



**Milan Rikalović**

**DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI  
TOPLOTE**

DRUGO PROŠIRENO IZDANJE

KNJIGA 1

**KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**





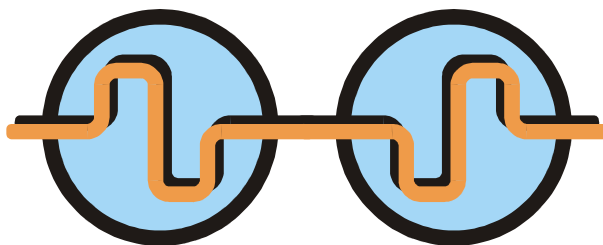




Milan R. Rikalović

# DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

**Knjiga I: KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**



Drugo prošireno izdanje  
Novi Sad 2024. godine

***Monografija***

Milan R. Rikalović, dipl.maš.inž.  
Prvo izdanje 2002. SMEITS Beograd  
Drugo prošireno izdanje 2024. Novi Sad  
Autorsko izdanje u dva toma

***Naziv***

DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE  
Knjiga I: Klasifikacija i konstrukcija

***Recenzent***

Aleksandar Anđelković  
prof. dr Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

***Urednik***

Milan Rikalović

***Izdavač***

Autorsko izdanje.  
Sva prava zadržava autor.  
Nije dozvoljeno reprodukovanje u bilo kom obliku ili na bilo koji način, bez  
dozvole autora ili koje nije u skladu sa Zakonom o autorskim delima.

***Tiraž***

200 primeraka

***Dizajn korica***

Aleksandar Rikalović  
prof. dr Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

***Tehnička obrada***

Dušan Rikalović, Mast. inž. graf. inženj. i diz.

***Štamparija***

Grafički centar GRID, FTN Novi Sad

***Narodna biblioteka Srbije, [www.nb.rs](http://www.nb.rs)***

Nacionalna ISBN agencija Srbije  
ISBN-978-86-906798-0-5

## **Apstrakt**

*Monografija Dobošasti razmenjivači toplote je integralno razmatranje teorijskih i praktičnih aspekata u projektovanju, fabrikovanju i primeni ovih aparata u veoma raširenim potrebama savremenog društva. Ona objedinjuje delove teorije prostiranja toplote i teorije fluida, mehaničku nosivost konstrukcije i brojne regulative koju nameće uređeno društvo u formi zakona, standarda, normativa preporuka itd. Autor se posebno trudio da svaki segment razmenjivača teorijski, konstrukciono i praktično analizira, kako bi korisnici bili u mogućnosti da u realnim uslovima pronađu adekvatna rešenja.*

*Prethodno izdanje knjige Dobošasti razmenjivači toplote objavljeno je 2002 god. (izdavač Smeits Beograd), ima daleko skromniji obim prilagođen datom trenutku i nestabilnom završetku dvadesetog veka. Kasniji tok vremena doneo je stabilan i obuhvatan razvoj normativne regulative u Evropskoj uniji, što je zahtevalo veoma značajna prilagođavanja procedure izrade proizvoda, upotrebe materijala i podizanja bezbednosti i zaštite okoline.*

*Novo izdanje monografije Dobošasti razmenjivači toplote je značajno po obimu prošireno i promenjeno, naročito u delu izrade proizvoda u skladu sa najnovijim normama i standardima grupacije opreme pod pritiskom (PED oprema). Zbog velikog obima i lakše distribucije monografija se izdaje u dva toma:*

*Knjiga I: Dobošasti razmenjivači toplote – Klasifikacija i konstrukcija,*

*Knjiga II: Dobošasti razmenjivači toplote – Rejting i dizajn.*

*U knjizi I je poboljšana procedura geometrije aparata, koja veoma praktično omogućava brze promene konfiguracije razmenjivača naročito u domenu malih vrednosti za približenje vrednostima zadatih termičkih parametara. U istoj knjizi je dat proračun čvrstoće komponenti razmenjivača usaglašen sa evropskim normama i kompariran sa nekim tradicionalnim normativima (DIN, AD 2000). Fabrikacija izrade razmenjivača toplote je veoma detaljna sa brojnim postupcima izrade i toka ispitivanja razmenjivača pre stavljanja proizvoda u promet.*

*U knjizi II je razmenjivač toplote posmatran kao termički ili tehnološki proizvod, čiji parametri rada zavise od geometrije aparata. Ako aparat posmatramo kao jedinstvo tehnoloških parametara na ulazu, geometrije aparata i tehnoloških parametara na izlazu, oni mogu imati različite odnose. Ulaz u aparat je uvek zadat (definisani), a od druga dva parametra, jedan se pretpostavlja, a drugi izračunava. Ako se za geometriju problem se naziva rejting, jer se upoređuju izlazi iz aparata i bira aparat koji najviše odgovara procesu. Drugi problem se naziva dizajn jer se dimenzioniše novi aparat koji će zadovoljiti tehnološke parametre na izlazu.*

*Monografija je namenjena pre svega inženjerima praktičarima koji se bave konkretnim problemima razmene toplote pomoću dobošastih razmenjivača. Ona se može koristiti u proizvodnji tehnološke opreme kao priručnik za konstrukciju i izvor velikog broja podataka. Studentima i specijalistima tehnologije, procesnog i termotehničkog mašinstva može služiti kao detaljna literatura. Inženjerima u institucijama PED opreme može biti podsetnik za razjašnjenje brojnih tehničkih problema.*

*Knjiga I sadrži 440. slika, 160. tabela u 4. poglavlja na oko 1000. strana.*

## Zaključak recenzenta

Predmetna monografija u dva toma o razmenjivačima toplote autora M. Rikalovića je zaista celovito i sveobuhvatno delo ove jedinstvene termotehničke opreme, iz koje se nedvosmisleno može shvatiti multidisciplinarnost termodinamike pre svega u inženjerskom smislu. Knjiga predstavlja izuzetan transfer naučnih saznanja u inženjersku praksu i sublimiše tri glavna aspekta tematskog razmatranja: razmenu toplote kao termodinamički proces, dizajn opreme kao konstrukciju, mehaničku nosivost i fabrikaciju i normativni aspekt koji obuhvata klasifikaciju opreme, propise i standarde i bezbednost u proizvodnji i eksploataciji. Iz velike raznolikosti razmenjivača toplote, autor je izabrao tip dobošastih aparata, kao istorijski dominantne geometrije koja najbolje reprezentuje navedene aspekte. Jezik izlaganja u monografiji je pristupačan i razumljiv, posebno u inženjerskom razmatranju veze između termičke i mehaničke komponente aparata. Ova veza je neophodna pri projektovanju, izradi i optimizaciji razmenjivača, a procedura nije jednostavna, već zahteva analizu, intuiciju i iterativnost, odnosno približavanje rešenju. Svaki problem ili detalj ove opreme autor je sa pažnjom razmotrio po principu: svako otvoreno pitanje traži odgovor, čak i pogrešan odgovor je doprinos rešenju. Značajan broj pitanja u ovoj monografiji imaju pečat autora, bilo preko autocitata ili preko rešenja specifičnih zadataka. Takav inženjerski pristup, ne isključuje alternativnost odgovora i drugačija rešenja iz prakse. Monografija ima edukativni karakter, što je preporuka studentima inženjerskog poziva kao dopunska literatura, ali i specijalistima u fazi prethodnog izbora opreme, a posebno inženjerima praktičarima kao priručnik pri projektovanju, izradi i eksploataciji ove termotehničke opreme.

Novi Sad, jul 2024. godine.



Prof. dr Aleksandar Anđelković, FTN Novi Sad

## O autoru ...



Milan R. Rikalović, 2016 god.

Milan R. Rikalović je rođen 1951. godine u Loznici, Srbija. Diplomirao je na Mašinskom fakultetu u Novom Sadu, 1977. godine.

Termotehničkim inženjerstvom se uspešno bavi dugi niz godina, kao projektant, procesni inženjer ili menadžer. Posebno polje delovanja su dobošasti razmenjivači toplote, gde je razvio posebnu seriju aparata pod nazivom "VITUS", koji imaju optimalno integrisane komponente i veoma pouzdano ostvarivanje zahteva iz tehnološkog procesa. Iz ove oblasti je objavio praktično-teorijsku monografiju pod nazivom "Dobošasti razmenjivači toplote", kao i veći broj stručnih radova i analiza u vodećim časopisima Srbije.

## **Abstract**

*The monograph Shell and tube heat exchangers is an integral consideration of theoretical and practical aspects in the design, manufacture and application of these devices in the widespread needs of modern society. It unites parts of the theory of heat transfer and the theory of fluids, the mechanical load-bearing capacity of the structure and numerous regulations imposed by an organized society in the form of laws, standards, normative recommendations, etc. The author made a special effort to theoretically, structurally and practically analyze each segment of the exchanger, so that users would be able to find adequate solutions in real conditions.*

*The previous edition of the book Shell and tube heat exchangers was published in 2002. (published by Smeits Belgrade), has a much more modest volume adapted to the given moment and the unstable ending of the twentieth century. The subsequent course of time brought a stable and comprehensive development of normative regulation in the European Union, which required very significant adjustments to the procedure of product manufacturing, use of materials and increased safety and environmental protection.*

*The new edition of the monograph Shell and tube heat exchangers has been significantly expanded and changed in scope, especially in the part of product development in accordance with the latest norms and standards of the grouping of pressure equipment (PED equipment). Due to its large volume and easier distribution, the monograph is published in two volumes:*

*Book I: Shell and tube heat exchangers – Classification and Construction,*

*Book II: Shell and tube heat exchangers – Rating and Design.*

*In book I, the apparatus geometry procedure has been improved, which very practically enables rapid changes in the exchanger configuration, especially in the domain of small values for approximation to the values of the given thermal parameters. In the same book, the calculation of the strength of the exchanger components is given in accordance with European norms and compared with some traditional norms (DIN, AD 2000). The manufacture of the heat exchanger is very detailed with numerous manufacturing procedures and the flow of testing the exchanger before putting the product on the market.*

*In book II, the heat exchanger is viewed as a thermal or technological product, whose operating parameters depend on the geometry of the device. If we consider the device as a unity of technological parameters at the input, geometry of the device and technological parameters at the output, they can have different relationships. The input to the device is always specified (defined), and of the other two parameters, one is assumed and the other is calculated. If the geometry is given, the problem is called rating, because the outputs from the apparatus are compared and the apparatus that best suits the process is chosen. The second problem is called design because the new device is dimensioned to meet the technological parameters at the output.*

*The monograph is primarily intended for practicing engineers who deal with specific problems of heat exchange using shell and tube exchangers. It can be used in the production of technological equipment as a construction manual and a source of a large amount of data. It can serve as detailed literature for students and specialists of technology, process and thermotechnical engineering. It can be a reminder for engineers in PED equipment institutions to clarify numerous technical problems.*

*Book I contains 440 pictures, 160 tables in 4 chapters on about 1000 pages.*



# PREDGOVOR

Da li je inženjerstvo nauka, praksa ili možda umetnost? Možda je pitanje kompleksno, kao i odgovor, možda zavisi od ukusa, o tome pri kraju ovog teksta.

Početna dilema autora, razmišljajući o inženjerstvu bila je, kome može biti od koristi i da li je uopšte potrebna ovakva inženjerska monografija koja razmatra mnogo puta opisane aparate, tumači i aktuelizuje napisane normative i preporuke za njihovu proizvodnju, ili istražuje puteve za optimizaciju proizvoda, podizanje pouzdanosti i energetske efikasnosti u tehnološkom okruženju u kome ostvaruje svoju funkciju. Taj proizvod se zove razmenjivač toplote, tehnički jednostavan, ali izaziva dosta nedoumica naročito u izboru, a nešto manje u izradi i eksploataciji. Za one koji misle da je to rutinski i lak posao, koji ne opravdava toliko napisanih strana o njemu, neka pokušaju da na sajmu izloženih stotinu različitih veličina, oblika i konstrukcija izaberu razmenjivač za koji misle da odgovara zadatim tehnološkim potrebama. Mala je verovatnoća za uspešan izbor, jer izbor nije očigledan, nije ni proporcionalnog gabarita kapacitetu postrojenja, a ni tehničko rešenje (tip) ga ne upućuje u pravcu najbolje selekcije. Samo inženjer specijalista solidnog iskustva može postaviti prava pitanja iz čijih odgovora se može u daljoj proceduri uz nužne kompromise doći do konačnog rešenja.

Za izbor mnogo složenijih proizvoda (npr. automobil), dovoljan je često samo kvalifikovani kupac i budžet, dok za izbor razmenjivača toplote je potreban prema mišljenju autora inženjer specijalista solidnog iskustva. To je zbog toga, što ovaj proizvod zahteva poznavanje složene teorije razmene toplote, koja je u okviru termotehnike, naučne discipline koja se posebno izučava u energetskom mašinstvu. Posebno se očekuje od inženjera specijaliste da poznaje i prati najnovija istraživanja tzv. relacija ili kriterijalnih jednačina za određivanje Nuseltovog broja konfiguracija strujanja koje odgovaraju stvarnoj strujnoj slici razmenjivača. To nije statičko ranije stečeno znanje, već dinamičko i često izloženo kritičnim empirijskim proverama, što je naročito zastupljeno u drugoj knjizi – Rejting i dizajn. Kada je razmenjivač termički proračunat, njegova konstrukcija, fabrikacija i usaglašavanje s tekućim

normativima čini se jednostavnijim, ali je izloženo čestim promenama procedura i državnih barijera, što se razmatra u prvoj knjizi – Klasifikacija i konstrukcija.

Dugotrajno iskustvo u svim fazama projektovanja izrade i eksploatacije razmenjivača toplote zaista je potrebno da bi se smatralo solidnom osnovom za brzo prepoznavanje grešaka (počev od sopstvenih) i pravovremenih reakcija na moguće štete na samom proizvodu ili tehnološkom procesu. Autor je uočio da lične beleške, razne tabele podataka ili razmatranje šireg problema postaju kao priručnik i da veoma dobro zamenjuju dugotrajna prelistavanja literature i proučavanja standarda i normativa. Uz dodatni podsticaj kolega iz struke, preuređenjem tekućeg materijala, ličnih proračunskih alata i principa iz prethodne knjige Dobošasti razmenjivači toplote (Smeits 2002) nastala je ova obimna monografija.

Tokom svoje radne aktivnosti i izučavanja problematike razmenjivača toplote, autor je došao u kontakt sa brojnom literaturom, naročito intenzivno u navedenim referencama, a takođe je konsultovana i preporučena literatura. Isto tako je bilo neophodno upoznati se sa zakonima, normativima i velikim brojem standarda, od kojih su mnogi i detaljno proučavani. Zbog brojnosti, standardi su navedeni direktno u tekstu, a u referencama su grupisani prema spisku u arhivama. Poznavanje normativa i standarda je neophodno za prohodnost proizvoda kakav je razmenjivač toplote. Autor je prednost dao klauzulama Evropske unije, ali nije bilo moguće ne koristiti Međunarodni standard (ISO) ili dominantne USA standarde (TEMA, API, ASME). Lokalni srpski propisi korišćeni su selektivno, imajući u vidu tendenciju usaglašenja s evropskom regulativom. Prema toku izlaganja gde je potrebno, insertovani su izvodi tabela iz standarda uz navod broja i godine izdanja, a ostatak neophodnih tabela iz standarda navedeni su u priložima. Velika lista literature nastala je iz napora da se razmatrana tematika razjasni ili sagleda iz više uglova, pa je navod nekih referenci učinjen samo iz razloga jer je konsultovana. Jedan broj autora s početka referenci dominira u navodima jer imaju veliki broj izdanja i najviše su citirani u bibliografiji razmatranih tema, dok se neki autori posebno izdvajaju po prihvatljivosti i u uklapanju u izlaganje u monografiji. Teme koje zadiru u autorska ili patetna prava, obrađene su informativno po principu "stanja stvari" (state of the art). Neka tumačenja, procedure, proračuni ili iskustva prikazani su kao lična rešenja, za koje autor nije pronašao podlogu u literaturi.

Posebnu pažnju autor je posvetio pitanju nomenklatura, definiciji pojmova i termina, oznaka i jedinica mera, koji su radi lakše dostupnosti posebno dati u prilogu knjige. Različita nomenklatura oznaka je poseban problem kod citiranih autoriteta i standarda, pa da bi se zadržala jasnoća izlaganja, novouvedene oznake u tekstu, na mestima uvođenja su i objašnjene, naročito u delu proračuna.

Imajući u vidu da je monografija pisana i za praktičnu upotrebu i da se pomoću nje može formirati dokumentacija za fabrikaciju, a da pritom autor nema nikakav uvid u njen sadržaj ili tačnost, radi sprečavanja eventualnih sporova, korisnik mora preuzeti potpunu odgovornost, odnosno da važi klauzula: Nema garancije eksplicitne ili implicitne (No warranty – expressed or implied). To znači (kao što navodi TEMA standard), da se u delu daju inženjerska načela i iskustva



autora u projektovanju, proizvodnji i eksploataciji razmenjivača toplote i da mogu biti predmet revizije na osnovu ispitivanja ili drugačijih iskustva, ako je potrebno. Ne postoji nikakvo jemstvo autora niti izdavača na bilo koju štetu usled primene ove knjige na komercijalni gubitak nastao u fabrikaciji ili distribuciji proizvoda, izgubljene dobiti ili profita.

Kao autoru ove monografije i inženjeru pri kraju radnog veka, u sećanje mi dopiru razmišljanja s početka školovanja, kao nadarenog učenika, koji voli da čita, ali ga matematika toliko privlači, da sam govorio, čime god da se bavim i šta god da radim to mora sadržati brojeve, kasnije sam dodao da brojevi ne mogu biti samo apstrakcija, već moraju imati neko fizičko značenje. Upisao sam mašinstvo i nikada se nisam pokajao ni pozeleo da radim nešto drugo. Posmatrajući kolege iz generacije, dobar deo su postali vešti praktičari, znalci rada sa majstorima, dobri organizatori i menadžeri ili zaposlenici institucija, pa čak i uticajni javni radnici (političari), zaboravili su većinu naučenog znanja, da čak ne mogu da se sete rešenja kvadratne jednačine, jer to im ne treba. Naravno da postoji i mnogo drugih primera.

Navedeno zapažanje nameće više pitanja: Koliko inženjeru treba nauka? Da li to zavisi od mišljenja i ukusa okoline, da li je inženjer diploma, struka ili delo?

Inženjer mora da stvara ili unapređuje postojeće. To nije nauka u smislu opšteg istraživanja, ali bez njenog poznavanja ne može se uspešno pretvoriti u delo. Neophodno je da inženjer održava poznavanje naučnih dostignuća iz svoje branše, jer to omogućava realni transfer znanja u praksu, pri čemu je moguć i inženjerski naučni doprinos. Međutim, postoji jedna stvaralačka oblast koja inženjerima daje dodatnu dimenziju (pored epiteta naučni ili bar stručni praktičar), a to je da delo sadrži varijante i približenje rešenju (iteracije), odnosno da rešenje nije izvesno. To daje inženjerima elemente kreativnosti, odnosno inovativnu intuiciju ili osećaj u kom pravcu treba ići, a to su kategorije umetnosti. Da li je to umetnost ili surogat umetnosti možda je tema intelektualne ili staleške rasprave, zavisi od ukusa čitaoca. Ipak je nepobitna istorijska činjenica, da su mnogi veliki umetnici ustvari bili inženjeri. Ako autor treba da se izjasni, za njega je prihvatljiv stav: da inženjer stvara delo koje može sadržati realizaciju naučnih principa, efikasnost i lakoću prenosa u praksu, sve do stvaranja osećanja prema delu, u bilo kom odnosu.

Rad na ovoj monografiji je bio dugotrajan, ali pored profesionalnih teškoća pružio mi je neizmerno zadovoljstvo bavljenja inženjerskim pozivom. Potrošeno vreme je moralo biti zakinuto porodici, mojoj supruzi i dvojici sinova akademskog obrazovanja i njihovim porodicama, a najviše unucima (kojih je šest) s kojima je vođenje "ozbiljnih" razgovora pravi melem za dušu i telo. Svima zahvaljujem na razumevanju i strpljenju.

U Loznici,  
januar 2024. godine

Autor



Namerno prazna strana

## UVOD

Aparati za razmenu toplote nisu tehnički komplikovani. Broj pozicija sklopa aparata retko prelazi 30, pri čemu se pozicije najčešće rade od polufabrikata, kao što su cevi, ploče, limovi i sl. Tehnologija i oprema za izradu ovih aparata može biti jednostavna i jeftina, mada se u masovnoj proizvodnji pojedinih pozicija ili celih aparata pojavljuju specijalne i skupe mašine za velike serije, kao na primer, u proizvodnji ploča pločastih razmenjivača toplote.

Oni nemaju nikakvih mehaničkih pogona niti okretnih delova, već je potrebno obezbediti strujanje bar dva fluida koji su u direktnom kontaktu ili preko površine razmene toplote. Strujanje fluida u aparatu se ostvaruje preko standardnih pogona izvan aparata, ili prirodnim putem na bazi razlika u gustinama. Ovi aparati se nazivaju razmenjivači toplote i oni prenose toplotnu energiju od jednog fluida ka drugom i široko su zastupljeni u raznim tehnološkim procesima.

Osnovni problem u primeni ovih aparata je složenost određivanja parametara fluida koji izlaze iz razmenjivača toplote ili određivanje optimalne konstrukcije koja obezbeđuje zahtevane parametre na izlazu. Naime, ni vizuelni izgled, ni gabarit, pa čak ni raspoloživi podaci o osnovnoj geometriji nisu dovoljni za saznanje o mogućnostima aparata. Površina razmene, koja se najčešće javlja kao merodavna veličina aparata, nije dovoljan podatak za donošenje odluke da li taj razmenjivač odgovara nekom procesu ni po kapacitetu ni po parametrima.

Teškoće uparivanja aparata i procesa su posledica složenih tokova razmene toplote. Za rešenje ovog problema potrebno je pored poznavanja mehanizma toka razmene toplote, još i poznavanje tehnološkog procesa u koji će se razmenjivač toplote ugraditi, kao i uticaj konfiguracije strujanja i geometrije aparata na dobijanje ekonomski optimalne konstrukcije koja zadovoljava kriterijume na izlazu. To se postiže sprovođenjem procedure koja sadrži: termički, strujni i mehanički proračun, kao i optimizaciju konstrukcije aparata na osnovu postavljenih kriterijuma.

Različite konstrukcije razmenjivača toplote u tehnološkom procesu u kome su isti ulazni parametri i isti izlazni parametri, ukazuju na činjenicu da geometrija aparata ne može biti određena samo na osnovu ulaza i izlaza iz sistema. Posledica

navedene neodređenosti je pojava velikog broja različitih konstrukcija ovih aparata. Među njima postoji jedna grupa tzv. dobošasti razmenjivači toplote, koji imaju najdužu tradiciju, mogu se primeniti u svim procesima, koji su najviše proučavani, standardizovani i jednostavni za izradu. Ne može se reći da su najbolji, jer je to vrednosna kategorija, koja se odnosi na lokalne uslove ugradnje i eksploatacije.

Ovi razmenjivači imaju dva osnovna sklopa, cevni registar i doboš (ili omotač) u koji se registar postavlja, po čemu je cela grupacija dobila ime. Prednost ovih razmenjivača je veoma razvijena teorijsko-tehnička podrška, dobra dostupnost standardnih polufabrikata i jednostavan tehnološki postupak izrade, što omogućava malu razliku u ceni za velike i male proizvođačke serije ili unikatne proizvode. Prva alternativa cevnoj površini razmene je razmenjivačka ploča, koja ima veću površinu razmene za istu jedinicu mase, ali je tehnologija izrade razmenjivačkih ploča složenija. Zahvaljujući visokoj tehnologiji, internoj standardizaciji i veoma velikim serijama, cena razmenjivačkih ploča je znatno opala pa je konkurencija pločastih razmenjivača značajno porasla u mnogim oblastima primene, a u nekim potpuno dominiraju. Troškovi energije rada, odnosno pad pritiska fluida u dobošastim razmenjivačima značajno zavise od konfiguracije strujanja, ali prosečni gubitak pritiska fluida kod dobošastih razmenjivača je manji od pada pritiska pločastih razmenjivača toplote. Mehanička nosivost, pa i bezbednost dobošastih razmenjivača je znatno viša od pločastih, jer cev ima mnogo veću nosivost od ploče, ali pločasti razmenjivači imaju izrazito manje gabarite (dužine) i lakše se rasklapaju i čiste. Pored ova dva tipa razmenjivača, razvijene su još mnoge konstrukcije kompaktnih razmenjivača toplote, čija je glavna karakteristika visoka površinska gustina (odnos površine razmene i zapremine) koja se kreće 200 - 300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> za razmenjivače tečnost-tečnost, a za razmenjivače gas-gas i preko 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. To su uglavnom inovativna i patentirana rešenja, zasnovana na modifikaciji ploče kao površine razmene toplote, a delimično i sa orebrenim cevima.

Imajući u vidu globalne tendencije proizvodnih i tržišnih tokova u današnje vreme postoje brojne i veoma upućene agencije koje prate tržišna kretanja, tako da se mogu pratiti pokazatelji trendova za mnoge grupacije proizvoda. Tako npr. jedna od agencija Strategic Market Research ([www.strategicmarketresearch.com](http://www.strategicmarketresearch.com)) objavljuje da je tržišna vrednost proizvodnje razmenjivača toplote u svetu za 2021 god. bila 16,01 milijardi dolara, a 2022 god. skočila na 16,86 milijardi dolara, a da će do 2030 godine, dostići obim od 25,5 milijardi dolara, što predstavlja godišnji rast od 5,3%, što se može videti na prikazanoj grafičkoj ilustraciji. Očekivani tržišni rast prometa razmenjivača toplote je povezan sa rastom potreba energetske efikasne rešenja, a kao posledica porasta energetske troškova i zabrinutosti od klimatskih promena. Razmenjivači toplote se pokazuju kao ključni elementi u poboljšanju energetske efikasnosti i smanjenju potrošnje energije u mnogim industrijama, kao: hemijska prerada, nafta i gas, HVAC, proizvodnja hrane i napitaka, električne energije itd. Međunarodna agencija za energiju (IEA) daje procenu da bi energetske efikasne tehnologije, uključujući razmenjivače toplote, mogle doneti uštedu do 40% globalne potrošnje energije do 2040, samo u SAD. Istovremeno Evropska unija je

postavila cilj za smanjenje emisije gasova staklene bašte za najmanje 55% do 2030. godine u odnosu na 1990. godinu, kao referentnu. Da bi se postigao ovaj cilj, EU promovira energetska efikasnost i obnovljivu energiju (sunce, vetar, zemlja), što uključuje Direktivu o energetskim karakteristikama zgrada, radi ostvarenja zacrtane uštede energije od 11,7%. Razmenjivači toplote su fundamentalno uključeni u ove sisteme, kao što su grejanje, ventilacija i klimatizacija i hlađenje (HVAC), što ih čini ključnom komponentom u postizanju ovih ciljeva.



Ilustracija trenda tržišta razmenjivača toplote i udela po tipu ([www.strategicmarketresearch.com](http://www.strategicmarketresearch.com))

Prema istraživanju Međunarodne asocijacije za bakar (ICA), najveći broj HVAC inženjera smatra da su razmenjivači toplote ključni u postizanju energetske efikasnosti u zgradama i da od njihove efikasnosti zavisi i efikasnost celokupne instalacije. Mnoge agencije za procenu resursa očekuju da će već 2030. godine prirodni gas biti drugi najveći izvor energije (iza nafte, a ispred uglja), što je nova prilika za razvoj razmenjivača toplote, jer se neminovno pojavljuje potreba za utečnjavanje gasa, radi ekonomičnog transporta i skladištenja.

Preraspodela tržišta razmenjivača toplote prema navedenom istraživanju, u zavisnosti od tipa konstrukcije, još uvek zadržava trend iz prethodnog stoleća, tako da dobošasti razmenjivači toplote pokrivaju 42%, pločasti 25%, vazdušno hlađeni 20% i ostali 13%. Međutim ploča kao površina razmene ima mnogo veći broj modaliteta konstrukcije i pa je prestigla cev kao osnovu dobošastih razmenjivača.

Prema lokaciji tržišta razmenjivača toplote, Azijsko-pacifička regija je već postala najveće tržište sa 39% udela, prestigla je Evropu, dok Severna Amerika sve više zaostaje. Ovakva preraspodela je posledica brze industrijalizacije i urbanizacije Kine, a zatim Indije uz tradicionalno visoku proizvodnju Japana.

Vodeći svetski proizvođači razmenjivača toplote se stalno menjaju, zbog brzog transfera kapitala i prilagođavanja tržištu. Prema raspoloživom izveštaju SMR, vodeći proizvođači su: API Heat Transfer Inc., Kelvion Holding GmbH, Alfa Laval AB Xylem Inc., Tranter Inc., Danfoss A/S, GEA Group Aktiengesellschaft, HRS, Koch Heat Transfer Company, LP Hisaka Works, Ltd., itd.

Utvrđivanje veze odziva i geometrije aparata zahteva pouzdane proračune. Dobrim dizajnom razmenjivača mogu se ostvarivati veće snage razmene toplote i bez povećanja gabarita i težine aparata, odnosno bez rasta cene razmenjivača toplote. Najosetljivije mesto u postupku proračuna je proces prelaza toplote konvekcijom od jednog fluida ka drugom preko površine razmene aparata, jer ne postoje univerzalni i opšteprihvaćeni postupci određivanja koeficijenta prelaza toplote za sve uslove. Nuseltov broj koji karakteriše ovaj fenomen zavisi od brzine strujanja, svojstava fluida i geometrije aparata. Veoma važni eksperimentalni radovi u ovoj oblasti imaju dvostruki cilj: da što tačnije kvantitativno opišu proces, ali i da otkriju uslove i konstrukciju aparata pri kojima raste intenzitet procesa razmene. Empirijske jednačine, koje opisuju proces prelaza toplote zavise od konfiguracije strujanja i vrednosti Rejnoldsovog broja, ali nemaju univerzalni karakter.

Uticaj radnih fluida na intenzitet razmene toplote uglavnom se odražava preko njihova četiri svojstva na srednjoj temperaturi ulaza i izlaza: specifičnog toplotnog kapaciteta, gustine, toplotne provodljivosti i viskoziteta. Ako fluidi imaju značajnu promenu navedenih svojstava od temperature, neophodno je izvršiti tzv. iterativni proračun, odnosno približavanje konačnom rešenju postupkom poređenja pretpostavljene i izračunate veličine.

Ova praktična proračunska teškoća koja zahteva veliki broj ponavljajućih operacija, otklanjena je primenom računara (najjednostavnije su tabelarne Excel aplikacije). Međutim, ostaje problem optimizacije, odnosno da li je konfiguracija za koju je izvršena iteracija najekonomičnije rešenje. Izabrano rešenje neminovno podleže strujnom i mehaničkom proračunu, kojim se određuje potrebna pogonska energija za strujanje fluida i izdržljivost (nosivost) konstrukcije. Ukoliko izabrana konstrukcija ne zadovoljava granične uslove optimalnog strujanja (pada pritiska) ili još pre ako ne zadovoljava mehaničku nosivost, konstrukcija se mora promeniti i cela procedura ponoviti. Za snalaženje u međusobno zavisnim veličinama, potrebno je tekuće iskustvo i talenat projektanta. Procedura proračuna zahteva poštovanje metodologije i redosleda uz inženjersku intuiciju u donošenja odluka.

Uobičajeni redosled toka proračuna je sledeći:

- a) Definisane projektnog zadatka i režima rada razmenjivača toplote,
- b) Termički proračun razmenjivača toplote, za izabranu konfiguraciju,
- c) Hidraulični proračun razmenjivača toplote definisane geometrije,
- d) Mehanički proračun čvrstoće aparata definisane geometrije,
- e) Tekuće iteracije prema potrebi i optimizacija konstrukcije i troškova izrade.

Pod režimom rada razmenjivača toplote podrazumeva se skup zadatih uslova u kojim aparat treba da radi u eksploataciji. Pored toga, mogu se ustrojiti i granični kriterijumi, koji predstavljaju granice sistema u pogledu pogonske energije, gabarita ili tehnologije rada. Osnovni režim rada razmenjivača toplote sadrži:

- Naziv, sastav i termodinamičke veličine stanja fluida u procesu i arealu radnih temperatura. Minimalno potrebne veličine stanja su: specifični toplotni kapacitet, gustina, koeficijent toplotne provodljivosti i kinematska ili dinamička viskoznost.

- Radne temperature fluida na ulazu u razmenjivač toplote.  
- Maseni ili zapreminski protoci fluida u procesu. Često se protoci fluida zadaju preko toplotne snage aparata i temperaturne razlike na ulazu i izlazu iz aparata. U tom slučaju, potrebno je navesti da li se zadata toplotna snaga ili kapacitet i temperaturna razlika odnosi na čist ili zaprljan aparat. Zaprljanje je često nepoznato, pa ako se kapacitet odnosi na čist aparat, on će biti ostvaren samo na startu, a zatim će opadati, a ako se kapacitet odnosi na zaprljan aparat, onda se mora znati nivo dozvoljenog zaprljanja i regulisati protok ili temperaturna razlika, inače će u startu kapacitet biti najveći. To često stvara nesporazum komunikacije.

- Radni, odnosno maksimalno dozvoljeni pritisci u aparatu za svaki fluid.

Ova četiri osnovna parametra su minimalno potrebna za svaki proces razmene toplote, ali može postojati još uslova, koje razmenjivač mora ispuniti. Oni se nazivaju dodatni ili granični uslovi i obuhvataju: dodatne podatke o zaprljanju, temperaturne promene u funkciji vremena (klizanje), diktirani raspored fluida, dozvoljeni pad pritiska u razmenjivaču, gabaritne mere u funkciji smeštaja (dužina), posebni zahtevi u vezi materijala usled agresivnosti fluida, konstruktivne mere radi mogućnosti čišćenja aparata itd.

Granični kriterijumi najčešće su suprotni zahtevima ekonomičnosti, jer utiču na poskupljenje proizvoda. Ako je režim rada razmenjivača definisan na prethodni način, onda se može uvesti pojam kontrolisanog područja rada aparata, jer obuhvata opseg radni – kontrolni režim i čist – zaprljan aparat. Promena bilo kojeg parametra osnovnog režima izvan kontrolisanog područja zahteva dodatnu proveru ostalih parametara i potvrdu da su u okviru tehnoloških zahteva.

Termičkim proračunom moguće je utvrditi izlazne vrednosti parametara fluida, odnosno tzv. odziv sistema za poznati aparat ili geometriju aparata ako je poznat odziv sistema. Te dve vrste proračuna nazivaju se: rejting i dizajn problem. Rejting problem je proračun odziva razmenjivača toplote poznate geometrije. Proračun je jednoznačan, odnosno za poznati ulaz i geometriju odziv sistema ima samo jednu vrednost. Ovim postupkom se kontrolišu mogućnosti raspoloživog razmenjivača toplote i zato je moguće ga nazvati i kontrolnim proračunom aparata. Dizajn problem može se nazvati i oblikovanje aparata, obuhvata pored konstrukcije i mehanizam strujanja fluida u aparatu, tzv. konfiguraciju. Ovaj problem za poznate veličine na ulazu u aparat i izlazu iz njega, definiše njegovu geometriju. Proračun nije jednoznačan, odnosno postoji više kombinacija geometrijskih veličina sa istim odzivom sistema. On zahteva kreativnost projektanta, jer usvajanje geometrije aparata zavisi od graničnih kriterijuma, izbora konstrukcije i njene optimizacije. Termički proračun se mora izvoditi postupkom iteracija zbog toga što se veličine stanja radnih fluida uzimaju za srednju vrednost ulazno-izlaznih temperatura, a izlazne temperature nisu poznate. Iterativni postupak se sprovodi tako što se veličine stanja uzimaju u prvoj iteraciji za ulazne temperature radnih fluida. Posle određivanja izlaznih temperatura u drugoj iteraciji se veličine stanja uzimaju za srednje aritmetičke vrednosti ulaznih i izlaznih temperatura iz prve iteracije. Broj

iteracija je određen tolerancijom razlike izlaznih temperatura radnih fluida dve uzastopne iteracije. Obično teži nuli posle tri-četiri iteracije.

Hidraulični proračun razmenjivača toplote podrazumeva proračun pada pritiska, posebno na strani svakog fluida. Pad pritiska se može računati samo za razmenjivač toplote definisane geometrije. Osnovne veličine koje utiču na vrednost pada pritiska su konfiguracija i brzina strujanja fluida. Ako je zadat maksimalni dozvoljeni pad pritiska u razmenjivaču, kao granični kriterijum, a tekući pad pritiska je viši, onda se vrši korekcija termičkog proračuna tako što se smanjuje brzina strujanja ili broj prolaza fluida. Ovakva situacija menja geometriju, povećava broj iteracija i produžava proračun. Upotrebom računara postupak se obavlja brzo.

Mehanički proračun ili proračun čvrstoće aparata se može delimično obaviti tokom termičkog proračuna, ali se definitivno vrši na kraju za konačno usvojenu geometrija razmenjivača. Proračun obuhvata određivanje debljine upotrebljenih limova, priključaka i cevi, kao i zavarenih spojeva, sistema zaptivanja, vešanja i vibracija u zavisnosti od dejstva unutrašnjih pritisaka fluida. Ukoliko se ovim proračunom menja geometrija razmenjivača, neminomno je ponavljanje termičkog i strujnog proračuna. Procedura proračuna se najčešće sprovodi prema standardima, čiju tačnost proizvođač ne mora dokazivati pred nadležnim državnim institucijama (tzv. imenovana tela), ali je obavezan sprovesti postupak ispitivanja i kontrole u skladu sa rigoroznim normativima.

Optimizacija konstrukcije, konfiguracije i tehnologije izrade je pre svega u interesu proizvođača, jer je u funkciji tržišta, smanjenja cena a povećanja kvaliteta. Ukoliko nema ograničavajućih uslova, uvek se optimizacijom teži povećanju intenziteta razmene toplote, smanjenju težine i prečnika doboša, na račun povećanja dužine cevnog registra.

Radni vek razmenjivača toplote obuhvata period od rađanja ideje da se neka tehnološka operacija u nekom procesu može obaviti, pa do procene da je proces prevaziđen ili je prevaziđen razmenjivač ili je fizičko stanje komponenti takvo, da je neophodno da on odlazi u "staro gvožđe", a na njegovo mesto dolazi nov aparat. U tom periodu izrazito se izdvajaju mehanička i termička komponenta, ali i relacije koje povezuju termičku i geometrijsku komponentu. Termička komponenta dolazi do izražaja najviše u fazi dimenzionisanja geometrije razmenjivača, a mehanička komponenta prati razmenjivač kroz ceo radni vek: od izbora materijala, tehničke konstrukcije, izrade, montaže, održavanja, sve do konačne izgradnje iz sistema (čak i dalje u dekompoziciji i tretiranju otpada). U redosled operacija koje treba obaviti u kreaciji razmenjivača posle definisanja polaznih parametara, geometrija se ne može odrediti bez učešća termičkog proračuna, zatim dominiraju mehaničke komponente uz povremeno učešće termike (iteracije), da bi posle završetka izrade proizvoda u eksploataciji skoro isključivo dominirala mehanička komponenta.

U slučaju da je neophodno problematiku razmenjivača tretirati u dva dela (kao u ovoj monografiji) autoru je bilo prihvatljivije podelu izvršiti na bazi učešća komponenti u razmatranju mehanike i termike nego redosleda toka proračuna i izrade proizvoda. Iz tog razloga I deo knjige obuhvata klasifikaciju i konstrukciju.



---

# SADRŽAJ

---

<b>Predgovor</b> .....	i
<b>Uvod</b> .....	v

## Pog 1. Klasifikacija razmenjivača toplote

1.1. Osnovna klasifikacija razmenjivača toplote	3
1.1.1. Klasifikacija razmenjivača toplote prema procesu i konstrukciji	6
<i>a) Razmenjivači toplote indirektog kontakta</i> .....	6
<i>b) Razmenjivači toplote direktog kontakta</i> .....	27
1.1.2. Klasifikacija razmenjivača toplote prema drugim kriterijumima	28
1.2. Kompaktni razmenjivači toplote	33
1.2.1. Pločasti razmenjivači toplote .....	38
<i>a) Rastavljivi pločasti razmenjivači toplote</i> .....	39
<i>b) Delimično zavareni pločasti razmenjivači toplote</i> .....	41
<i>c) Lemljeni pločasti razmenjivači toplote</i> .....	41
<i>d) Baveks (bavex), hibridno zavareni pločasti razmenjivači toplote</i>	42
<i>e) Platural (platural), pločasti razmenjivači toplote</i> .....	43
<i>f) Kompablok (compabloc), zavareni pločasti razmenjivači toplote</i>	44
<i>g) Pekinoks (packinox), zavareni pločasti razmenjivači toplote</i> .....	45
<i>h) Alfa-Reks (alfa-rex), zavareni pločasti razmenjivači toplote</i> .....	46
1.2.2. Orebreni pločasti razmenjivači toplote (PFHE) .....	47
<i>a) Lemljeni orebreni pločasti razmenjivači toplote</i> .....	47
<i>b) Difuziono spojeni orebreni pločasti razmenjivači toplote</i> .....	48
1.2.3. Spiralni razmenjivači toplote .....	49
1.2.4. Razmenjivači toplote tipa ploča u omotaču .....	51
1.2.5. Štampani razmenjivači toplote .....	52
1.2.6. Razmenjivači toplote od polimera .....	53
1.3. Dobošasti razmenjivači toplote	55
1.3.1. Komponente dobošastih razmenjivača toplote .....	55
1.3.2. Standardi i kodeksi dobošastih razmenjivača toplote .....	57

a) Standardi .....	58
b) Kôdovi .....	59
1.3.3. TEMA standard .....	61
a) Prednja i zadnja glava .....	62
b) Doboš (omotač, plašt, ljuska) .....	65
c) Tipski TEMA primeri i specifikacija pozicija .....	66
d) TEMA klasifikacija razmenjivača toplote .....	68
1.3.4. Specijalne konstrukcije cevnih razmenjivača toplote .....	73
a) Isparivači - ribojleri .....	73
b) Kondenzatori .....	79
c) Razmenjivači tipa bajonet cev .....	86
d) Isparivači sa duplim registrom .....	87
e) Razmenjivači sa duplom cevnom pločom .....	88
f) Razmenjivači tipa cev-u-cev (CuC) i tipa "šnala" (herpin) .....	89
1.4. Preporuke i granice izbora tipa razmenjivača toplote .....	95
1.4.1. Kriterijumi izbora razmenjivača toplote .....	96
a) Opšti kriterijumi izbora razmenjivača toplote .....	96
b) Dodatni i specifični kriterijumi izbora razmenjivača toplote .....	99
c) Kriterijumi prema posledicama nepravilnog izbora .....	104
d) Kriterijumi bezbednosti okoline, procesa i opreme .....	106
e) Kriterijumi efikasnosti razmene toplote .....	108
1.4.2. Tok izbora razmenjivača toplote - preporuke .....	112
a) Specifikacija parametara za izbor razmenjivača toplote .....	113
b) Analiza uticajnih faktora za izbor razmenjivača toplote .....	116
c) Iskustva dobre prakse pri izboru tipa razmenjivača toplote .....	118
1.4.3. Procedura izbora razmenjivača toplote .....	128
1.4.4. Cevni ili kompaktni razmenjivač toplote? .....	132
1.5. Materijal za izradu razmenjivača toplote .....	138
1.5.1. Osnovne osobine materijala .....	139
a) Mehanička svojstva materijala .....	139
b) Uticaj visoke i niske temperature na mehanička svojstva materijala..	142
c) Otpornost materijala na koroziju .....	147
d) Termo-fizička svojstva materijala .....	151
e) Jednostavnost i tehnologija oblikovanja (obrada, zavarivanje i sl.) .	152
f) Raspoloživost u standardnim polufabrikatima (ploče, profili, cevi) .	153
g) Niska ili prihvatljiva cena .....	153
1.5.2. Standardi i oznake materijala .....	154
a) Označavanje čelika prema EN .....	154
b) Označavanje čelika prema ASTM (ASME), AISI (SAE) i UNS .....	159
c) Označavanje livenog gvožđa .....	162
d) Označavanje materijala od bakra i aluminijuma .....	162
e) Uporedne tabele oznaka materijala .....	163
f) Grupacije materijala prema zavarljivosti .....	164
1.5.3. Najčešće korišćeni materijali pri izradi RT .....	167
a) Liveno gvožđe .....	167
b) Niskougljenični i niskolegirani čelici .....	168

c) Nerđajući čelici	172
d) Ostali metali i legure	179
e) Nemetali	181
1.5.4. Osnovni poluproizvodi za izradu dobošastih razmenjivača toplote	182
a) Lim i ploče	182
b) Danca	184
c) Cevi	186
d) Armatura, fitting i pribor	204
1.5.5. Elementi zaptivnih spojeva	205
a) Zaptivači	206
b) Prirubnice	213
c) Vijčani sklop	218
1.5.6. Procedura izbora materijala	227

## Pog 2. Konstrukcija dobošastih razmenjivača toplote

2.1. Dizajn komponenti dobošastih razmenjivača toplote	232
2.1.1. Dispozicija fluida u razmenjivaču toplote	233
2.1.2. Preporuke izbora konstrukcije osnovnih komponenti dobošastih razmenjivača toplote	234
2.2. Konstrukcioni detalji i preporuke dobošastih razmenjivača toplote	238
2.2.1. Cevi razmenjivača toplote	239
2.2.2. Cevna ploča i prirubnice omotača	243
2.2.3. Spoj cevi i cevne ploče	249
A. Ekspanzija cevi u valjcima - valcovanje	254
B. Hidrauličko proširenje cevi	260
C. Hibridna ekspanzija	264
D. Eksplozivna ekspanzija i zavarivanje	265
E. Ručno i automatsko zavarivanje	267
F. Kombinovani spoj zavarivanjem i ekspanzijom i obrnuto	274
2.2.4. Omotač i glave razmenjivača	277
A. Omotači registra i glava razmenjivača	278
B. Glave razmenjivača toplote	279
2.2.5. Pregrade	284
A. Uzdužne (podužne ili longitudinalne) pregrade – dijafragme	284
B. Poprečne pregrade	287
C. Zavojne (spiralne ili helikoid) pregrade	300
D. Osnovna komparacija pri selekciji tipa pregrade	306
2.2.6. Specifičnosti isparivača i kondenzatora kao RT	307
2.2.7. Vibracije izazvane protokom	313
2.2.8. Inovacije dobošastih razmenjivača toplote	323
A. Nove vrste materijala razmenjivača toplote	324
B. Inovacije cevi razmenjivača toplote	325
C. Inovativne pregrade razmenjivača toplote	343
D. Inovativni tipovi razmenjivača toplote	343
E. Principi prihvatljivosti inovativnih rešenja	344

2.3. Geometrija dobošastih razmenjivača toplote	345
2.3.1. Konfiguracija strujanja	345
2.3.2. Mrežni aranžman, geometrijske veličine i oznake	345
2.3.3. Relacije mrežnog rasporeda	351
2.3.4. Strujni aranžman	356
A. Broj prolaza fluida	357
B. Orjentacija strujanja	359
C. Funkcionalna oznaka konfiguracije strujanja	360
2.3.5. Izbor i ograničenja konfiguracije strujanja	360
2.3.6. Tipizirane konfiguracije strujanja	362
2.3.7. Broj cevi u mrežnom rasporedu	366
A. Standardni tabelarni ili grafički prikaz broja cevi	367
B. Približni kumulativni postupak određivanja broja cevi	371
C. Analitički (numerički) postupak određivanja broja cevi	373
Prvi korak	376
Drugi korak	383
Treći korak	387
Rezultati proračuna	389
2.3.8. Geometrija strujanja u omotaču	390
2.3.9. Geometrija orebrenih razmenjivača toplote	396
2.4. Tehnička dokumentacija dobošastih razmenjivača toplote	402
2.4.1. Vrste i obim tehničke dokumentacije	402
a) Ponudbena dokumentacija razmenjivača toplote - informativno	405
b) Dokumentacija nakon pregleda i saglasnosti naručioca na ponudu	406
c) Dokumentacija uz proizvod, izveštaji, zapisnici, ...	407
2.4.2. Montažna i radionička grafika	408
2.4.3. Tolerancija oblikovanja geometrije	411
2.4.4. Veličina razmenjivača. Faktori predimenzionisanja	417
2.4.5. Specifikacije podataka	423
2.4.6. Optimizacija konstrukcije razmenjivača toplote	427

### **Pog 3. Proračun čvrstoće konstrukcije dobošastih razmenjivača toplote**

3.1. Tehnički propisi PED opreme u EU	442
3.1.1. Osnovne odredbe regulativnog dela direktive PED opreme	445
3.1.2. Tehnički prilozi uz direktivu PED opreme	447
A. Prilog I – Osnovni sigurnosni zahtevi	447
B. Prilog II – Dijagrami za ocenjivanje usaglašenosti	453
C. Prilog III – Postupci ocenjivanja usaglašenosti	457
3.2. Opšte o proračunu čvrstoće dobošastih razmenjivača toplote	464
3.2.1. Izbor postupka mehaničkog proračuna toplote	464
3.2.2. Sadržaj standarda EN 13445 za PED opremu	469
3.2.3. Metalurške i mehaničke karakteristike materijala	472
3.3. Proračun čvrstoće konstrukcije DRT prema EN 13445	482
3.3.1. Osnovni kriterijumi proračunskog kôda EN 13445-3	482

<i>A. Opšti proračunski uslovi</i>	482
<i>B. Uticaj opterećenja PED posuda</i>	483
<i>C. Klasifikacija opterećenja i proračunski parametri</i>	483
<i>D. Maksimalno dozvoljene vrednosti opterećenja PED posuda</i>	485
<i>E. Proračunska i nominalna debljina materijala komponenti</i>	488
<i>F. Kompleksni primer proračuna čvrstoće DRT prema EN 13445-3</i>	489
3.3.2. Proračun čvrstoće RT – unutrašnji pritisak, EN 13445-3	492
<i>A. Cilindrični i sferni omotač</i>	492
<i>B. Kružna danca</i>	493
<i>C. Otvori u cilindričnim omotačima i sfernim dancima</i>	496
<i>1. Priklučci razmenjivača - normalni na tangentnu ravan</i>	497
<i>2. Priklučci razmenjivača - kosi na tangentnu ravan</i>	501
<i>3. Ostale geometrijske veličine priključaka</i>	502
<i>D. Ravna danca</i>	505
<i>E. Prirubnički spojevi doboša i glava</i>	508
<i>1. Opšti i preporučeni elementi prirubničkog spoja</i>	509
<i>2. Geometrija prirubnice i proračunske metode</i>	513
<i>3. Proračunska procedura dominantnih prirubnica DRT</i>	515
<i>F. Proračun cevne ploče</i>	526
<i>1. Preduslovi proračuna cevne ploče prema EN 13445-3</i>	528
<i>2. Projektni proračun cevne ploče za U cevi, konfiguracija d)</i>	532
<i>G. Ostale proračunske pozicije</i>	538
3.3.3. Kalkulativni proračun čvrstoće prema AD 2000	548
<i>a. Osnovni uslovi za proračunske listove (Merkblatt B 0)</i>	549
<i>b. Cilindrični i sferni omotač (Merkblatt B 1)</i>	549
<i>c. Torisferično danca (Merkblatt B 3)</i>	550
<i>d. Ravno danca (Merkblatt B 5)</i>	552
<i>e. Cevna ploča (Merkblatt B 5)</i>	555
<i>f. Vijčano prirubnički spoj (Merkblatt B 7 i B 8)</i>	559
<i>g. Izrezi u cilindričnim i sfernim površinama (Merkblatt B 9)</i>	567
<i>h. Primer proračuna čvrstoće prema AD 2000</i>	571
<i>i. Komentar uporednog proračuna čvrstoće EN 13445 - AD 2000</i>	573

## **Pog 4. Izrada i eksploatacija dobošastih razmenjivača toplote**

4.1. Fabrikacija razmenjivača toplote	576
4.2. Postupci fabrikacija komponenti razmenjivača toplote	579
4.2.1. Izrada omotača – rolovanje	580
4.2.2. Ostale komponente doboša	585
<i>a) Kompenzator aksijalnih dilatacija doboša</i>	585
<i>b) Spoj cevne ploče ili prirubnice s dobošem</i>	587
<i>c) Oslonci razmenjivača na dobošu</i>	588
<i>d) Glavni priključci doboša</i>	593
4.2.3. Fabrikacija cevnog registra ili bunda	596
<i>A. Cevna konfiguracija</i>	596
<i>a. Savijanje cevi preko radius rama</i>	599
<i>b. Savijanje cevi pomoću tri rolne</i>	600

c. Kompresiono savijanje cevi	601
d. Savijanje cevi rotacionom matricom	602
B. Izrada otvora za prolaz cevi i vijaka	605
C. Cevni kavez (roštilj)	607
D. Fabrikacija spoja cevi i cevne ploče	618
a. Izrada spoja mehaničkim valcovanjem	621
b. Izrada spoja hidrauličkom ekspanzijom	624
c. Izrada spoja hibridnom ekspanzijom	627
d. Izrada spoja zavarivanjem	628
4.2.4. Mašinska izrada-obrađa komponenti	631
A. Sečenje	631
B. Obrada skidanjem strugotine	641
C. Obrada deformacijom	643
4.2.5. Opšta procedura spajanja komponenti	645
4.2.6. Zavarivanje	650
A. Identifikacija zavarenog spoja	650
a. Termini i definicije	650
b. Položaj zavarivanja	651
c. Šeme i simboli zavarivanja	655
B. Struktura zavarenog spoja, tehnologija i tehnika zavarivanja	658
a. Kvalitet zavarenog spoja	659
b. Tehnologičnost zavarenog spoja	660
c. Deformacije pri zavarivanju	661
d. Proračun zavarenih spojeva	665
C. Kompetentnost sprovođenja procesa zavarivanja	666
D. Dokumenti zavarivanja	669
a. Dokument PQR	669
b. Dokument WPS	669
c. Lični (personalni) atest zavarivača	673
E. Kontrola postupaka zavarivanja i zavarenog spoja	674
a. Kontrola toka zavarivanja	674
a. Greške zavarenih spojeva	675
F. Otkrivanje grešaka zavarenog spoja	678
a. Vizuelni pregled	679
b. Metode ispitivanja bez rezaranja	682
c. Radiografska metoda ispitivanja (RT)	684
d. Ultrazvučna metoda ispitivanja (UT)	686
e. Penetrantska metoda i metoda s magnetnim česticama (PT, MT)	689
f. Oprema za ispitivanje (NDT metoda)	691
G. Specifičnosti zavarivanja PED opreme, prema EN 13445	694
a. Izvođenje zavarivanja PED opreme	694
b. Pregledi i ispitivanje zavarenih spojeva PED opreme	696
c. Tehnika ispitivanja bez razaranja PED opreme	670
H. Dodatni materijal i postupak zavarivanja	701
a. Elektrode	699
b. Ručno elektrolučno zavarivanje	704
c. MIG/MAG postupci zavarivanja	708

<i>d. TIG (WIG) postupak zavarivanja</i> .....	712
4.2.7. Lemljenje .....	715
<i>A. Procedura izrade i osnovni parametri lemljenog spoja</i> .....	717
<i>B. Postupak lemljenja, preporučeni dizajn, greške spoja i metode ispitivanja</i> .....	721
<i>C. Lemljenje u proizvodnji dobošastih razmenjivača toplote</i> .....	727
4.2.8. Fabrikacija zaptivnih spojeva .....	734
<i>A. Pouzdanost zaptivnog spoja</i> .....	736
<i>B. Klase pritiska i klase nepropusnosti</i> .....	737
<i>C. Karakteristike zaptivača u zaptivnom spoju</i> .....	741
<i>D. Prirubnice u zaptivnom spoju DRT</i> .....	744
<i>E. Navojni sklop u zaptivnim spoju DRT</i> .....	746
<i>a. Specifičnosti izbora i markiranja vijčanih proizvoda</i> .....	746
<i>b. Sistemska analiza opterećenja vijčanog spoja</i> .....	748
<i>c. Gubitak nosivosti opterećenja usled deformacija vijčanog spoja</i> ..	752
<i>d. Tehnička obrazloženja i preporuke u praksi vijčanih spojeva</i> ..	753
<i>e. Kontrola opterećenja vijčanog spoja</i> .....	758
<i>F. Kompetencije operatera i procedure izrade zaptivnog spoja</i> .....	764
<i>a. Kompetencije operatera</i> .....	765
<i>b. Priprema i osnovni tok izrade zaptivnog spoja</i> .....	766
<i>c. Redosled zatezanja vijaka zaptivnog spoja</i> .....	770
<i>G. Nepravilnosti zaptivnog spoja</i> .....	773
<i>a. Nepravilnosti spoja kao posledica greške projekta</i> .....	773
<i>b. Geometrijske nepravilnosti zaptivnog spoja</i> .....	773
<i>c. Montažne greške i greške operatera zatezanja spoja</i> .....	774
4.2.9. Fabrikacija revizije razmenjivača toplote .....	775
<i>a. Zamena ili blokada oštećenih cevi</i> .....	776
<i>b. Problem curenja zaptivnog spoja u glavi RT</i> .....	780
<i>c. Zamena cevne registra</i> .....	780
<i>d. Reparacija cevne ploče</i> .....	781
4.3. Završno ispitivanje i isporuka DRT .....	783
4.3.1. Karakteristike i vrste završnog ispitivanja .....	783
4.3.2. Oprema, instrumenti, vreme i brzina ispitivanja .....	787
4.3.3. Procedura ispitivanja na probni pritisak .....	791
4.3.4. Mere bezbednosti pri ispitivanju na probni pritisak .....	799
4.3.5. Ispitivanje curenja spojeva razmenjivača toplote .....	802
4.3.6. Završna obrada i isporuka razmenjivača toplote .....	815
4.4. Nepravilnosti u radu DRT .....	819
4.4.1. Tehnološka nestabilnost sistema DRT .....	820
4.4.2. Korozivno i erozivno dejstvo radnih fluida .....	821
4.4.3. Zaprljanje i čišćenje površina razmene toplote .....	827
<i>a. Nastanak i tok zaprljanja razmenjivača toplote</i> .....	828
<i>b. Kategorije zaprljanja</i> .....	829
<i>c. Uticaj zaprljanja na rad razmenjivača i uticaji na tok zaprljanja</i> ..	833
<i>d. Dobra praksa za ublažavanje tekućeg uticaja zaprljanja</i> .....	835
<i>e. Čišćenje razmenjivača toplote od zaprljanja</i> .....	836
4.4.4. Nepravilna distribucija fluida – Maldistribucija .....	845
4.4.5. Otkrivanje nepravilnosti u eksploataciji razmenjivača toplote ..	846

4.5. Regulacija rada sistema sa DRT .....	850
4.6. Bezbednost sistema DRT .....	860
4.6.1. Bezbednost opreme u eksploataciji .....	860
A. Funkcionalna bezbednost i upravljanje .....	861
a. Faza analize procesa .....	863
b. Faza projektovanja i implementacije .....	866
c. Faza rada i održavanja .....	866
B. Tok i stepen implementacije bezbednosti i upravljanja .....	867
C. Stepen povezanosti sistema bezbednosti .....	870
4.6.2. Zaštita od pritiska u eksploataciji razmenjivača toplote .....	872
4.6.3. Uređaji zaštite od pritiska razmenjivača toplote .....	880
4.6.4. Sekundarne sigurnosne mere u radu RT .....	890
4.7. Uputstva za rad razmenjivača toplote .....	895
4.7.1. Montaža-demontaža sklopova i ugradnja RT u sistem .....	895
4.7.2. Puštanje u rad i isključenje RT .....	898
4.7.3. Manipulacija u normalnoj eksploataciji RT .....	900
4.7.4. Održavanje RT, obavezne provere .....	901

## Prilozi

PAI. SI sistem jedinica	
PAI-1. Jedinice mera	906
Istorija Međunarodnog sistema jedinica mera (SI) .....	906
Prezentacija novog SI sistema jedinica iz 2019 god. ....	907
Redefinicija osnovnih jedinica SI sistema iz 2019 god. ....	909
<i>Tab.PAI-101. Komparacija osnovnih SI jedinica pre i posle 2019 god.</i> .....	909
<i>Tab.PAI-102. Definicija osnovnih SI jedinica mera pre i posle 2019 god.</i> .....	910
<i>Tab.PAI-103. SI osnovne veličine jedinica mera</i> .....	912
<i>Tab.PAI-104. SI prefiksi (faktori većih i manjih jedinica)</i> .....	912
<i>Tab.PAI-105. Koherentne SI izvedene jedinice sa posebnim imenom</i> ..	913
<i>Tab.PAI-106. Primeri koherentnih jedinica posebnog imena i simbola</i> .	914
<i>Tab.PAI-107. Ne SI jedinice prihvaćene za upotrebu s SI jedinicama</i> .	915
<i>Tab.PAI-108. Odnosi SI jedinica i nekih ostalih jedinica</i> .....	915
PAII. Nomenklature	
PAII-1. Osnovna nomenklatura	917
PAII-2. Geometrijska nomenklatura DRT	921
PAIII. Registar osnovnih pojmova ili termina	
PAIII-1. Englesko-srpski registar sa opisom	925
PAIII-2. Trojezični rečnik važnijih termina	931
PBI. Materijali	
PBI-1. Periodni sistem elemenata	934
<i>Tab.PBI-101. Savremeni periodni sistem elemenata</i> .....	934



PBI-2. Otpornost materijala prema koroziji	935
<i>Tab.PBI-201. Otpornost metala na koroziju prema dejstvu fluida</i>	935
PBI-3. Tolerancije čeličnih proizvoda (limovi)	937
<i>Tab.PBI-301. Tolerancije debljine, prema širini i granici tečenja</i>	937
<i>Tab.PBI-302. Tolerancije debljine toplovaljanih limova iznad 3 mm</i>	939
<i>Tab.PBI-303. Tolerancije debljine toplovaljanih nerđajućih limova</i>	939
PBI-4. Uporedne oznake čelika	940
<i>Tab.PBI-401. Uporedne oznake čelika: JUS – drugi standardi</i>	940
PBI-5. Mehanička svojstva izabranih čelika	942
<i>Tab.PBI-501. Mehanička svojstva opštih konstrukcionih čelika</i>	942
<i>Tab.PBI-502. Čvrstoća konstrukcionih čelika na povišenoj temperaturi</i>	942
<i>Tab.PBI-503. Čvrstoća sitnozrnih čelika na sobnoj temperaturi</i>	942
<i>Tab.PBI-504. Čvrstoća sitnozrnih čelika na povišenoj temperaturi</i>	943
<i>Tab.PBI-505. Mehanička svojstva ugljeničnih i legiranih PED čelika</i>	943
<i>Tab.PBI-506. Čvrstoća ugljeničnih (nelegiranih) PED čelika na povišenoj temperaturi i izduženju 0,2%</i>	945
<i>Tab.PBI-507. Čvrstoća legiranih PED čelika na povišenoj temperaturi i izduženju 0,2%</i>	945
<i>Tab.PBI-508. Mehanička svojstva na sobnoj temperaturi za feritne čelike u žarenom stanju i druge osobine</i>	947
<i>Tab.PBI-509. Mehanička svojstva na sobnoj temperaturi za austenitne čelike u žarenom stanju i druge osobine</i>	948
<i>Tab.PBI-510. Zatezna čvrstoća <math>R_m</math> na povišenim temperaturama za austenitne čelike u žarenom stanju</i>	949
<i>Tab.PBI-511. Nerđajući čelici, prema EN 10028-7:2007 (E) izvod</i>	950
PBI-6. Opšta svojstva metala	951
<i>Tab.PBI-601. Modul elastičnosti (E/G) i Puasonov broj nerđajućih čelika</i>	951
<i>Tab.PBI-602. Tehnička svojstva metala na sobnoj temperaturi</i>	952
PBII. Grupni parametri izrade sklopova	
PBII-1. Parametri prirubničkog spoja	953
<i>Tab.PBII-101. Parametri vijčanog spoja – TEMA X preporuke</i>	953
<i>Tab.PBII-102. Grupe materijala za izradu prirubničkog spoja</i>	954
<i>Tab.PBII-103. Razvrstavanje čelika prema grupama (iz Tab.PBII-102)</i>	955
PBII-2. Parametri zaptivača	956
<i>Tab.PBII-201. Parametri ravnih zaptivača m i y</i>	956
<i>Tab.PBII-202. Parametri ravnih zaptivača m i y (bez azbesta)</i>	956
<b>Reference i literatura</b>	
Reference	958
Normativi i standardi	966
Web literatura	969
Preporučena literatura	970

Namerno prazna strana

---

## POGLAVLJE 1.

---

# KLASIFIKACIJA RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Tehnološki procesi i potreba da se njima upravlja, osnovni su razlog za pojavu i široku lepezu različitih konstrukcija razmenjivača toplote. Potreba za toplotom u zanatstvu rešavala se direktno upotrebom vatre (kovačka vatra, kade sa toplom vodom i sl.). Osnovna karakteristika ove jednostavne razmene toplote je otvorenost sistema prema okolini, odnosno nepostojanje pritisne neravnoteže. Tek otkrićem parne mašine (*Dzems Vat 1769*) i parne lokomotive (*Dzordz. Stivenson 1825*) došlo je do zatvaranja fluida i pritisne neravnoteže i industrijske revolucije. Kasnije pojavom drugih motora (motora sa unutrašnjim sagorevanjem i elektro motori) došlo do razvoja veoma različitih tehnoloških procesa u proizvodnji dobara za svakodnevni život. Može se primetiti da osnovni cilj u otkriću motora, svakako nije bila potreba za transformacijom toplote, već dobijanje mehaničkog rada iz toplote nastale sagorevanjem energetskog materijala. Transformacija toplote bio je nužni pomoćni proces za ostvarenje glavnog cilja, dobijanje mehaničkog rada. Ključni napredak u tom procesu postignut je tek onda, kada je postignuta kontrola razmene toplote i drastično povećanje stepena iskorišćenja goriva. Veliki broj tehnoloških procesa zahteva temperatursku ili pritisnu neravnotežu ili obe istovremeno, što je osnovni razlog (pored potrebe za racionalizacijom uređaja) za nastanak širokog spektra konstrukcija razmenjivača toplote.

Uslovno rečeno, razmenjivač toplote uvek će se upotrebiti u tehnološkom procesu indirektno razmene, kada između radnih fluida treba da ostanu sve druge neravnoteže (različiti pritisci, protoci, koncentracije, agregatno stanje i sl.) osim toplotne, ili se toplotna neravnoteža mora održavati na zadatom nivou.

Geometrijom razmenjivača toplote mogu se ostvariti promene brzina i strujnog toka radnih fluida, a to su veličine koje najviše utiču na toplotni fluks, što

pokazuje da postoji značajan uticaj geometrije na intenzitet razmene toplote. Ako bi samo intenzitet razmene toplote bio kriterijum uspešnosti razmenjivača toplote, onda bi postojala optimalna konstrukcija do koje bi se moglo doći empirijskim putem. Različitost tehnoloških postupaka i karakteristika radnih fluida imaju takođe značajan uticaj na geometriju ili konstrukciju aparata.

Najznačajniji uticaji na konstrukciju razmenjivača su: promena faze jednog ili oba radna fluida, velika promena gustine i viskoznosti u zavisnosti od temperature, kristalizacija, zaprljanje i čišćenje površina razmene, itd. Značajan faktor predstavlja i takozvana kompaktnost konstrukcije i cena proizvoda. Uticaj tehnologije izrade razmenjivača može dovesti da skupi aparati pri masovnoj izradi postanu dominantni. Isto tako značajan uticaj ima i upotrebljeni materijal pri izradi aparata, delimično na intenzitet razmene toplote, a mnogo više na tehnologiju izrade i cenu proizvoda. Izbor materijala može biti uslovljen prirodom tehnološkog procesa i vekom proizvoda.

Tipične aplikacije razmene toplote su: grejanje ili hlađenje fluida, isparavanje ili kondenzacija. Međutim, oni se pojavljuju i u sklopu različitih tehnoloških procesa: grejanje, hlađenje, isparavanje, kondenzacija, sterilizacija, pasterizacija, destilacija, kristalizacija, parcijalno izdvajanje komponenti fluida, povećanje koncentracije ili kontrola procesa promene stanja fluida.

Navedene činjenice dovele su do velikog broja konstrukcija razmenjivača toplote, pa je nastao dodatni problem – izbor odgovarajućeg tipa konstrukcije. Da bi neki razmenjivač ili grupacija postao tip, prepoznatljiv u komunikaciji i upotrebi mora zadovoljiti nekoliko uslova, koji ne moraju biti istovremeno ispunjeni, kao:

Jasna definicija površine razmene, kao cev, ploča ili njihove kombinacije.

Prilagodjenost mehanizmu razmene toplote, sa ili bez promene faze.

Namena za izvorni ili naknadni prenos toplote, gde je izvorni prenos toplote na mestu njenog nastanka (proces sagorevanja, ostale hemijske reakcije ili otpor toku električne struje), a naknadni prenos razmena toplote između fluida koji je ranije primio izvornu toplotu sa tehnološkim fluidom čija se promena zahteva. To je stvorilo dve gotovo odvojene grupacije razmenjivača toplote: pod dejstvom plamena (kotlovi) i ostali razmenjivači bez dejstva plamena.

Karakteristični strujni tok koji obezbeđuje kontakt fluida preko površine razmene, kao npr: slobodni pristup okolnog fluida, strujanje pod pritiskom, i sl.

Dominantna sfera upotrebe je razdvojila komercijalne razmenjivače od ostalih, jer je veliki broj komercijalnih jedinica uslovio da njihova konstrukcija i upotrebljeni materijali budu prilagođeni brzom izradi i niskoj ceni. To su na primer, hladnjaci u auto-industriji i isparivači i kondenzatori u rashladnoj tehnici.

Prilagodjenost rešenja specifičnom tehnološkom procesu, kao: oprema za grejanje i hlađenje, posebni zahtevi korozivnih i opasnih fluida i slično.

Naziv tipa razmenjivača nastaje uglavnom prema karakteristici površine razmene, kao cevni, pločasti, spiralni, orebreni ili po karakteristici konstrukcije, kao ploča u omotaču, cev-u-cev, ili specijalni, ako su baš specifične konstrukcije.

## 1.1. OSNOVNA KLASIFIKACIJA RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Potreba za klasifikacijom tipova razmenjivača toplote (RT) je nastala pre svega iz dva praktična razloga, prvi je informativni, da se ne bi gubilo vreme na razvijanju "nove" konstrukcije, ako je ona već poznata i u praksi primenjena, a drugi je namenski, da bi se mogla izvršiti prethodna analiza primenljivosti postojećih tipova razmenjivača na predmetni proces i smanjiti broj alternativa. Pored toga klasifikacijom tipova konstrukcija lakše se može vršiti uporedna analiza i utvrditi prednost ili nedostatak u odnosu na bitne zahteve tehnološkog procesa.

U novijim izdanjima svi važniji autoriteti u razmeni toplote u svojim knjigama daju klasifikacije razmenjivača toplote, sa detaljima konstrukcije, prema različitim kriterijumima. O tome se može se naći u literaturi *Šaha i Sekulića* [1], radovima *Bela* [2.3.1], *Saundersa* [7] i *Kakača* [14], kao i u mnogim priručnicima.

U ovoj knjizi iz klasifikacije tipova razmenjivača, kao nepredmetni, isključeni su komercijalni razmenjivači toplote i razmenjivači toplote koji su izloženi dejstvu vatre (kotlovi). Prvi iz razloga što je njihova upotreba strogo namenska i što su ograničeni konstrukcijom, tehnologijom izrade i upotrebljenim materijalima, pa su neracionalni za korišćenje u ostalim tehnološkim procesima, a drugi iz razloga, što ovi uređaji pripadaju drugoj grupaciji razmenjivača, pod imenom kotlovska postrojenja, za koje važe posebni propisi i standardi.

Površina razmene toplote je osnovni deo svakog razmenjivača toplote, koja istovremeno i razdvaja fluide nosioce toplote. U suštini mogući su samo dva oblika ove površine, ravna i obla (valjkasta), koje se teorijski mogu izjednačiti, ako ravnu površinu smatramo oblom sa beskonačno velikim poluprečnikom krivine. Ipak iz ovoga je nastao veliki broj tipova aparata, jer su moguće modifikacije ovih površina po obliku, načinu strujanja fluida preko njih, ili sekundarnim dodacima novih površina (razuđenost ili orebrenje) sa jedne ili obe strane.

Aparat za razmenu toplote obezbeđuje dve osnovne funkcije: smeštaj i strujanje radnih fluida i kontaktnu površinu preko koje se vrši prenos toplote. Površina koja odvaja proces razmene od okoline predstavlja gabarit aparata, koji ima svoju zapreminu, u koju je smeštena površina razmene. Ako se veća površina razmene može smestiti u gabarit aparata, on dobija veću površinsku gustinu, odnosno postaje kompaktniji. Kompaktnost aparata je jedna od nezavisnih mera za upoređivanje razmenjivača toplote. Aparati koji imaju veliku površinsku gustinu, upravo se nazivaju kompaktnim razmenjivačima toplote. Kao referentna mera kompaktnosti može se uzeti klasifikacija prof. *Hans Miler-Štajnhagena* [30]

Fluidi: tečnost-tečnost	kompaktnost $\geq 200 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Fluidi: gas-tečnost	kompaktnost na strani gasa $\geq 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Fluidi: gas-gas	kompaktnost $\geq 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

Radi uporedbe, konvencionalni dobošasti razmenjivač toplote od cevi  $\phi$  19 mm ima površinsku gustinu od oko  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  na jednoj strani fluida. Postoje i uslovno rečeno, "kompaktni dobošasti aparati", koji imaju visok koeficijent prenosa toplote. Rotirajući razmenjivači toplote, se takođe mogu smatrati "kompaktnim", oni imaju površinsku gustinu od 5000, čak do  $15000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Aparati sa površinskom gustinom iznad  $15000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , i hidrauličnim prečnikom  $l < D_h < 100 \text{ mm}$ , nazivaju se mikro razmenjivačima toplote.

Pored kompaktnosti, postoji i niz drugih kriterijuma, pomoću kojih se razmenjivači toplote mogu upoređivati ili razvrstavati. Kriterijumi se grupišu prema predmetu posmatranja u dve osnovne kategorije:

Kriterijumi klasifikacije prema procesu i konstrukciji aparata.

Kriterijumi klasifikacije prema nameni i domenu upotrebe.

Detaljnju klasifikaciju razmenjivača toplote, dali su Šah [1] i Kakač [14], a prema sledećim kriterijumima procesa i konstrukcije aparata:

Proces prenosa toplote,

Broj fluida u procesu,

Kompaktnost površine razmene,

Konstrukcija izrade aparata.

Strujni aranžman radnih fluida,

Mehanizam prenosa toplote,

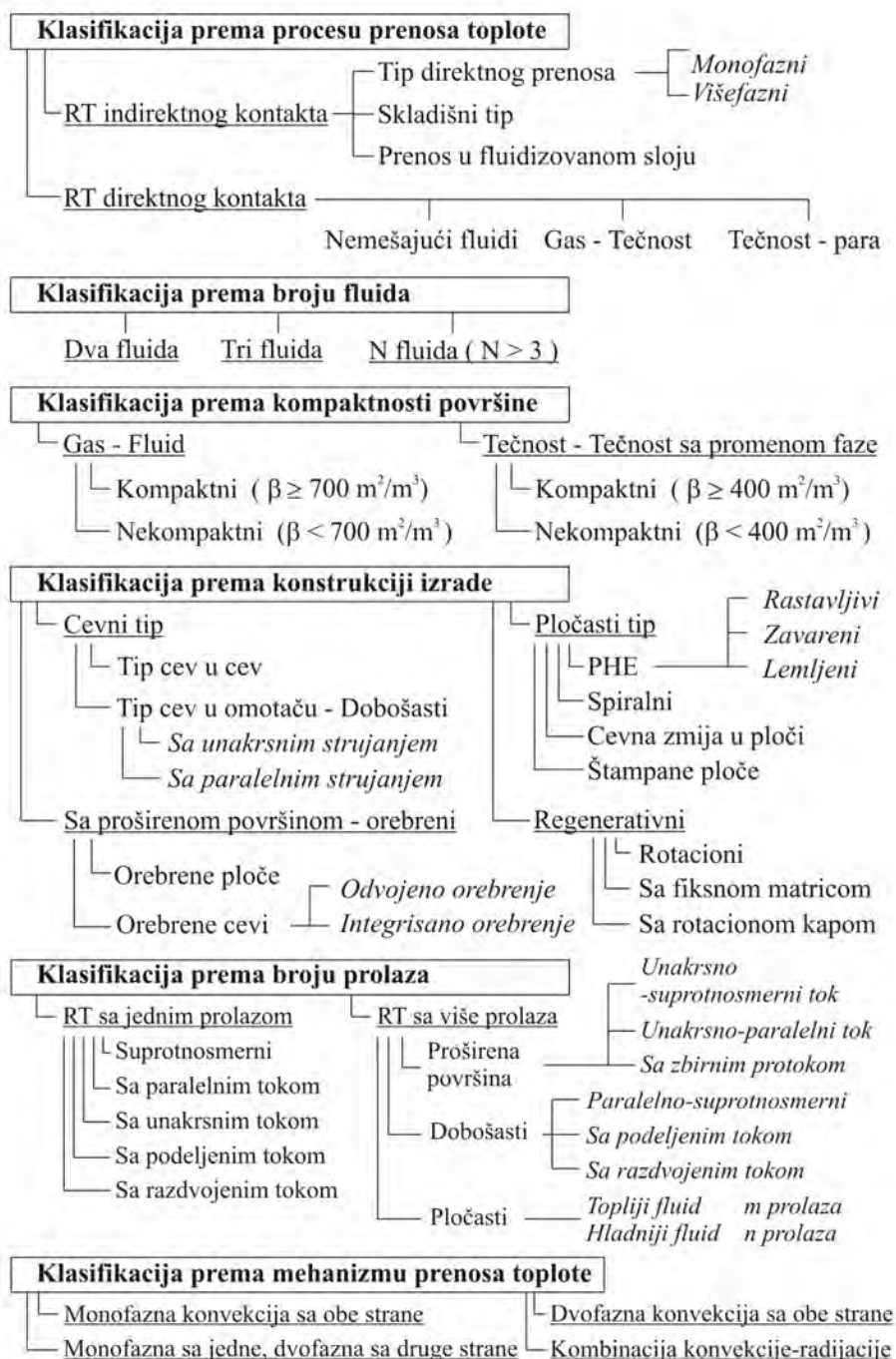
Prizak klasifikacije, prema navedenim kriterijumima, dat je u tabeli TAB 1.1 [1].

Najveći broj razmenjivača toplote, prenosi toplotu između fluida koji su razdvajeni zidom, površinom razmene, pri čemu nema potrebe (ili je nedozvoljeno) mešanje fluida ili propuštanje površine razmene. Toplota se prenosi u smeru topliji fluid - površina razmene - hladniji fluid. Takvi razmenjivači toplote nazivaju se aparati sa direktnim prenosom, ili rekuperatori.

Ako se toplota privremeno skladišti u pogodnom medijumu (ispuna ili matrica), a fluidi nosioci toplote povremeno dolaze u kontakt sa ispunom u skladištu, putanja prenosa toplote nije direktna, već posredna, pri čemu se ispuna naizmenično greje i hladi u zavisnosti da li je u kontaktu sa toplijim ili hladnijim fluidom. Takvi razmenjivači toplote nazivaju se aparati sa indirektnim prenosom, ili regeneratori. Ovi razmenjivači zbog svoje konstrukcije ne sprečavaju mešanje toplijeg i hladnijeg fluida, niti mogu obezbediti veće razlike pritisaka između njih. Pored toga, oni mogu imati i pokretne delove (rotore), radi povremene promene mesta kontakta fluida i površine za razmenu.

Sagorevanje je hemijska reakcija pri kojoj se oslobađa toplota koja se prenosi na fluid koji je u kontaktu sa plamenom. Ovi procesi se odvijaju u posebnoj vrsti razmenjivača, koje nazivamo kotlovi, komore za grejanje vazduha plamenom i slično. Osnovna specifičnost ovih razmenjivača jeste velika temperaturska razlika na površini razmene toplote i uticaj zračenja na strani plamena. Zbog toga se ne smatraju "razmenjivačima toplote u pravom smislu" i posebno se proučavaju kao oprema pod pritiskom i dejstvom plamena (standardi grupa EN 12952).

TAB. 1.1. Opšta klasifikacija razmenjivača toplote, prema Shah [1]



Površina razmene razmenjivača direktnog dejstva, ako je istovremeno u kontaktu sa oba radna fluida naziva se primarna ili direktna površina. Međutim, ako je na strani jednog (ili oba fluida) intenzitet razmene toplote slab, jedna od mera intezifikacije razmene je povećanje kontaktne površine samo sa jednim fluidom. Ta dodatna površina naziva se indirektnom (sekundarnom) površinom razmene, razvijenom (extended) ili razuđenom površinom. Termin razuđena površina možda najviše odgovara, jer asocira na dodatnu površinu po dubini. Ovaj deo površine najčešće se izvodi u obliku orebrenja integralno sa osnovnom površinom ili kao dodatni element čvrsto (intimno) povezan sa osnovnom površinom. Osnovni zadatak orebrenja je da smanji otpor pri prenosu toplote od fluida na čvrstu površinu (zid).

### **1.1.1. Klasifikacija razmenjivača toplote prema procesu i konstrukciji**

#### **a) Razmenjivači toplote indirektnog kontakta**

Ovi razmenjivači (zovu se još i površinski razmenjivači toplote) ostvaruju prenos toplote preko pregradnog zida ili površine razmene. Površina razmene može imati različitu konfiguraciju, ali se svodi na dve osnovne površine, cev i ploču, pri čemu je cev zatvorena, a ploča otvorena površina. Ove površine mogu imati mnogo modaliteta u pogledu preseka, deformacije i dodatne površine, Dakle, idealno ne postoji direktan kontakt ni interakcija između radnih fluida. Oni se dalje dele na: Tip direktnog prenosa, skladišni tip i prenos u fluidizovanom sloju.

**A. Razmenjivači toplote direktnog prenosa**, toplotu prenose u kontinuitetu od toplijeg ka hladnijem fluidu preko pregradnog zida. Svaki fluid struji u odvojenim prolazima, tako da ne postoji direktno mešanje. Ovi razmenjivači nemaju pokretnih delova, i predstavljaju tipične rekuperatore, iako se u procesnoj industriji, gde se najviše primenjuju, nazivaju svojim konstruktivnim imenom (dobošasti, pločasti, itd.). Glavni predstavnici ove grupe razmenjivača su:

Cevni razmenjivači

Pločasti razmenjivači

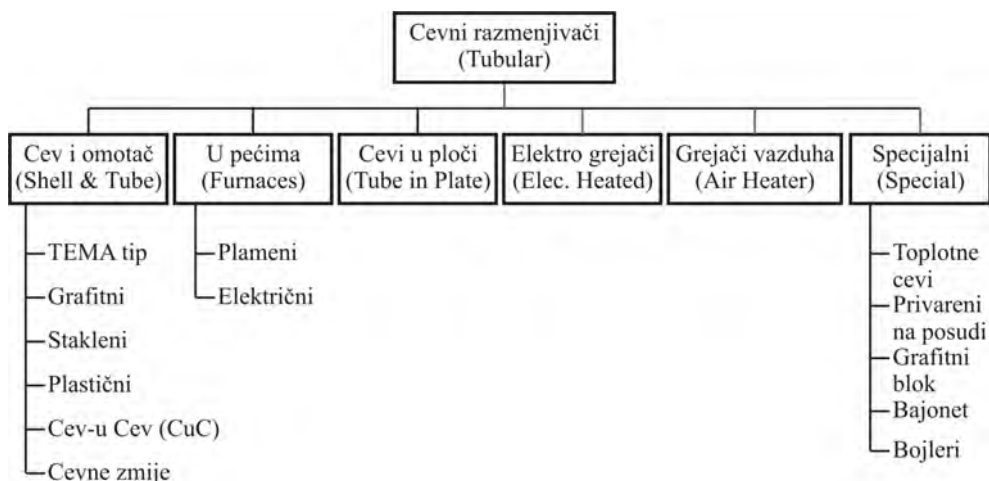
Razmenjivači sa razuđenim površinama (orebreni)

**A1. Cevni razmenjivači** su najšira i najstarija grupacija aparata za razmenu toplote. Površina razmene je cev, pri čemu jedan fluid protiče kroz cev, a drugi oko cevi. Dalja podela data je u TAB. 1.2 prema *Brogan*, ([www.thermopedia.com](http://www.thermopedia.com)).

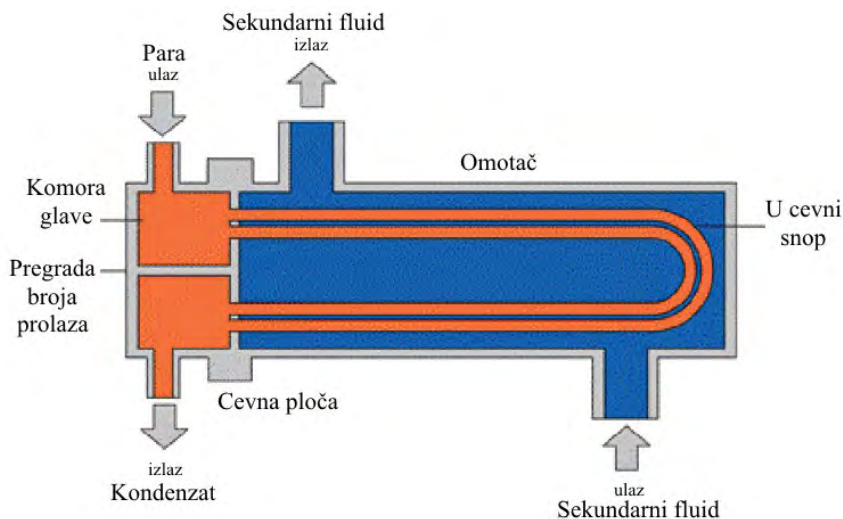
**Dobošasti razmenjivač toplote** je dominantni predstavnik ove grupacije, koja ima mnogo podtipova i modaliteta, Dobošasti razmenjivači su glavni predmet monografije, a njihovoj konstrukciji posvećeno je posebno poglavlje knjige (pog. 2). Najčešće korišten materijal za ove razmenjivače je metal, ali za specijalne aplikacije koriste se i drugi materijali, kao što su grafit, plastika i staklo.



TAB. 1.2. Klasifikacija cevnih razmenjivača toplote, (www.Thermopedia)



Na slici Sl. 1.1, šematski je prikazan dobošasti razmenjivač toplote prema *TEMA standardu* [S1] tip CFU, sa U cevima. Ako se izrađuju od nemetalnih materijala (videti slike Sl. 1.2-1.4), imaju takve specifičnosti da se svrstavaju u posebne grupacije.

Sl. 1.1. Dobošasti razmenjivač toplote, *TEMA standard*, tip CFU

Grafitni razmenjivači su razvijeni pre svega za proizvodnju fosforne kiseline, a primenjuju se za skoro sve organske i neorganske kiseline. Za sprečavanje poroznosti od korozivnih medija, dodaju se specijalni aditivi ili

premazi. Površina razmene je od grafitnih cevi (do 2000 m<sup>2</sup>), a cevna ploča je takođe od grafita. Spoj cevi i cevne ploče je pomoću O prstena ili pletenice, pa je moguća zamena pojedinačno svake cevi. Mogu izdržati temperature do 200°C i radne pritiske do 6 bara i veoma su otporni na trenje i abraziju.



SI. 1.2. *Grafitni dobošasti razmenjivač toplote, DIABON, SGL CarbonGroup, Nemačka*



SI. 1.3. *Stakleni dobošasti razmenjivač toplote, DE DIETRICH process systems, France*

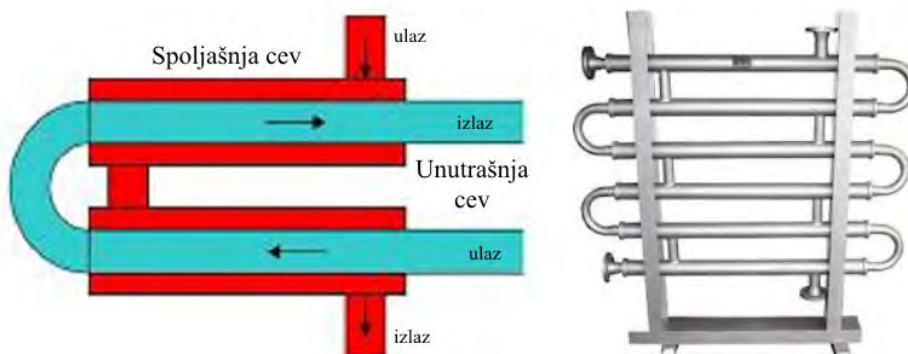
Stakleni (borosilikatno staklo) razmenjivači toplote imaju prilično dobar prenos toplote, zbog svoje glatke površine koja smanjuje tendenciju zaprljanja. Mogu biti u dve osnovne verzije u obliku spirale (navojni kalem) i dobošasti. Imaju široku primenu u industriji, kao u procesu ekstrakcije, apsorpcije i drugih hemijskih reakcija, kada su bitne sledeće karakteristike: otpornost na koroziju i zaprljanje, fleksibilnost ugradnje, laka zamena cevi, širok spektar veličina, glatka površina, mala težina i visoka ekonomičnost primene. Posebna prednost mu je transparentnost (providnost), čime se omogućava vizuelno praćenje procesa, tok strujanja fluida, promene boja itd. Navedene osobine mu omogućavaju da bude alternativa skupljim materijalima, kao grafit, bakar, hastelaj, titanijum, tantal i drugim egzotičnim metalima. Spoj cevi i ploče se izrađuje od teflona (PTFE) pomoću specijalnog metalnog prstena (ferrule fitting) koji obezbeđuje jednostavnu zamenjivost cevi.

Dobošasti razmenjivači od plastike rade se uglavnom od politetraflona, koji je licenciran od firme *Polytetra* u Nemačkoj. Umesto cevi koriste se plastična creva malog prečnika, koja su zavarena u dve cevne ploče, koje su takođe zavarene za omotač, cev od istog materijala. Toplotne dilatacije se kompenziraju savitljivošću creva. Primenjuju se za razne namene u temperaturskom području  $-40$  do  $150^{\circ}\text{C}$  i maksimalnom temperaturskom razlikom do  $120^{\circ}\text{C}$ . Radni pritisci zavise od debljine materijala, a može se koristiti i kao oprema pod pritiskom.



Sl. 1.4. Plastični dobošasti razmenjivač toplote, POLYTETRA, Nemačka.

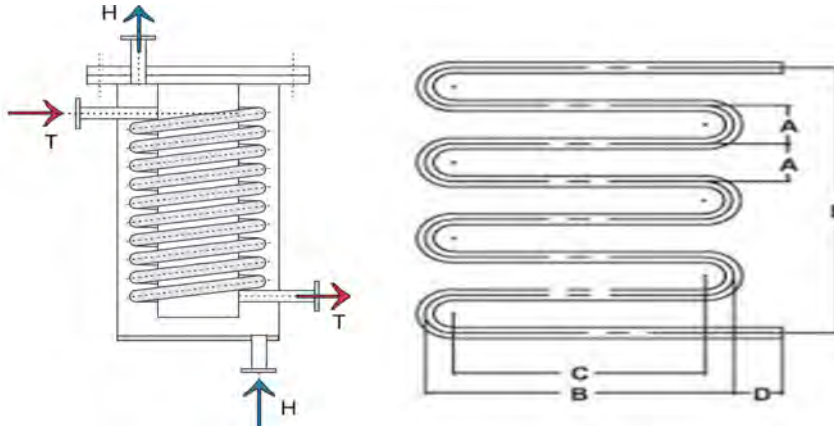
Posebnu grupaciju predstavljaju najjednostavniji dobošasti razmenjivači toplote, tip duple cevi ili cev-u-cev (CuC), koji nisu po TEMA standardu. U ovom slučaju doboš predstavlja cev većeg prečnika, dok površina obima manje cevi predstavlja površinu razmene toplote. Za veće površine razmene, jedinični CuC razmenjivači se povezuju i blokove u istoj ili više paralelnih ravni, slika Sl. 1.5.



Sl. 1.5. Razmenjivač toplote tipa cev-u-cev. Desno, Paket CuC u jednoj ravni

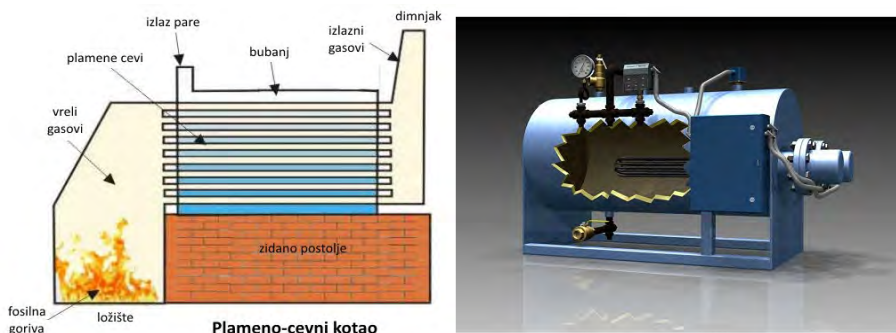
Razmenjivači sa zavojnim snopom. (prostorna zavojnica) ili sa cevnom zmijom (zavojnica u ravni), slika Sl.1.6, umesto cevnom snopom od pravih ili U cevi

imaju cevi u obliku zavojnice, smeštene u omotač cilindričnog ili drugog oblika, koji često može da bude posuda sa velikom i inertnom zapreminom.



Sl. 1.6. Dobošasti razmenjivač sa prostornom (levo) i ravanskom zavojnicom (desno)

**Cevni razmenjivači u pećima** su namenjeni za prijem toplote nastale pri sagorevanju fosilnih goriva (pod dejstvom plamena) ili od električne struje, slika Sl. 1.7. Njihova glavna karakteristika je izdržljivost na povišenim temperaturama i na velikim temperaturnim razlikama na površinama razmene.



Sl. 1.7. Peći sa sagorevanjem fosilnog goriva (levo) i elektrokotao (desno)

Cevi razmenjivača u pećima mogu biti horizontalne (na slici) i vertikalne u zavisnosti vrste goriva, temperatura i namene. Namena peći može biti veoma različita, od proizvodnje tople (vrole) vode, pare ili toplog (vrelog) vazduha (gasa), do zagrevanja ili pečenja raznih materijala u tehnološkim procesima.

**Cevi u ploči** su razmenjivači namenjeni uglavnom u klima instalacijama. Njihovo osnovno obeležje je cev u sprezi sa pločom, koja služi istovremeno kao nosač cevi i dodatna površina razmene toplote – orebrenje, slika Sl. 1.8. Veći broj ovakvih razmenjivača mogu se integrisati u baterije.



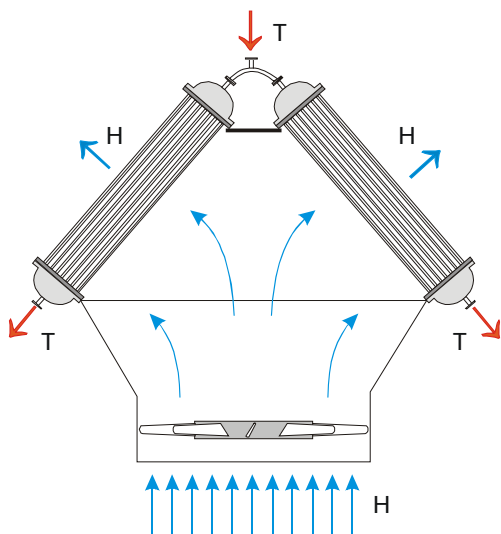
Sl. 1.8. Razmenjivač toplote tipa cev u ploči



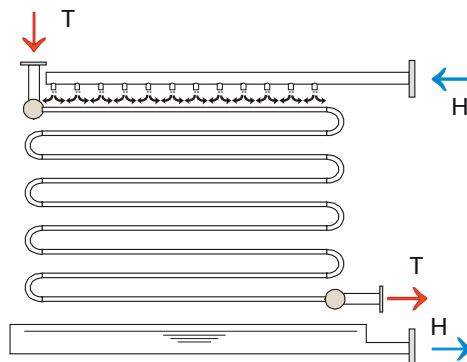
Sl. 1.9. Razni oblici elektrogrejača

**Elektro grejači** su posebno formirane konstrukcije elektrootpornika, koji generišu toplotu, slika Sl. 1.9, u obliku štapova, U cevi ili zavojnica (kalemi), u kojima nema fluida pa je tok razmene toplote drugačiji. Najčešće se ugrađuju kao posebne jedinice kao dodatni ili osnovni izvor za zagrevanje nekog fluida.

**Vazdušni hladnjaci (ili grejači)** su razmenjivači urađeni u formi cevno snopa, u kombinaciji sa nosećom konstrukcijom i ventilatorom za cirkulaciju vazduha. Vazduh struji sa spoljnje strane najčešće orebrenog cevno snopa, koji je delimično ili potpuno otvoren prema okolnom fluidu, koga ima u dovoljnim količinama, slika Sl. 1.10. Strujanje vazduha se obavlja pomoću ventilatora koji se postavlja ispred ili iznad snopa. Najčešća primena im je kod toplotnih pumpi za



Sl. 1.10. Razmenjivač toplote sa vazдушnim hlađenjem



Sl. 1.11. Orošavajući razmenjivač toplote



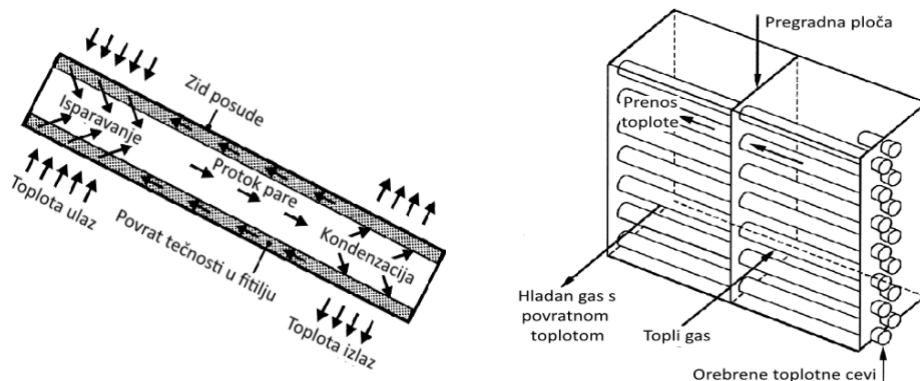
hlađenje (vazduh – toplotni ponor) ili za grejanje (vazduh – toplotni izvor). Ukoliko je okolni fluid voda, konstrukcija postaje kompaktnija, a voda oplakuje spoljnu površinu cevi, pa se ovi razmenjivači nazivaju orošavajućim. Ako okolni fluid pri orošavanju menja fazu, intenzitet razmene se značajno poboljšava, slika Sl. 1.11. Kombinacijom vazdušne struje u koju se ubrizgava voda raspršena preko mlaznica intenzitet hlađenja još više poboljšava. Takvi razmenjivači se nazivaju evaporativni kondenzatori i našli su primenu najviše u rashladnim instalacijama, slika Sl. 1.12.



Sl. 1.12. Evaporativni kondenzator, tipa BALTIMOR (SAD)

**Specijalni cevni razmenjivači** su razmenjivači koji nisu svrstani u neku od prethodnih klasifikacija. Izdvajaju se toplotne cevi, zavarene posude, grafitni blokovi i bajonet razmenjivači.

Toplotne cevi se sastoje od cevi, iznutra obložena materijalom za fitilje i dovoljnom količinom radnog fluida. Na jednom kraju, radni fluid apsorbuje toplotu, isparava i prelazi na drugi kraj toplotne cevi gde kondenzuje i predaje toplotu. Kondenzat se zatim kapilarno vraća preko fitilja na topli kraj toplotne cevi da bi ponovo ispario, slika Sl. 1.13. Cevi spolja mogu biti glatke ili ako je potrebno orebrene pojedinačno ili u masi.

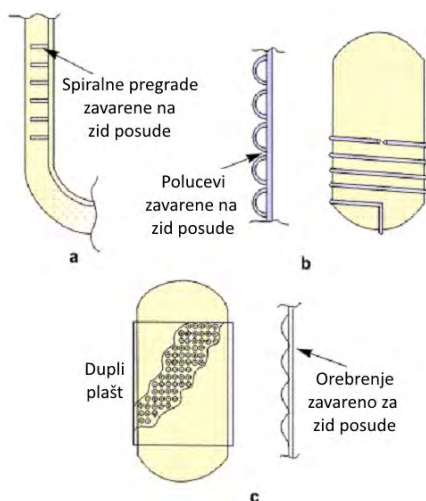


Sl. 1.13. Toplotne cevi, levo princip rada, desno snop toplotnih cevi

Cevi su trajno zatvorene sa obe strane i količina radnog fluida se ne menja. Fitilj je glavna specifičnost ovih razmenjivače toplote, jer on omogućava kapilarni povrat kondenzata. Količina radnog fluida je ona koja omogućava potpunu natopljenost

fitilja, a preostali prostor je parna faza istog fluida. Pri isparavanju nastaje porast a pri kondenzaciji pad pritiska u cevi i proces je neprekidan sve dok postoji temperaturna razlika između tople i hladne strane okolnog fluida. Ova razlika obično treba da je veća od 5°C, što je ukupni toplotni otpor toplotne cevi. Nagib toplotnih cevi je značajna performansa, jer se pomoću nje menja gravitacioni otpor kapilarnom strujanju. Primena ovih razmenjivača je najčešća pri korišćenju otpadne toplote gasnih aplikacija.

Privareni razmenjivači se uglavnom koriste za zagrevanje viskozničkih tečnosti, jer su izvan nje, čime je omogućeno čišćenje posude na koju su privareni. Mogu biti u obliku cevi, polucevi ili duplog plašta (duplikatori), slika Sl. 1.14. Tehnološki fluid je u posudi, koja često ima mešalicu, radi homogenizacije prenosa toplote.



Sl. 1.14. Privareni razmenjivači



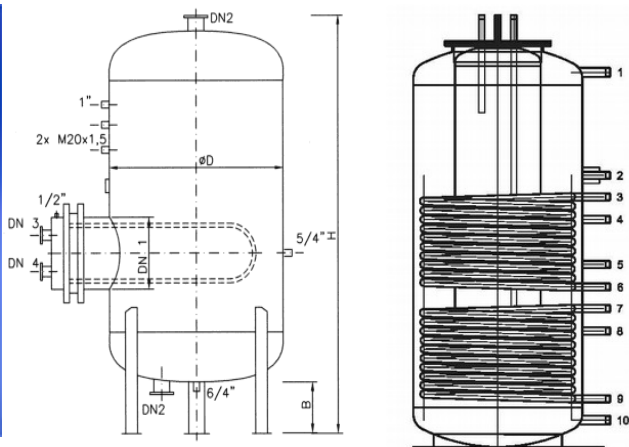
Sl. 1.15. Grafitni blok, DIABON, Nemačka

Grafitni blok toplote se obično koristi kada agresivni fluid treba da se greje ili hladi. Oni se sastoje od čvrstih blokova ugljenika, slika Sl. 1.15, koji imaju otvore izbušene u njima popreko i podužno za prolaz fluida. Blok se postavlja najčešće u metalni omotač sa dilatacionim segmentom, ako su temperaturna razlike velike. Agresivni fluid se postavlja u podužne otvore, a ako su oba fluida agresivna, metalni omotač se oblaže rezidentnom oblogom ili premazom. Blok je potpuno demontažan i pogodan za mehaničko čišćenje sa uzdužne i/ili poprečne strane. Razvijene su konstrukcije sa cilindričnim i poliedarskim oblikom grafitnog bloka, površine do 850 m<sup>2</sup>, sa mogućnošću agregiranja više jedinica po dužini. Primenuju se za temperature do 200°C i pritiske do 7 bara. Najviše se koriste u kriogenim, hemijskim ili prehrambenim procesima za grejanje i hlađenje, kao i za promenu faze bilo kog fluida, parcijalno sa razdvajanjem faza ili u potpunosti.

Bajonet razmenjivač ima dva osnovna dela: bajonet registar i cilindrični omotač, slika Sl. 1.16. Bajonet se sastoji od dve cevi, unutrašnje cevi, otvorene na obe strane i spoljašnje cevi navučene na unutrašnju, koja je sa gornje strane zatvorena. Komplet bajonetnih cevi čini registar i postavlja se vertikalno (ili bar koso) u dobošasti omotač. Ova konstrukcija omogućava nesmetano i nezavisno dilatiranje cevi, pa je zato naročito pogodna za procese sa visokom temperaturnom razlikom između fluida, kao pri kondenzaciji i isparavanju.



Sl. 1.16. Bajonet registar



Sl. 1.17. Bojleri: Levo registar, desno zavojnica

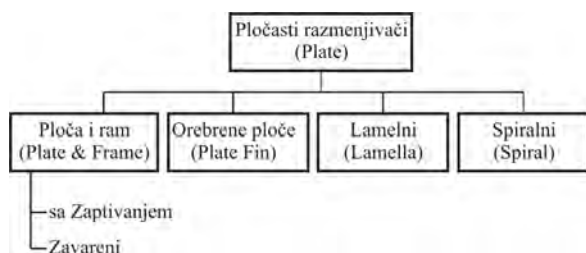
Bojleri imaju cevni registar ili cevnu zmiiju smeštenu u znatno veću zapreminu (bojler). Glavna primena ovih razmenjivača je zagrevanje potrošne vode za tehnološke ili sanitarne potrebe. Strujanje u velikoj zapremini je dvojako: lokalno u okolini grejača i strujanje usled zamene dela zagrejane tečnosti novom hladnom tečnošću, što je normalni postupak potrošnje tople vode. Veličina grejača se određuje na bazi potrebnog vremena (1 do 4 sata) da se skladištena voda bez dovoda sveže zagreje od početne do zadate temperature. Lokalno strujanje može biti prirodno slojevito, uzgonom usled razlike temperatura, ili prinudno pomoću mešalica, ako je potrebno intenzivirano zagrevanje.

Napomena: Cevni razmenjivači tipa cev-u-cev i bajonet razmenjivači nisu svrstani u dobošaste razmenjivače po TEMA standardu, ali zbog slične procedure izbora i proračuna, su pridodati njima i mogu se razmatrati kao i ostali dobošasti razmenjivači toplote.

A2. Pločasti razmenjivači se sastoji od dve pravougaone krajnje ploče, koje zatvaraju više različito oblikovanih reljefnih ploča sa otvorima za dovod toplijeg i hladnijeg fluida. Ove ploče mogu biti ploče u ramu, orebrene ploče, lamele ili spirale, tabela TAB 1.3, [www.thermopedia.com](http://www.thermopedia.com). Ploče su nezavisne i međusobno spojene zaptivačima. Takva konstrukcija je istovremeno i prednost i nedostatak. Moguće je detaljno čišćenje svake ploče, ali to omogućuje mešanje ili curenje fluida preko zaptivača, što im ograničava upotrebu za "opasne" fluide.



Lemljenjem dihtovanih spojeva, opasnost od curenja se otklanja, ali u tom slučaju nema mogućnosti mehaničkog čišćenja, pa se lemljeni pločasti razmenjivači uglavnom koriste za čiste fluide, ili jednokratnu upotrebu. Orebreni pločasti razmenjivači sadrže odstoynike između paralelnih ploča, što omogućava veći broj prolaza na svakoj strani ploče.



**TAB. 1.3.** Klasifikacija pločastih razmenjivača

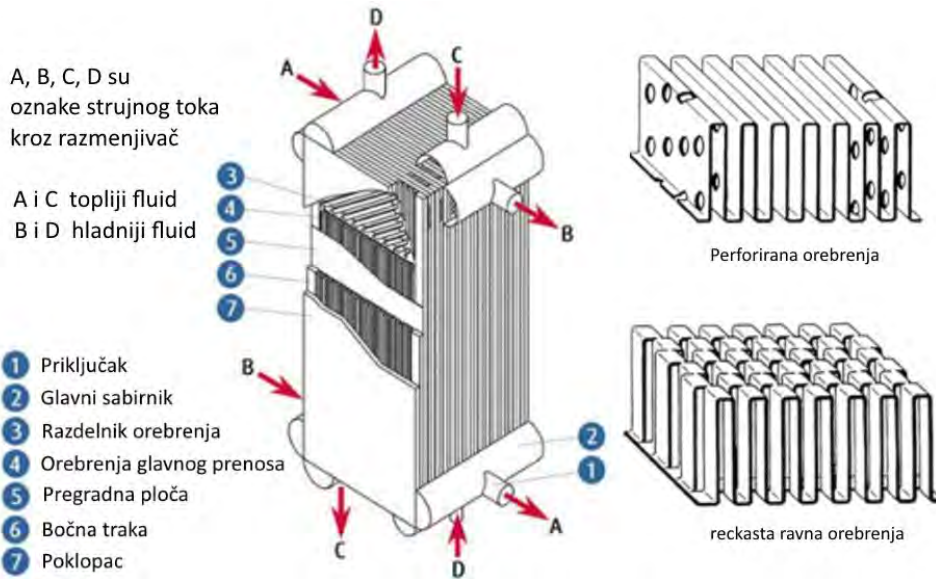
se sastoje od dve spiralno savijene ravne ploče, tako da kontakt fluida ima dug put. Krajevi spirala se zatvaraju dihtovanim ili zavarenim pločama. Uglavnom se koriste za viskozne tečnosti ili tečnosti koje sadrže vlakna ili čestice.

Informativan prikaz pločastih razmenjivača dat je na slici Sl. 1.18, a pošto oni imaju visoku površinsku gustinu spadaju u grupaciju kompaktnih razmenjivača toplote, koja je posebno obrađena u narednoj tački ovog poglavlja.

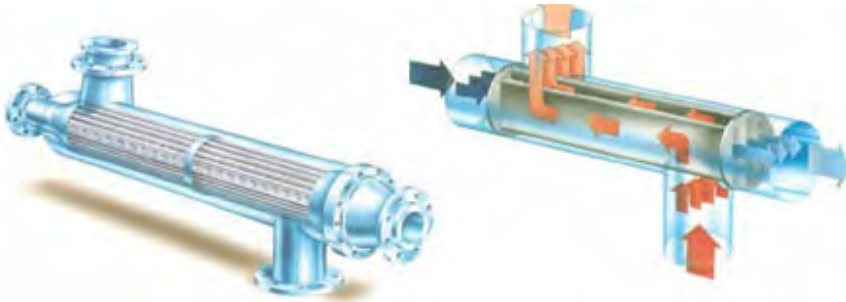
A3. Razmenjivači sa razuđenim površinama (orebreni), su aparati koji imaju dodatnu površinu razmene sa jedne ili obe strane radnih fluida, kao što je navedeno na početku ovog poglavlja. Konstrukcija ovih razmenjivača najčešće je ista kao i da nema orebrenja, a osnovni element po kome se izdvaja ova grupacija razmenjivača je efikasnost razmene toplote i postupak izrade orebrenja.



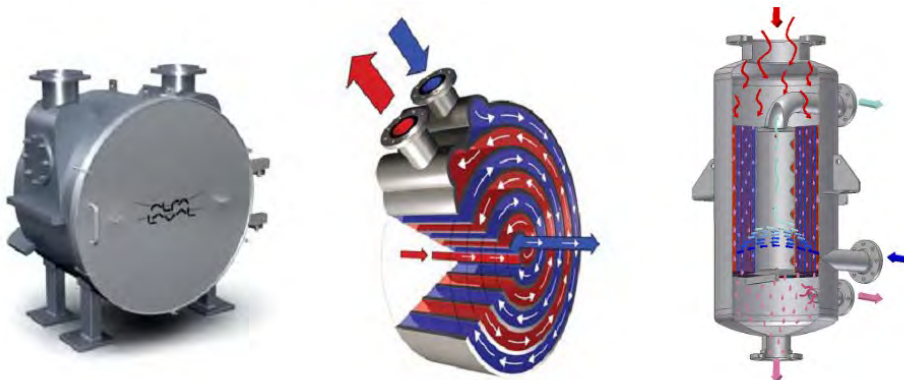
**Sl. 1.18a.** Pločasti razmenjivači, levo sa zaptivačima, desno lemljeni, ALFA LAVAL, Švedska



Sl. 1.18b. Orebreni pločasti razmenjivači toplote, desno tip orebrenja, LINDE Nemačka

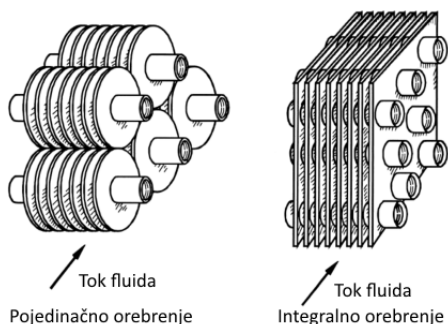


Sl. 1.18c. Lamelni pločasti razmenjivači toplote, SONDEX Finska



Sl. 1.18d. Spiralni razmenjivači toplote, ALFA LAVAL, Švedska

Povećanje kontaktne površine cevnog ili pločastog razmenjivača ostvaruje se dodacima u obliku pločastih površina i to na dva načina: preko pojedinačnih kontaktnih površina (cev ili ploča) ili integralno kada je dodata površina zajednička za više cevi ili ploča, slika Sl.1.19.



Sl. 1.19. *Pojedinačno i integralno*

Integralno orebrenje je kompaktnije, a pojedinačno orebrenje se lakše izrađuje, jer je orebrana cev može biti posebni poluproizvod.

Tehnička rešenja postizanja razuđenih površina razmene toplote zasnivaju se na nekoliko principa, kao što su: radijalni ili podužni kontakt dodatne površine sa cevima, oblik i visina dodatne površine, ili deformacija osnovne površine, tako da ona izaziva veću turbulenciju strujanja i na taj način povećava intenzitet razmene toplote.

Razuđenost kontaktnih površina može se ostvariti sa jedne, druge ili obe strane kontaktne površine. Različitim rešenjima dodatnih površina prema *Shah* [1], površina razmene se može povećati od 5 do 12 puta, a toplotna snaga prenosa se povećava 2 do 4 puta, iz čega se vidi da koeficijent prenosa toplote opada sa porastom površine, što je razumljivo imajući u vidu promenu hidrauličkih uslova strujanja. Orebranje cevi i orebranje ploče su dva najčešća postupka izrade razuđene površine razmenjivača toplote.

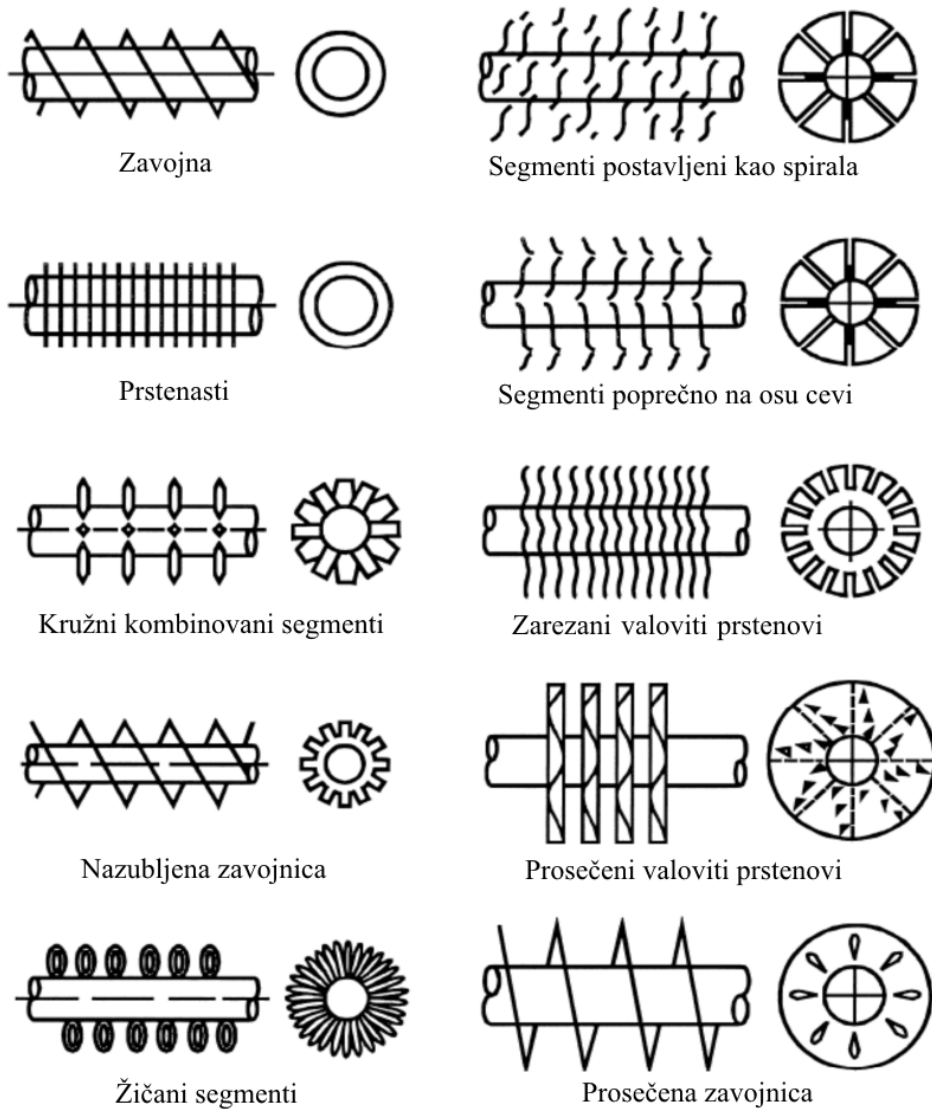
Orebranje cevi, može se izvesti uzdužno, poprečno i kao usukana cev.

Uzdužno (longitudinalno) orebrane cevi se uglavnom izrađuju postupkom zavarivanja, zbog dobrog kontakta i iste dilatacije između osnovne cevi i rebra, slika Sl.1.20. Rebra mogu biti pojedinačna ili češće savijena u obliku slova "U". Orebranjem se može spoljna kontaktna površina povećati do 8 puta. Uglavnom se koriste se za veoma prljave i viskozne fluide u zoni laminarnog strujanja i niskih koeficijenata prelaza toplote u aparatima tipa cev-u-cev ili tipa "šnala" (Hairpin).



Sl. 1.20. *Podužno orebrane cevi i razmenjivač tipa "šnala" (Hairpin) ALCO TWIN, SAD*

Poprečno orebrene cevi su najviše zastupljeni tip orebrenja, sa puno varijanti oblika i tehnologije izrade. Prema obliku, orebrenja mogu biti helikoidna, radijalna, zupčasta itd. uglavnom sistematizovana prema *Shah* [1], slika Sl. 1.21. Prema tehnologiji izrade, razučena površina može biti izvedena presovanjem, lepljenjem, lemljenjem, zavarivanjem, obradom, istiskivanjem i deformacijom osnovne cevi. Po visini rebara, orebrenja mogu biti: visoka, srednja, niska i mikro.



Sl. 1.21. Sistematizacija oblika cevnog orebrenja presovanjem, prema *Shah* [1]

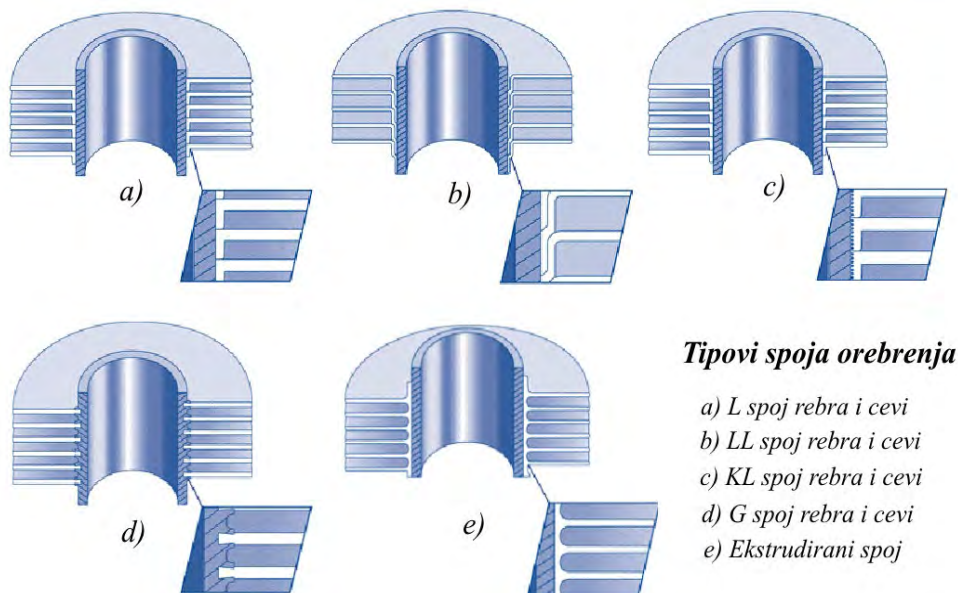
Unutrašnje orebrenje može biti kao sastavni deo cevi, uglavnom niske visine ili kao dodatno orebrenje, koje često zahvata celu unutrašnjost cevi.

Spoljašnje orebrenje u zavisnosti od namene mogu imati različite visine. Dobošasti razmenjivači toplote uglavnom koriste niska orebrenja, zbog rastojanja između cevi, koje ne sme biti preveliko, zbog smanjuja brzine strujanja oko cevi.



Sl. 1.22. *Levo spoljnje, desno spoljnje i ubačeno unutrašnje orebrenje cevi*

Orebrenja, prema obliku, su najčešće spiralna ili kružna. Dodatna kružna orebrenja mogu se različitim tehnologijama postaviti na osnovnu cev. Od oblika spoja i materijala orebrenja zavise performanse namene, slika Sl. 1.23.



**Tipovi spoja orebrenja**

- a) L spoj rebra i cevi
- b) LL spoj rebra i cevi
- c) KL spoj rebra i cevi
- d) G spoj rebra i cevi
- e) Ekstrudirani spoj

Sl. 1.23. *Tipovi spojeva orebrenja od dodatnog materijala, prema PROFINS, Engleska*



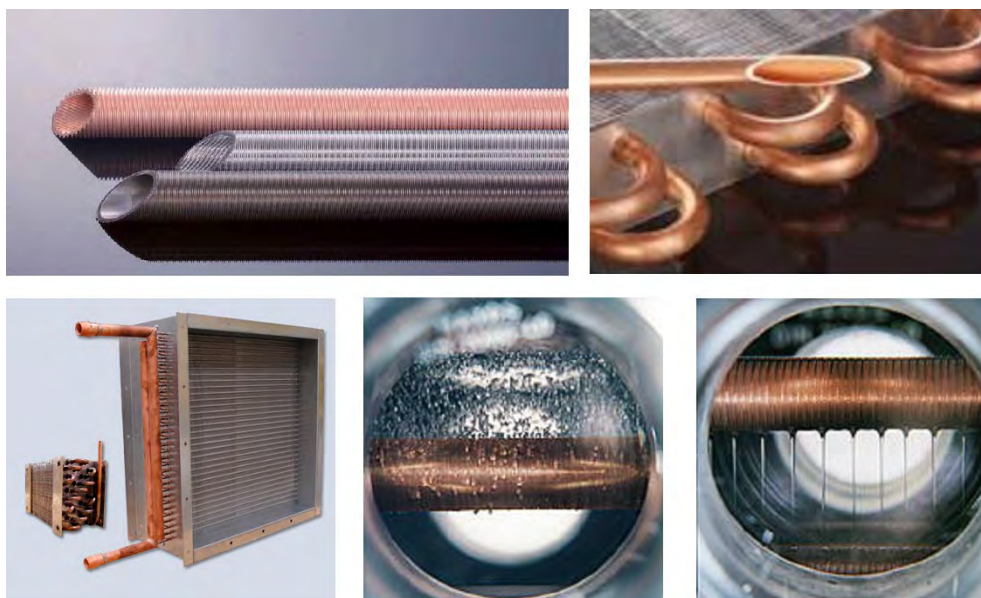
**TAB 1.4.** Tabela prikaz performansi orebrenja, prema *PROFINS*, Engleska

Tip	Opis	Performanse	
L	Rebra su podvrgnuta pritisku oko ili iz cevi. Kontrolisanom deformacijom se ostvaruje optimalan kontakt podnožja peraje na bazu cevi.	Maks. radna temp.	150°C
		Otpor. na atmosf. koroziju	prihvatljiva
		Mehanička otpornost	Slaba
		Materijal orebrenja	Al, Cu
		Materijal cevi	Bilo koji
LL	Rebra se preklapaju, ostalo kao kod tipa L. Odlična dodatna zaštita cevi. Često zamenjuju skuplji tip ekstrudiranog spoja	Maks. radna temp.	180°C
		Otpor. na atmosf. koroziju	prihvatljiva
		Mehanička otpornost	Slaba
		Materijal orebrenja	Al, Cu
		Materijal cevi	Bilo koji
KL	Isto kao L spoj, pri čemu se bazna cev nareckuje, radi poboljšanja površinskog kontakta i veće mehaničke čvrstoće spoja.	Maks. radna temp.	260°C
		Otpor. na atmosf. koroziju	prihvatljiva
		Mehanička otpornost	prihvatljiva
		Materijal orebrenja	Al, Cu
		Materijal cevi	Bilo koji
G	U osnovnom materijalu se prave brazde deformacijom u koje se istovremeno utiskuju orebrenja. Spoj upotrebljiv za povišene temperature.	Maks. radna temp.	400°C
		Otpor. na atmosf. koroziju	slaba
		Mehanička otpornost	prihvatljiva
		Materijal orebrenja	Al, Cu, Fe
		Materijal cevi	Bilo koji
Ekst rudir ana	Orebrenje se formira iz spoljne cevi od Al navučene na osnovnu cev, ekstrudiranjem. Spoj je dugovečan i ima odličan prenos toplote.	Maks. radna temp.	285°C
		Otpor. na atmosf. koroziju	odlična
		Mehanička otpornost	odlična
		Materijal orebrenja	Al
		Materijal cevi	Bilo koji

Cevno orebreni dobošasti razmenjivači su manje kompaktni od pločastih orebrenih razmenjivača. Oni imaju površinsku gustinu u komercijalnoj upotrebi do 3300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Tipična gustina rebara kreće se od 250 do 800 rebara/m, a debljina rebra iznosi od 0,08 do 0,25 mm. Orebrene cevi mogu izdržati jako visoke pritiske u cevi, dok je najviša temperatura ograničena tipom veze osnovnog i dodatnog materijala. Pritisci sa spoljašnje strane cevi su uglavnom niski, jer je sa te strane najčešće gasoviti fluid.

Nisko-orebrene, mikro-orebrene i razne vrste mikro-izbrazdanih cevi (microgroove), slika Sl. 1.24, su dobile na značaju snažnim razvojem tehnike hlađenja i energetske efikasnosti. Mali prečnici cevi razmenjivača imaju bolje koeficijente prenosa toplote od okruglih bakarnih ili aluminijskih orebrenih cevi, koje su standard u HVAC industriji kondenzatora i isparivača. One mogu izdržati veće pritiske koji zahtevaju nove generacije ekoloških rashladnih fluida (freon R-410A, ugljendioksid R-744, propan R290). Materijalni troškovi su niži, jer je manja težina razmenjivača i manja količina rashladnog fluida u opticaju. Istina,

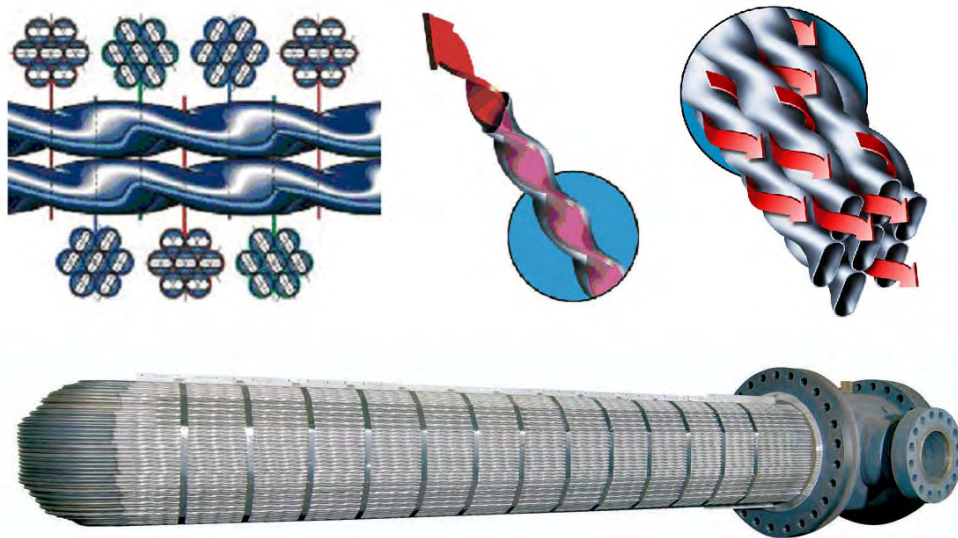
jedinični padovi pritiska su veći po jedinici dužine, ali se na njihovo smanjenje može uticati, pored smanjenja dužine i brojem cirkulacionih krugova. Na primer, za toplotnu snagu razmene od 5 kW HVAC razmenjivač toplote od bakarne cevi  $\phi$  9,52 mm ima masu 3,09 kg, cevi  $\phi$  7 mm masu od 2,12 kg, a od cevi  $\phi$  5 mm masu od 1,67 kg. Mikro-izbrazdana unutrašnja površina cevi još više povećava učinak u razmeni toplote, pri čemu je neophodna optimizacija performansi razmaka između lamela, oblika izbrazdanosti površine, prečnika cevi i broja strujnih krugova. Spoljnji prečnici ovih cevi se kreću 4 do 7 mm. Proizvodnja ovih cevi vrši se postupkom povećanja prečnika cevi bez promene dužine (tzv. circumferenca).



**Sl. 1.24.** Gore: Nisko-orebrene i mikro-izbrazdane cevi WIELAND THERMAL, Nemačka, dole: hladnjak od mikro-izbrazdanih cevi i tok isparavanja i kondenzacije

Poseban slučaj predstavljaju takozvane deformisane cevi, koje nemaju cevno jezgro i orebrenje, već se cev deformiše tako da se površina unutrašnjeg preseka ne menja, ali su poprečni preseki duž cevi različitog oblika. Pобољшanje performansi razmene toplote nastaju, ne povećanjem površine razmene, već promenom karaktera strujanja usled stalne promene pravca strujanja, tako da turbulentno strujanje nastaje pri nižim brzinama ili je intenzivnije. Izrada ovih cevi zahteva specijalne mašine, pa su skuplje u odnosu na okrugle cevi. Početak cevi se ne deformiše, tako da je spoj sa cevnom pločom isti kao kod okruglih cevi. Takođe, deformacije nema ni na mestu savijanja U cevi.

Komercijalnu primenu najviše su našle usukane ili uvrnute (twisted) i valovite (corrugated) cevi. Glavna prednost ovih cevi je što nemaju klasična orebrenja od dodatnog materijala, već se sama cev deformiše, pri čemu se menja profil strujanja fluida u i oko cevi.



**Sl. 1.25.** Gore, usukana cev sa karakterističnim presecima i formom strujanja u i oko cevi, dole bunt od U usukanih cevi, KOCH HEAT TRANSFER Compani, SAD

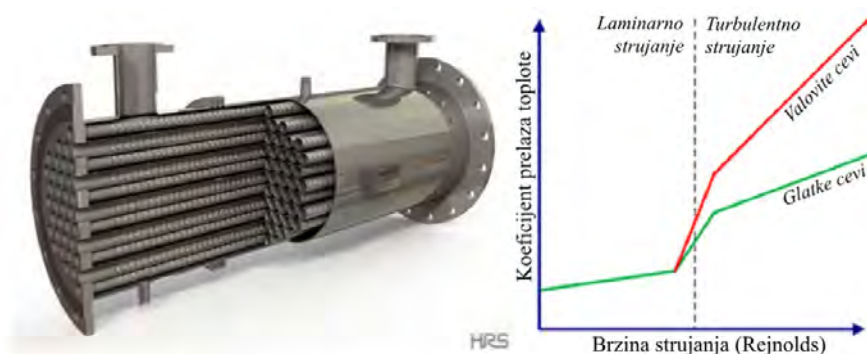
Usukane cevi, slika Sl. 1.25, pored poboljšanog prenosa toplote u odnosu na glatke cevi imaju još niz drugih prednosti, konstrukcija skoro da nema vibracija, osetljivost na zaprljanje je mala jer nema mrtvih zona, zakrivljenost po uzdužnom preseku značajno samokompenzuje temperaturne dilatacije i imaju manje padove pritiska. Ove cevi se često koriste kao predgrejači sirovina u tehnologiji, a najveću primenu su našle u hemijskoj industriji, industriji nafte i gasa, industriji papira i termoelektranama, za teške uslove rada, visoke pritiske i zaprljane fluide.

Valovite cevi se u oblasti laminarnog strujanja ponašaju skoro kao glatke cevi, a povećanje koeficijenta prelaza toplote nastaje u području turbulentnog strujanja, kao što je prikazano na slici Sl. 1.26. Valovite cevi imaju poboljšanje prelaza toplote i oko cevi, ali ne u meri kao orebrenja. Kod njih najveći i najmanji prečnik cevi po dužini nema veliku razliku, pa ne povećavaju u većoj meri rastojanja između cevi, zbog čega su pogodni kod dobošastih razmenjivača (*HRS Heat Exchangers*, Engleska, slika Sl. 1.26) i razmenjivača cev-u-cev (*APV*, SAD, slika Sl. 1.27). Glavna razlika između usukanih i valovitih cevi je odnos povećanja prelaza toplote i povećanja pada pritiska nastalog usled deformacije cevi u poređenju sa glatkim cevima. Istraživanja su pokazala da je moguće pri pažljivom izboru dubine, ugla i širine "vala", smanjiti otpor u graničnom sloju prelaza toplote, a da pritom ne dođe do porasta "pada pritiska" kroz cev. Valovite cevi mogu se izraditi sa talasima u obliku zavojnice (helikoidni) ili u obliku zaobljenog cilindra.

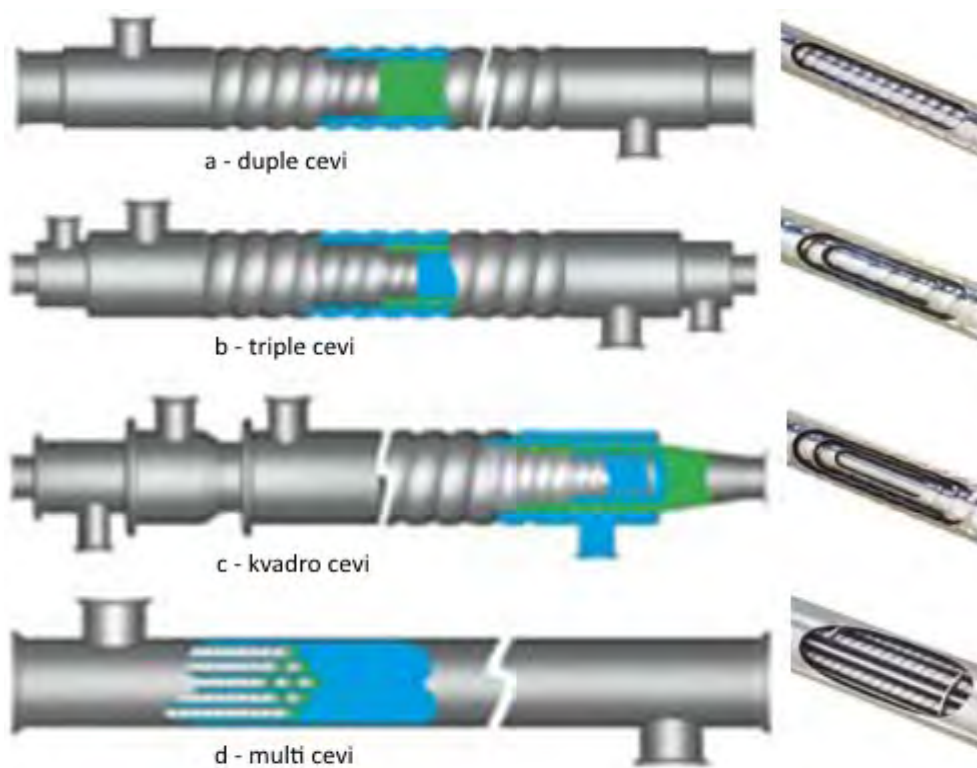
Plitka spiralna deformacija (gofriranje) izaziva poremećaj u graničnom sloju, a da pri tom nema prevelikog smanjenja brzine strujanja. Podsticaj razvoju



razmenjivača toplote sa valovitim cevima, dala je prehrambena industrija (pasterizacija, sterilizacija), jer radna materija sadrži i veće čestice koji mogu da se zaglave u manjim cevima ili dubokim žljebovima talasa. Ove cevi mogu da ostvare koeficijent prelaza toplote do 2,5 puta veći od ekvivalentne glatke cevi, pri čemu pad pritiska neće porasti za istu vrednost. Zbog povećanja turbulencije pri strujanju



Sl. 1.26. RT od valovitih cevi i uporedni dijagram prema glatkim cevima, HRS, Engleska



Sl. 1.27. RT tipa CuC od valovitih cevi (a - duple cevi, b - triple cevi, c - kvadro cevi, d - multi cevi), APV (SPX Brand), SAD

kroz valovitu cev, smanjuje se tendencija zaprljanja taloženjem, pri niskim brzinama fluida. Valovite cevi naročito su našle primenu kod razmenjivača tipa cev-u-cev, razvijen je veći broj tipova prema strujanju fluida, slika Sl. 1.27, kao:

Tip CDT (Corrugated double tube) sadrži jednu valovitu cev, prečnika zavisno od toka i veličine prisutnih čestica u fluidu. Ova konstrukcija je posebno pogodna za grejanje ili hlađenje proizvoda sa veoma visokim sadržajem vlakana celuloze, ili proizvoda koji sadrže čestice sa nestabilnim termofizičkim osobinama.

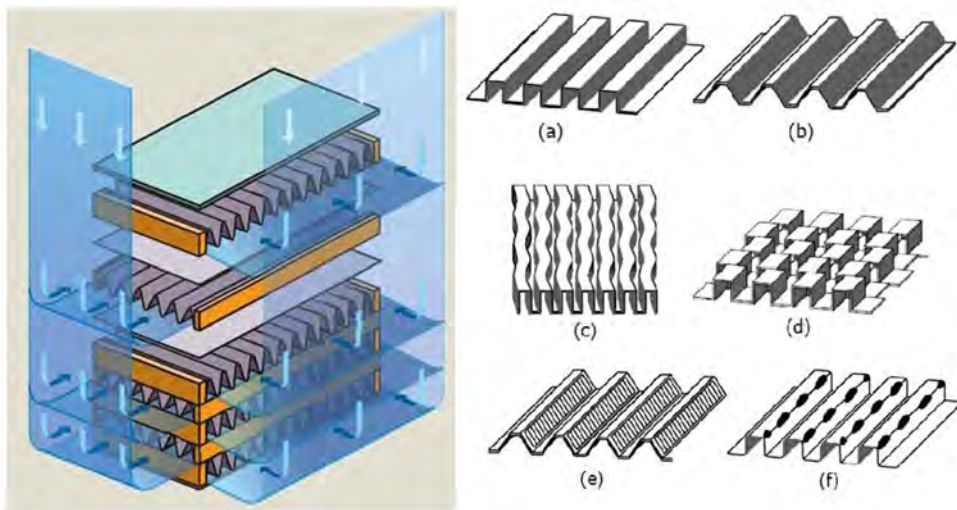
Tip CTT (Corrugated triple tube) sastoji se od dve valovite cevi koncentrično postavljenih u spoljašnju cev, pomoću odstoynika, tako da formiraju prstenasti prostor, gde se prenos toplote obavlja sa obe strane. Primenjuje se za fluide velike viskoznosti koji mogu sadržati vlakna ili čvršće čestice.

Tip CQT (Corrugated quadruple tube) sastoji se od tri valovite cevi koje omogućavaju fleksibilnost i optimizaciju prenosa toplote i pada pritiska u prstenastim prostorima koje formiraju. Ova funkcija je od ključnog značaja pri laminarnom strujanju fluida i povratnom iskorišćenju toplote regeneracijom.

Tip CMT (Corrugated multi tube) sadrži valovite cevi manjih prečnika smeštene u omotač od cevi većeg prečnika. Ova konstrukcija povećava površinu prenosa toplote, što je preporučuje za zagrevanje ili hlađenje materijala manjeg viskoziteta (sok pulpe).

Za sve tipove, dozvoljene su temperature do 285°C i pritisci do 60 bara.

Orebrenje ploča, sastoji se u tome da se na matične (osnovne) ploče zaleme dodatne sekundarne površine (orebrenja), koja mogu imati različite oblike, slika Sl. 1.28. Najčešći oblici orebrenja su trouglastog ili pravougaonog preseka. Ovi razmenjivači imaju veliku površinu prenosa toplote po jedinici zapremine, koja

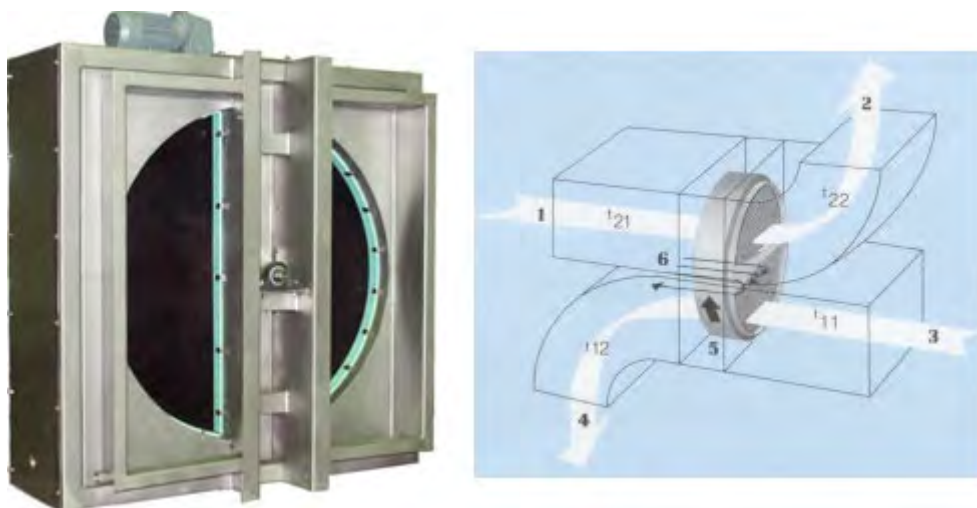


**Sl. 1.28.** *Levo: razmenjivač sa orebrenim pločama, desno: detalji oblika orebrenja a-pravougaoni, b-trapezni, c-talasasti, d-presecani, e-sa otvorima, f-perforirani*

je i preko pet puta veća od standardnih dobošastih razmenjivača toplote. Površinska gustina se kreće u rasponu od 850 do 1500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Rade se uglavnom od aluminijuma, što im daje malu jediničnu masu, pa se često koriste u avio industriji.

**B. Skladišni tip razmenjivača toplote**, ima fluide koji naizmenično struje kroz istu površinu razmene, pa je prenos toplote diskontinualan. Površina prenosa toplote može biti pokretna, kada se naziva matricom, slika Sl. 1.29, ili je propusna (porozna) od čvrstog materijala kada se naziva paketom. Pri strujanju toplijeg fluida preko površine za prenos toplote, toplotna energija se skladišti u zidu matrice, pri čemu se topliji fluid hladi. Kada se zagrejana matrica zakrene, sada hladniji fluid struji preko iste površine, matrica sada predaje toplotu hladnijem fluidu. Dakle, toplota izmenjuje mesto nosioca, od toplijeg prelazi na hladniji fluid, pa se ovi aparati mogu nazivati izmenjivačima toplote u pravom smislu te reči.

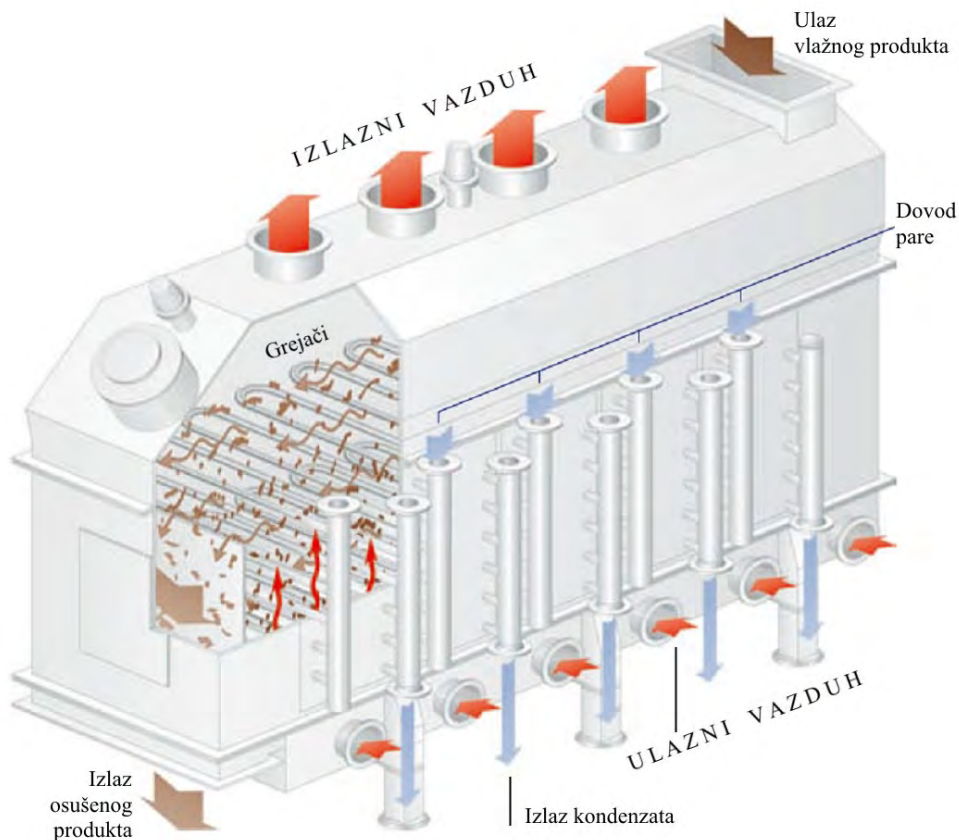
Skladišni razmenjivači pripadaju grupaciji regenerativnih razmenjivača toplote. Vreme u kome topliji fluid struji kroz hladnu matricu se zove topli period, a vreme u kome hladniji fluid struji kroz toplu matricu se zove hladni period, pri čemu nije neophodno da topli i hladni period budu jednaki. Pri radu ovog postrojenja neizbežno je da mala količina fluida koji ostane u matrici, koja se meša sa drugim fluidom posle zakretanja matrice, što se naziva curenjem. Pojava curenja će se pojačati ako topliji i hladniji fluid nisu na istim pritiscima (curenje usled razlike u pritisku). Pošto su ova curenja neizbežna, regeneratori se isključivo koriste za razmenu toplote (i mase) gas-gas.



Sl. 1.29. Rotacioni skladišni tip (levo) i princip rada (desno), KLINGENBURG Nemačka

**C. Prenos toplote u fluidizovanom sloju**, nastaje kada je jedan od dva fluida nosioca toplote mešavina čestica ili granula čvrstog materijala i vazduha. Ovaj postupak se koristi za grejanje, hlađenje, zamrzavanje ili sušenje (kada pored

razmene toplote, postoji i razmena mase) u procesnoj ili prehrambenoj industriji, a poznat je i postupak sagorevanja uglja u fluidizovanom sloju. Fluidizovani sloj nastaje ubacivanjem vazduha u rinfuzni materijal, pri čemu na određenoj brzini, čestice materijala podiže nagore sila nešto veća od težine čestica, kada nastaje mešavina rinfuznog materijala i vazduha koja se ponaša kao fluid. Brzina pri kojoj čestice lebde u struji vazduha naziva se brzinom fluidizacije. Koeffcijent prenosa toplote u fluidizovanom sloju je mnogo veći nego u slučaju same čestice. Na slici Sl. 1.30, prikazan je proces sušenja hemijskih produkata parom koja kondenzuje. Brzina fluidizacija obično se kreću od 0,6 do 2,4 m/s, a koeffcijent prolaza toplote je veliki, od 9 do 14 kW/m<sup>2</sup>K, što proces čini veoma intenzivnim.



**Sl. 1.30.** Sušara u hemijskoj industriji u fluidizovanom sloju, ALLGAIER Nemačka

Prednosti procesa u fluidizovanom sloju su:

1. Visok prenos toplote i mase u izotermkim uslovima zbog dobrog mešanja.
2. Fluidizovan sloj ima pouzdanu cirkulaciju unutar postrojenja, nema pokretnih delova, što utiče na niske troškove rukovanja i održavanja.



3. Proces je kontinualan i mogući su veliki protoci i kod proizvoda osetljivih na temperaturno dejstvo ili egzotermnih i endotermnih reakcija.

4. Sistem kontrole i regulacije rada je jednostavan i pouzdan, a moguć je rad i sa višestepenim izuzimanjem materijala u toku procesa.

Osnovni nedostaci su:

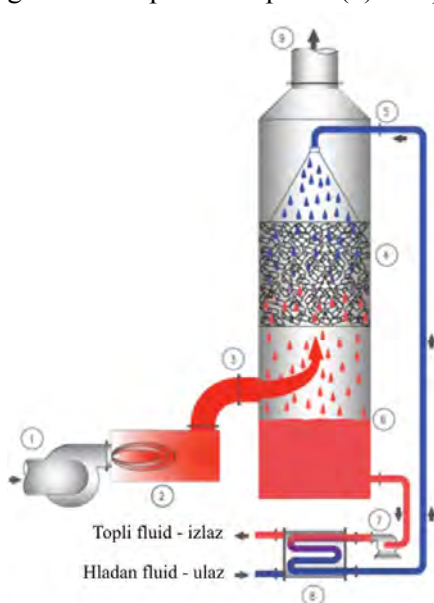
1. Ne mogu se jednostavno fluidizovati veoma sitne ili veoma krupne čestice.

2. Neizbežni su i ne mali troškovi energije održavanja fluidizovanog sloja.

3. Lepljivost proizvoda u bilo kojoj fazi procesa može dovesti do prekida fluidizacije. Takođe neki materijali mogu uticati na pojavu ozbiljne erozije opreme.

### **b) Razmenjivači toplote direktnog kontakta**

Kod ovih razmenjivača, razmena toplote se odvija između struja dve materije u direktnom kontaktu. Moguće su razne kombinacije materijala u kontaktu: gas-čvrsta materija, gas-tečnost, tečnost-tečnost, tečnost-čvrsta materija, dve čvrste materije. Čvrsta materija, ako je nosilac toplote mora biti u rinfuznom ili fluidizovanom stanju, a često može biti posrednik (ispuna) za poboljšanje kontakta radnih fluida. Prednosti ovakve razmene toplote su veoma visok koeficijent prenosa toplote i niska cena. a problem zaprljanja generalno ne postoji, jer nema površine između dva fluida. Međutim, postoji mnogo ograničenja u primeni direktnog kontakta dva fluida. Mešanje fluida u procesu mora biti dozvoljeno, ili da su fluidi ne mešivi. Pritisak fluida mora biti isti, ili će se pritisci uravnotežiti posle mešanja. Na slici Sl. 1.31, prikazan je uređaj grejanja vode direktno pomoću vrelih gasova uz pomoć ispune (4) za poboljšanje kontakta između gasova i vode.



**Sl. 1.31.** Razmenjivač toplote direktnog dejstva, QSENSE, SAD

Gorionik (1) u komori (2) vrši sagorevanje prirodnog gasa ili druge gorive materije, a produkti sagorevanja (3) ubacuju se u mešnu komoru sa ispunom (4) gde dolaze u kontakt sa raspršenom vodom (3), kojoj predaju toplotu, pri čemu se kondenzuju ili samo hlade i izlaze iz postrojenja (9). Dobijena topla ili vrela voda se skuplja u dnu postrojenja (6) i dalje koristi direktno ili preko razmenjivača (8). Neophodna je pumpa (7) za rad postrojenja, podizanja i raspršivanja vode u procesu. Ekonomičnost ovog postupka je visoka, naročito pri kondenzaciji - kad para čini produkte sagorevanja. Ako dimni gasovi pored pare sadrže kiseline ili druge štetne komponente, moguće je predvideti dodatno postrojenje za neutralizaciju ili indirektni razmenjivač toplote za dalji prenos toplote, što znatno poskupljuje celokupno postrojenje.

### 1.1.2. Klasifikacija razmenjivača toplote prema drugim kriterijumima

U prethodnom odeljku navedena je klasifikacija razmenjivača prema konstrukciji izrade, kojom su obuhvaćeni skoro svi tipovi aplikacija sa razmenom toplote. Isti tipovi razmenjivača se mogu klasifikovati prema drugim kriterijumima, ako je potrebno da neka druga performansa aparata bude kriterijum podele. Prema tabeli TAB 1.1, date su klasifikacije razmenjivača prema najčešćim kriterijumima, a neke specifičnosti tih podela je potrebno dodatno analizirati.

Broj fluida u procesu zavisi od tehnologije aplikacije, većina procesa podrazumeva prenos toplote između dva fluida, što je teorijski minimum. Veći broj fluida u procesu pojavljuje se u postupcima sa posrednim fluidima ili pri odvajanju komponenti. Poznate su konstrukcije koje obuhvataju čak 12 fluida u kontaktu.

Kompaktnost površine razmene je značajan kriterijum, tesno povezan sa energetsom efikasnošću i zaslužuje naročitu pažnju, zato su posebno obrađeni kompaktni razmenjivači i komparacija sa dobošastim razmenjivačima.

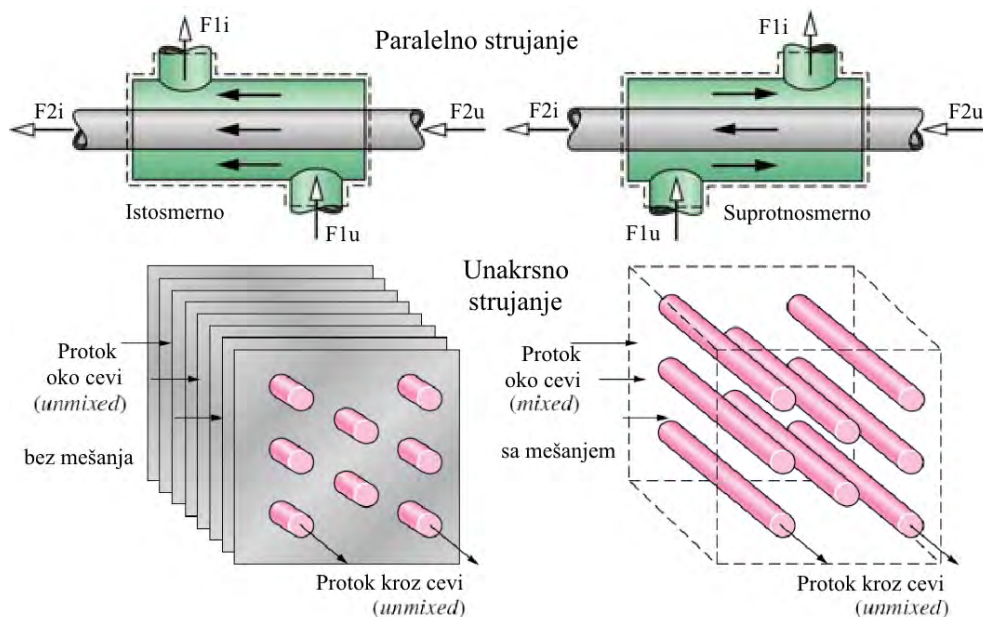
Strujni aranžman je kriterijum koji obuhvata broj prolaza, strujni tok i homogenost temperaturnog polja.

Broj prolaza (number of fluid streams) predstavlja broj dužina površine razmene, koje jedan fluid prođe od ulaza do izlaza iz razmenjivača toplote, koji može biti različit na strani svakog fluida. Jedan prolaz fluida se definiše kao struja fluida u kontaktu sa površinom razmene po dužini aparata. Broj prolaza utiče na brzinu strujanja, pad pritiska i efikasnost razmene toplote. Minimalni broj prolaza fluida mora biti jedan (single-pass), a maksimalni broj nije određen i zavisi od geometrijske konstrukcije aparata. Aplikacije sa većim brojem prolaza, zajednički se nazivaju višeprolazni (multi-pass) razmenjivači toplote. Treba napomenuti da jednoprolazni razmenjivači imaju po jedan prolaz svih fluida koji učestvuju u razmeni toplote, a višeprolazni imaju bar jedan fluid sa većim brojem prolaza.

Strujni tok fluida preko površine razmene, može biti istog pravca (istosmerno-cocurrent ili suprotnosmerno-countercurrent) – pod nazivom paralelno strujanje (parallel flow), ili pod nekim uglom (najčešće pravim) – pod nazivom unakrsno strujanje (cross flow). Istosmerno strujanje se često u literaturi naziva paralelnim, iako termin nije baš adekvatan, jer strujanje nije vektorski istovetno, inteziteti mogu biti različiti, ali se ovde misli da fluidi struje na istu stranu.

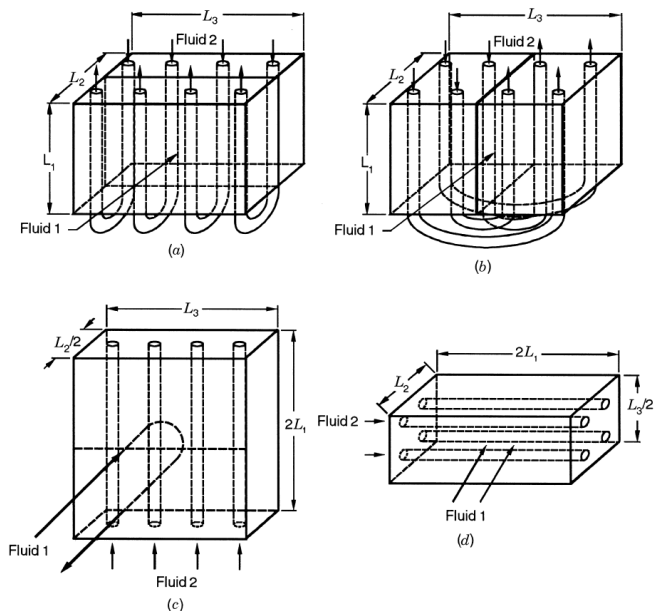
Homogenost strujanja predstavlja uticaj poprečnog strujanja u strujnom frontu. Poprečno strujanje koje se javlja na dovoljno velikom preseku strujanja, izaziva mešanje poprečnih slojeva fluida i homogenizaciju temperaturnog polja, tako da razlikujemo mešajuće (mixed) i ne mešajuće (unmixed) strujanje.

Strujni aranžman može imati veliki broj kombinacija, čije određivanje može ponekad izazvati nedoumicu. Na slici Sl. 1.32, dat je opšti strujni aranžman cevnih razmenjivača, detaljnije u delu o dobošastim razmenjivačima toplote.



Sl. 1.32. Strujni aradžman cevnih RT, gore: Paralelno strujanje, dole: Unakrsno strujanje

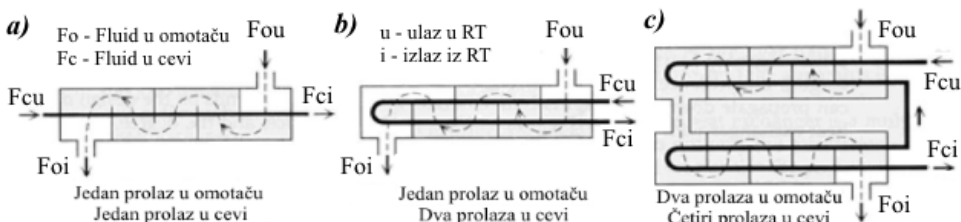
Ako je strujna površina po preseku mala, što se postiže strujanjem kroz cevi ili uske kanale (Sl. 1.32 dole levo), nema mešanja i temperaturno polje je homogeno u istoj cevi ili kanalu, ali u svim cevima ili kanalima nije isto.



Sl. 1.33. Dve varijante unakrsnog strujanja U cevnog RT gore-aranžman U cevi, dole razvijeni oblik cevi

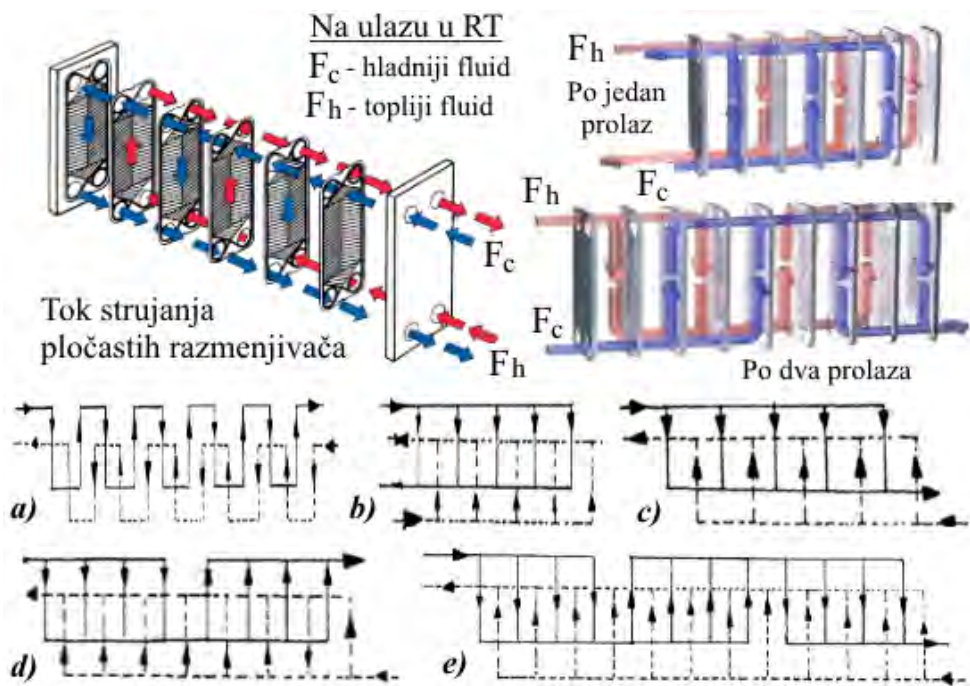
Pri unakrsnoj struji razmenjivača toplote sa U cevima, mora se posebno obratiti pažnja na smer savijanja cevi, jer broj prolaza zavisi od rasporeda U cevi u odnosu na front struje, slika Sl. 1.33, prema [1]. Za slučaj a-c na slici, broj prolaza je 2 za oba fluida, što se vidi ako razvijemo U cev u smeru savijanja. U slučaju b-d, oba fluida imaju po 1 prolaz, na osnovu U cevi razvijene u smeru savijanja po istom principu.

Kod dobošastih razmenjivača toplote, sa poprečnim strujanjem, prolaz poprečne dužine se ne smatra brojem prolaza, već promenom pravca cirkulacije, pa fluid u omotaču postiže pun prolaz pri prelazu cele dužine aparata, slika Sl. 1.34.



Sl. 1.34. Broj prolaza fluida u razmenjivačima toplote sa poprečnim strujanjem - primeri

Pločasti razmenjivači toplote, kao dužinu prolaza imaju rastojanje od ulaza do izlaza ploče. Ako se protok fluida deli na veći broj ploča, to ne povećava broj prolaza. Broj prolaza se povećava tek kada ista struja fluida ponovo prođe celu dužinu ploče. Pri većem broju ploča, mogu nastati različite kombinacije broja prolaza i strujnog toka. Topliji i hladniji fluid mogu imati jednak ili različit broj prolaza. Prema toku fluidne struje pločasti razmenjivači mogu biti: suprotnosmerni,



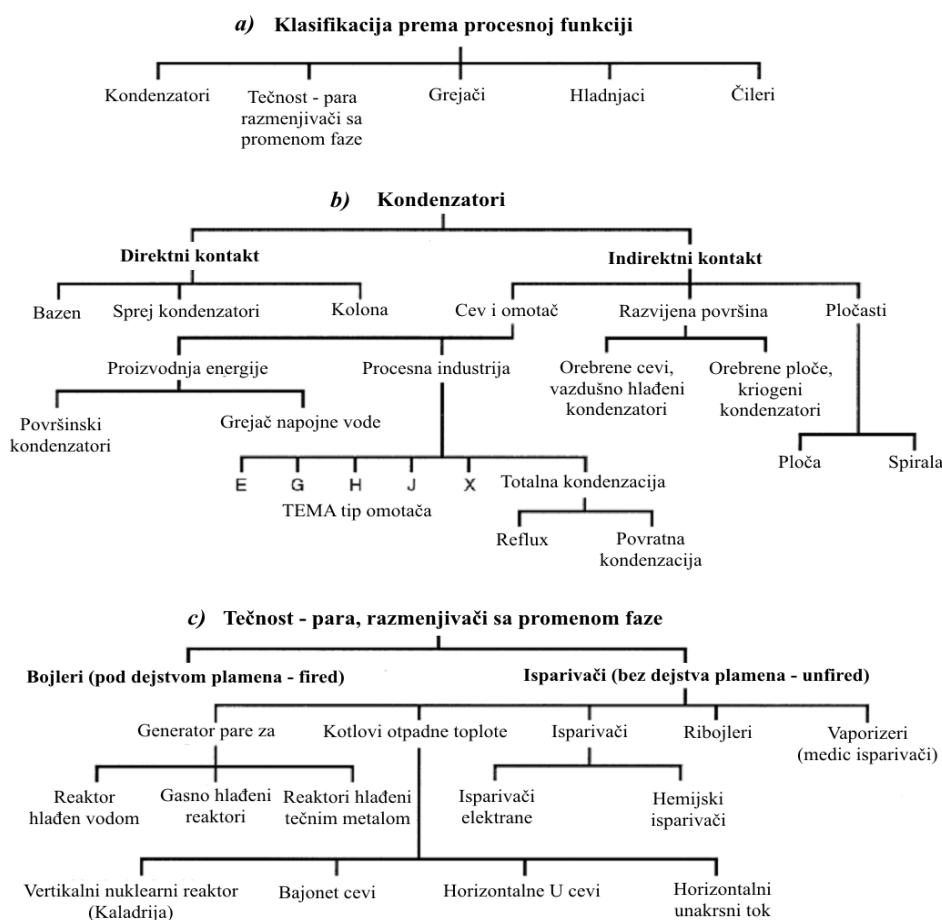
Sl. 1.35. Gore – Tok strujanja fluida u pločastim razmenjivačima toplote, Dole - Šema aranžmana: a) višeprolazno suprotnosmerno strujanje, b) U veza u jednom prolazu, c) Z veza u jednom prolazu, d) Strujanje 2-1, e) Aranžman strujanja 3-1



istosmerni ili kombinovani. Pored toga pločasti razmenjivači koji imaju kolektore na obe krajnje ploče, mogu se aranžirati tako da ulaz i izlaz istog fluida bude na istoj krajnjoj ploči (U veza) ili na suprotnim krajnjim pločama (Z veza). Prednost U veze u odnosu na Z vezu, nastaje u slučaju malog prostora za ugradnju, jer su svi priključci sa iste strane. Na slici Sl. 1.35, prikazan je tok strujanja toplijeg i hladnijeg fluida duž ploča razmenjivača, a takođe šematski su prikazane neke od velikog broja varijanti strujnog aranžmana pločastih razmenjivača toplote.

Klasifikacija prema mehanizmu prenosa toplote podrazumeva podelu prema osnovnim termodinamičkim procesima koji se odvijaju u toku razmene toplote. Osnovni mehanizmi razmene toplote su: kondukcija, konvekcija i zračenje, a stanje fluida može biti tečno, gasovito ili da menja fazu u toku procesa. Moguće su sve kombinacije stanja jednog i drugog fluida.

**TAB. 1.5.** Tabelarni prikaz klasifikacije prema mehanizmu prenosa toplote, Shah [1], a) prema procesu, b) podela kondenzatora c) podela isparivača



Često se naziv razmenjivača povezuje sa nazivom procesa koji se u njemu obavlja, tako na primer grejači i hladnjaci su razmenjivači bez promene faza u kome se procesni fluid greje ili hladi, iako onaj drugi fluid ima suprotnu promenu, on se hladi ili greje. Nazivi grejač i hladnjak se odnose na procesni fluid, pri čemu drugi fluid koji greje ili hladi može menjati fazu. Brojni takvi primeri su grejači na paru (koja kondenzuje) ili hladnjaci vazduha na freon (koji isparava). Tek kad fluid čija promena stanja je potrebna za održavanje procesa, menja fazu dobija naziv kondenzator ili isparivač. Kondenzator je razmenjivač toplote u kome procesni fluid prelazi iz gasovite u tečnu fazu, a u isparivaču obrnuto, procesni fluid iz tečne faze prelazi u gasnu fazu. Pored toga, pri promeni faze bilo kog fluida postoji promena stanja tečne ili gasovite faze, do momenta nastupanja tzv. latentnog stanja, tako da postoje kondenzatori sa podhlađivanjem kondenzata, ili isparivači sa pregrevanjem pare. Postoje i razmenjivači u kojima se vrši hlađenje pare do temperature kondenzacije, kondenzacija i podhlađivanje kondenzata. Zbog promene specifične zapremine i drugih svojstava fluida pri promene faze, menja se intenzitet razmene (opada koeficijent prolaza toplote posle kondenzacije, pri podhlađivanju kondenzata). Može se zaključiti, da nisu preporučljive aplikacije za veće promene temperatura procesnog fluida sa promenom faze u istom aparatu.

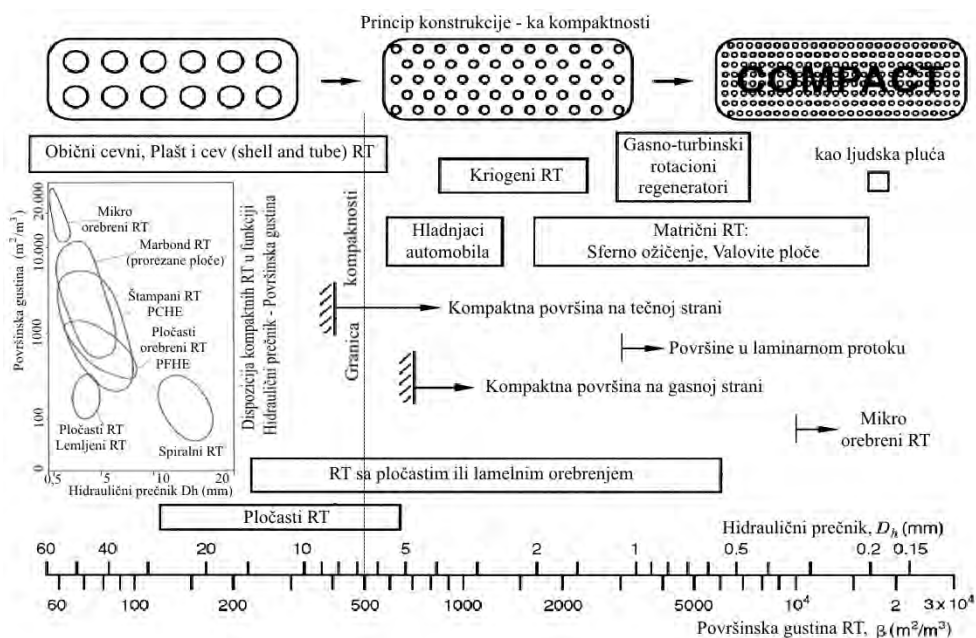
Ako procesni fluid treba da pređe u čvrsto stanje, takav razmenjivač se naziva zamrzivač, a ako treba da pređe iz čvrstog u tečno stanje razmrzivač. Ako je procesni fluid mešavina dve ili više materija i u toku procesa menja fazu sa ciljem povećanja koncentracije jedne od komponenti, onda se takvi aparati nazivaju uparivači i kristalizeri. Kod uparivača se isparavanjem lakše isparljivih tečnosti, koje zovemo rastvaračima, vrši koncentrisanje drugog dela mešavine ili rastvorka, dok u kristalizerima suspenzija tečnog rastvarača i čvrste materije, isparavanjem rastvarača se razdvaja, a čvrsta materija kristališe.

Detaljnija podela razmenjivača toplote prema mehanizmu prenosa toplote uključujući i namenu procesa, prema *Shah* [1], data je u tabeli TAB 1.5.

## 1.2. KOMPAKTNI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

U okviru opšte klasifikacije razmenjivača toplote date u prethodnoj tački, navedena je posebna grupacija kompaktnih razmenjivača, koji mogu pripadati po konstrukciji raznim tipovima, ali svi imaju zajedničku karakteristiku visoku površinsku gustinu, odnosno visoku kompaktnost.

Karakteristika kompaktnosti je dobila na uticaju, porastom svesti o značaju energetske efikasnosti, tako da je došlo do snažnog unapređenja postojećih i razvoja novih tipova kompaktnih razmenjivača toplote. Dobošasti razmenjivači mogu donekle podići kompaktnost konstrukcije upotrebom cevi manjih prečnika, ali kompaktnost definitivno nije njihova prednost, što ne umanjuje njihov značaj, što govori i podatak da se kompaktni razmenjivači upoređuju sa dobošastim, kao sigurnim dokazom da je postignuto poboljšanje.



Sl. 1.36. Dispozicija i gradacija razmenjivača toplote prema kompaktnosti

Spektar pozicije konstrukcija više tipova RT prikazan je na slici Sl.1.36, na bazi Shah [1]. Na dnu slike, date su dve skale: kompaktnost razmenjivača toplote (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) i hidraulični prečnik  $D_h$ , (mm), koji idu u suprotnim smerovima, odnosno porastom kompaktnosti opada hidraulički prečnik i obrnuto. Dispozicija više grupacija kompaktnih RT u zavisnosti od navedenih parametara ubačena je u istu sliku na osnovu dijagrama iz poglavlja Ch4 Procesa intezifikacije od Reay [36].

Područje primene kompaktnih razmenjivača je široko, naročito u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, industriji nafte i gasa, tekstila, hrane i pića, avio industriji, transportu i brodogradnji, kao i u energetici i rashladnim postrojenjima.

Osnovni benefiti koji se postižu primenom kompaktnih razmenjivača toplote u odnosu na standardna rešenja su:

- Poboljšana toplotna efikasnost, temperaturno približenje i termička efektivnost
- Manji gabarit i težina za dati kapacitet
- Niži troškovi montaže (u većini slučajeva)
- Mogućnost višestrujnih i višeprolaznih konfiguracija
- Pouzdana kontrola temperature
- Ušteda energije pogona
- Smanjenjem gabarita dobija se ušteda u prostoru

U probleme ili nedostatke kompaktnih razmenjivača se ubrajaju:

- Nerešen ili nedovoljno objašnjen problem zaprljanja
- Nepostojanje svesti i navika o upotrebi ovih aparata
- Konzervativizam u primeni inovativnih rešenja
- Nedostatak standarda

Postoji delimično neslaganje vodećih autora o granici (koja je inače orjentaciona) kada se neki aparat može smatrati kompaktnim, što nema suštinski značaj, jer energetska efikasnost se može podići i drugim faktorima a ne samo kompaktnošću konstrukcije. Prema *Shah* [1] granica kompaktnosti nastupa pri zapreminskoj gustini od  $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , dok prema profesoru *Hans Miler-Štajnhagenu* [30] ta granica odnosi se isključivo na gasnu stranu razmenjivača gas-tečnost. Kao referentnu meru kompaktnosti, on predlaže sledeću klasifikaciju (već pomenuto).

Fluidi: tečnost-tečnost                      kompaktnost  $\geq 200 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Fluidi: gas-tečnost                              kompaktnost na strani gasa  $\geq 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Fluidi: gas-gas                                    kompaktnost  $\geq 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$

U površinu razmene toplote, uzima se pored osnovne površine koja razdvaja fluide i takozvana sekundarna površina na strani orebrenja.

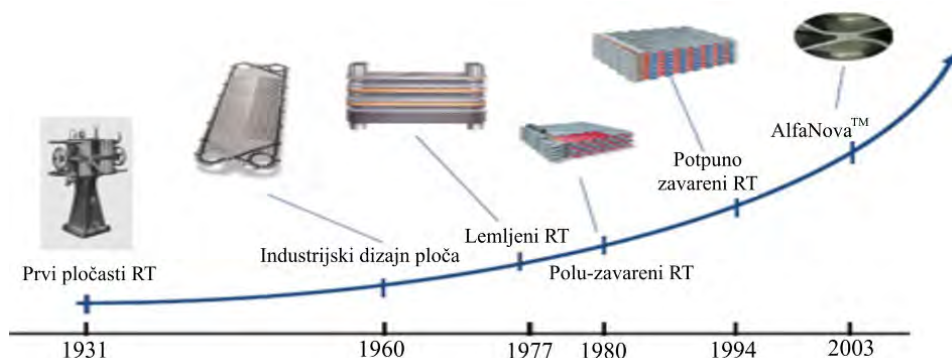
Kompaktnost aparata sama po sebi ne predstavlja ništa, ako se ne mogu utvrditi ostale prednosti, na osnovu poznatog odnosa kompaktnosti prema referentnom razmenjivaču toplote. Procena kako se menjaju važni parametri razmenjivača toplote usled promene kompaktnosti se naziva skaliranje razmenjivača, *Hesselgreaves* [26]. Skaliranje se spovodi postupno od zadatih performansi ka proračunskim, da bi krajnji rezultat bio odnos toplotnih snaga i pada pritiska, kompaktnog i referentnog razmenjivača u funkciji njihovog geometrijskog odnosa (najčešće je to odnos hidrauličnih prečnika), kojom se potvrđuje porast toplotne snage sa padom geometrijskog odnosa, ali takođe raste i pad pritiska. Detaljnija analiza skaliranja može se naći u navedenoj literaturi, a za razmatranje u ovoj knjizi od značaja su praktični rezultati u primeni kompaktnih razmenjivača. Takođe treba istaći, da je referentni razmenjivač toplote dobošasti razmenjivač, kojim se potvrđuje njegova pouzdanost u hijerarhiji ove opreme.

Kompaktni razmenjivači toplote se mogu koristiti i za fluide sa i bez promene faze sa jedne ili obe strane površine razmene. Broj tipova kompaktnih razmenjivača nije definitivan (dopunjava se), u ovom trenutku su obuhvaćeni [30]:

- Pločasti razmenjivači toplote (sa većim brojem podtipova)
- Pločasti orebreni razmenjivači toplote
- Spiralni razmenjivači toplote
- Štampani razmenjivači toplote
- Pločasti razmenjivači toplote u dobošu
- Polimerni razmenjivači toplote

**TAB 1.6** Tabelarni prikaz primene kompaktnih RT, prema aplikacijama [30]

Sektor - Aplikacija	Tip razmenjivača toplote	Sektor - Aplikacija	Tip razmenjivača toplote
Hemija i petrohemija	Rastavljivi pločasti Lemljeni pločasti Zavareni pločasti Spiralni Orebreni pločasti Štampani Kompaktni dobošasti Kompaktni u omotaču	Postrojenja nafte i gasa	Rastavljivi pločasti Lemljeni pločasti Zavareni pločasti Orebreni pločasti Štampani
	Kriogene aplikacije	Prevozna sredstva	Rastavljivi pločasti Lemljeni pločasti Zavareni pločasti Kompaktni dobošasti
Hrana i piće	Rastavljivi pločasti Lemljeni pločasti Zavareni pločasti Spiralni Kompaktni u omotaču	Rashladna postrojenja	Rastavljivi pločasti Lemljeni pločasti Orebreni pločasti Štampani
	Papir i slično	Kompresori vazduha	Rastavljivi pločasti Lemljeni pločasti
Tekstil i konfekcija	Rastavljivi pločasti	Mehanička rekompresija pare	Rastavljivi pločasti Lemljeni pločasti



**Sl. 1.37.** Dijagram rasta prodaje pločastih razmenjivača ALFA LAVAL, Švedska

Iskustvo u korišćenju kompaktnih razmenjivača toplote za dalji njihov razvoj je od velike važnosti, mnogi novi tipovi su nastali rešavanjem netipičnog tehnološkog problema. U tabeli TAB. 1.6, prikazani su tipovi kompaktnih razmenjivača toplote, koji nalaze primenu u velikom broju različitih aplikacija, na bazi - *Kompaktni razmenjivači toplote - inženjerske smernice u Engleskoj* [30].

Kompaktni razmenjivači, pokazuju veliku dinamičnost u razvoju, lako se prilagođavaju novim tehnologijama i njihova prodaja raste sa pojavom novih tipova, što pokazuje dijagram (Sl. 1.37) prodaje pločastih razmenjivača, globalnog proizvođača *Alfa Laval* iz Švedske. Od prvobitnih pločastih razmenjivača (PHE), iz 1931. god. do njihovog industrijskog redizajna prošlo je 30. godina, da bi se razvoj ubrzao pojavom lemljenih, poluzavarenih i potpuno zavarenih tipova do fuziono spojenih (Alfa Nova) uporedo sa razvojem potrošačkog društva.

**TAB 1.7** Tipovi kompaktnih RT prema limitirajućim parametrima [30].

Performanse (Osobine)	Tip kompaktnog razmenjivača toplote						
	Rastavljivi pločasti RT	Delimično zavarene ploče	Potpuno zavareni ploče (AlfaRex)	Lemljeni pločasti RT	Baveks hibridni pločasti RT	Platular pločasti RT	Kompa- blok pločasti RT
Kompaktnost (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) <sup>0</sup>	→ 200	→ 200	→ 200	→ 200	200-300	→ 200	→ 300
Tip strujanja <sup>1</sup>	tečn.-tečn. gas-tečn. dve faze	gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	gas-gas gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	tečn.-tečn. dve faze	gas-gas gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	gas-gas gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	tečn.-tečn. dve faze
Materijal <sup>3</sup>	s/s, Ti, inkoloid, hasteloid, grafit, polimer	s/s, Ti, inkoloid, hasteloid	s/s, Ti, Ni-legure	s/s	s/s, Ni, Cu, Ti, spec. čelik	s/s, Ti, hasteloid, Ni-legure	s/s, Ti, inkoloid
Temperaturni opseg (°C)	-25 do 175 spec. -35 do 200	-35 do 200	-50 do 650	Cu lem -195 do 220 Ni lem → 400	-200 do 900	-180 do 700	→ 300
Maksimalni pritisak (bar) <sup>2</sup>	normal 25 spec 40	25	40	Cu lem 30 Ni lem 16	60	40	32
Fluidi Ograničenja	nema ogrančenja za gas	malo, neki tip zahteva čist fluid	malo, neki tip zahteva čist fluid	mora biti kompatab. sa lemom	malo	malo	malo
Metode čišćenja	mehan <sup>14</sup> hemijsko	mehan <sup>4,14</sup> hemijsko <sup>6</sup>	hemijsko	hemijsko <sup>5</sup>	mehan <sup>11,9</sup> hemijsko	mehan <sup>12,14</sup>	mehan <sup>14</sup>
Otpornost na koroziju	dobra <sup>7</sup>	dobra <sup>7</sup>	odlična	dobra <sup>8</sup>	dobra	dobra	dobra
Otpornost na koroziju	dobra <sup>7</sup>	dobra <sup>7</sup>	odlična	dobra <sup>8</sup>	dobra	dobra	dobra
Mogući većeg broja struja (multi-stream)	da <sup>9</sup>	ne	ne	ne	da u principu	da <sup>13</sup>	obično ne
Mogući veći broj prolaza (multi-pass)	da	da	da	ne <sup>10</sup>	da	da	da

TAB 1.7 - nastavak

Performanse Osobine	Tip kompaktnog razmenjivača toplote						
	Pekinoks pločasti RT	Spiralni RT	Lemljeni orebreni pločasti RT	Difuziono spojeni orebreni RT	Štampani RT	RT od polimera	RT ploča u omotaču
Kompaktnost (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) <sup>0</sup>	→ 300	→ 200	800-1500	700-800	200-5000	→ 275	→ 200
Tip strujanja <sup>1</sup>	gas-tečn. dve faze	gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	gas-gas gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	gas-gas gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	gas-gas gas-tečn. tečn.-tečn. dve faze	tečn.-tečn.	tečn.-tečn.
Materijal <sup>3</sup>	s/s, Ti, hasteloid, inkonel	c/s, s/s, Ti, inkoloid, hasteloid,	Al, s/s, Ti, Ni-legure	Ti, s/s, Ni	s/s, Ni, Ni-legure, Ti	teflon	s/s, Ti, (omotač i od c/s) <sup>15</sup>
Temperaturni opseg (°C)	-200 do 700	→ 300 spec →850	Al -270 do 200 s/s kriogen do → 650	→ 400	-200 do 900	→ 200	-200 do 900
Maksimalni pritisak (bar) <sup>2</sup>	300	30	120	200	500	11	100
Fluidi Ograničenja	malo	malo	nisko zaprljanje mnogo ogranič. kod Al	nisko zaprljanje	nisko zaprljanje	malo	malo
Metode čišćenja	mehan <sup>16, 14</sup>	mehan <sup>14</sup>	hemijsko	hemijsko <sup>5</sup>	hemijsko	pranje vodom	mehan <sup>16, 14</sup> hemijsko <sup>17</sup>
Otpornost na koroziju	dobra	dobra	dobra	odlična	odlična	odlična	dobra
Mogući većeg broja struja (multi-stream)	da <sup>9</sup>	ne	da	da	da	ne	ne
Mogući veći broj prolaza (multi-pass)	da	da	da	da	da	ne	da

Napomena uz tabelu

→ = do tog iznosa, s/s = nerđajući čelik, Ti = titan, Ni = nikl, Al = aluminijum, Cu = bakar, c/s = ugljenični čelik  
<sup>0</sup>) Površina obuhvata i sekundarni površinu (kao što su rebra), <sup>1</sup>) Dve faze obuhvataju isparavanje i kondenzaciju  
<sup>2</sup>) Maksimalni pritisak sposobnost RT da ga izdrži, <sup>3</sup>) Posebne legure često u upotrebi, izdržljive na radnoj temperaturi, ne i pritisku / otpornost na koroziju, <sup>4</sup>) Na zaptivnoj strani, <sup>5</sup>) Kompatibilno sa bakarnom lemom,  
<sup>6</sup> Na zavarenoj strani, <sup>7</sup>) Funkcija zaptivača, kao i materijala ploče, <sup>8</sup>) Funkcija lema, kao i materijala ploče,  
<sup>9</sup> Nije uobičajeno, <sup>10</sup>) Nije u jednoj jedinici, <sup>11</sup>) Na strani cevi, <sup>12</sup>) Samo za približnički priključak, inače hemijsko čišćenje, <sup>13</sup>) Maksimalno pet fluida, <sup>14</sup>) Moguća demontaža, <sup>15</sup>) Omotač može biti od polimera,  
<sup>16</sup>) Na strani omotača, <sup>17</sup>) Na strani ploče ili cevi, <sup>18</sup>) Pre svega funkcija materijala, a ne tipa razmenjivača.

Kompaktni razmenjivači toplote su su prvobitno rešavali pojedinačne tehnološke probleme, a zatim su zahvaljujući dobrim performansama primenjivani i u drugim procesima, ali nisu dostigli univerzalnost primene cevni razmenjivača. Kao što postoji potreba komparacije između kompaktnih i cevni razmenjivača, i između samih kompaktnih razmenjivača je neophodno upoređenje, radi utvrđivanja prednosti izbora za predmetni proces. U tabeli TAB. 1.7 paralelno su prikazane limitirajuće granice performansi glavnih tipova kompaktnih razmenjivača [30].

### 1.2.1. Pločasti razmenjivači toplote

Površina razmene toplote kod ovih razmenjivača je u osnovi ravna ploča, sa raznim mogućnostima modifikacije oblika i dodataka sa jedne ili obe strane ploče. Kod njih dolazi do izražaja geometrijska mogućnost paralelnog slaganja ploča, sa konstatnim odstojanjem, na osnovu čega se dobija najveća površina kontakta po jedinici zapremine. Kao po opštem pravilu, svako dobro ima svoju lošu stranu, tako i ovde, povećanje kompaktnosti ide na štetu porasta pritiska pri cirkulaciji fluida, kao i slaba mesta na velikom broju mesta zaptivanja. Držanje ploča odvojeno od okoline se postiže ramom ili okvirom, koji istovremeno obezbeđuje i potreban pritisak zaptivanja. Dijametralno suprotni zahtevi, rastavljivost i jednostavno dodavanje novih ploča i što manja dužina zaptivanja, razvile su dve grupacije ovih razmenjivača: rastavljivi sa zaptivanjem i nerastavljivi bez zaptivanja, sa puno modaliteta između ove dve krajnosti.

Modifikacija ploče kao površine razmene toplote, kod ove grupacije ide u pravcu deformacije po površini, radi stvaranja kanala za ostvarenje turbulentnog strujanja fluida, ali bez promene planarnosti ili orebrenja (osim u funkciji povećanja krutosti paketa). Modeli sa promenom planarnosti (spiralni razmenjivači toplote) ili razuđenosti površina su odvojeni u posebne tipove.

Materijal ploče ovih razmenjivača je uglavnom nerđajući metal, prilagođen većini procesa u kome se koristi, još više tehnologiji izrade razmenjivača, imajući u vidu velike površine razmene i velike serije proizvoda. Upotreba nerđajućih metala je opravdana sa stanovišta smanjenja uticaja korozije, koja je velika opasnost od brzog začepjenja uzanih kanala između ploča.

Nastanak novih tipova pločastih razmenjivača sa boljim performansama, u odnosima velike konkurencije i borbe za profit, doveli su do toga, da su skoro sve novije konstrukcije zaštićene licencama, odnosno da su vlasništvo velikih korporacija, što otežava stvaranje jedinstvenog koncepta proračuna i izbora.

Dominantna konstruktivna varijanta ovih razmenjivača, sastoji se od niza valovitih ploča postavljenih u ramu ili okviru. Geometrija ploča je najčešće tipizirana u nekoliko veličina, koje su prilagođene opremi masovne proizvodnje, što je omogućilo nisku cenu ploča i dominaciju nekoliko globalnih proizvođača. Pomoću veličine ploče i broja ploča u sklopu omogućen je veliki broj različitih aplikacija. Prema procesnim specifičnostima u okviru glavne varijante razvile su se podvarijante i nove konstrukcije visoke kompaktnosti. Glavni problem pločastih razmenjivača toplote (PHE) je da nisu pogodni za rad na vrlo visokim pritiscima, temperaturama, ili visokim razlikama pritiska i temperature. Pored toga, zavarene ploče imaju problem sa starenjem u toku vremena. Osnovni tipovi, prema [30] su:

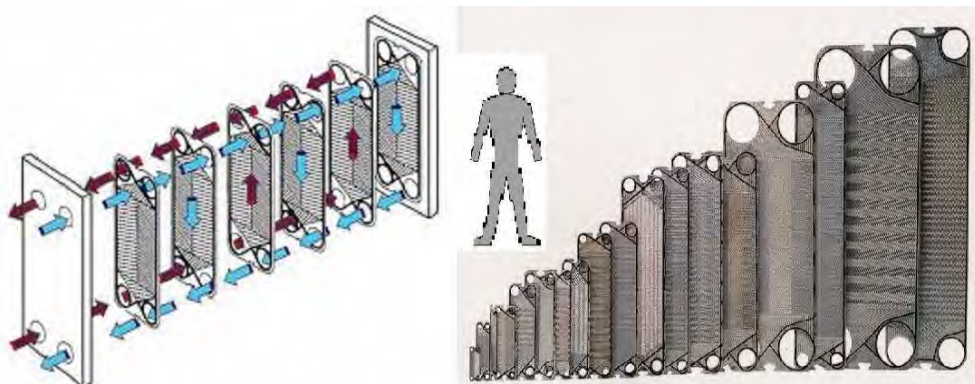
- Rastavljivi ili razmenjivači sa zaptivanjem ploča
- Delimično zavareni pločasti razmenjivači toplote
- Lemljeni pločasti razmenjivači toplote
- Baveks, hibridni pločasti razmenjivači toplote



- Platular, pločasti razmenjivači toplote
- Kompablok, pločasti razmenjivači toplote
- Pekinoks, pločasti razmenjivači toplote
- Alfa-Reks, pločasti razmenjivači toplote

### a) Rastavljivi pločasti razmenjivači toplote

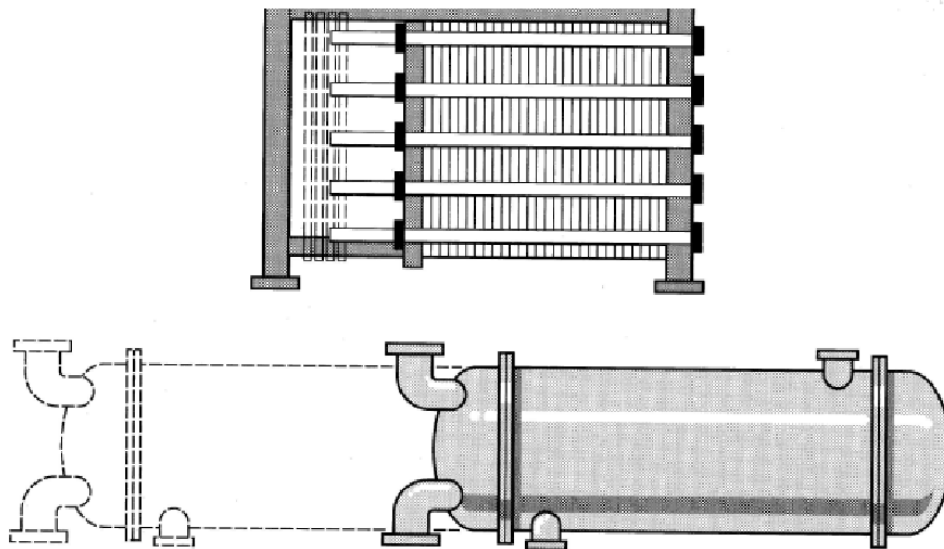
Osnovni princip strujanja i set razmenjivačkih ploča prikazan je na slici Sl. 1.38. Ploče su dizajnirane sa obe strane, tako da imaju veliki broj kanala različitih profila, preko kojih cirkulišu radni fluidi, pri čemu topliji fluid predaje toplotu ploči, od koje je prima hladniji fluid. Mali profili kanala ploče izazivaju turbulenciju i veće brzine strujanja, što sprečava nastanak mesta sa slabom cirkulacijom i smanjuje sklonost ka zaprljanju. Ploče se redom pakuju tako da se svaka sledeća ploča sa prethodnom zatvara preko zaptivača. Potreban pritisak zaptivanja održavaju masivne krajnje ploče, od kojih je jedna fiksna, a druga demontažna, koja omogućava demontažu, čišćenje, zamenu zaptivača i ploča ili promenu broja ploča. Broj ploča može biti veliki, ali je ograničen, tako da za razliku od dobošastih razmenjivača toplote, toplotna snaga se ostvaruje u opsegu razlika koje daje jedna ploča. Materijal ploča je najčešće nerđajući čelik (AISI 304 ili 316), titanium, inkolaj ili hastelaj. Pojedinačna izrada ploča je veoma skupa, zbog učešća specijalnih alata i presa, ali pri masovnoj proizvodnji cena ploča može biti veoma konkurentna. U slučaju korozije, ili usled dejstva agresivnih fluida, ploče se mogu izraditi i od nemetala, kao što su grafit ili polimeri. Krajnje ploče su



Sl. 1.38. *Levo, šematski prikaz rastavljivih pločastih razmenjivača toplote, desno, set tipiziranih ploča po veličini APV, an SPX brand, SAD*

obično od čelika, koji se može prema potrebi premazati radi zaštite od dejstva fluida, a u prehrambenoj ili farmaceutskoj industriji krajnje ploče su od nerđajućeg čelika. Zaptivači su kritična pozicija u konstrukciji PHE, zbog svojstava prema dejstvu temperature, pritiska i agresije fluida, kao i otpornosti na starenje tokom vremena. Obično se rade od nitrilne gume, hipalona, vitona, neoprena ili EPDM.

Nitrilna guma je sintetički kaučuk (rezidentan od  $-40$  do  $108^{\circ}\text{C}$ ), hipalon (naziv prema *DuPont*) je hlorosulfatni polietilen vrlo sličan sintetičkom kaučuku, viton (*DuPont* naziv za fluoroelastomer) je polimer vrlo sličan gumi, neopren je sintetička guma nastala polimerizacijom hloroprema, a EPDM (etilen, propilen, dien monomer) je sintetička guma izdržljiva u opsegu  $-50$  do  $150^{\circ}\text{C}$ .



**Sl. 1.39.** Komparacija gabarita rastavljivih pločastih razmenjivača (gore) i dobošastih razmenjivača (dole), za istu snagu razmene toplote

Granice i oblast upotrebljivosti ovih razmenjivača su:

Raspon radnih temperatura	od $-35^{\circ}\text{C}$ do $200^{\circ}\text{C}$ (u praksi i niže)
Najviši pritisci	projektni 25 bara, ispitni 40 bara (u praksi i niže)
Površina razmene po ploči	u rasponu od 0,02 do $4,45\text{ m}^2$
Maksimalni protok fluida	$3500\text{ m}^3/\text{h}$ standardni, $5000\text{ m}^3/\text{h}$ dupli priključak
Temperaturno približenje	nisko, može biti do $1^{\circ}\text{C}$ (glavna prednost).

Otpori zaprljanja se uzimaju 25% od onih za dobošaste razmenjivače, *HTRI* [18], Ch-B.3.5. Za permanentno zaprljanje potrebno je povećati razmak između ploča (do 13 mm). Glavne aplikacije primene rastavljivih pločastih razmenjivača toplote su: grejanje i hlađenje tečnosti, kondenzacija i isparavanje, u rashladnim instalacijama i toplotnim pumpama. Pogodni su hemijskoj i industriji hrane gde je potrebno često čišćenje i pranje, a nedostatak ako je neophodna i zamena zaptivača.

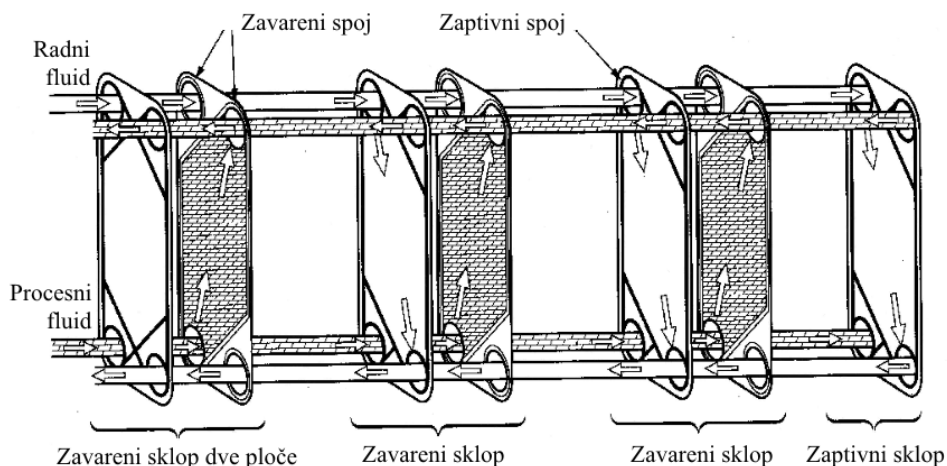
Komparacija sa dobošastim razmenjivačima toplote

Prema uporednim ispitivanjima, za toplotnu snagu koja zahteva pločasti razmenjivač toplote površine  $200\text{ m}^2$ , gabarita 3 m dužine 2 m visine i 1 m širine, težine prazan/napunjen vodom  $3,3/4$  tone, potreban je dobošasti razmenjivač

površine razmene oko 600 m<sup>2</sup> površine, gabarita  $\Phi$  1,8 m dužine 5 m, koji ima težinu 6/11 tona, slika Sl. 1.39. Za aplikacije tečnost-tečnost, potrebna površina razmene može se uzeti da je oko 25% ekvivalentne površine dobošastih aparata.

### b) Delimično zavareni pločasti razmenjivači toplote

Gledano spolja, delimično zavareni pločasti razmenjivači toplote izgledaju potpuno isto kao rastavljivi pločasti razmenjivači, međutim, razlika je u tome što su paketi po dve ploče zavarene, slika Sl. 1.40. Prednost zavarivanja u parovima je da, osim što ima manje zaptivanja, u zavareni sklop može se smestiti opasniji fluid.



Sl. 1.40. Šematski prikaz delimično zavarenog pločastog razmenjivača toplote

Zavarivanje ploča se obično izvodi laserski, a zaptivači su od visoko otpornog elastomera. Granice upotrebljivosti i komparacija prema dobošastim razmenjivačima toplote je ista kao kod rastavljivih aparata, a oblast primene se proširuje na agresivne medije. Često se pojavljuju kao isparavači i kondenzatori rashladnih fluida kao što su amonijak i HCFCs (brend *DuPont* - freoni).

### c) Lemljeni pločasti razmenjivači toplote

Razlika između lemljenih (BPHE) i zavarenih pločastih razmenjivača je u tehnologiji spajanja ploča, one se kod lemljenih leme, pa se zaptivači potpuno eliminišu, a stezne ploče mogu biti izostavljene, slika Sl. 1.41. Glavna primena lemljenih razmenjivača je u rashladnoj tehnici i toplotnim pumpama, za isparivače i kondenzatore (hladene vodom), kapaciteta do 600 kW. Pri korišćenju bakarnog lema granica primene je temperatura do 225°C i pritisak do 30 bara, a sa lemom od nikla granica primene je do 400°C i 16 bara. Zbog niske cene, pogodan je i za indirektno sisteme daljinskog grejanja. Težina lemljenog pločastog razmenjivača je oko 20-30% težine dobošastog razmenjivača toplote za iste uslove primene.

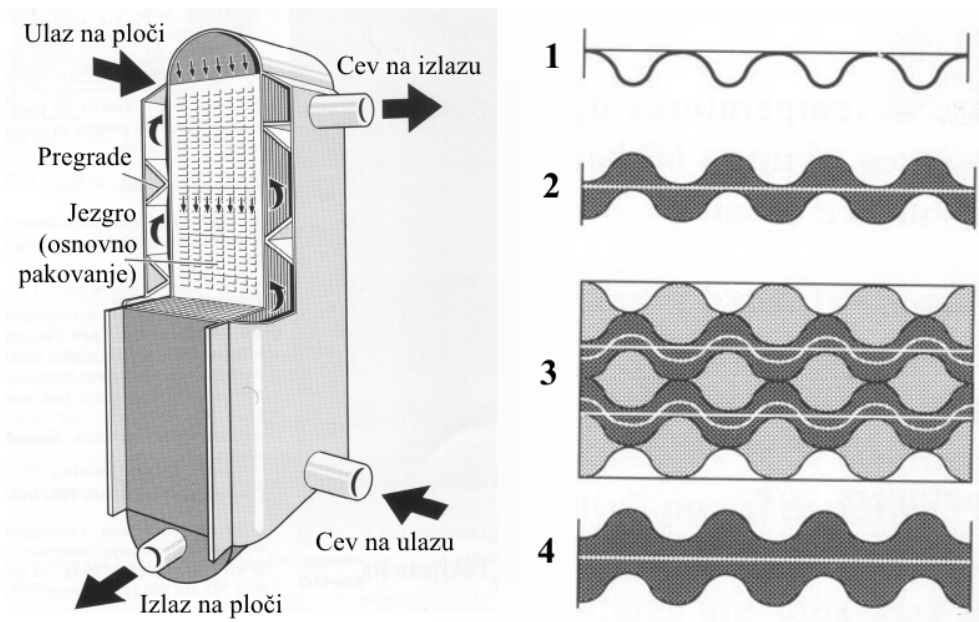


Sl. 1.41. Lemljeni BPHE: ALFA LAVAL

Pločasti RT imaju veoma zavidan globalni razvoj naročito u sledećim aspektima:

- Zbog niže cene tendencija je lemljenje
- Dubina valovitih ploča od 3-5 mm se smanjuje na vrednost 2-2,5 mm
- Radno-tehnički parametri se povećavaju  
Radna temperatura od 260°C do 1000°C,  
Radni pritisak od od 2,5 MPa do 8,5 MPa,  
Prolaz toplote od 2000-12000 W/m<sup>2</sup>K,  
Površina razmene toplote do 10000 m<sup>2</sup>.
- Rast prodaje je najveći, gde već imaju oko 10% tržišta RT. U nekim oblastima izrazito dominiraju kao što su hladnjaci autoindustrije, vazduhoplova i elektronike, ali su znatno slabiji u procesnoj industriji, prema Klemešu iz 2016. god. [35].

#### d) Baveks (Bavex), hibridno zavareni pločasti razmenjivači toplote

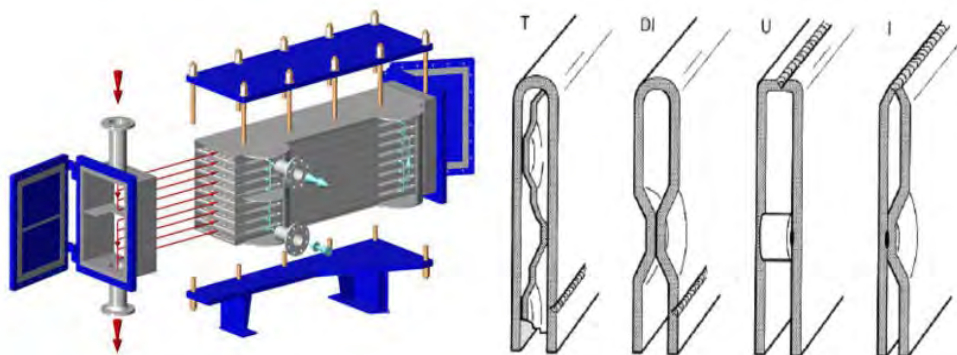


Sl. 1.42. Baveks zavareni pločasti razmenjivači toplote, desno postupak izrade jezgra, 1. presovane ploče, 2. formiranje podsklopa bočnih kanala, zavarivanjem dve ploče, 3. formiranje jezgra, sa uzdužnim cevima spajanjem više podsklopova, 4. podsklop sa više razmaknutim pločama.

Ovaj tip pločastog razmenjivača vodi poreklo iz Velike Britanije, a naziv je dobio po licenci iz Bavarske (*Anlagenbau GmbH*). Zanimljivo je, da oni nisu nastali kao alternativa dobošastim razmenjivačima toplote, već kao potreba procesa za visokim pritiscima i širokim temperaturnim opsegom. Unutrašnja geometrija Baveks razmenjivača toplote prikazana je na slici Sl. 1.42, u delimičnom preseku i u detaljima izrade jezgra ploča. Ploče su vertikalne, širine 350 mm, a dužina može biti do 16 m. Broj ploča može biti različit, zavisno od konstrukcije. Strujanje je unakrsno, sa većim brojem prolaza fluida koji struji bočno na jezgro, a podužno struji fluid u jednom prolazu, a novije konstrukcije (*APV*, Danska) mogu imati veći broj podužnih prolaza. Postupak formiranja pločastog jezgra objašnjeno je na slici. Debljina lima ploče kreće se 0,2 do 1 mm, a efektivni prečnik formiranih cevi iznosi od 6,0 do 11,1 mm, u zavisnosti od proračunskog pritiska. Razmak između ploča može da bude različit, u zavisnosti od postupka čišćenja. Ove aplikacije mogu imati kompaktnost do  $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (*APV*), a kompaktnost se smanjuje pri povećanju razmaka ploča za prljave aplikacije. Konstrukcija omotača jezgra može biti zavarena, ili demontažna ako je potrebno detaljno čišćenje jezgra.

Fluid koji struji kroz cevi može imati pritiske do 60 bara i temperature od  $-200^\circ\text{C}$  do  $+900^\circ\text{C}$ . Ploče mogu biti izrađene od širokog spektra materijala, pod uslovom da se mogu hladno deformisati i hibridno zavarivati (hibridno zavarivanje je kombinacija elektro-lučnog i laserskog zavarivanja velike produktivnosti). Tipično područje primene je u rekuperaciji toplote otpadnih gasova, kriogene i aplikacije sa morskom vodom. U odnosu na adekvatne dobošaste razmenjivače zauzimaju oko 40% zapremine doboša, a koeficijent prelaza toplote za razmenu tečnost-tečnost je visok i iznosi oko  $5000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ .

#### e) Platular (Platular), pločasti razmenjivači toplote



Sl. 1.43. Platular pločasti razmenjivač toplote i tipovi ploča, *BARRIQUAND* Francuska,

Platular je licencni naziv pločastih razmenjivača toplote, proizvedenih od firme *Barriquand* iz Francuske, koji integriše čvrstoću dobošastih razmenjivača i visoke koeficijente prenosa toplote pločastih razmenjivača toplote. Ploče su od lima veće

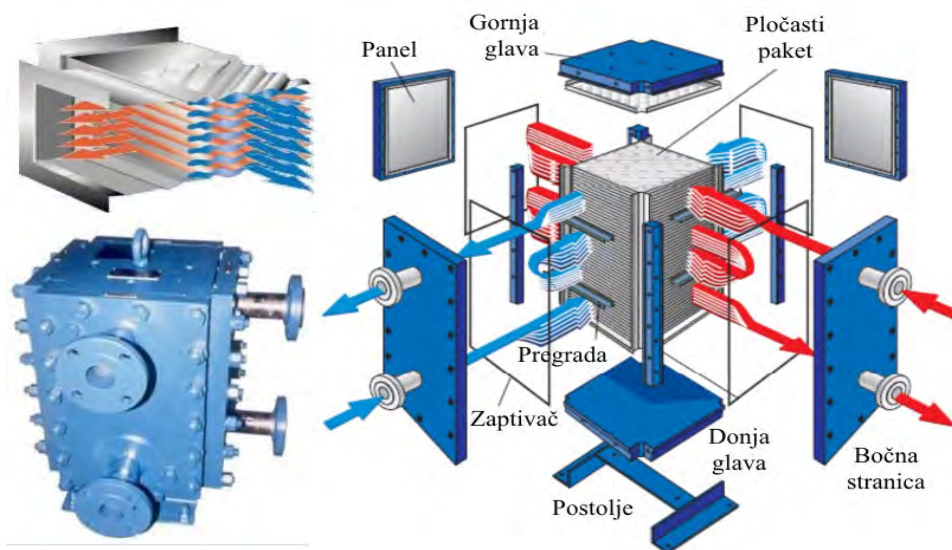


debljine, zavarene izvedbe, tako da nema zaptivanja. Postoje dve varijante dizajna, osnovni X (bez krajnjih ploča kao omotača) i S tip (sa omotačem). Ploče mogu biti različite geometrije, slika Sl. 1.43, koje formiraju različite konfiguracije. Tip T je savijena i podužno zavarena ploča u koju se ubacuje vrtložnik, što je preporučljivo za gasove i viskozne fluide. Ako se jedna stranica pravougaonog kanala po sredini tačkasto zavaruje dobija se tip I, koji je pogodan za visoke pritiske. Kanal DI je sličan, ali su obe ploče deformisane po sredini, što povećava razmak između njih. Još veći razmak se ostvaruje u konfiguracijom U, gde su ploče razdvojene stubicem zavarenim sa obe strane. Ova konfiguracija je pogodna za visoki pritisak fluida, ali i za mehaničko čišćenje.

Ovi razmenjivači toplote se mogu koristiti na temperaturama  $-180^{\circ}\text{C}$  do  $700^{\circ}\text{C}$  i na pritiscima od potpunog vakuma do 40 bara. Površina prenosa toplote jedne jedinice može biti do  $1500\text{ m}^2$ . Aplikacije razmene mogu biti gas-gas, gas-tečnost, tečnost-tečnost, kao i kondenzatori ili isparivači. Tipična primena je u hemijskoj industriji, industriji hrane i pića, industriji papira i cementa. Prema podacima proizvođača, koeficijent prolaza toplote je 2 do 4 puta veći a zapremina manja 75 do 90%, od adekvatnih dobošastih razmenjivača toplote.

#### f) Kompablok (*Compabloc*), zavareni pločasti razmenjivači toplote

To je još jedan tip zavarenih pločastih razmenjivača toplote patentiran od proizvođača *Alfa Laval* za potrebe procesne industrije. Sastoji se iz kompaktnog zavarenog jezgra i potpuno demontažnog omotača, slika Sl. 1.44, tako da je moguće čišćenje površina sa strane obadva fluida, a zbog odsustva zaptivača koristi se i na visokim temperaturama fluida i za rad u hemijski agresivnim sredinama.

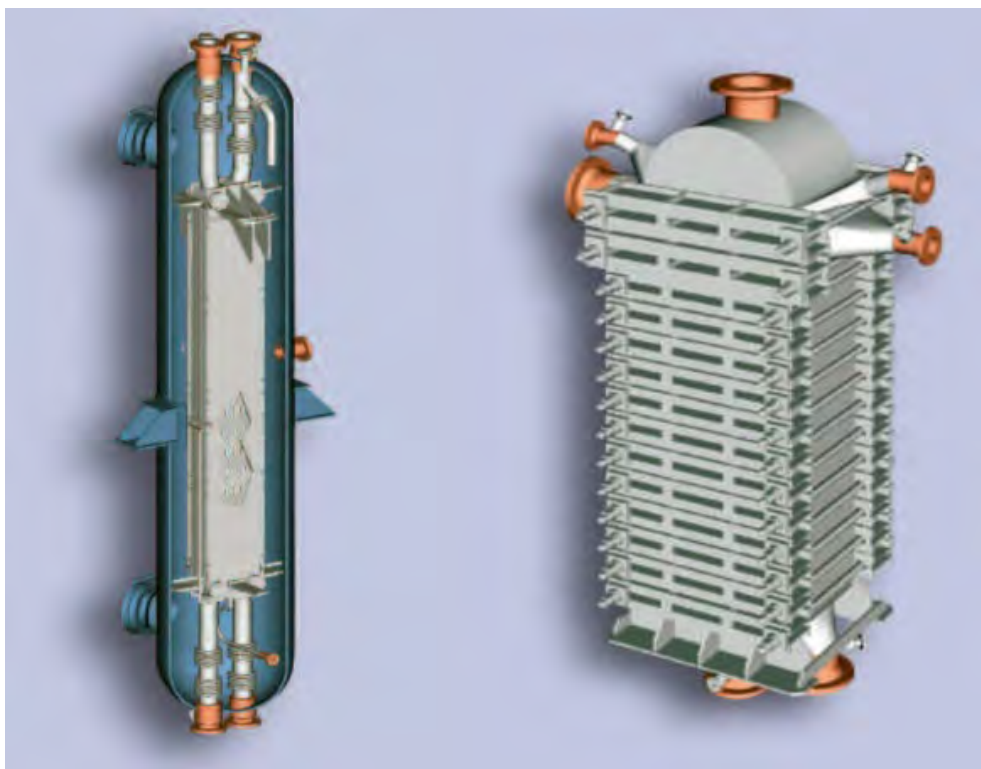


Sl. 1.44. Kompablok zavareni pločasti razmenjivač toplote, levo – spoljašnji izgled i detalj strujanja fluida, desno – prikaz okvira i jezgra, ALFA LAVAL, Švedska

Mogućnosti za optimizaciju procesa su velike, a moguće je ostvarivati veći i različiti broj prolaza fluida u kontaktu, sa ili bez promene faze. Montaža je moguća horizontalno i vertikalno, strujanje je unakrsno, a temperaturno približenje može biti do  $3^{\circ}\text{C}$ . Proizvodi se u više tipiziranih veličina površine razmene od 0,7 do  $840\text{ m}^2$  po modularnoj jedinici, sa karakterističnim razmakom između ploča od 5 mm. Moguća je primena različitih materijala, između ostalih nerđajući čelik, titanium, hasteloid, monel i tantal. Maksimalne temperature mogu biti do  $300^{\circ}\text{C}$  a pritisci od potpunog vakuma do 32 bara. Najčešće površine razmene su od 1,5 do  $300\text{ m}^2$  (koji sadrži 500 ploča) kompaktnosti do  $300\text{ m}^2/\text{m}^3$ . Zbog valovite konfiguracije ploča i turbulentnog strujanja ima tri do pet puta veći ukupni koeficijent prelaza toplote i malu sklonost na zaprljanje u odnosu na dobošaste razmenjivače toplote.

### g) Pekinoks (*Packinox*), zavareni pločasti razmenjivači toplote

Pekinoks pločasti razmenjivač toplote je licencni tip zavarene konstrukcije iz Francuske, sada u vlasništvu *Alfa Laval*. Namena ovih jedinica je prvenstveno u petrohemiji, pri proizvodnji gasa ili za rekuperaciju toplote. Pogodni su za visoke temperature (nekoliko stotina stepeni), ali sa malim temperaturnim razlikama



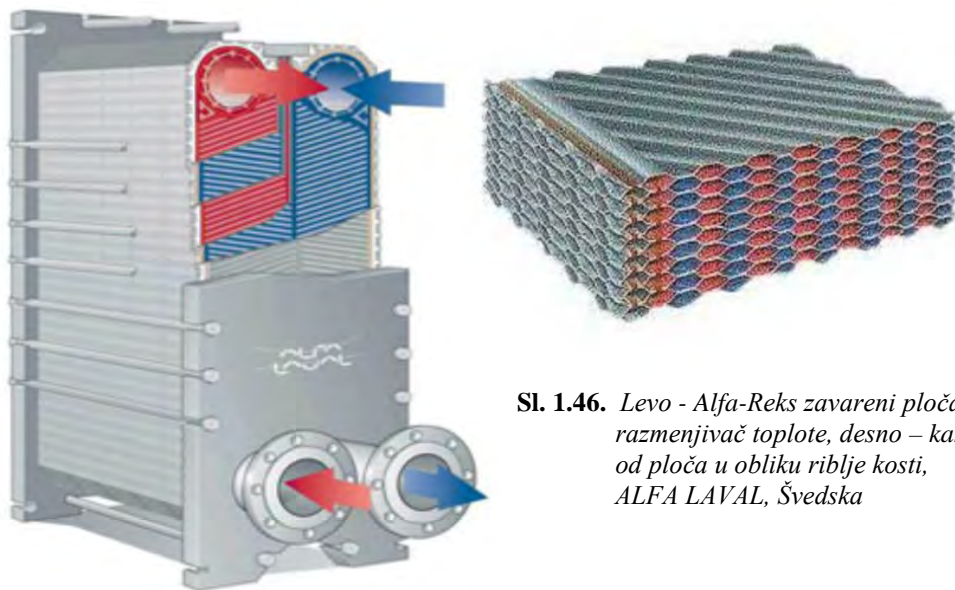
**Sl. 1.45.** Pekinoks zavareni pločasti razmenjivač toplote, levo – u sopstvenom kućištu sa kompenzatorima, desno – pekinoks paket, ALFA LAVAL, Švedska

između fluida. To su veoma efikasani razmenjivači toplote sa veoma velikim površinama za prenos toplote. Pekinoks konstrukcija se sastoji od velikih metalnih ploča, zavarenih u jedinstveni paket koji se potom ubacuje u kućište koje može podneti veće pritiske, slika Sl. 1.45. Ova kombinacija ima izuzetnu toplotnu i hidrauličnu efikasnost karakterističnu za pločaste razmenjivače i izdržljivost za rad na visokim temperaturama i pritiscima kao kod dobošastih razmenjivača toplote.

Postoje dve osnovne konstrukcije sa i bez posude u koju se postavlja pekinoks paket. Ako se paket postavlja u poseban omotač, priključci moraju imati kompenzatore, za prihvatanje termičkih dilatacija. U zavisnosti od fluida mogu se koristiti razni nerđajući materijali. Opseg rada su temperature između  $-200^{\circ}\text{C}$  i  $+700^{\circ}\text{C}$ , a mogu izdržati i velike temperaturne razlike između radnih fluida. Pogodni su za rad na izuzetno visokim pritiscima, do 300 bara u kućištu, a zbog velikog broja spojeva između ploča, može izdržati diferencijalni pritisak između fluida do 60 bara, sa dodatnim rešenjima i do 100 bara. Površina jedne pekinoks jedinice može biti i do  $16.000\text{ m}^2$ . Osnovne aplikacije primene ovih razmenjivača je povrat toplote u industriji hrane, zatim u rafinerijama i u hemijskoj industriji.

#### **h) Alfa-Reks (*Alfa-Rex*), zavareni pločasti razmenjivači toplote**

Alfa-Reks, je takođe verzija zavarenih pločastih razmenjivača, proizvod *Alfa Laval*, sa integrisanim kanalima u ploči u obliku "riblje kosti", koja stvara visoku turbulenciju i povećava toplotnu efikasnost a smanjuje rizik od zaprljanja. Protok fluida je suprotnosmerni, čime se postiže 20% veći prenos toplote od unakrsnog toka kompablok razmenjivača, slika Sl. 1.46. Projektne temperature Alfa-Reks razmenjivača se nalaze u rasponu  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $+350^{\circ}\text{C}$ , a pritisci su do 40



**Sl. 1.46.** *Levo - Alfa-Reks zavareni pločasti razmenjivač toplote, desno – kanali od ploča u obliku riblje kosti, ALFA LAVAL, Švedska*

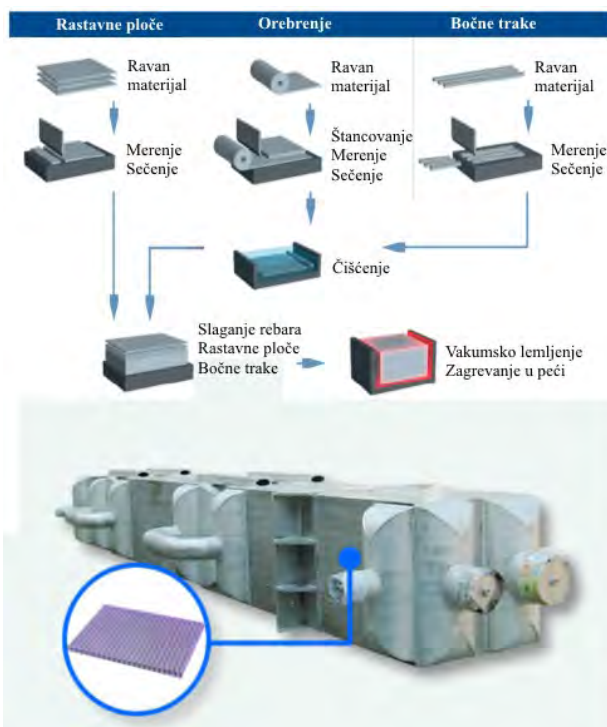


bara, a mogu se ostvariti maksimalni protoci do 800 m<sup>3</sup>/h. Tipične oblasti primene ovih razmenjivača su grejanje i hlađenje sirove nafte svih faza na naftnim platformama, isparavanje NaOH u proizvodnji kaustične sode, u petrohemijskoj industriji i proizvodnji raznih hemikalija, kondenzaciji i isparavanju rashladnog sredstva u toplotnim pumpama, predgrevanje napojne vode u kotlarnicama, daljinskom grejanju i slično. Prema podacima proizvođača, u odnosu na dobošaste razmenjivače iste namene i kapaciteta, Alfa-Reks razmenjivači su šest puta lakši, a zahtevaju isto toliko puta manju površinu poda za montažu.

## 1.2.2. Orebreni pločasti razmenjivači toplote (PFHE)

### a) Lemljeni orebreni pločasti razmenjivači toplote

Valovita sendvič orebrenja i lemljene ploče od aluminijuma daju ovim razmenjivačima toplote vrlo visoku kompaktnost, 850 do 1500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Prema potrebi procesa, ovi razmenjivači mogu imati priključke i na sredini konstrukcije, što im omogućava više paralelnih tokova ili procesa sa oduzimanjem fluida u toku postupka. Na slici Sl. 1.47, prikazana je procedura izrade ovih razmenjivača, gde se lemljenje obavlja jedinstvenim postupkom u vakumskim pećima. Temperaturno



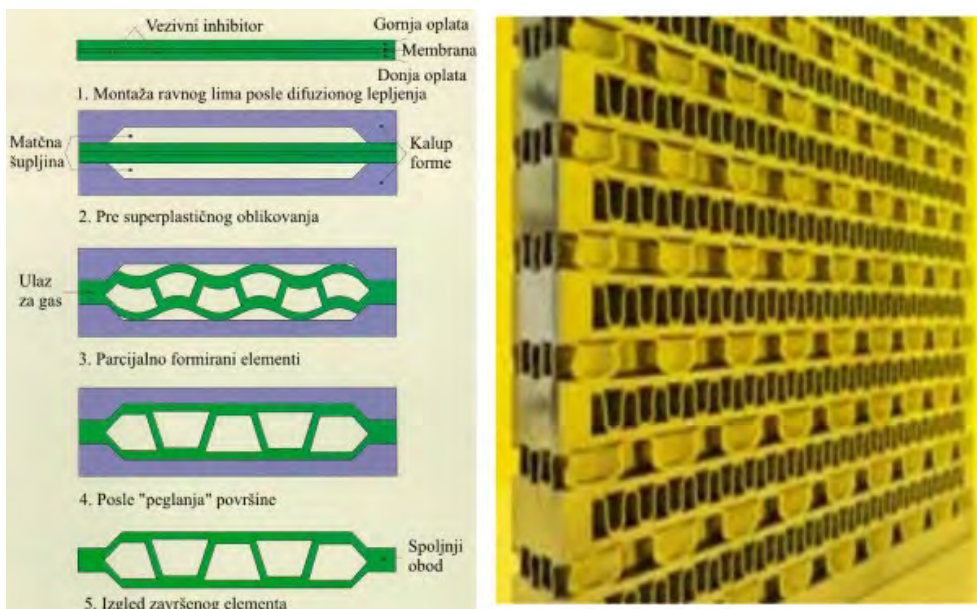
Sl. 1.47. Postupak izrade i izgled lemljenog orebrenog razmenjivača toplote, LINDE AG, Nemačka

približenje može biti veliko, u rasponu 1 do 3°C, a uređaj ima veoma visoku toplotnu efikasnost i kompaktnost. Glavna primena im je u kriogenoj tehnici, ali i u drugim tehnologijama, ako se sendvič orebrenja i lamele urade od odgovarajućeg materijala. Ako su lamele od aluminijuma, koristiti se u opsegu temperatura od -270 do 200°C i pritiska do 120 bara u kriogenoj tehnici. Ako se lamele sendviča rade od nerđajućeg čelika moguć je rad i do 650°C i 50 bara (u razvoju su i konstrukcije do 90 bara). Glavna ograničenja ove aplikacije je osetljivost na zaprljanost fluida, pa je obavezna prethodna filtracija za čestice preko 0,3 mm. Otpornost na korozivni uticaj

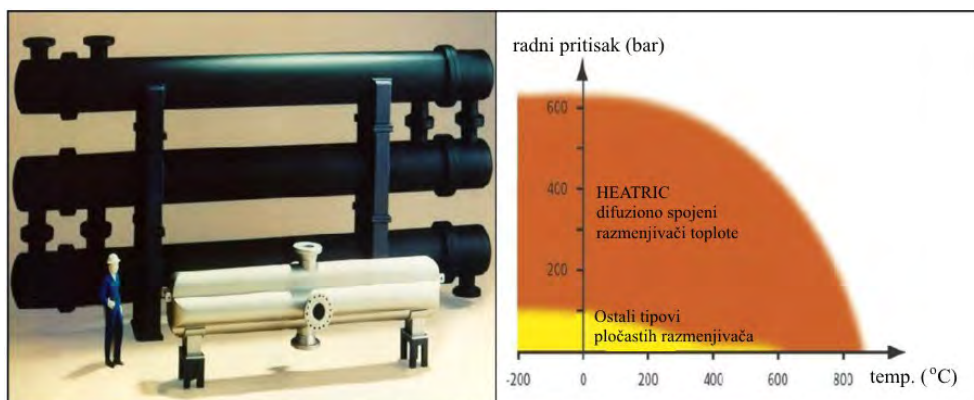
fluida na materijal lamela takođe se mora obezbediti. Ovakav pločasti razmenjivač sa 6 rebara/cm ima kompaktnost približno  $1300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , što je zapremina svega oko 10% u odnosu na adekvatni dobošasti razmenjivač od cevi  $\phi 19 \text{ mm}$ .

### **b) Difuziono spojeni orebreni pločasti razmenjivači toplote**

Difuziona tehnologija spajanja lamelnog orebrenja na ploče (diffusion bonded) ima niz prednosti u odnosu na lemljeno orebrenje, navedeno u prethodnoj konstrukciji. Ova tehnologija spajanja je prvo primenjena u proizvodnji aviomotora, pri čemu su orebrenja bila od titanijuma. Osnovna karakteristika spoja je visok mehanički integritet i povećana otpornost na koroziju. U fazi pripreme titanijumskih limova dodaje se inhibitor na unutrašnje površine, kao da je u pitanju lepljenje, a zatim se vrši difuziono spajanje na visokom pritisku i temperaturi, slika Sl. 1.48. Poslednja faza podrazumeva "peglanje" gotovih ploča, za osiguranje planarnosti površina. Ovu inovativnu tehnologiju primenjuje manji broj subjekata, zbog patentiranih prava, ali su tehnički parametri bliski. Visina formiranih kanala iznosi 0,5 do 5 mm, a tehnologija izrade ne zahteva ivične trake, jer se međuprostor raširuje uz pomoć komprimovanog vazduha. Integralni moduli mogu sadržati veliki broj prethodno formiranih ploča, povezane sa ulazno-izlaznim kolektorima. Ovakvi razmenjivači sa titanskim orebrenjem, mogu izdržati pritiske čak do 900 bara i temperature od  $-200$  do  $1000^\circ\text{C}$ . Imaju široko područje veličina, površina razmene toplote može biti do  $10.000 \text{ m}^2$ , masa 1 kg do 60 tona, kompaktnost se kreće od  $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$  za pritiske od 500 bara pa do  $1300 \text{ m}^2/\text{m}^3$  za pritiske do 100 bara.



Sl. 1.48. Postupak difuzionog spajanja i gotov blok – HEATRIC, V. Britanija

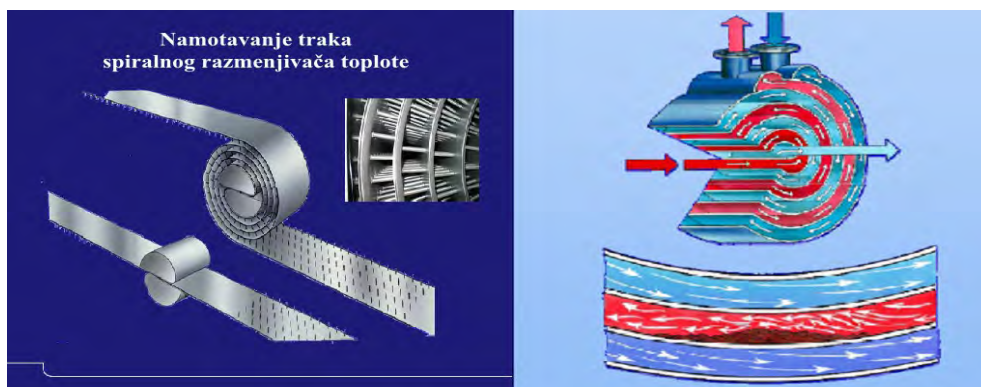


**Sl. 1.49.** *Levo – izgled i komparacija difuziono spojenog orebrenog pločastog i odgovarajućeg dobošastog razmenjivača toplote, desno – područje primene difuzionih i ostalih pločastih razmenjivača toplote, prema HEATRIC, V. Britanija (2006)*

Na slici Sl. 1.49, prikazana je komparacija difuziono spojenih orebrenih pločastih razmenjivača u odnosu na klasične dobošaste razmenjivače, gde je masa DRT veća 5-8 puta u odnosu na difuzione aparate. Takođe, difuzioni razmenjivači toplote u odnosu na ostale pločaste razmenjivače imaju znatno veću izdržljivost na visoke pritiske i temperature. Glavno područje primene su razmene toplote tipa gas-gas, gas-tečnost i razmena sa promenom faze, kao što su procesna postrojenja, industrija nafte i gasa, energtika i povrat toplote.

### 1.2.3. Spiralni razmenjivači toplote

Spiralni razmenjivač toplote ima idealnu konstrukciju za dobijanje identičnog toka temperatura oba medija, pošto sadrži dva koncentrična spiralna kanala. Konstrukcija ovih razmenjivača toplote je jednostavna, videti sliku Sl. 1.50.

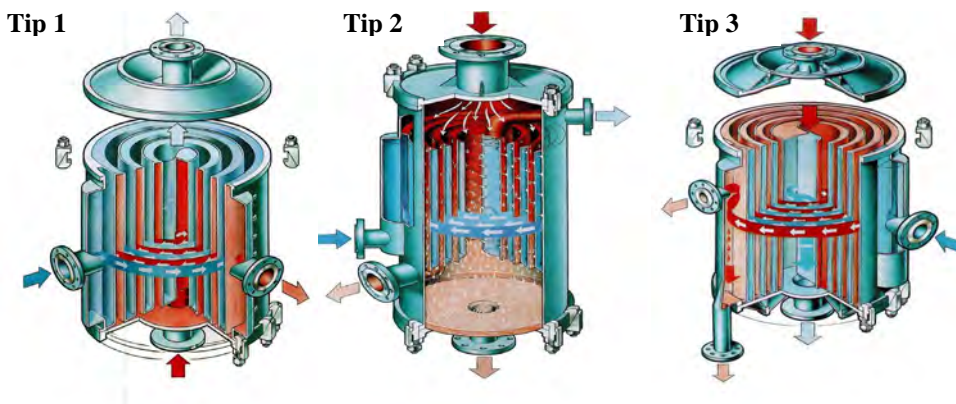


**Sl. 1.50.** *Spiralni razmenjivači toplote: Namotavanje spirale i tok strujanja*

Osnovni element je spirala, koja se sastoji od dve metalne trake namotane zajedno oko centralnog jezgra, pri čemu se formiraju dva koncentrična spiralna kanala, međusobno zavarena. Postoji mogućnost izrade duplih zavojnica sa po dva kanala, kad se istovremeno namotavaju četiri trake. Dvostruki kanali se koriste za velike protoke i male padove pritiska, ali nisu preporučljivi za prljave medije ili medije sa sadržajem čvrstih čestica. Širina kanala služi za optimizaciju procesa i obično je u rasponu od 5 do 30 mm. Prečnik razmenjivača i širina spiralne ploče može biti do 2 m, što obezbeđuje maksimalnu površinu razmene do 600 m<sup>2</sup>. Zaptivanje kanala je neophodno na strani demontažne ploče, što omogućava jednostavnu inspekciju i čišćenje obe strane spiralne ploče. Ako svaki fluid ima samo jedan kanal za strujanje, glatke površine, pri smanjenju preseka usled taloženja zaprljanja, to izaziva lokalni porast brzine, koja gura zagušenje do izlaza iz razmenjivača. Ovaj efekat samočišćenja utiče na pad operativnih troškova, posebno kada je uređaj montiran horizontalno. Horizontalna montaža je neophodna i pri korišćenju fluida velike viskoznosti, ili sa vlaknastim česticama, da ne bi došlo do potencijalnog taloženja čestica na dnu krivine kanala.

Spiralni razmenjivači mogu imati tri tipa konfiguracije, slika Sl. 1.51:

- Tip 1 - Mediji su u suprotnosmernom strujanju. Topliji fluid ulazi u centru razmenjivača i struji od centra prema periferiji. Hladniji fluid struji suprotno, ulazi bočno od periferije, a izlazi centralno.
- Tip 2 - Mediji su u unakrsnom strujanju, jedan fluid struji vertikalno, a drugi horizontalno kroz spiralu. Ova konstrukcija se koristi kao kondenzator ili isparivač.
- Tip 3 - Kombinovani tok. Gas ili para koja kondenzuje ulazi odozgo i struji vertikalno i spiralno na dole i izlazi bočno. Drugi fluid ulazi bočno od periferije i izlazi centralno na dole.



Sl. 1.51. Tri tipa konstrukcije spiralnih razmenjivača toplote: ALFA LAVAL, Švedska

Koriste se za razmenu toplote tipa tečnost-tečnost, kao i za gas-tečnost u zavisnosti od tipa konfiguracije strujanja fluida. Maksimalna projektna temperatura

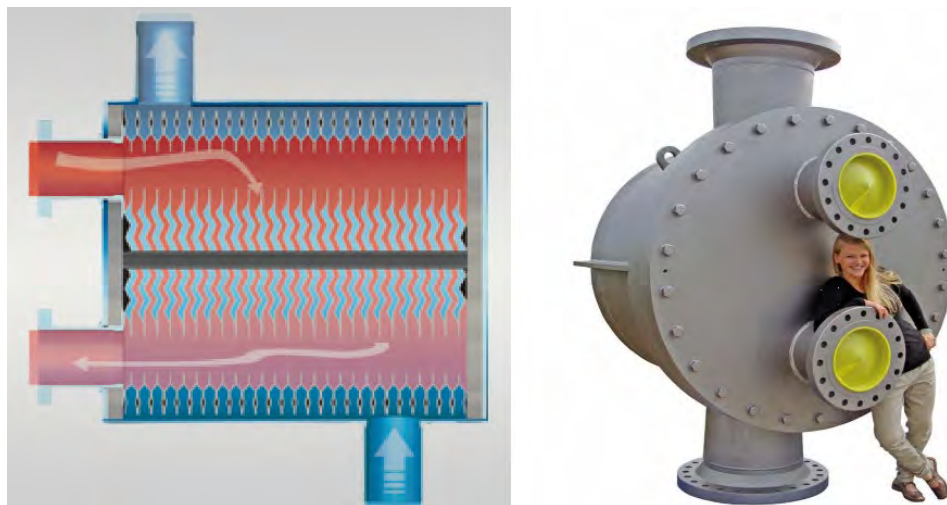


je 400°C i zavisi od prirode zaptivača, a u specijalnim konstrukcijama bez zaptivača i do 850°C. Najviši dozvoljeni pritisak je 15 bara, specijalno do 30 bara. Zbog lakog čišćenja idealan je za prljave fluide, pa mu je primena najčešće u prehrambenoj industriji i industriji pića (pivo i vino), a takođe i u hemijskoj industriji, iako mogu biti skuplji od pločastih razmenjivača. Pogodan je za povrat toplote prljavih fluida (industrijske otpadne vode). Imaju savršen suprotnosmerni temperaturski tok i visoko temperaturno približenje, pa maksimalno mogu vratiti toplotu velikih kogenerativnih sistema. Najveću prednost imaju u niskopritisnim procesima velikog protoka, a mogu raditi i kao kondenzatori pod vakumom.

Spiralni razmenjivači toplote imaju značajne prednosti u odnosu na dobošaste razmenjivače, pre svega u optimalnim protočnim uslovima bez mrtvih mesta, pregrevanja ili podhlađivanja. Bez multiprolaznosti fluida mogu ostvariti temperaturna ukrštanja, a imaju visoku efikasnost razmene i veliku kompaktnost. Za iste uslove rada, ako spiralni razmenjivač toplote ima površinu od 90 m<sup>2</sup> odgovarajući dobošasti razmenjivač toplote imao bi površinu razmene od 125m<sup>2</sup>.

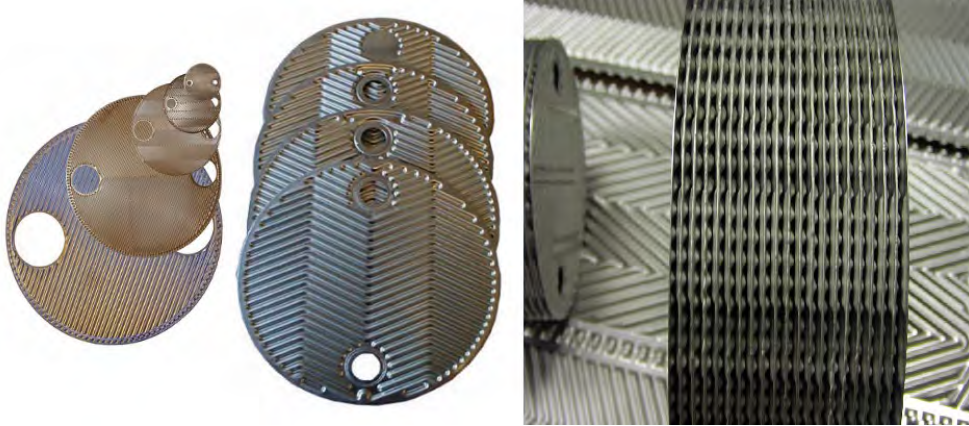
#### 1.2.4. Razmenjivači toplote tipa ploča u omotaču

To su pločasti razmenjivači toplote (površina razmene je kružna ploča), ali su smešteni u doboš, koji im daje spoljni izgled dobošastih razmenjivača. Kružne ploče su zavarene po dve u paru i postavljene u doboš, slika **Sl. 1.52**, tako da se fluid koji struji unutar zavarenih ploča distribuira kroz otvore u pločama, a fluid koji struji oko ploča se distribuira kroz omotač. Zbog toga ploče mogu imati veće prečnike, na račun dužine, radi smanjenja horizontalnog razvoda fluida. Inače ploče imaju različite konfiguracije za poboljšanje turbulencije strujanja, kao što se vidi na slici Sl. 1.53. Poklopac doboša može biti demontažan ili zavaren u zavisno



**Sl. 1.52.** Razmenjivač toplote tip ploča u omotaču, tok strujanja i konstrukcija

od toga, da li je predviđeno vađenje i revizija pločastog paketa. Veličina jedne jedinice ovih razmenjivača obično ne prelazi površinu od 500 m<sup>2</sup>. Ploče se izrađuju

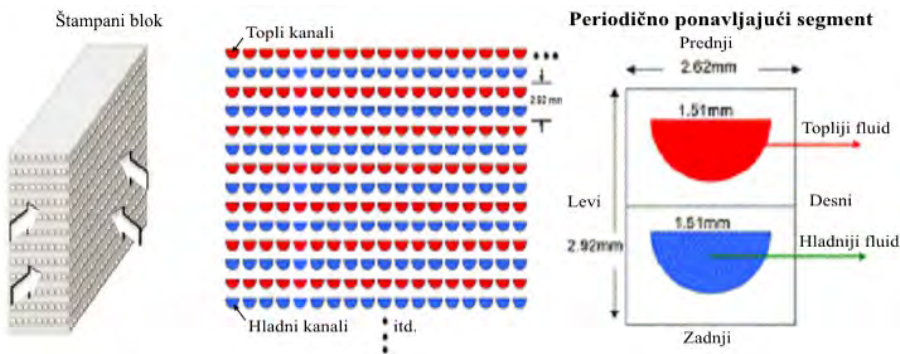


Sl. 1.53. Dizajn parova ploča razmenjivača toplote "ploča u omotaču" i izgled paketa

od titanijuma ili nerđajućih čelika, a omotač od ugljeničnih ili nerđajućih čelika. Maksimalne radne temperature za ploče i omotač, mogu biti do 900°C. Maksimalni radni pritisci mogu biti do 100 bara. Zbog robusne konstrukcije ovi razmenjivači lako podnose udare pri naglim promenama temperatura i pritisaka. Najviše se primenjuju u daljinskom grejanju, rashladnim i kriogenim aplikacijama, a radni fluidi mogu biti svih faza. Prema podacima vodećih proizvođača za iste uslove, prema površini razmene, mogu se uporediti sa lemljenim razmenjivačima toplote, a zauzimaju 20-30% gabarita odgovarajućeg dobošastog razmenjivača toplote.

### 1.2.5. Štampani razmenjivači toplote

Štampani razmenjivači toplote su nova inovativna tehnologija sa visokim potencijalom primene, veoma su kompaktni, otporni na koroziju i prilagođeni za rad na niskim i visokim temperaturama i visokim pritiscima. Izrada je postupkom



Sl. 1.54. Izgled štampanog bloka sa rasporedom i oblikom kanala.

hemijskog nagrizanja, sličnom štampanju elektronskih ploča, počev od 1985 god. (*Heatric, Ltd.*, Engleska). Štampane ploče su veoma fleksibilne, jer promena alata ne zahteva veće troškove. Dubina kanala u pločama je obično 0,5 do 2,0 mm, ili 1,5 do 3 mm, zavisno od viskoznosti i čistoće fluida slika Sl. 1.54. Ploče se zatim sastavljaju postupkom difuzionog spajanja, tako da se dobije veoma kompaktni blok sa suprotnosmernim strujanjem fluida, koji ima istu nosivost spoja i osnovnog materijala. Formirani štampani blokovi se postavljaju u metalno kućište sa kolektorskim razvodom na mestu priključaka. Izrađuju se uglavnom od nerđajućih čelika, titanijuma ili bakra. Kompletiran štampani razmenjivač rutinski izdržava pritiske do 200 bara, a mogu se izraditi konstrukcije za pritiske od 300 do 600 bara. Radne temperature se kreću od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $900^{\circ}\text{C}$ , u zavisnosti od izabranih materijala.



**Sl. 1.55.** *Uporedba dobošastog i štampanog razmenjivača toplote 600 m<sup>2</sup>, HEATRIC Ltd*

U zavisnosti od dimenzija kanala, kompaktnost im može biti izrazito visoka i iznositi do 2500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. a toplotna efikasnost dostiže do 98%. Razmena toplote, može se odvijati sa i bez promene faze fluida, a štampani kanali mogu formirati sve temperaturne tokove. Pokrivaju veliki opseg toplotnih snaga razmene, od nekoliko vati do više desetina megavata. Nisu osetljivi na vibracije i velike temperaturske razlike. Glavni nedostatak im je pored visoke relativne cene i praktično stvarna nemogućnost mehaničkog čišćenja, pa je neophodna ugradnja finih filtera ispred ulaza u razmenjivač. Hemijsko čišćenje kanala je moguće, samo ako je konstrukcija obloge prilagođena za tu operaciju. U odnosu na dobošaste razmenjivače iste namene, štampani razmenjivači imaju 5 do 10 puta manju težinu, slika Sl. 1.55, na kojoj je prikazan uporedni izbor dobošastog i štampanog razmenjivača toplote, kapaciteta 2.350 kW, LMTD=4°C, 600 m<sup>2</sup> površine razmene i projektni pritisak 124 bara. Ima masu 15 tona, što je mnogo niže u poređenju sa 105 tona ekvivalentnog dobošastog razmenjivača toplote. Izbor tipa i veličine štampanih razmenjivača toplote moguća je jedino uz softversku podršku proizvođača, što im otežava širu rasprostranjenost.

### 1.2.6 Razmenjivači toplote od polimera

Ovo su možda jedini razmenjivači, koji su postali tip na bazi materijala od kojih su urađeni. Nemetalni materijali (ugljenik, teflon, staklo ili keramika, koriste se i kod drugih razmenjivača, ali im to nije glavna odrednica. (videti tačku 1.5 Materijali za izradu razmenjivača toplote) Najčešće korišćeni polimer za izradu razmenjivača toplote je teflon (PTFE fluoropolimer) zbog hemijske stabilnosti i

možnosti primene na povišenim temperaturama. Razvijene su razne konstrukcije ovih tipova razmenjivača, koje se mogu svrstati u dve kategorije: jezgro od polimera, a omotač od metala i potpuno polimerni razmenjivači. Na slici Sl. 1.56, prikazane su različite konstrukcije od više proizvođača, od vrlo malih do srednjih površina razmene. Naročito je specifična konstrukcija od umreženih cevi malog prečnika, povezanih u kolektorski priključak (na slici pod c). Ovako izrađena jezgra mogu biti veće dužine i potopljena u kade postrojenja tehnološkog procesa.



a) Razni polimerni razmenjivači toplote      b) Jezgro od polimera, omotač od metala



c) Polimerno jezgro od upletenih cevi      d) Polimerni snop cevi u dobošu

**Sl. 1.56.** Razne varijante izrade razmenjivača toplote od polimera

Kako polimeri imaju relativno nisku toplotnu provodljivost, najčešće se koriste cevi malog prečnika, (2,5 do 9,5 mm) debljine zida od 10% spoljnog prečnika. Teflon se može koristiti za temperature fluida do 200°C (K tip, koji ima približno dva puta veću toplotnu provodljivost od standardnog teflona). Mogu dostići kompaktnost konstrukcije do 275 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Konstrukcije se lako prilagođavaju uslovima rada, jednostavno se održavaju i popravljaju. Nedostatak im je slaba univerzalnost i visok gubitak toplote na okolinu. U odnosu na adekvatne dobošaste razmenjivače imaju višu cenu i zauzimaju više prostora. Preporučene aplikacije ovih razmenjivača su visoko abrazivni i korozivni tehnološki procesi.



## 1.3. DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

Kada je površina preko koje se vrši razmena toplote cev ili cevna konstrukcija, onda se takvi razmenjivači toplote nazivaju *cevnim razmenjivačima toplote* (*Tubular heat exchangers*). Fluid koji struji u cevi je ograničen unutrašnjom površinom zida cevi, a fluid koji struji oko cevi ograničava se s jedne strane spoljnom površinom zida cevi, a s druge strane omotačem čija je površina različite konstrukcije i koja ga odvaja od okoline. Moguće je da površine odvajanja od okoline i nema ili postoji kao obloga tzv. velika zapremina, kao što su cevni grejači ili hladnjaci smešteni slobodno u medijumu vode ili vazduha. U slučaju kada je fluid oko cevi neograničen (slobodan) on predstavlja okolinu, tj. toplotni izvor ili ponor sa malom promenom temperature.

Ako je i fluid oko cevi ograničen spoljnom površinom koju nazivamo *doboš* (*omotač ili plašt*), onda se takvi razmenjivači nazivaju *dobošastim razmenjivačima toplote ili razmenjivačima "cev u omotaču"* (*Shell and tube*). U ovoj knjizi će se koristiti termin dobošasti razmenjivači toplote (DRT ili STHE). Fluid u cevi može imati različite pritiske, a uspostavljanjem spoljnje površine okolni fluid takodje može imati različite pritiske u odnosu na unutrašnji fluid i okolinu. Spoljnja površina doboša je smeštena u okolni medijum (najčešće atmosfera) i preko nje se takođe vrši razmena toplote sa fluidom u velikoj zapremini. Ako se posebno ne navede, ovaj toplotni gubitak ili dobitak, se ne uzima u obzir, odnosno smatra se da je spoljašnja površina razmenjivača toplote toplotno nepropusna. Poseban slučaj nastaje kada je zapremina fluida oko cevi znatno veća od zapremine fluida u cevi, ali ne i velika zapremina. Takve razmenjivače toplote nazivamo *bojleri* i kod njih uticaj ima i tzv. gravitaciono strujanje usled različite temperature vertikalnih slojeva. Konačno, moguće je da je doboš delimično otvoren, odnosno da fluid oko cevi ima i direktan kontakt sa okolinom. U tom slučaju fluid oko cevi ne održava razliku pritiska sa okolinom.

### 1.3.1. Komponente dobošastih razmenjivača toplote

Dobošasti razmenjivači toplote imaju dva osnovna dela: spoljašnji deo, kroz koji struji "fluid oko cevi", koji čine omotač, uzdužne i poprečne pregrade, prednja (stacionarna) i zadnja glava i unutrašnji deo, kroz koji struji "fluid u cevi", koji čine cev ili cevna konstrukcija (cevni registar ili snop cevi).

Prednja glava je mesto ulaza fluida u cevni snop. To je cilindrični kolektor koji sadrži cevne priključke za povezivanje fluida u cevima, koji je najčešće demontažni radi pristupa cevnoj ploči. Omotač je središnji deo doboša u koji se smešta cevni snop. Zadnja glava ne mora postojati ako je zadnji zatvarač omotača (dance) zavaren. Ako se u nju smesti posebna konstrukcija za dilataciju cevnog snopa u odnosu na omotač, naziva se plivajuća glava. Uzdužne i poprečne pregrade

u omotaču obezbeđuju broj prolaza, pravac i smer strujanja fluida oko cevi. Uzdužne pregrade se nazivaju i dijafragmama, a poprečne segmentim pregradama. Pregrade u prednjoj glavi obezbeđuju broj prolaza i smer strujanja fluida u cevima.

Cevni registar određuje površinu razmene toplote i može biti sa dve ili jednom cevnom pločom, u zavisnosti od toga da li su cevi prave ili savijene kao U-cevi. Spoj cevi sa cevnom pločom može biti zavaren (lemljen) ili kompresioni, a cevni snop može biti fiksni ili demontažni u odnosu na prednju glavu. Raspored cevi u cevnoj ploči ima veoma značajnu ulogu u efikasnosti razmene toplote. Fluid u cevima registra struji pravo, a fluid u omotaču takođe pravo ili poprečno.

Priključci su elementi za povezivanje razmenjivača na instalaciju. Fluid koji struji kroz cevi ima ulazni i izlazni priključak na glavama razmenjivača, a fluid koji struji oko cevi ima priključke na omotaču. Priključci na omotaču mogu biti kolinearni uz prednju ili zadnju glavu, radijalno pomereni uz prednju ili zadnju cevnu ploču, ili asimetrično uz prednju i zadnju cevnu ploču, ili na sredini.

Dobošasti razmenjivači toplote nemaju pokretnih delova.

Omotač i cevni registar mogu biti međusobno razdvojivi ili demontažni, ili nerazdvojivi, čvrsto spojeni ili zavareni. Fluid u omotaču može strujati duž cevi ili naizmenično duž i poprečno na cevi, ako su ugrađene poprečne pregrade. Ako je cevni registar demontažan, onda dijafragme, odnosno podužne pregrade, moraju imati konstruktivni zazor, što je poseban problem, jer zahtevaju zaptivanje u sklopu sa omotačem između različitih prolaza jednog istog fluida oko cevi. Nezaptiveni prolaz omogućava tzv. lekažno strujanje koje nepovoljno utiče na efikasnost razmene toplote. Plivajuća glava ima dvostruku ulogu: obezbeđenje termičkih dilatacija cevnog snopa u odnosu na doboš i reviziju cevi i cevne ploče na zadnjoj glavi. Međutim ona sama značajno poskupljuje konstrukciju razmenjivača i zahteva dobru koaksijalnost i zaptivanje. Relativno klizanje koje nastaje usled termičkih dilatacija može se ostvariti unutar ili sa spoljnje strane glave.

Na slici 1.57, prikazan je dobošasti razmenjivač toplote sa pravim cevima, poprečnim strujanjem u omotaču i plivajućom zadnjom glavom, sa pozicijama osnovnih delova.

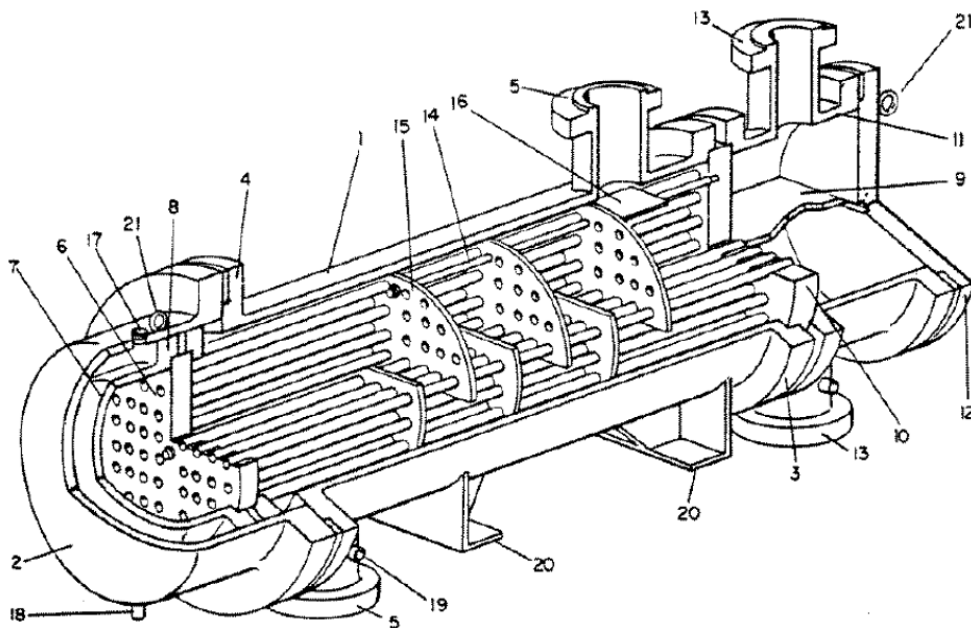
Svaki razmenjivač toplote, a pogotovo dobošasti kao gotov uređaj u sebi integriše dve ili čak tri osnovne komponente:

Tehnološka komponenta (ovde bi se pre moglo reći termička), obezbeđuje funkciju namene, odnosno ako razmenjivač ima zadati ulaz on ostvaruje očekivani odziv, koji obezbeđuje tehnološku funkciju.

Mehanička komponenta obezbeđuje integritet aparata pri opterećenju unutrašnjim i spoljnjim silama.

Dodatna komponenta bi mogla biti marketinško-bezbednosna. To znači da je proizvod privlačan za kupca i da u eksploataciji ne ugrožava ljude i okolinu.

Kasnije će se videti da ovi uređaji nisu jednoznačni, odnosno da za rešenje jednog problema, može se konstruisati više različitih tipova uređaja, a u okviru istog tipa više različitih varijanti.



Sl. 1.57. Dobošasti razmenjivač toplote – pozicije i opis

#### LEGENDA

1 – omotač	12 – poklopac prednje glave
2 – zadnja glava	13 – priključna priрубnica glave
3 – prednja priрубnica omotača	14 – cevi snopa
4 – zadnja priрубnica omotača	15 – segmentna pregrada
5 – priključna priрубnica omotača	16 – zaštitna ploča cevnog snopa
6 – zadnja cevna ploča	17 – odzraka zadnje glave
7 – plivajuća glava	18 – ispust zadnje glave
8 – priрубnica plivajuće glave	19 – drenaža priključaka
9 – pregrada prednje glave	20 – oslonac
10 – prednja cevna ploča	21 – kuka za podizanje
11 – prednja glava	

### 1.3.2. Standardi i kodeksi dobošastih RT

Dobošasti razmenjivači toplote se u tehnologiji koriste preko 150. godina, a a više od 60. godina javljaju se kao tipizirane konstrukcije. Za to vreme nastalo je mnogo konstrukcija, koje su usavršene kako po efikasnosti razmene toplote, tako i po konstrukciji, upotrebljenim materijalima i standardizaciji izrade. Cena, lakoća u održavanju, kompaktnost konstrukcije i mogućnost primene u najširem opsegu

temperatura i pritisaka su neke od važnijih osobina koje preporučuju dobošaste razmenjivače toplote. Tipizacija proizvoda nastupila je kod velikih proizvođača kao praktična potreba za unificiranjem konstrukcija, delova i sklopova, a zatim i kao preporuke u domenu primene. Udruživanjem proizvođača, tipizacija se širila, dok nije prerasla u standarde na nivou velikih grupa ili država.

Ne treba zanemariti i činjenicu da se pored evidentnih tehničkih prednosti, standardizacijom se povećava sigurnost proizvođača od neuspeha, *Kupan* [19, Ch11]. Naime, porastom svesti na globalnom nivou za očuvanjem životne sredine, veoma su porasle naknade od proizvođača za neuspela tehnička rešenja. Primenom standarda, proizvođač umanjuje svoju odgovornost i prenosi je na izdavače propisa.

Standardi i kôdovi daju smernice u nekim slučajevima i propisuju projektovanje, proizvodnju, montažu, korišćenje i održavanje razmenjivača toplote i opštije opreme pod pritiskom. Oni su nastali na osnovu istraživanja, razvoja, i iskustva. Standard se može definisati kao skup tehničkih definicija i smernica za konstrukciju i proizvodnju opreme. Standardi mogu biti sa obaveznom primenom (imaju snagu zakona) ili kao preporuka bez obavezne primene.

Kôdovi su zbirke propisa sa obaveznom primenom utvrđenih na nivou države sa zakonskom snagom, koji određuju tačnu proceduru. Poreklo kôdova je u pravilima koja su u prošlosti utvrđivala osiguravajuća društva za siguran rad kotlova i opreme pod pritiskom, a usmerenih protiv eksplozija ili nesreća, koje su ugrožavale ljude i imovinu i donosile veliku materijalnu štetu. Kôd postaje pravni dokument u državi kada prođe zakonodavnu proceduru. Mnogi kôdovi se koriste u više zemalja (npr. *ASME kôd ili EU PED direktive*), ali snagu zakona dobijaju tek kad se proglase nacionalnim kôdom ili standardom.

### **a) Standardi**

Primena usvojenih standarda pomaže u smanjenju troškova proizvodnje razmenjivača toplote izbegavanjem ponavljanja detaljne analize za konstrukciju istovetnih ili sličnih proizvoda. Standardi se primenjuju u postupku izrade tehničke dokumentacije, unifikaciji detalja, izradi i primeni alata i procesa proizvodnje.

Standardi mogu biti:

1. Standard proizvođača
2. Standard udruženja proizvođača ili proizvodnih grana
3. Nacionalni standard
4. Međunarodni standard

Proizvođački standardi su obavezni pored firme nosioca i za podizvođače i korisnike koji imaju licence i slične dozvole. Trgovine ili udruženja proizvođača donose standarde, kao preporuke od zajedničkog interesa, na osnovu iskustva u projektovanju, proizvodnji i montaži. Najpoznatiji standardi u SAD su: *TEMA* za cevne razmenjivače toplote, *HEI* - Institut za razmenjivače toplote, *API* za naftnu industriju i *EJMA* za ekspanzione membrane termičkih dilatacija.

Nacionalni standard važi u zemlji u kojoj je donesen i kooperantima ili nosiocima licenci u drugim zemljama ili po osnovu ugovora o prodaji. Prvi nacionalni standard je bio *BSI* (Velika Britanija), a veoma su rašireni i *DIN* (Nemačka) i *JIS* (Japan). Danas ima više od 100. nacionalnih standardnih organizacija koje pripadaju Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju (*ISO*) i Međunarodnoj elektrotehničkoj komisiji (*IEC*). Na nivou Evropske unije (EU) formirano je stalno koordinaciono telo CEN/CENELEC. ISO koordinira razmenu informacija o međunarodnim i nacionalnim standardima, tehničkim propisima i drugim dokumentima, putem informacione mreže ISONET u Ženevi. Relevantni međunarodni standard za oblast sistema kvaliteta proizvoda je ISO serija standarda ISO 9000 (počev od 1987. god. do trenutno važeće verzije iz 2015. god.

S obzirom na činjenicu o raširenosti i uticaju TEMA standarda u svetu na proizvodnju razmenjivača toplote, to zaslužuje posebno razmatranje.

### **b) Kôdovi**

Američki ASME kôd za izradu kotlova i posuda pod pritiskom se osim u SAD široko koristi i u mnogim zemljama širom sveta. Primenjivost kôdova se razlikuje po obimu, ali uglavnom uvek sadrže: osnove konstruisanja, analizu opterećenja (stres), uticaj zapremine, pritiska i temperature u primeni, materijale, inspekcije i sl. Ne postoji specifičan kôd isključivo za razmenjivače toplote u svetu, već su najčešće predviđeni okvirno u sastavu grupacije kôdova opreme pod pritiskom ili u okviru kotlovskih postrojenja.

Oznake najčešće korišćenih kôdova za razmenjivače toplote su:

*ASME Code, Section III, Section VIII, Div. 1,2,3* - SAD,

*BS 5500* - Velika Britanija,

*CODAP, SNCT* - Francuska,

*A. D. Merkblätter* - Nemačka,

*ANNC* - Italija,

*IS:2825-1969* - Indija

*GOST* - Rusija

*The Pressure Vessel Code* - Japan

*ISO/DIS-2694* - Međunarodni kod

*PED 2014/68/EU [N3]* – 2014. godina. *Pressure equipment directive* (prethodna verzija 97/23/EC iz 1997. god.) - Evropska direktiva

*EN 13445 [S1]* - Evropski kod opreme pod pritiskom neizložene plamenu.

Bivša SFRJ je imala pokriven prostor standarda i kôdova za oblast posuda pod pritiskom (Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom Sl. list SFRJ 16/83, standardi grupe JUS M.E2) koji su se oslanjali na DIN standarde. Srbija kao pravni naslednik Jugoslavije nastavila je da primenjuje i dalje navedene propise, (SRPS M.E2), ali je dozvoljena upotreba i evropskih propisa. Prema očekivanju, 2011. god (Sl. glasnik RS 87/11) došlo je do usvajanja EN za opremu pod pritiskom, sa početkom primene od 2012. god.

*ASME kôd* je prvi put donet 1911. godine posle velikog broja eksplozija parnih kotlova U SAD u periodu 1870 – 1910 godine, posle čega je broj akcidenata sa fatalnim ishodom drastično opao, iako je broj ugrađenih kotlovskih jedinica rapidno porastao. ASME kôd sekcija VIII ima veliki broj izdanja (najčešće svake tri godine) i stalno se dopunjuje. ASME kod za kotlove i posude pod pritiskom obuhvata minimum pravila sigurnosti, uređuje projektovanje, izradu i inspekciju za novu i rekonstruisanu postojeću opremu. Izdanje iz 2015. god, koje se najviše koristi u ovoj knjizi ima 12 sekcija i obuhvata sledeće oblasti:

- I Pravila za konstrukciju kotlova za napajanje
- II Materijali
- III Pravila za konstrukciju komponenti nuklearnih postrojenja
- IV Pravila za konstrukcije toplovodnih kotlova
- V Ispitivanja bez razaranja
- VI Pravila za rad i rukovanje toplovodnim kotlovima
- VII Smernice za održavanje energetske kotlova
- VIII Pravila za izradu posuda pod pritiskom (deo 1,2 i 3) ASME VIII div 1 [S10]
- IX Postupci zavarivanja i lemljenja
- X Pravila za posude pod pritiskom izrađene od plastičnih materijala
- XI Pravila unutrašnje kontrole nuklearnih centrala
- XII Pravila za izradu pokretnih rezervoara.

Američki sistem jedinica i SI jedinice su u ASME kodu ravnopravne, ali se jedan sistem jedinica mora koristiti u svim fazama proizvodnje.

*EN kôd*, za opremu pod pritiskom važi Direktiva 97/23/EC, koja je izdata 1999. godine (posle 10. godina usaglašavanja), a konačno je na snazi od 29. maja 2002. Direktiva je promenjena 2014. god., delovi važe od 2015. god., a obavezna primena od 2016. god., pod novim imenom Direktiva 2014/68/EN. Važeći novi evropski standardi EN 13445 i EN 1591 (za pribornice umesto DIN 2505), primenjuju se i kao nacionalni standard u Nemačkoj pod nazivom AD 2000 [S8]. Kôd EN 13445 se prvenstveno koristi u knjizi a AD 2000 povremeno, imajući u vidu njegovu kompatibilnost sa ex. JUS standardima (videti poglavlje 3).

*Standard EN 13445:2009* pod nazivom „*Unfired pressure vessels*“ – Posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu, sastoji se od sledećih delova:

- Deo 1 Opšte.
- Deo 2 Materijali.
- Deo 3 Konstrukcija.
- Deo 4 Izrada.
- Deo 5 Ispitivanje i testiranje.
- Deo 6 Preporuke za projektovanje i izradu posuda pod pritiskom i delova pod pritiskom izrađenih od austenitnog livenog gvožđa.
- Deo 7 Smernice za korišćenje procedura ocenjivanja usaglašenosti.
- Deo 8 Dodatni zahtevi za posude pod pritiskom od aluminija i legura aluminija.
- Deo 9 Usklađenost sa EN 13445 serija ISO 16528.

Pored navedenih delova standard sadrži i veći broj aneksa (izdanje EN 13445-3 iz 2009. god. sadrži 22 aneksa), koji preciziraju ili preporučuju postupke proračuna tehničke podatke materijala itd. Izmene i dopune ovog standarda su česte, sa namerom da se svake godine objavi novo izdanje, objedinjavanjem dodataka, izmena i drugih korekcija.

Evropskim normativima razdvojena su kotlovska postrojenja od posuda pod pritiskom koje nisu izložene plamenu (za razliku od ASME kôda). Ova oblast je regulisana standardom EN 12953 - Vodenocevni dobošasti kotlovi, koji sadrži:

Deo 1 Opšte.

Deo 2 Materijali za delove kotlova i pribora.

Deo 3 Dizajn i proračun delova pod pritiskom.

Deo 4 Izrada i konstrukcija delova kotla pod pritiskom.

Deo 5 Kontrola u toku izrade, dokumenti i označavanje delova kotla po pritiskom.

Deo 6 Zahtevi za opremu kotla.

Deo 7 Zahtevi za sistem sagorevanja tečnih i gasovitih goriva za kotlove.

Deo 8 Zahtevi za zaštitu od previsokog pritiska.

Deo 9 Zahtevi za uređaje za osiguranje kotla i opreme.

Deo 10 Zahtevi za kotlovsku napojnu vodu i kvalitet kotlovske vode.

Deo 11 Ispitivanja prihvatljivosti.

Deo 12 Zahtevi za sistem sagorevanja čvrstih goriva u kotlu.

Deo 13 Uputstva za rukovanje.

Deo 14 Uputstva za rad nezavisnog inspeksijskog tela.

Prilozi A i B ove evropske norme su informativnog karaktera.

Novi globalni pristup standardizaciji je osnovni preduslov za slobodno kretanje roba i usluga na teritoriji Evropske zajednice. Proizvodi urađeni po tim propisima imaju jedinstvenu oznaku CE. Optimalni dizajn prema ovom standardu omogućuje značajne prednosti kao što su: smanjenje debljine upotrebljenih materijala, povećanje sigurnosti i drastično smanjenje troškova održavanja. Propisi ne sadrže previše tehničkih detalja za proizvodnju proizvoda, već su ograničeni na "bitne zahteve", a to su uglavnom bezbednosni zahtevi, koje proizvođač mora da ispuni. Potrebno je naglasiti, da upotreba tehničkih rešenja iz standarda nije obavezna za izradu proizvoda. Svaki proizvođač može da izabere sopstveno tehničko rešenje, ako je uveren, da je izabrano rešenje u skladu sa bitnim bezbednosnim zahtevima direktive. Zbog zakonske pouzdanosti, izbegavanja negativnog publiciteta i problema dokazivanja nacionalnim organima, uvek je najjednostavnije upotrebiti evropske harmonizovane standarde. U tom slučaju dokazivanje da su standardna rešenja neprikladna je obaveza nadležnih organa.

### 1.3.3. Tema standard

Najstariji, najviše citiran i u praksi najviše korišten je standard udruženja proizvođača cevni razmenjivača toplote u SAD, *TEMA - Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.* Udruženje TEMA su pioniri istraživanja i razvoja

razmenjivača toplote već osamdeset godina (prvo izdanje TEMA je 1941 god.) i danas su nesumnjivi autoritet usmeren ka budućnosti u oblasti mehaničkog dizajna cevnih razmenjivača toplote. Nova izdanja TEMA standarda su obično svake desete godine (1941, 1949, 1952, 1959, 1968, 1978, 1988, 1999, 2007), u ovoj knjizi koristi se najnovije izdanje X iz 2019. [S1]. Važne novine u odnosu na prethodno izdanje standarda su primena metode konačnih elemenata (FEA) za proračun dilatacije omotača, odeljak za horizontalne nosače, studija ublažavanja zaprljanja, smernice spojeva orebrenih cevi, uključen je i ASME PCC-1 za vijčane spojeve.

TEMA standard X/2019 ima deset poglavlja: Nomenklatura, Tolerancije, Izrada i performanse razmenjivača, Ugradnja, rad i održavanje, TEMA mehanički standard, Vibracije izazvane protokom, Termičke relacije, Fizička svojstva fluida, Tabele karakteristika materijala i Preporučena dobra praksa. Treba napomenuti da TEMA standard ne detaljnije prenos toplote, već upućuje na referentnu literaturu.

Granice primene standarda na razmenjivače toplote koji nisu izloženi plamenu su: unutarnji prečnik ne prelazi 100 in. (2540 mm), maksimalni proizvod nazivnog prečnika i proračunskog pritiska do 100.000 in. psi, ( $17,5 \times 10^6$  mm kPa), i maksimalni pritisak 3.000 psi (20.684 kPa). Maksimalna debljina zida omotača može biti do 3 in. (76 mm) a maksimalni prečnik vijka do 4 in. (102 mm).

TEMA standard je razvio nomenklaturu za označavanje različitih tipova konstrukcije dobošastih razmenjivača toplote. Razmenjivač je podeljen u tri dela: prednja (stacionarna) glava, doboš (samo za smeštaj cevnog snopa) i zadnja glava, svaki deo je označen slovnom oznakom kao na slici Sl. 1.58. Tema standardom su utvrđena tri opšta tipa konstrukcije razmenjivača toplote:

Razmenjivač toplote sa fiksnim cevima u cevnom snopu,

U-cevni razmenjivač,

Razmenjivač toplote sa plivajućom glavom.

### **a) Prednja i zadnja glava**

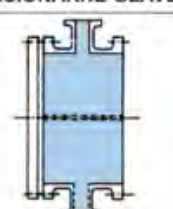

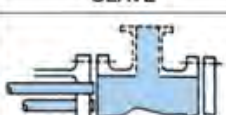
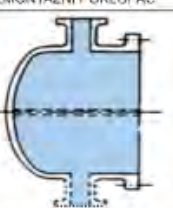

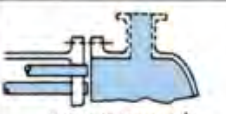
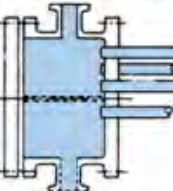
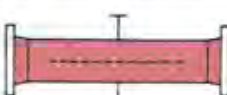
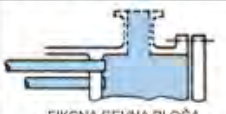
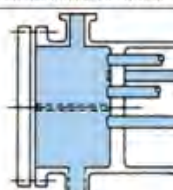
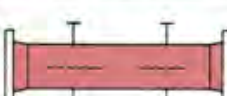
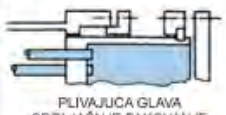
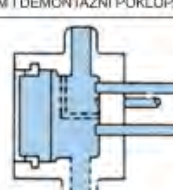

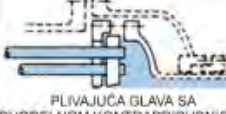
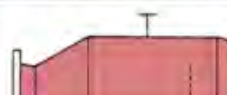
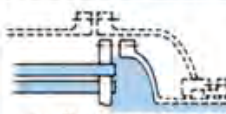


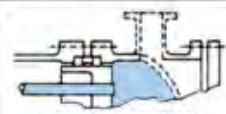
Prednja i zadnja glava su klasifikovani kao pet prednjih (A, B, C, D, i N) i osam tipova zadnjih glava (L, M, N, P, S, T, U i W). Zadnja glava L je identična prednjoj glavi A, zadnja glava M identična je prednjoj glavi B, a N ima istu nomenklaturu kao prednja ili zadnja. Zadnja glava određuje tip konstrukcije: L, M i N su glave za razmenjivače sa fiksnim cevima, U tip zadnje glave se odnosi na U-cevne razmenjivače, dok S, T, P, W su različite vrste konstrukcija plivajućih glava.

#### *Tip glave A/L*

Ova glava ima kolektor kao cilindar s prirubnicom na oba kraja. Zatvaranje kolektora je sa cevnom pločom sa jedne strane i poklopcem (slepa prirubnica) sa druge strane. Za čišćenje ili hidroispitivanje cevi dovoljno je skinuti samo poklopac kolektora. Međutim, to nije dovoljno za detaljniji pregled ili reviziju cevnog spoja ili kompletno čišćenje, u tom slučaju kolektor se mora demontirati, a posebno ako su u pitanju cevi po obodu ili periferne cevi. Demontaža celog kolektora takođe je



neophodna za vađenje cevnog snopa. Iako je, zbog prirubničkog sklopa poklopca, ova konstrukcija skuplja, ovaj tip glave često se koristi, naročito u rafinerijama gde su u pitanju prljavi fluidi koji zahtevaju čestu demontažu i čišćenje.

	TIP PREDNJE STACIONARNE GLAVE	TIP OMOTAČA	TIP ZADNJE GLAVE
A	 KOLEKTOR I DEMONTAŽNI POKLOPAC	E  JEDAN PROLAZ U OMOTAČU	L  FIKSNA CEVNA PLOČA KAO "A" STACIONARNA GLAVA
B	 HAUBA (INTEGRISANI POKLOPAC)	F  DVA PROLAZA U OMOTAČU SA PODUŽNOM PREGRADOM	M  FIKSNA CEVNA PLOČA KAO "B" STACIONARNA GLAVA
C	 KOLEKTOR INTEGRISAN SA CEVNOM PLOČOM I DEMONTAŽNI POKLOPAC	G  RAZDVOJENO STRUJANJE	N  FIKSNA CEVNA PLOČA KAO "N" STACIONARNA GLAVA
N	 KOLEKTOR INTEGRISAN SA CEVNOM PLOČOM I DEMONTAŽNI POKLOPAC	H  DUPLO RAZDVOJENO STRUJANJE	P  PLIVAJUĆA GLAVA SPOLJAŠNJE PAKOVANJE
D	 SPECIJALNO ZA VISOKE PRITISKE	J  PODELIJENO STRUJANJE	S  PLIVAJUĆA GLAVA SA DVODELNOM KONTRAPRIRUBNICOM
		K  ISPARIVAČ TIPRA KETLE	T  IZVLAČEĆA PLIVAJUĆA GLAVA
		X  UNAKRSNO STRUJANJE	U  SNOP U - CEVI
			W  SPOLJAŠNJE ZAPTIVANJE PLIVAJUĆA CEVNA PLOČA

Sl. 1.58. Oznake delova razmenjivača toplote (TEMA X-2019 Nomenklatura)

*Tip glave B/M*

Ova konstrukcija glave ima prirubnicu samo na strani cevne ploče, a s druge strane je zatvorena haubom ili dancem. Glava tipa B (M) je rešenje gde se umesto poklopca koristi dance. Ona je lakša i jeftinija od tipa A, posebno pri visokim pritiscima, jer je debljina zida danca znatno manja nego debljina zida ravnog poklopca. Glava se mora ukloniti prilikom čišćenja cevi, kao i pri kompletnoj reviziji. Ovaj tip glave se preporučuje za slučajeve čistog fluida oko cevi, što se posebno odnosi na U cevi, kada su oko cevi pare ili rashladni fluidi. Takođe se preporučuje i za razmenjivače malog prečnika omotača, gde nije, zbog težine glave, teško demontirati celu glavu, umesto poklopca. U praksi se javlja i neTEMA konstrukcija sa zavarenim ravnim dancem (krug pri sečenju prirubnica).

*Tip glave C*

Ovo je glava slična tipu A, jer ima ravan poklopac kolektora, ali nema prirubnice na drugom kraju kolektora, već je prirubnica istovremeno i cevna ploča. Ovaj tip konstrukcije je namenjen za izmenjive cevi paketa, jer omogućava da se izvrši pojedinačna revizija ili zamena cevi bez demontaže glave, što je prednost, naročito za dugačke omotače. Značajna mana kod ovog tipa glave je otežan pristup spoju cevi i ploče ako je mali razmak između cevi, što povećava prečnik omotača i cenu izrade. Ovaj nedostatak je glavni razlog retke primene ovog tipa glave.

*Tip glave N*

N tip glave nema rastavljivu vezu sa omotačem, cevna ploča je fiksirana unutar omotača, pa se ovo rešenje može koristiti samo za fiksno-cevne razmenjivače toplote. Ovde nema rastavljivih spojeva na strani fluida koji struji oko cevi, pa se konstrukcija preporučuje za rad sa toksičnim ili otrovnim fluidima na strani fluida u omotaču. Kao i tip glave A, ima prednost da se čišćenje cevi iznutra obavlja samo skidanjem poklopca. Međutim, to je istovremeno i nedostatak kao kod tipa glave C, jer je nepristupačan prilaz perifernim cevima spojevima.

*Tip glave D*

Kolektori tipa D su predviđeni za visoke pritiske na strani fluida u cevima. Ne daju se posebna rešenja, već postoji mnogo patenata. Zbog visokih pritisaka a za velike prečnike omotača vijčani spojevi su veoma opterećeni pa je neophodno hidrauličko zatezanje navrtki vijaka.

*Konusna glava*

Konusna glava nije navedena u TEMA nomenklaturi, ali se često koristi za registar sa jednim prolazom, naročito u vertikalnim termosifonskim isparivačima (reboilers). Osim elegantne konstrukcije konus se koristi i za redukciju preseka na vertikalnom termosifonskom isparivaču i kada je priključak prevelik da bi se aksijalno uklopio na kolektor. Uobičajeno je da prečnik priključka bude do jedne polovine prečnika kolektora. Konusna glava se primenjuje za niske pritiske gasova ili para na strani cevi, za visoke brzine strujanja i naročito kod dvofaznih strujanja pri prelasku iz parne faze u tečnu fazu. Može biti zavarene ili prirubničke izvedbe. Prirubnička izvedba je demontažna, koristi se ako cevi zahtevaju čišćenje iznutra.

### **b) Doboš (omotač, plašt, ljuska)**

TEMA standard definiše konstrukcije omotača: E, J, F, G, H, K, i X (Sl. 1.58) u zavisnosti od strujanja fluida oko cevi.

#### *Omotač tipa E*

Ovaj omotač se koristi za strujanje u jednom prolazu fluida oko cevi. To je daleko najčešći tip omotača u hemijskoj i procesnoj industriji.

#### *Omotač tipa F*

Ovaj omotač ima dva prolaza fluida oko cevi, koji su podeljeni uzdužnom pregradom. Ova konstrukcija se koristi za tzv. ukršteni temperaturni režim, to jest, kada je temperatura hladnijeg fluida na izlazu viša od izlazne temperature toplijeg fluida, što je uobičajeni slučaj suprotnosmernog strujanja fluida u cevi i oko cevi.

#### *Omotač tipa J*

Fluid u omotaču ulazi na dva kraja odvojeno, a zatim se spaja u zajedničku izlaznu struju na sredini omotača. Taj slučaj se naziva omotač tip J 2-1. Može biti i suprotno, da se ulazni tok postavi na sredini, a zatim deli na dve polovine na izlazu iz omotača. Ovaj slučaj se označava J 1-2 omotač. Ako je fluid kondenzujuća para, usvaja se tip J 2-1, jer je manji priključak pare ako je iz dva dela, a priključak kondenzata je znatno manji zbog veće gustine tečne faze. U slučaju isparavanja koristi se omotač J 1-2, jer je sada na ulazu tečna, a na izlazu parna faza. Manji priključci omogućavaju veći broj cevi po preseku snopa, pri ugradnji zaštitne ploče na strani ulaza pare. Ovo je bitno za doboše manjeg prečnika (manje od 800 mm).

#### *Omotač tipa G*

Ovaj tip omotača se koristi uglavnom za horizontalne termosifonske ribojlere. Omotač ima jednu centralnu podužnu pregradu, bez poprečnih pregrada. TEMA određuje dužinu podeljene struje do 60 in. (1500 mm), pa se G omotač ne može koristiti za razmenjivače toplote veće dužine cevi od 120 in. (3000 mm).

#### *Omotač tipa H*

Omotač H je ustvari dva G omotača postavljeni jedan pored drugog i može se zvati dupli podeljeni sistem. Preporučuje se za horizontalne termosifonske ribojlere. Prednost TEMA G i H omotača je drastični pad pritiska, budući da nema pumpe (prirodna cirkulacija) pad pritiska mora biti minimalan. Osim toga, ova konstrukcija minimizira prirodnu tendenciju razdvajanja fluida na dve faze.

#### *Omotač tipa X*

Ovo je u unakrsni omotač. Fluid se uvodi preko više ulaza duž omotača u cilju postizanja bolje raspodele. Konstrukcija ima izrazito niske padove pritiska i koristi se za hlađenje ili kondenzaciju para pod vakuumom. Podužna ploča može postojati kao noseći element, ali bez uticaja na unakrsnu struju fluida u omotaču.

#### *Omotač tipa K*

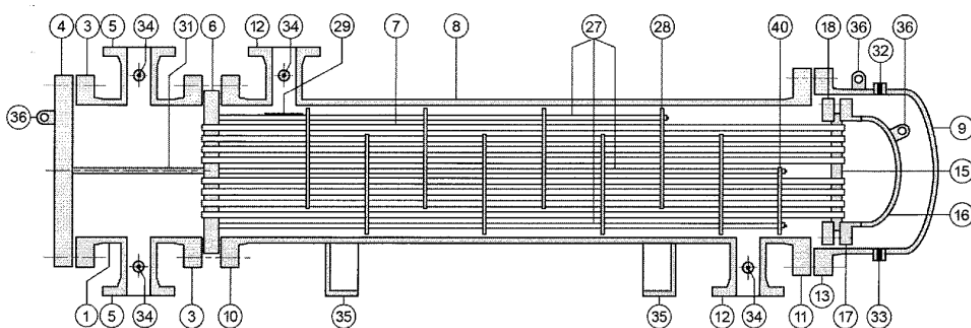
To je posebni unakrsni omotač koji se primenjuje kod isparivača tipa ketle ribojler (*Kettle reboiler*). Unakrsna struja fluida oko cevi postiže se pomoću brane raspodele fluida (poz. 38, Sl. 1.59e), da bi isparavao u donjoj zoni razmenjivača.

### ***c) Tipski TEMA primeri i specifikacija pozicija***

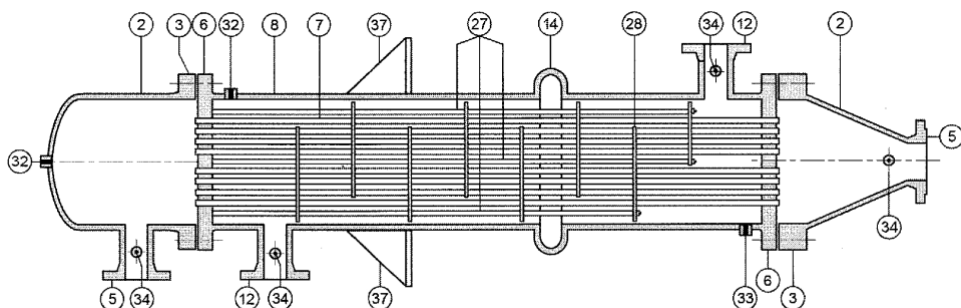
TEMA standard daje tipske primere razmenjivača sa specifikacijom naziva pozicija. Popis pozicija TEMA konstrukcija razmenjivača toplote dat je na slikama Sl. 1.59 a,b,c,d,e,f pri čemu su izabrani sledeći tipovi: AES - sa plivajućom glavom sa dvodelnom prirubnicom, BEM - sa konusnom zadnjom glavom, AEP - sa plivajućom glavom i zaptivanjem preko spoljašnjeg pakovanja, CFU - sa U cevima, koji nema zadnju glavu, AKT - isparivač kette (ribojler), AJW - sa podeljenim strujanjem i plivajućom cevnom pločom.

Popis tripskih pozicija razmenjivača toplote prema TEMA standardu (IX - 2019):

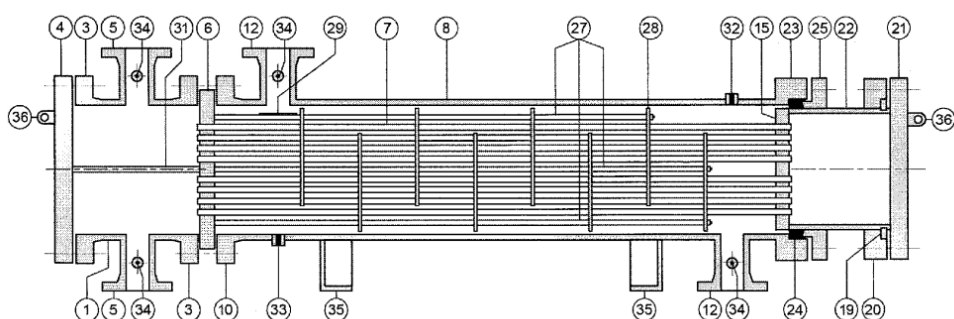
- |   |  |
|---|--|
| 1. Stacionarna glava-kolektor                 | 21. Spoljnji poklopac plivajuće glave  |
| 2. Stacionarna glava-hauba                    | 22. Klizna čaura plivajuće cevne ploče |
| 3. Stacionarna prirubnica kolektora ili haube | 23. Kućište zaptivnog pakovanja        |
| 4. Poklopac kolektora                         | 24. Zaptivno pakovanje                 |
| 5. Stacionarni priključak glave               | 25. Stezna čaura pakovanja             |
| 6. Stacionarna cevna ploča                    | 26. Srednji prsten                     |
| 7. Cevi                                       | 27. Noseće šipke i razmaknica          |
| 8. Doboš - omotač - plašt                     | 28. Poprečna pregrada ili noseće ploče |
| 9. Dance doboša                               | 29. Protivudarna ploča                 |
| 10. Prirubnica omotača stacionarne glave      | 30. Podužna ploča - dijafragma         |
| 11. Prirubnica omotača-na strani zadnje glave | 31. Pregrada broja prolaza             |
| 12. Prirubnica priključka                     | 32. Priključak za odzraku              |
| 13. Prirubnica dobošastog danca               | 33. Priključak za drenažu - pražnjenje |
| 14. Proširenje za dilataciju                  | 34. Priključak za merne instrumente    |
| 15. Plivajuća cevna ploča                     | 35. Nosači aparata                     |
| 16. Poklopac plivajuće glave                  | 36. Kuka za podizanje                  |
| 17. Prirubnica poklopca plivajuće glave       | 37. Papuča vertikalnog oslonca         |
| 18. Kontraprirubnica plivajuće glave          | 38. Brana                              |
| 19. Dvodelni stezni prsten                    | 39. Priključak nivoa tečnosti          |
| 20. Prirubnica steznog prstena                | 40. Nosač plivajuće glave              |



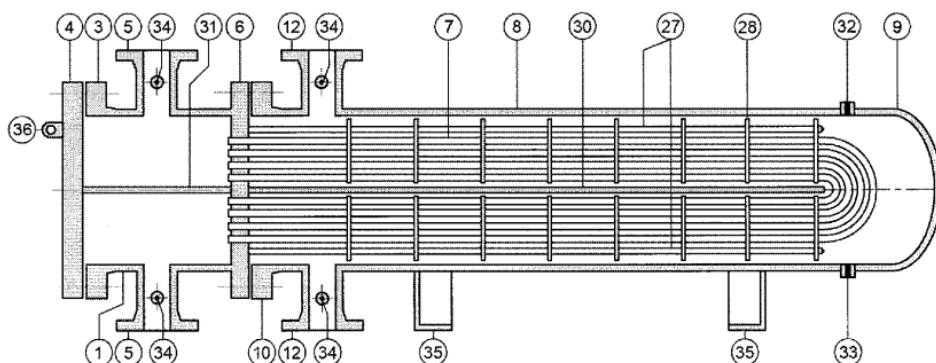
**Sl. 1.59a.** AES razmenjivač toplote sa plivajućom glavom - dvodelna prirubnica



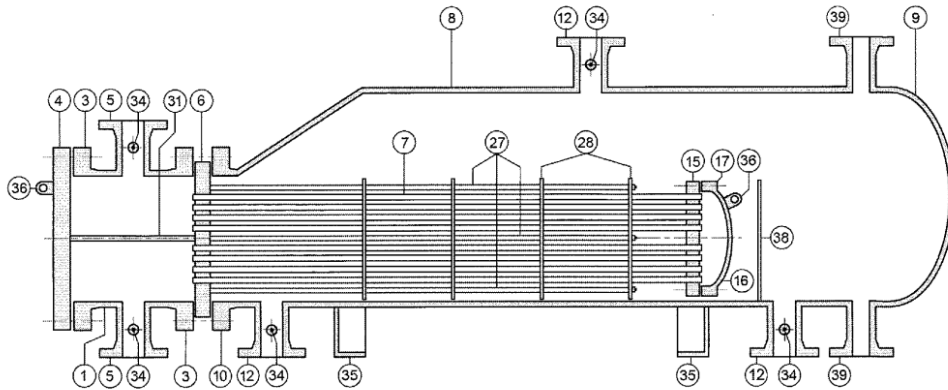
Sl. 1.59b. BEM razmenjivač toplote sa konusnom zadnjom glavom



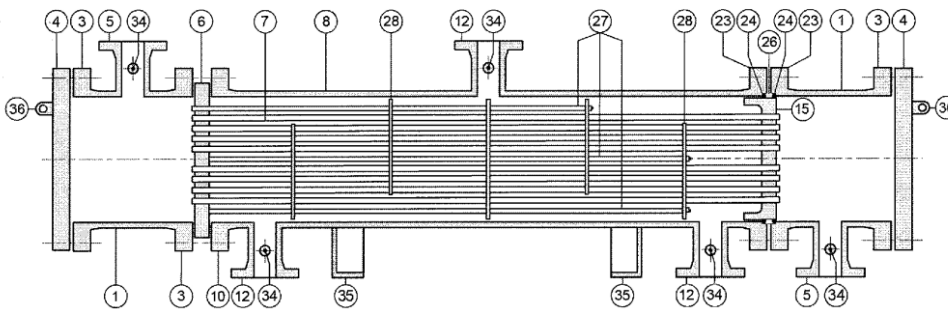
Sl. 1.59c. AEP razmenjivač toplote sa plivajućom glavom – spoljašnje pakovanje



CFU Sl. 1.59d. razmenjivač toplote sa U cevima - nema zadnju glavu



Sl. 1.59e. AKT razmenjivač toplote tipa – isparivač kete (ribojler)



Sl. 1.59f. AJW razmenjivač toplote sa podeljenim strujanjem – plivajuća cevna ploča

#### **d) TEMA klasifikacija razmenjivača toplote**

**Klasifikacija prema uslovima rada:** Predviđene su tri klase razmenjivača toplote:

Klasa R je predviđena za uopšteno teške uslove, bez uticaja plamena, u rafinerijama i sličnim tehnološkim uslovima prerađivačke industrije.

Klasa C je predviđena za umerene komercijalne zahteve, bez dejstva vatre na konstrukciju razmenjivača, i za uobičajene uslove rada.

Klasa B je predviđena za posebne zahteve u hemijskim procesima, koji zahtevaju upotrebu specijalnih legura koje su otporne na koroziju.

Klasifikacija razmenjivača prema uslovima rada odnosi se samo na mehaničke standarde, zato je relativno malo razlika u konstrukciji između klasa razmenjivača toplote, a najviši zahtevi se postavljaju za razmenjivače koji rade prema R klasi TEMA standarda. Konstrukcija razmenjivača se može usvojiti prema tehničkom

rešenju proizvođača, ali usvojena konstrukcija mora odgovarati standardnim TEMA rešenjima glave i omotača (Sl. 1.58).

**Klasifikacija prema konstrukciji razmenjivača toplote:** Standardizovane su grupe:

Razmenjivači toplote sa fiksnom cevnom pločom

U-cevni razmenjivači toplote

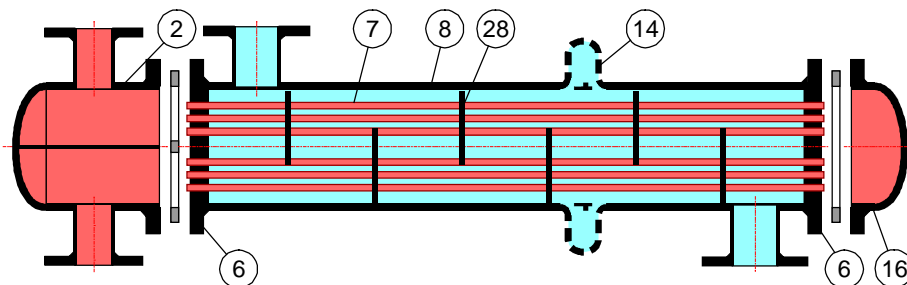
Razmenjivači toplote sa plivajućom glavom

Razmenjivači toplote sa fiksnom cevnom pločom ima prave cevi osigurane fiksiranjem na oba kraja omotača. Konstrukcija može imati demontažni poklopac kolektora (npr. AEL), poklopac tipa haube (npr. BEM, Sl. 1.60), ili integrisane cevne ploče (npr. NEN). Glavna prednost konstrukcije sa fiksnim cevima je niska cena, jednostavnost izrade i konstrukcije i mogućnost primene u najvećem broju tehnoloških aplikacija. U stvari, razmenjivač sa fiksnim cevima je najjeftiniji tip, samo dok su male termičke dilatacije i dok nije potrebno rešavati problem kompenzacije. Ostale prednosti ove grupe razmenjivača su:

- 1) mogućnost mehaničkog čišćenja unutrašnjosti cevi pošto su pristupačne posle uklanjanje poklopca kolektora ili haube,
- 2) Najveća zaštita od propuštanja fluida na strani omotača, jer ima integrisane priрубnice na obe strane omotača, bez zaptivanja, što je preporuka za rad sa otrovnim ili zapaljivim fluidima.

Nedostaci konstrukcije sa fiksnim cevima su:

- 1) Cevni paket je fiksiran u omotaču, ne može se demontirati, prostor oko cevi se ne može očistiti mehanički. Kako je mehaničko čišćenje cevi (provlačenjem četke) uobičajeni postupak, to predstavlja ograničenje u upotrebi i zbog toga fluid oko cevi treba biti čist. Međutim, treba napomenuti da je hemijsko čišćenje prostora oko cevi moguće. Dakle, ako je hemijsko čišćenje zadovoljavajuće, može se prihvatiti konstrukcija sa fiksnim cevima za prljave fluide oko cevi. Budući da je hemijsko čišćenje težak postupak, to ova konstrukcija nije jako rasprostranjena.
- 2) U slučaju velikih razlika temperatura između cevi i omotača, apsorbovanje temperaturskih dilatacija će biti moguće samo ugradnjom kompenzatora u omotaču. U tom slučaju se gubi prednost niske cene u značajnijoj meri.



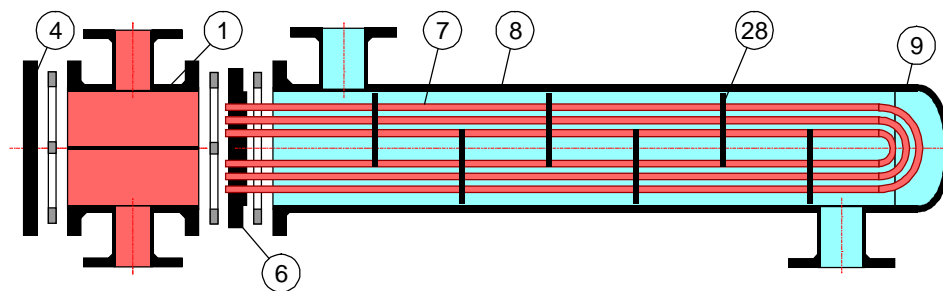
Sl. 1.60. BEM razmenjivač toplote sa fiksnom cevnom pločom (fiksne cevi).

Moguće su i kombinacije AEL i NEN – videti TEMA nomenklature, slika 1.58

U-cevni razmenjivači toplote implicira cevi razmenjivača toplote savijene u obliku slova U (Sl. 1.61). Očigledno, postoji samo jedna cevna ploča, što pojeftinjuje konstrukciju, međutim savijanje cevi predstavlja dodatni trošak. Dalje, minimalni prečnik luka U-cevi je obično tri puta veći od spoljašnjeg prečnika cevi, što povećava središnji neiskorišćeni prostor razmenjivača. Ovaj nedostatak se može delimično ublažiti postavljanjem u središnji prostor ukošenih U-cevi, koje opet otežavaju mehaničko čišćenje, jer remete koridore mrežnog rasporeda. Za istu spoljnu površinu cevi, razmenjivač toplote sa U-cevima, imaće veći prečnik doboša, u odnosu na razmenjivače sa fiksnim cevima. Razlika u prečniku je izraženija kod manjih prečnika omotača, jer središnje U-cevi za isti prečnik cevi zauzimaju isti prostor po preseku. Dodatni trošak od savijanja U-cevi i veći prečnik omotača više ili manje pokrivaju uštedu u troškovima s obzirom na ukidanje jedne cevne ploče. Dakle, troškovno gledano U-cevni razmenjivač toplote se izjednačuje sa razmenjivačem sa fiksnim cevima.

Prednost razmenjivača toplote sa U-cevima je kompenzacija toplotnih dilatacija usled razlike u temperaturama fluida u i oko cevi. Širenje cevnog snopa je moguće, jer je slobodan na kraju suprotno od cevne ploče. Dakle, i bez detaljnog proračuna U-cevni razmenjivači toplote mogu se koristiti za uslove većih temperaturnih razlika i česta pogonska uključjenja-isključjenja. Osim toga, moguće je spoljašnje cevi, koje se ne mogu čistiti, ukloniti iz cevnog paketa i zameniti.

Nedostatak U-cevne konstrukcije je, da se unutrašnjost cevi ne može lako očistiti, jer mehaničko čišćenje zahteva fleksibilne šipke ili sajle. Zbog toga se ne preporučuje upotreba U-cevnih razmenjivača toplote, za uslove smeštaja prljavog fluida u cevima. Ovo je veoma veliko ograničenje za U-cevne razmenjivače toplote za primenu u rafinerijama, koje obično imaju prljave fluide i u cevima i oko cevi.

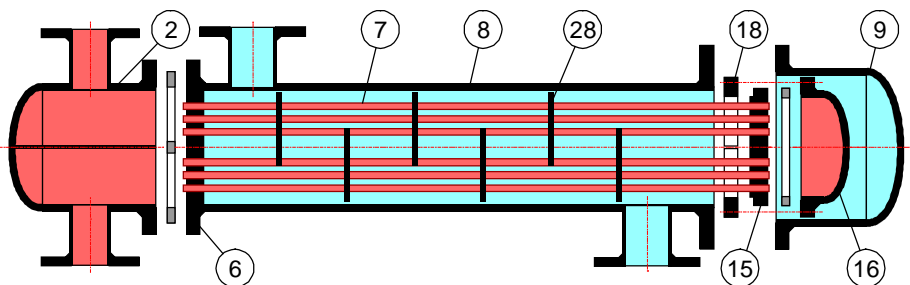


Sl. 1.61. AEU razmenjivač toplote sa U cevima. Moguće je umesto prednje glave tipa A ugraditi glavu tipa B ili C – videti TEMA nomenklature, slika 1.58

Razmenjivači toplote sa plivajućom glavom su veoma svestrani dobošasti razmenjivači toplote, koji se često označavaju - STHE (*Shell and Tube Heat Exchangers*), ali su i najskuplji, Sl. 1.62. Ovi razmenjivači imaju jednu fiksnu cevnu ploču u odnosu na omotač, dok je druga cevna ploča slobodna, i pliva unutar omotača. To omogućava slobodno širenje cevnog snopa, ali i čišćenje oba prostora, u i oko cevi. Stoga se ovi razmenjivači mogu koristiti za prljave fluide u i oko cevi,



pa predstavljaju standardnu konstrukciju, koja se koristi u rafinerijama. Viša cena izrade razmenjivača toplote sa plivajućom glavom je posledica činjenice da on ima više komponenti u odnosu na U-cevne ili razmenjivače sa fiksnim cevima, a takođe i veći prečnik omotača da bi se konstrukcija plivajuće glave mogla izvući, ili veći



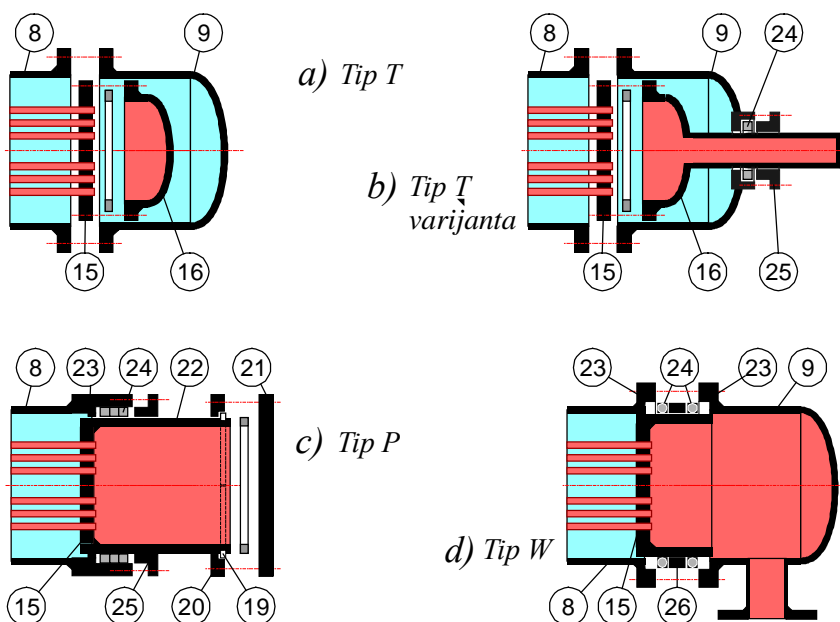
Sl. 1.62. BES razmenjivač toplote sa plivajućom glavom tipa S. Moguće su razne kombinacije prednje i zadnje glave i omotača – TEMA nomenklature, Sl. 1.58

prečnik zadnje glave, ako se plivajuća glava prethodno demontira. Postoji više rešenja konstrukcije plivajuće glave: S, T, P i W, videti Sl. 1,58.

*Plivajuća glava sa dvodelnom kontraprirubnicom:* TEMA tip S, ima najčešću primenu u hemijskoj procesnoj industriji, Sl. 1,62. Poklopac plivajuće glave, poz. 16 zatvara plivajuću cevnu ploču pomoću dvodelne kontraprirubnice, poz. 18, a sve je smešteno u dance doboša, poz. 9. Prečnik doboša zadnje glave mora biti veći od prečnika omotača da bi u njega mogao stati plivajući prirubnički spoj. Demontaža razmenjivača toplote ide sledećim redom: skida se zadnja glava - dobošasta hauba (poz. 9), zatim se uklanja poklopac plivajuće glave (poz. 16) zajedno sa dvodelnom kontraprirubnicom (poz. 18), nakon čega se cevni paket može izvući na stranu stacionarne glave razmenjivača.

*Izvlačeća plivajuća glava:* TEMA tip T, ima poklopac poz. 16. na Sl. 1.63a. direktno pričvrćen na plivajuću cevnu ploču poz. 15, tako da dvodelna prirubnica nije potrebna. Prečnik omotača mora biti veći od prirubnice poklopca, pa gustina cevi po preseku omotača pada. Prednost ovog tipa plivajuće glave je u tome, da se cevni snop može izvući iz omotača, bez demontaže zadnje glave ili plivajućeg poklopca glave, čime se smanjuje vreme održavanja. Posebno je pogodna za kettle isparivače, gde je i inače prečnik doboša znatno veći od cevnog snopa, Sl. 1.59e. Nedostatak ove konstrukcije je posledica male gustine cevnog snopa po preseku omotača, pa je uporedna cena najviša kod ove vrste razmenjivača toplote. Ako fluid koji struji kroz cevi mora da ima samo jedan prolaz, tip plivajuće glave sa dvodelnom prirubnicom (S), prema Sl. 1.62. nije moguć. U tom slučaju primenjuje se varijanta plivajuće glave tip T prikazana na Sl. 1.63b, gde se dilatacija cevnog snopa izmešta izvan razmenjivača i ostvaruje preko cevnog priključka. Nedostatak ove konstrukcije je neophodnost zaptivanja između cevnog priključka i dance doboša, pri čemu problem dilatacije nije rešen, već se rešava kompenzatorom cevnog priključka (nije prikazan na slici).

*Plivajuća glava sa spoljnim zaptivnim pakovanjem: TEMA tip P, ima zadnju plivajuću cevnu ploču, poz. 15. integrisanu sa zadnjim poklopcem u obliku doboša, poz. 22. zatvorenu sa poklopcem plivajuće glave, poz. 21, Sl. 1.63c. Dilatirajući spoj doboša poz. 22. i kućišta poz. 23, koje je zavareno na omotač poz. 8, se ostvaruje preko zaptivnog pakovanja poz. 24. i stezne čaure za kompresiju pakovanja poz. 25. Karakteristika ovog tipa plivajuće glave je dilatiranje izvan unutrašnjosti razmenjivača, ali bez potrebe za dodatnom kompenzacijom, kao u slučaju prikazanom na Sl. 1.63b. Zaptivni spoj dozvoljava kretanje plivajućoj cevnoj ploči zajedno sa zadnjim dobošem, ali je ova konstrukcija sklona*



**Sl. 1.63.** Tipovi plivajuće glave: a) Tip T - izvlačeća plivajuća plivajuća glava, unutrašnja dilatacija, b) Tip T - izvlačeći cevni snop, spoljnja dilatacija c) Tip P - plivajuća glava sa zaptivanjem pakovanjem, spoljnja dilatacija d) Tip W - plivajuća glava sa O-ring zaptivanjem, unutrašnja dilatacija.

propuštanju fluida i njena upotreba je ograničena na strani omotača na bezopasne i netoksične fluide, kao i na umerene pritiske i temperature (do 40 bara i 300°C).

*Plivajuća glava sa spoljnim O-ring pakovanjem: TEMA tip W, takođe ima spoljašnje zaptivanje, kao tip P, ali je dilatacija cevnog snopa unutar razmenjivača toplote, Sl. 1.63d. Zaptivanje dilatirajućeg spoja je izvedeno pomoću pakovanja (najčešće dva O-ring zaptivača) poz. 24, koji su odvojeni pomoću srednjeg prstena poz. 26. smeštenog u zazor prirubnica poz. 23. Sa jedne strane pakovanja pritisak na propuštanje vrši fluid u cevi, a sa druge strane fluid oko cevi, ali u oba slučaja propuštanje će se odvijati prema spoljašnjoj sredini. Širina cevne ploče mora biti*

dovoljna da obezbedi prostor za smeštaj dva pakovanja, prstena za razdvajanje i dilatacije. Konstrukcija je ograničena do 10 bara i 200°C, ali omogućuje jedan prolaz fluida u cevima sa fiksnim cevnim priključcima, što je prednost u odnosu na tip T plivajuće glave prikazan na Sl. 1.63b.

*Specifična rešenja plivajuće glave*, su zasnovana na standardnim tipovima, uz dodatke kojima se ostvaruje ušteda u materijalu, izradi, montaži ili održavanju. Najčešće su to patenti, koji nisu dovoljno provereni u praksi i nemaju širu primenu.

### 1.3.4. Specijalne konstrukcije cevnih razmenjivača toplote

Specijalne konstrukcije imaju specifičnu namenu i konstruktivna rešenja i prepoznatljiviji su u raznim tehnološkim procesima. Prema *Saundersu* [7] mogu biti:

Isparivači - ribojleri,

Kondenzatori,

Razmenjivači tipa bajonet cev,

Isparivači sa duplim registrom,

Razmenjivači sa duplom cevnom pločom,

Razmenjivači tipa cev-u-cev (CuC).

#### **a) Isparivači - ribojleri**

To su česti aparati u procesnoj i hemijskoj industriji, a koriste se naročito u destilacionim kolonama kao element za predaju energije fluidu koji isparava. Prema hidrodinamičkim karakteristikama mogu se podeliti na:

Recirkulacione sisteme velike brzine (termosifonski i pumpni ribojleri).

Bazenske jedinice sa unutrašnjim ribojlerom, takođe termosifonski.

Jedinice sa padajućim filmom.

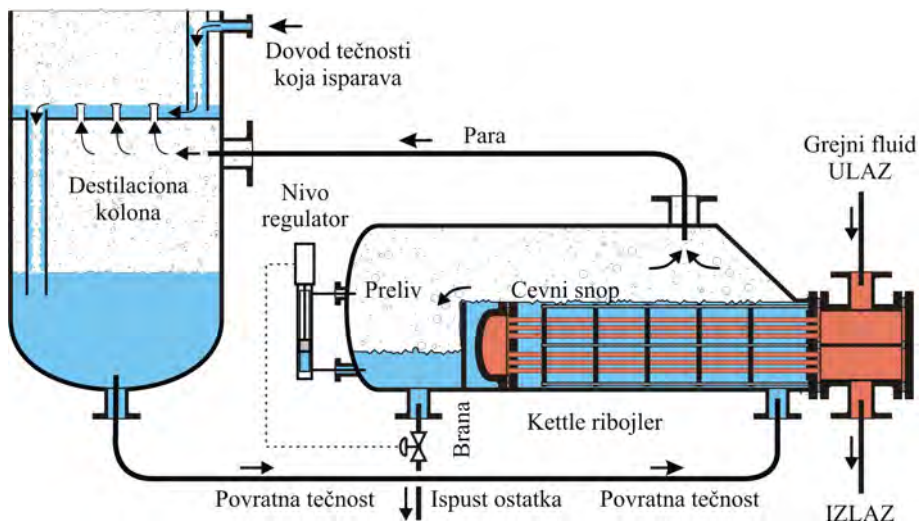
Toplotne performanse, tendencija zaprljanja, konstruktivna rešenja i cena varira u velikim rasponima u zavisnosti od vrste isparivača. Izbor rešenja treba zasnivati na zahtevima tehnološkog procesa i tehnoeкономске analize. Proizvoljan, ili izbor na prostoj analogiji, često dovodi do nepotrebnih ulaganju i skupe eksploatacije.

**Recirkulacioni isparivački sistemi** imaju zajedničku osobinu da tečnost koja isparava, može više puta prelaziti preko ogrevne površine, tj. recirkulisati. Mesto fluida loži isparava, najčešće je oko cevi, ali može biti i u cevi.

*Ketle ribojler*, Sl. 1.64, je najčešća konstrukcija isparivača sa prirodnom cirkulacijom i izvedbom od U cevi sa dva prolaza toplijeg fluida. Omotač ribojlera je TEMA tip K, a prednja i zadnja glava mogu biti različitog tipa u zavisnosti od vrste fluida i potrebe za čišćenjem u toku eksploatacije. Visinu tečnog prostora određuje prelivna brana koja obezbeđuje da tečna faza prekrije cevni snop. Jednostavnost, pouzdanost, niska cena i mogućnost primene u širokom području toplotnog opterećenja površine razmene su glavne prednosti ovog isparivača.

Niski protoci isparavajuće tečnosti kroz isparivač, usled prirodne cirkulacije, utiče na relativnu neosetljivost ove konstrukcije na promene uslova rada isparivača. Međutim, za velike prečnike cevnog snopa ili male razmake

između cevi snopa, može doći do pada toplotnog fluksa, usled gušenja protoka tečnosti pojavom parnih mehurova u donjoj zoni cevnog snopa. Preporučeno toplotno opterećenje površine razmene prema *HTRI* [18] je oko  $63000 \text{ W/m}^2$ .

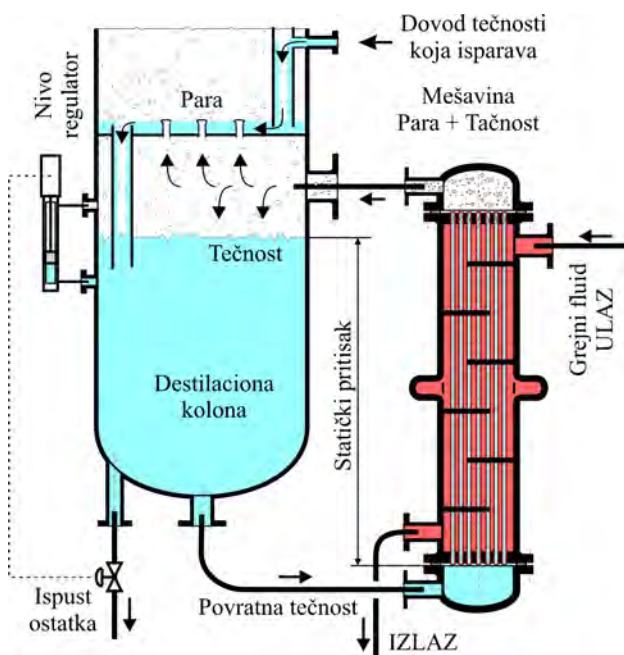


Sl. 1.64. Tipični isparivački sistem sa kette ribojlerom

Kettle ribojler se najčešće koristi u području malih temperaturnih razlika na površini razmene, za čiste tečnosti i za više komponentne tečnosti kada su manji rasponi temperatura ključanja. Veća razlika temperatura ključanja komponenti nije dozvoljena, zbog tendencije da se teže komponente akumuliraju u zoni cevnog snopa, što značajno povećava temperaturu ključanja. Iz istog razloga sklonost zaprljanju kette ribojlera je viša od bilo koje druge vrste ribojlera. Upotreba orebrenja sa spoljašnje strane cevi, povećava koeficijent prelaza toplote, ali još više otežava mehaničko čišćenje.

*Vertikalni termosifonski ribojler* je vertikalni razmenjivač toplote, gde isparavajuća tečnost isparava u cevi u jednom prolazu. Prave cevi mogu biti dužine i do 6 m. [18]. Cena ove konstrukcije je relativno niska, jer se ribojler može direktno osloniti na konstrukciju kolone, Sl. 1.65. Da bi isparivačke cevi ribojlera bile dovoljno potopljene, potrebno je održavati nivo tečnosti u koloni, na visini kraja cevi gornje cevne ploče, kontrolom isticanja neisparenog ostatka pomoću nivo regulatora. Glavni problem ove konstrukcije ribojlera je velika dužina cevnog snopa, koja zahteva i povećanu visinu kolone, kako bi se održao nivo stuba tečnosti, koji je potreban za potapanje cevi razmenjivača toplote. Smanjenje visine za istu površinu razmene, može se postići povećanjem broja vertikalnih cevi u cevnom snopu ribojlera, što se ne preporučuje. Bolje rešenje je ugradnja više paralelnih jedinica manjeg prečnika. Alternativno rešenje za smanjenje visine

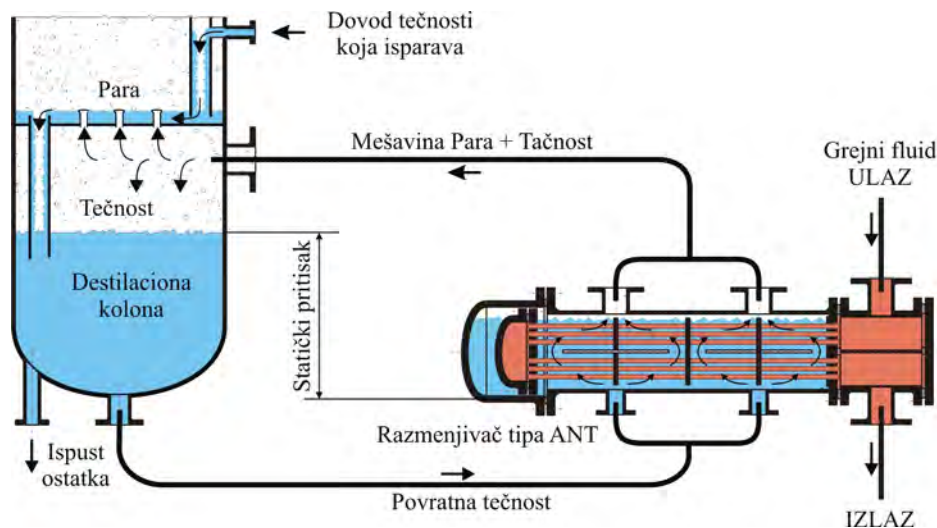
ugradnje, može biti spiralni razmenjivač toplote vertikalne izvedbe, iako ima višu cenu po jedinici površine razmene toplote. Niže statičke visine neće ugroziti koeficijent prelaza toplote, jer je pad pritiska u cevima vrlo mali. Brzina cirkulacije zavisi od otpora trenja tečne i gasne faze u ribojleru. Pad pritiska mora biti u ravnoteži sa visinom stuba tečnosti u koloni. Ako sistem radi pod vakuumom, usled



Sl. 1.65. Tipični vertikalni termosifonski ribojler

prekoračenja kritičnog toplotnog fluksa, mogu se pojaviti oscilacije u radu i pad prenosa toplote. Povećanje stabilnosti rada vertikalnog termosifonskog ribojlera se može postići ugradnjom prigušnog organa u cevnoj liniji povratne tečnosti, pomoću koga se može dodatno uticati na ukupni pad pritiska procesa. Ako sistem radi pod visokim pritiskom, kritični toplotni fluks je ograničen pojavom filmskog ključanja, a ne oscilacija u radu. Vertikalni termosifonski ribojleri se ne preporučuju u procesima gde se očekuju velike fluktuacije parametara fluida u toku rada, ili visoke viskoznosti tečnosti koja isparava i ako komponente smeše imaju širok raspon tačaka ključanja. Stepenn zaprljanja termosifonskog ribojlera je manji nego kod ketle ribojlera. Ipak, zavisno od fluida, ako postoji potreba za češćim čišćenjem prostora oko cevi ribojlera, isplativa je ugradnja rezervnih jedinica, koje se mogu čistiti bez dužih prekida procesa rada.

*Horizontalni termosifonski ribojleri* imaju, za razliku od vertikalne izvedbe strujanje tečnosti koja isparava sa spoljnje strane cevi. Uglavnom se koriste TEMA omotači za niske padove pritiska. Na slici Sl. 1.66, prikazan je ribojler tipa ANT. Za ravnomerno korišćenje cele površine razmene potrebno je dobro izbalansirati sve priključne grane ribojlera. Zbog povećanih troškova cevne instalacije, horizontalni termosifonski ribojler je skuplji od vertikalne izvedbe. Međutim, horizontalna konstrikcija ima dobro mešanje u prostoru oko cevi i niske padove pritiska, što je čini prikladnom za šire rasponne tačaka ključanja smeše koja isparava. Oni su manje osetljivi na promene toplotnog fluksa u odnosu na vertikalne ribojlere, zbog stabilizacije otpora trenja u prostoru oko cevi, usled manjih brzina i intenzivnog mešanja. Zato im je potreban niži statički pritisak.



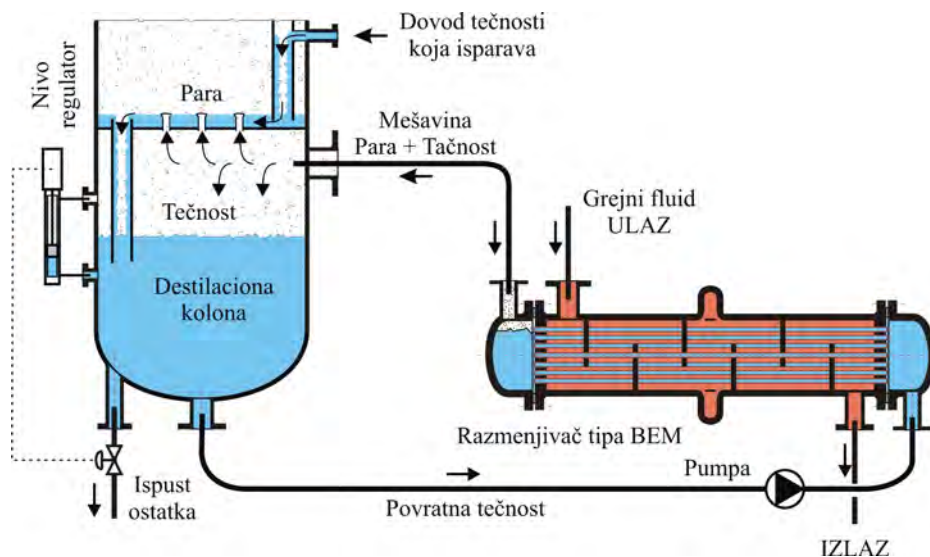
Sl. 1.66. Konstrukcija sa horizontalnim termosifonskim ribojlerom

Koeficijenti prenosa toplote su nešto viši u odnosu na ostale ribojlere, a maksimalni toplotni fluks je sličan kao za kettles ribojlere. Tendencija zaprljanja je prilično niska, ako sistem radi s povećanim brzinama, inače je povećana i čišćenje je teže nego kod vertikalnih ribojlera. Zato, ako su u pitanju fluidi koji isparavaju, a imaju veću sklonost ka zaprljanju bolje rešenje je vertikalni termosifonski ribojler.

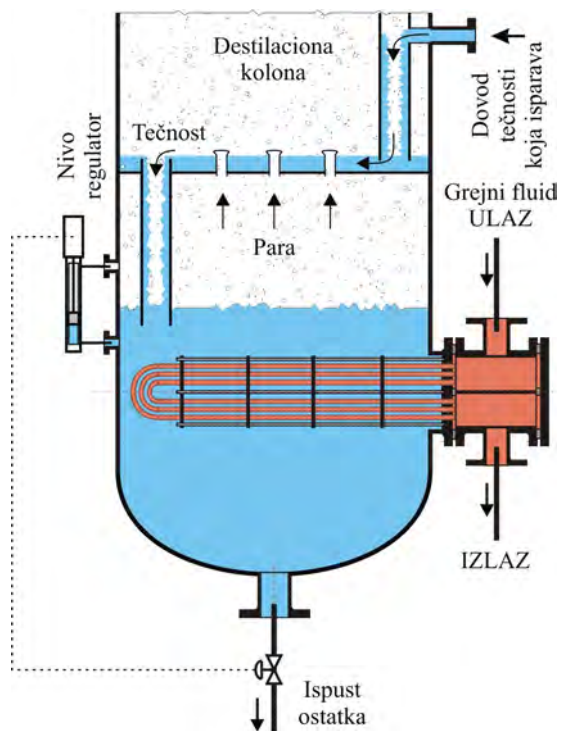
*Pumpni ribojleri* su poseban slučaj, i ne mogu biti ekonomski konkurenti ostalim tipovima rebojlera, osim u slučaju vrlo viskoznih fluida ili fluida sa visokom sklonošću ka zaprljanju površina razmene. Upotreba pumpe u procesu pre svega se odnosi na povećanje brzine cirkulacije procesnog fluida. Za razliku od termosifonskih horizontalnih ribojlera, cirkulacioni tok fluida koji isparava se smešta u cevi, slika Sl. 1.67, jer veće brzine i padovi pritiska ne predstavljaju problem, a čišćenje umutrašnjosti cevi je inače jednostavnije od čišćenja oko cevi. Sama pumpa se ugrađuje ispred ribojlera, a na izlazu se pojavljuje smeša parne i tečne faze, čije odvajanje se obavlja u samoj koloni. Regulacijom nivoa tečnosti u koloni, postiže se potopljenost cevnog snopa ribojlera i zaštita pumpe od usisavanja gasne faze.

Ugradnja pumpe treba da je predmet pažljive ekonomske studije, s obzirom na to da su njeni investicioni i eksploatacioni troškovi visoki. Prednosti ugradnje pumpe su povećanje koeficijenta prenosa toplote usled povećanja brzine cirkulacije (ali i nedostatak usled porasta pada pritiska), cevovodi su manjeg prečnika i veće dužine (ribojler može biti znatno udaljen od kolone), kao i povećanje stabilnosti rada pri visokom toplotnom fluksu. Navedene prednosti, ipak ne pokrivaju troškove pumpanja, tako da je primena ovog rešenja preporučljiva samo u slučajevima gde proces isparavanja ne dozvoljava primenu rešenja sa prirodnom cirkulacijom isparavajućeg fluida.





Sl. 1.67. Tipični primer pumpne konfiguracije ribojlera



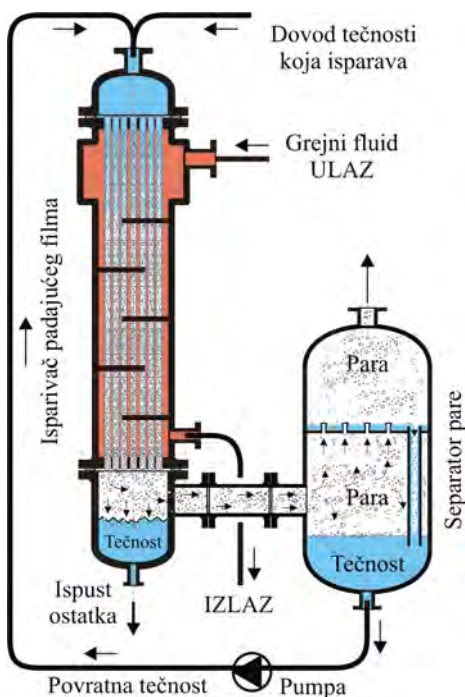
Sl. 1.68. Tipična kolona sa unutrašnjim ribojlerom

**Bazenske jedinice sa unutrašnjim ribojlerom**, imaju cevni snop direktno postavljen u kolonu, usled čega se eliminiše omotač razmenjivača toplote. Cirkulacija isparavajućeg fluida se odvija na bazi termosifonskog uzgona. U koloni je neophodno održavanje nivoa tečnosti, da bi cevni snop uvek bio potopljen, slika Sl. 1.68. Prirubnica na koloni, može držati cevni snop razmenjivača konzolno, ako su u pitanju manje težine snopa. Za veće jedinice obavezna je izrada kliznog oslonca u koloni na suprotnoj strani manloha.

Ovo rešenje ribojlera je najjeftinije i preporučuje se uvek kad nema drugih ograničenja. Problem u praksi predstavlja činjenica da su prečnici kolone manji od optimalne dužine cevnog snopa, što može povećati

neracionalno prečnik i broj cevi u cevnom snopu. Sve to povećava cenu i otežava manipulaciju u radu i čišćenju. Ako je moguće bolje je ugraditi više cevnih snopova, koji imaju manji prečnik kolektora, nego povećavati prečnike cevi snopa, ili smanjivati rastojanja cevi u cevnoj ploči. Ove dve mere kojima se postiže veća površina razmene, istovremeno doprinose padu koeficijenta prenosa toplote, zbog pojave parnih mehurova i pada toplotnog fluksa. Sa porastom prečnika cevnog snopa, tendencija stvaranja zaprljanja na spoljašnjoj strani cevi se povećava, a mogućnost čišćenja smanjuje. U zavisnosti od stepena zaprljanja radnog fluida u cevima, cevni snop ribojlera mogu biti U cevi ili sa izvlačećom zadnjom glavom.

**Jedinice sa padajućim filmom** slični su isparivačima sa vertikalnim termosifonskim ribojlerom. Osnovna razlika je u smeru strujanja tečnosti koja isparava. Kod ribojlera sa padajućim filmom strujanje tečnosti je odozgo na dole u smeru gravitacije, u obliku tankog filma tečnosti koja isparava po unutrašnjoj površini cevi, pa izgleda da film pada, po kome je konstrukcija dobila ime. Strujanje procesnog fluida u cevima razmenjivača je u jednom prolazu, dok energetski fluid struji poprečno u omotaču, slika Sl. 1.69. Prečnik cevi je veći u odnosu na vertikalni ribojler, iz razloga što najvećom dužinom cevi struje tečna i parna faza istovremeno. Recirkulacija neisparene tečnosti obavlja se pumpom, koja



Sl. 1.69. Ribojler sa padajućim filmom

može podići stub tečnosti u gornju zonu ribojlera. Raspodela tečnosti ravnomerno na sve vertikalne cevi vrši se preko perforirane ploče ili prelivnih brana specifične konstrukcije u gornjoj zoni, a priključak na separator pare velikog preseka je u donjoj zoni ribojlera. Veliki presek na izlazu pare je neophodan zbog pada brzine strujanja i odvajanja neisparene tečnosti. Sve ove specifičnosti utiču na višu cenu ribojlera sa padajućim filmom u odnosu na vertikalni termosifonski ribojler. Da bi se obezbedila stabilna debljina filma od oko 0,25 mm prema *HTRI* [18], potrebno je tačno proračunati protok tečnosti i on mora biti manji u odnosu na termosifonski ribojler (40 do 60%). Prekid filma može izazvati i mehurasto isparavanje, koje je posledica velike temperaturne razlike između površine razmene i filma fluida koji isparava. Prekid filma uvek izaziva pad koeficijenta prelaza toplote, zbog čega se kao prva preventivna mera, temperaturna



razlika ograničava na manje od 25 K, a uobičajeno 3 – 6 K.

Za isparavanje filma duž cevi potreban je visok koeficijent prelaza toplote, zbog toga se kao energetski fluid najčešće koristi para koja kondenzuje. Debljina sloja filma opada duž cevi odozgo na dole, pri čemu mu, zbog dejstva gravitacije, raste brzina, odnosno strujanje postaje turbulentno, što povoljno utiče na intenzitet prenosa toplote. Koeficijent prelaza toplote, pri isparavanju na strani cevi, uglavnom zavisi od hidrodinamičkih uslova protoka filma, pri čemu viskozitet ima najveći značaj. Osnovna prednost isparavanja pomoću padajućeg filma je vrlo kratko vreme zadržavanja tečnosti na kontaktnoj površini, pri čemu ne dolazi do pregrevanja nastale pare. Vreme isparavanja i separacije pare je kratko i meri se u sekundama. Ovo je idealno rešenje za tehnologije sa toplotno osetljivim proizvodima, kao što su mleko, voćni sokovi, farmaceutski proizvodi itd.

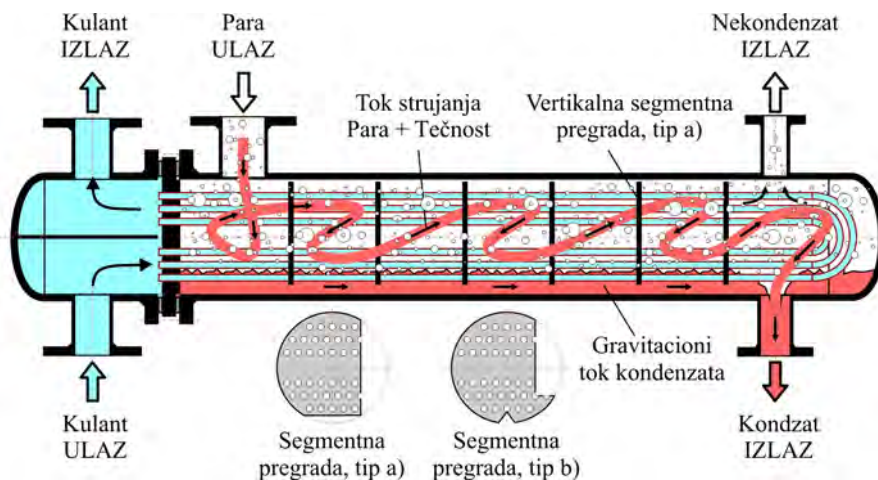
### **b) Kondenzatori**

Kondenzatori su veoma česti aparati, standardne konstrukcije, a specifičnost im se ogleda u tome, što jedan od fluida menja agregatno stanje i iz parne prelazi u tečnu fazu. Kondenzovati može procesni fluid, uz pomoć fluida koji se zagreva (kulant), ili se operacija zagrevanja može obavljati na procesnom fluidu pomoću radne pare koja se kondenzuje. Kondenzacija je takođe sastavni deo svakog rashladnog ciklusa. U slučaju kondenzacije procesnog fluida, kulant može biti vazduh (vazdušno hlađeni kondenzatori), voda bez promene faze (vodeno hlađeni kondenzatori) ili vazduh i voda koja isparava (evaporativni kondenzatori). Dobošasti kondenzatori su dominantni u industrijskim procesima, dok u komercijalnim rashladnim postrojenjima prednost dobijaju pločasti i spiralni razmenjivači toplote (kompaktni). Osnovna podela je po kriterijumu mesta kondenzacije (u cevi ili oko cevi) i uticaja gravitacije (vertikalni ili horizontalni).

**Kondenzacija u omotaču (oko cevi)** je najčešći slučaj kod rashladnih instalacija sa vodenim hlađenjem. Voda je jeftin radni fluid sa visokim specifičnim toplotnim kapacitetom, ali je vazduh ipak konačni toplotni ponor kome se predaje toplota kondenzacije. Procesni fluid najčešće ima manju sklonost ka zaprljanju od vode (ipak ne uvek), pa iz razloga lakšeg čišćenja unutrašnjosti cevi, a takođe i zbog potrebe za niskim orebrenjem cevi na strani kondenzacije, voda se usmerava u cev, a procesni fluid oko cevi. Kada su u pitanju rashladni fluidi, pritisak kondenzacije igra važnu ulogu na temperaturu kondenzacije, pa pad pritiska fluida koji menja fazu treba biti što niži (ispod 10% od radnog pritiska, prema *HTRI* [18]), jer inače može doći do pada LMTD (srednje temperaturske razlike), odnosno do povećanja potrebne površine razmene toplote.

*Horizontalnu kondenzaciju oko cevi* ima omotač TEMA tip E, ili drugi, dok cevni snop može biti fiksni sa plivajućom zadnjom glavom ili u obliku U cevi. Poprečne pregrade su segmentne i to jednom, dvaput ili triputa u zavisnosti od dozvoljenog pada pritiska. Na slici Sl. 1.70, prikazan je horizontalni kondenzator sa U cevima i poprečnim vertikalnim segmentnim pregradama tipa a), koje su malo

podrezane sa donje strane, radi lakšeg odvoda kondenzata gravitacionim putem. Ako je potrebno održavati nivo kondenzata, onda se koristi pregrada sa branom i V izrezom, radi podizanja nivoa kondenzata i sporijim oticanjem preko V izreza, pregrada tip b). Jednostavna konstrukcija i niska cena najveća je prednost omotača tipa E, a izbor zadnje glave (U cevi ili plivajuća glava), zavisi pre svega od potrebe za čišćenjem kulanta u cevima. Sekcija omotača na ulazu pare, može biti nedovoljno iskorišćena, zbog usmeravanja strujanja odmah prema oknu prve pregrade, a takođe, pri većim brzinama pare, moguća je erozija i vibracija cevi, koje su prve na udaru. U takvim slučajevima potrebno je primeniti neka od inovativnih rešenja ili izvršiti optimizaciju. Kondenzat se skuplja u dnu omotača, čineći potopljene cevi pasivnim, u smislu koeficijenta prenosa toplote, zbog male brzine kondenzata, pa je podhladivanje kondenzata skoro nikakvo. U slučaju potrebe za podhladivanjem kondenzata, najbolje je predvideti posebni dodatni razmenjivač toplote, koji radi u režimu tečnost-tečnost, bez promene faza. Dva osnovna problema horizontalne kondenzacije oko cevi su porast nivoa tečnosti u donjoj zoni i sakupljanje nekondenzujućih gasova u gornjoj zoni omotača. Odvod



Sl. 1.70. Horizontalni kondenzator TEMA tip BEU, kondenzacija oko cevi

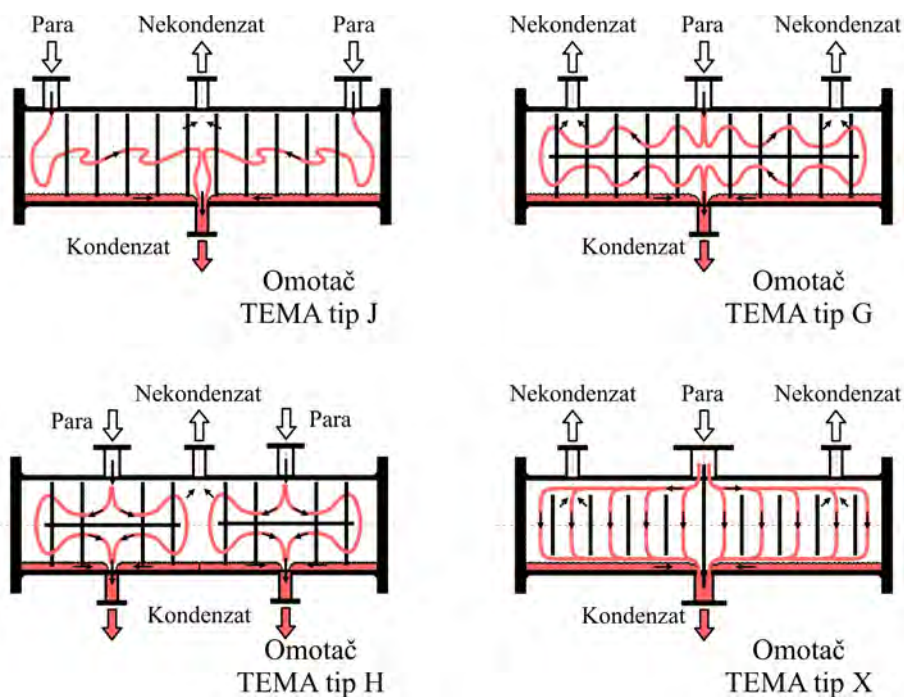
kondenzata ne sme ometati mali presek priključka ili mali akumulacioni rezervoar. Odvod nekondenzata mora biti pod kontrolom, inače može značajno umanjiti aktivnu površinu razmene toplote. Relativno veliki pad pritiska u omotaču može biti ograničavajući faktor mnogih aplikacija. Za aplikacije koje zahtevaju manje padove pritiska u omotaču, prikladnije su opcije sa J i X omotačem.

Na slici Sl. 1.71, šematski su prikazane opcije J, G, H i X tipova TEMA omotača za horizontalnu kondenzaciju oko cevi, a prema potrebama procesa. *J-tip omotača* koristi se, kada je dozvoljeni pad pritiska, niži nego što se može dobiti pri upotrebi E omotača, (videti sliku Sl. 1.70). Konfiguracija J omotača podseća na dva

paralelno postavljena E omotača, sa odvojenim dovodom, a zajedničkim odvodom fluida koji kondenzuje. Cevnih priključaka je više, što povećava cenu ove instalacije u odnosu na kondenzatora sa E omotačem. Ovom konfiguracijom se postižu nešto manje LMTD, u odnosu na E omotač, jer polovina razmenjivača ima suprotnosmerno a polovina istosmerno strujanje. Glavna prednost J omotača jeste smanjen pad pritiska fluida u omotaču, koji se može još smanjiti, ako se umesto pregrada sa jednim segmentom, koriste pregrade sa dva segmenta ili pregrade tipa krug i kružni presten (videti više detalja o pregradama u odeljku 2.1 - Dizajn komponenti). Ipak, ako postoji potreba za još manjim padom pritiska u omotaču, pravo rešenje je X omotač. Fluid u omotaču E i J ima jedan prolaz, a varijacije rešenja sa dva prolaza u omotaču su tipovi omotača G i H.

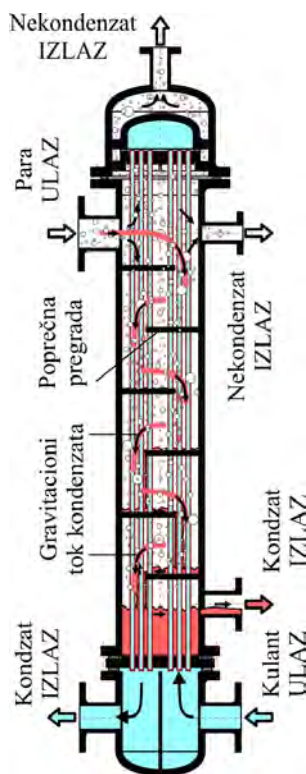
*Omotač tipa G*, ima središnji dovod pare i odvod kondenzata, protoci se dele na polovinu razmenjivača, svaki sa po dva prolaza. Pad pritiska je veći nego kod J omotača, ali zbog dužeg kontakta fluida ostvaruje se veći pad temperatura i manji protok kulanta, što može biti dobra alternativa. *Omotač tipa H*, podseća na dva paralelno postavljena G omotača, slično kao J u odnosu na E omotač, ali sa dva prolaza. Prednost omotača H u odnosu na G je manji pad pritiska, a nedostatak nešto viša cena instalacije.

Osnovna alternativa omotačima E i J ustvari je *X omotač*, sa značajnom drugačijom konfiguracijom. Kondenzujući fluid ulazi u sredinu omotača, širi se



Sl. 1.71. Horizontalni kondenzatori, omotač TEMA tip J, G, H i X, kondenzacija oko cevi - šematski prikaz.

duž omotača, levo i desno, spušta se prema dole poprečno preko cevi snopa, zatim se sabira i izlazi preko centralnog priključka na dnu omotača. Osim pregrada, cevni paket X omotača je sličan E i J omotaču. Pregrade u X omotaču imaju ulogu oslonca cevi i sprečavanje pojave vibracija, a nemaju ulogu usmeravanja struje fluida levo-desno. Zbog toga su ove pregrade sa horizontalnim gornjim segmentom za razvod fluida, dok na donjoj strani pregrade takođe može biti segment ili isečak za odvod kondenzata. Neki proizvođači umesto gornjeg segmenta, rade kolektorsko proširenje omotača za horizontalni razvod pare. U zavisnosti od razlika temperatura i mehaničkih napreznja zadnja glava može biti fiksna ili plivajuća, dok je upotreba U cevi retka. Dužina X omotača je obično manja u odnosu na E ili J omotače istog prečnika. Glavni problem ove konfiguracije je horizontalna distribucija pare, odnosno da najudaljenije pregrade neće imati istu iskoristivost površine razmene, zbog smanjenog dotoka pare. Najbolje rešenje ovog problema jeste kolektorski dovod pare na svaku sekciju koja nije duža od pet prečnika omotača (preporuka *HTRI* [18]).

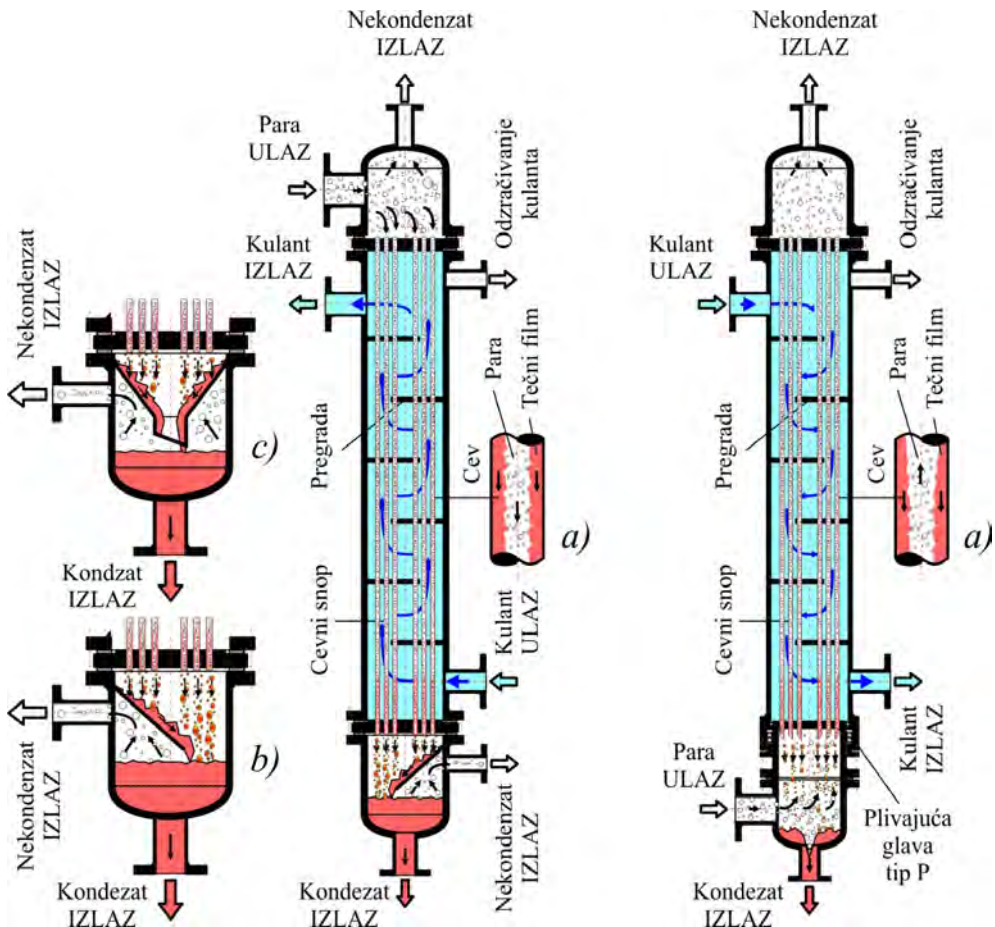


**Sl. 1.72.** Vertikalni TEMA tip E kondenzator - kondenzacija u omotaču

Najvažnija prednost X omotača je, osim niskog pritiska na strani fluida koji kondenzuje, jednostavan i lako predvidiv proces kondenzacije. Kod njih je poželjna primena nisko-orebrenih cevi, radi povećanja prenosa toplote sa strane parne faze, i smanjenja ukupne površine razmene. Zbog malih brzina na strani pare može doći do akumulacije nekondenzujućih gasova, koje treba kontrolisano odvoditi, imajući u vidu mesto skupljanja, u zavisnosti od težinskog odnosa prema kondenzujućem fluidu. Razlike temperatura između fluida u aparatu nisu velike, pa ova konfiguracija nije preporučljiva za parcijalnu kondenzaciju višekomponentnih fluida. Prava preporuka kondenzatora sa X omotačem su aplikacije jednokomponentnih fluida, koje zahtevaju niske pritiske (čak i vakuum). Alternativa može biti vertikalna kondenzacija u cevi s kratkim cevima većeg prečnika (videti nastavak ovog razmatranja).

Vertikalna kondenzacija oko cevi se odvija uglavnom u omotaču TEMA tip E, slika, Sl. 1.72. Ova konfiguracija, kao što se vidi na slici Sl. 1.65, redovno se koristi za termosifonski ribojler pri isparavanju tečnosti u kolonama. Kada se koristi za kondenzaciju pare, broj prolaza kulanta na cevnoj strani može biti dva, kao na slici, ako je cirkulacioni ciklus otvoren, pa se odzračivanje vrši preko izlaznog priključka. Odzračivanje u gornjoj zoni može biti samo ako je

gornja glava fiksna. U tom slučaju, ako je potrebno, kompenzacija termičkih dilatacija se obavlja preko kompenzatora na strani omotača. Broj prolaza fluida u omotaču je uvek jedan, a strujanje se odvija odozgo na dole, da bi se ostvarila glavna prednost ovog kondenzatora, a to je lagani gravitacioni odvod kondenzata, kao i mogućnost podhlađivanja kondenzata tokom strujanja. Koeficijent prelaza toplote je visok, zbog prekida filma tečnosti na cevima usled poprečnih pregrada. Osnovni nedostatak ove konstrukcije su teškoće pri mehaničkom čišćenju, naročito ako su dugačke cevi snopa. Pored toga, za duge cevi snopa vertikalne konstrukcije, iako zauzima malo prostora u osnovi, potreban je objekat veće visine i posebna konstrukcija za nošenje aparata i pristup pri manipulaciji, što ga čini skupljim u



**Sl. 1.73.** Vertikalni TEMA tip E kondenzator - kondenzacija u cevi, smer pare ka dole, a) Detalj kondenzacije u cevi, b) Separator pregrada, c) Separator u obliku levka. odnosu na horizontalnu izvedbu.

**Sl. 1.74.** Vertikalni TEMA tip E kondenzator - kondenzacija u cevi, smer pare ka gore - refluks, a) Detalj kondenzacije u cevi.



Ova konfiguracija se naročito preporučuje za slučaj kondenzacije vlažne pare, odnosno mešavine pare i tečnosti na temperaturi ključanja, jer pri gravitaciom strujanju dolazi do razdvajanja tečnosti od pare i njene potpune kondenzacije. Odvojena tečnost se skuplja na površini pregrada i slobodno preliva na sledeću pregradu ka dole, sve dok se ne skupi u donjem prostoru omotača, na izlazu kondenzata. Potapanjem donje zone kondenzatora jednostavno se ostvaruje dobro podhlađivanje kondenzata, ali je koeficijent prenosa toplote nizak, zbog male brzina kondenzata, pa se ne preporučuju veće temperature podhlađivanja.

**Kondenzacija u cevima** koristi se pre svega u procesnoj industriji za kondenzaciju korozivnih ili para pri polimerizaciji. Korozivne i polimerizacijske pare su problematične sa aspekta čišćenja, a njihov smeštaj u cev predstavlja ekonomičnije rešenje, čak i u slučaju smeštanja rashladnog kulanta u prostor oko cevi. Neka istraživanja (*HTRI*) pokazuju da gravitaciona kondenzacija u cevima ima bolji učinak u okviru raspoloživog pada pritiska od kondenzacije u omotaču. Takođe, nije bez značaja, pri kondenzaciji pare u cevima, nastaju manji problemi od hidrauličkog udara pri strujanju dvofazne mešavine. U nastavku će se prikazati kondenzacija u cevima za vertikalne i horizontalne kondenzatore.

*Vertikalna kondenzacija u cevi* je najbolja konstrukcija za kondenzaciju, ima najbolji prenos toplote i najbolju hidrodinamiku. Omotač je najčešće TEMA, tip E, broj prolaza na strani cevi mora biti jedan, cevni snop može biti sa fiksnim cevnim pločama u slučaju da nema velikih termičkih dilatacija, slika Sl. 1.73. Ako je kompenzator termičkih dilatacija neophodan mnogo češće se koristi donja plivajuća glava (kao na Sl. 1.74), umesto kompenzatora u omotaču, zato što je obezbeđenje kolinearnosti vertikalnog kompenzatora skuplje rešenje. Ulaz pare je na gornjoj glavi, a izlaz kondenzata i odvod nekondenzovanih para i inertnih gasova (nekondenzat) je na donjoj glavi. Odvajanje tečnosti u donjoj glavi od nekondenzata, odvija se uz pomoć konstrukcije u obliku pregrade b), ili levka c), Sl. 1.73. Manja količina nekondenzata može se skupiti i na gornjoj glavi, ako je ulaz pare bočno, kao na slici, koji takođe povremeno treba odvesti. Kulant ulazi u donjoj zoni omotača i struji ka gore preko poprečnih pregrada, čiji broj se određuje u zavisnosti od brzine i dozvoljenog pada pritiska, i izlazi u gornjoj zoni. Kako se izlazni priključak kulanta često ne može postaviti dovoljno blizu cevne ploče, potrebno je predvideti priključak za odzračivanje, prvenstveno iz cevne ploče ili iz omotača u blizini cevne ploče. Odzračivanje kulanta otklanja smetnje u cirkulaciji i utiče na smanjenje prisustva kiseonika u omotaču. Prisustvo kiseonika značajno pojačava dejstvo korozije na konstrukciju omotača.

Jednostavna konstrukcija, lako ostvariv gravitacioni tok kondenzata unutar cevi, kao i podhlađivanje prema zahtevu, čine ovu konstrukciju preporučljivu za veliki broj aplikacija. Kao što se vidi u detalju a), Sl. 1.73, tanak film kondenzata se formira na unutrašnjoj strani cevi i sliva se ka dole, pri čemu ostvaruje stalni kontakt sa kulantom i dobru razmenu toplote, pa nije neophodno, ali se ponekad koristi unutrašnje nisko orebrenje. Strujni tok procesnog i radnog fluida je uvek

suprotnosmerni, što obezbeđuje visoku temperaturnu razliku i efikasnost procesa razmene toplote, što daje ovoj konfiguraciji prednost, u procesima gde postoji širok temperaturni raspon kondenzacije komponenti smeše.

Osnovni nedostatak aplikacije sa kondenzacijom u cevi je zahtev da kulant bude što čistiji i da se čišćenje može obaviti hemijskim putem, što često nije slučaj. Ako se cevni snop, radi mehaničkog čišćenja mora vaditi napolje, to se može obaviti preko gornje glave uz upotrebu dizalice, što je skupa operacija.

*Refluks - vertikalna kondenzacija u cevi* je specifična aplikacija, u kojoj strujanje kondenzujuće pare ide odozdo prema gore, a kondenzat se sliva sa unutrašnje strane cevi prema dole, u obliku tankog filma, Sl. 1.74. Dakle, para i kondenzat struje u suprotnim smerovima u cevi, što omogućava kondenzaciju do kraja, odnosno uklanjanje nekondenzovanih para u najvišem stepenu. U prilog tome ide i smer strujanja kulanta od gore ka dole, čime se obezbeđuje visoka temperaturna razlika u gornjoj zoni cevnog snopa. Kako se para podiže ka gore, njen protok opada, a usled toga i brzina strujanja, što ima za posledicu smanjenje koeficijenta prolaza toplote. Velika brzina pare za ovu konstrukciju nije preporučljiva, jer može doći do povećanja debljine filma kondenzata i preplavlivanja tečnosti po celom preseku cevi, što će izazvati prekid protoka pare ka gornjoj zoni razmenjivača. Zbog toga se cevi snopa izvlače duže iz cevne ploče i zasecaju koso, da bi se sprečilo zagušenje protoka na ulazu u cevni snop. U slučaju većih temperaturnih dilatacija, uobičajeno rešenje je plivajuća glava sa spoljašnjim zaptivanjem, tipa P, koja je prikazana na slici Sl. 1.74.

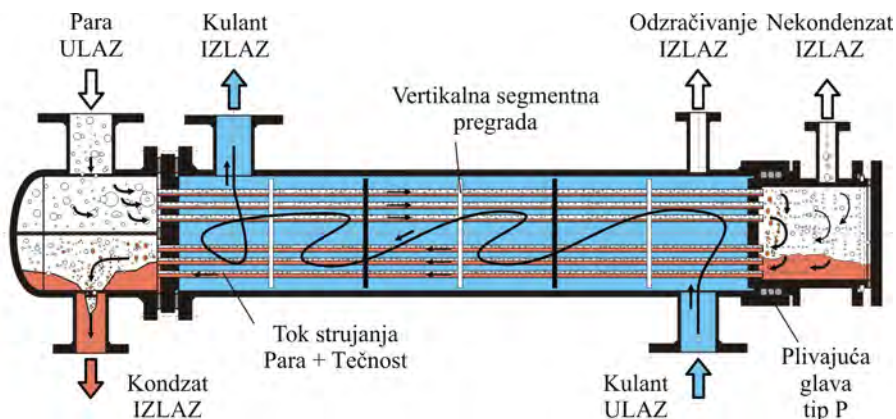
Osnovna prednost ove aplikacije, određuje i njenu namenu, pre svega za definitivnu kondenzaciju preostalih para u drugom stepenu, posle glavne kondenzacije, koja je obavljena u kondenzatoru druge konstrukcije. Refluks kondenzatori se mogu koristiti i za otklanjanje parnih čepova, koji su nastali u transportu tečnosti, zbog lokalnog pada pritiska, naročito na usisu pumpi. Nedostatak aplikacije je nizak koeficijent prenosa toplote, ali sa time se unapred računa, imajući u vidu namenu, kondenzacija preostalih parnih komponenti.

*Horizontalna kondenzacija u cevi* najčešće se koristi u kombinaciji sa ketle ili termosifonskim ribojlerima u kojima procesni fluid isparava, a u horizontalnom kondenzatoru se kondenzuje ili razdvaja na komponente. Na slici Sl. 1.75. je prikazan horizontalni kondenzator sa kondenzacijom u cevi, sa dva prolaza u cevi i jednim prolazom u omotaču i plivajućom zadnjom glavom tipa P. Retke su višeprolazne plivajuće glave iz razloga podhlađenja i pada LMTD, što utiče na kondenzaciju višekomponentnih mešavina sa velikim rasponom tačaka ključanja. Najpouzdanije konstrukcije ove aplikacije su sa jednim ili dva prolaza fluida koji kondenzuje u cevi, a kulant poprečno struji u omotaču u jednom prolazu. Kod konstrukcija sa U cevima, priključak za odvod nekondenzovanih para i gasova mora biti u donjoj zoni prednje glave, iznad priključka za odvod kondenzata.

Horizontalna orijentacija kondenzatora je poželjna zbog ograničenja pri ugradnji i održavanju, a kondenzacija u cevi se preporučuje, ako kulant mora biti u omotaču ili je fluid koji kondenzuje sklon zaprljanju i koroziji. Prenos toplote je



dobar, pod uslovom da se održava stabilan protok i velika brzina strujanja u cevi. U tom slučaju se mogu dostići performanse vertikalne konfiguracije sa strujanjem kondenzata u cevi ka dole.



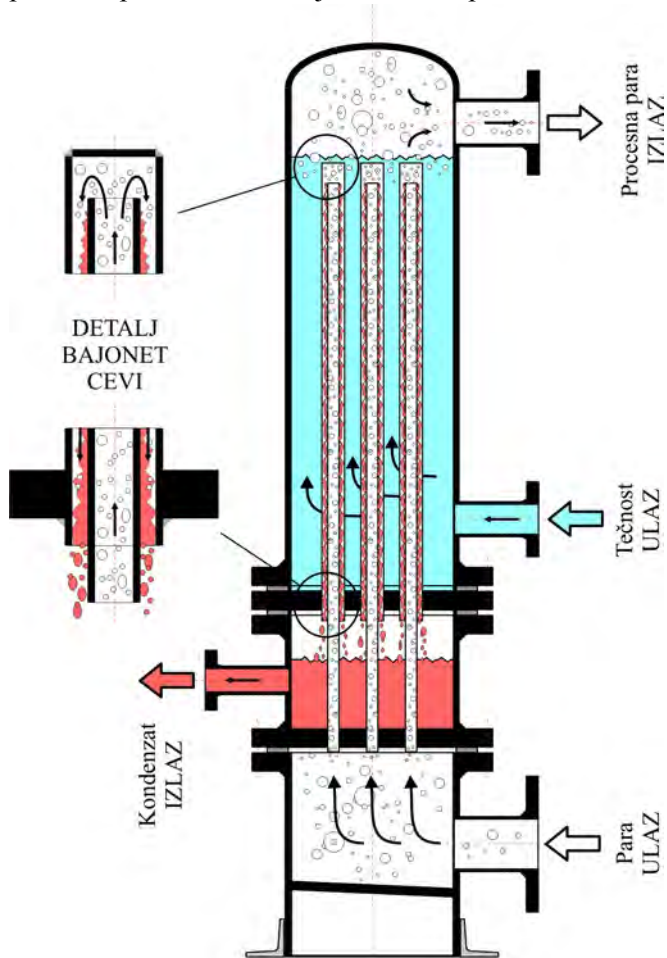
**Sl. 1.75.** Horizontalni kondenzatori, omotač TEMA tip E, kondenzacija u cevi, sa dva prolaza i plivajućom zadnjom glavom tipa P.

Problem koji se javlja u aplikacijama sa horizontalnom kondenzacijom u cevima, jeste pojava potapanja donjih cevi kondenzatom, što smanjuje efikasnost kondenzacije. Ova pojava se redovno javlja u slučaju kada se zahteva potpuna kondenzacija, pa je neophodno predvideti sigurnosni nivo kondenzata u odvodnoj glavi, što znači i potapanje jednog broja donjih cevi u snopu. Istina, to dovodi do podhlađivanja kondenzata, ali sa veoma niskim koeficijentom prenosa toplote, jer je brzina strujanja jako pala u cevima preplavljenim kondenzatom. Podhlađenje kondenzata i kontrolu kraja procesa kondenzacije, bolje je predvideti u dodatnom razmenjivaču toplote znatno manjih dimenzija, u režimu rada tečnost-tečnost.

### **c) Razmenjivači tipa bajonet cev**

Ovaj tip razmenjivača toplote podseća na bajonet koji se stavlja na pušku, ima dva osnovna dela unutrašnju cev, koja je otvorena na obe strane i spoljašnju cev ili oblogu, koja je sa jedne strane zatvorena, slika Sl. 1.76. Unutrašnje cevi su fiksirane u donju cevnu ploču, a spoljašnje cevi su fiksirane (zavarene) u gornju cevnu ploču. Kompleti bajonetnih cevi su postavljeni vertikalno (ili bar koso) u dobošasti omotač. Cevne ploče sa cevima se mogu rastaviti i na taj način je omogućen prilaz svakoj cevi sa obe strane radi revizije ili čišćenja. Ova konstrukcija omogućava nesmetano i nezavisno dilatiranje cevi, pa je zato naročito pogodna za procese sa visokom temperaturnom razlikom između fluida. Spoljašnja cev je sa gornje strane zatvorena ravnim ili bombiranim poklopcem. Razmak između cevi ako su veće dužine održava se pomoću trokrakog ili

zvezdastog prstena koji ne otežava strujanje fluida između cevi, a nošenje spoljanje cevi se rešava pomoću poprečnih pregrada u sklopu struje fluida u omotaču. Za kratke cevi nisu potrebni nikakvi nosači, osim koaksijalnog oslonca u cevnim pločama. Ako se za potrebe povećanja koeficijenta prenosa toplote između cevi predviđa podužno orebrjenje ono može poslužiti i za održavanje ekvidistancije.



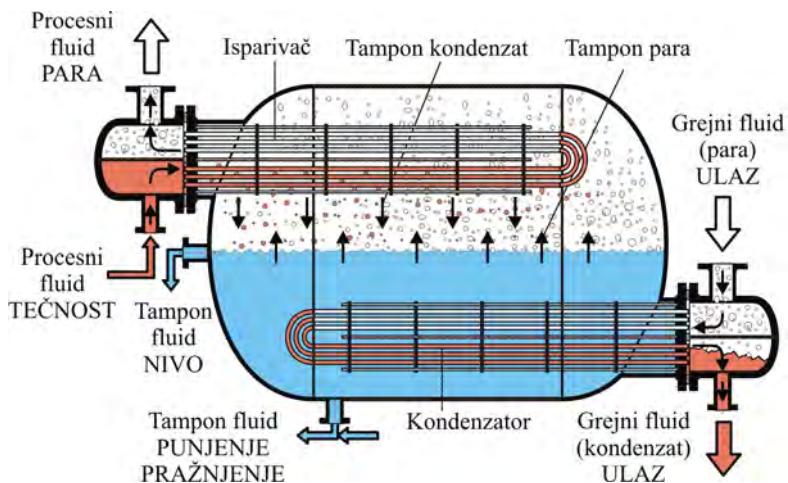
Sl. 1.76. Cevni razmenjivač toplote tipa BAJONET

Najčešća namena ove aplikacije je isparavanje tečnosti niske tačke ključanja pomoću vodene pare koja kondenzuje. Vodena para se diže kroz unutrašnju cev do vrha cevi, a zatim kondenzuje u spoljašnjoj cevi, koja se hladi pomoću fluida iz procesa. Skupljeni parni kondenzat se vrlo malo podhlađuje, jer se greje parnim cevima koje kroz njega prolaze. Ovaj tip razmenjivača treba da se ugrađuje vertikalno ili bar u kosom položaju, zbog gravitacionog toka pri odvođenju kondenzata. Procesni fluid se zagreva, ključa i zatim isparava u omotaču razmenjivača. Bajonet razmenjivači su predmet brojnih patenata. Poboljšanja konstrukcije idu u pravcu podizanja efikasnosti kondenzacije, najčešće redizajniranjem površine unutrašnje cevi orebranjem.

#### d) Isparivači sa duplim registrom

Poseban tip isparivača, koji nije po TEMA standardima, je razmenjivač toplote koji radi pomoću tri fluida: Grejni (energetski) fluid je obično vodena para koja kondenzuje u kondenzatoru, procesni fluid isparava u isparivaču, a razmena toplote između energetskog i procesnog fluida se odvija preko pomoćnog ili tzv. tampon fluida, koji isparava i kondenzuje u velikom dobošu u koji su smešteni i

cevni snopovi grejnog i procesnog fluida, slika Sl. 1.77. Termini kondenzator i isparivač su uslovni i odnose se na promenu stanja fluida u cevima, dok je za tampon fluid obrnuto, za njega je kondenzator ustvari isparivač, a na isparivaču on kondenzuje. Cela konstrukcija mora biti pažljivo projektovana da bi se održavao toplotni bilans između tri fluida. Kompenzacija temperaturnih dilatacija se obezbeđuje preko U cevi, ako grejni i procesni fluid nisu skloni zaprljanju ili preko plivajuće glave tip T, slika Sl. 1.63, ako je potrebno mehaničko čišćenje unutar cevnog prostora. Prostor oko cevi se može čistiti vađenjem cevnog snopa iz doboša, pri čemu je za izvlačenje kondenzatora potrebno pražnjenje tampon fluida.



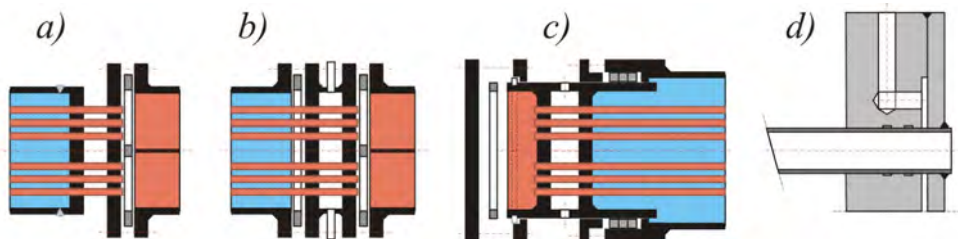
Sl. 1.77. Isparivač sa duplim cevnim registrom i tampon fluidom

Ovakva aplikacija ima primenu za isparavanje tečnosti koje imaju nestabilnu i niskotemperaturnu tačku ključanja. Stabilan rad obezbeđuje tampon fluid koji ključa, isparava i kondenzuje u zajedničkom dobošu. Tipična aplikacija je isparavanje etilena (-104 do +10°C), pomoću vodene pare (205°C), a metanol (120°C) služi kao tampon fluid, Saunders [2.4.2]. Konstrukcije sa dva cevna snopa mogu se koristiti i u aplikacijama sa dva fluida, kao npr. dupli kotle ribojler sa cevnom snopom na obe strane omotača.

### **e) Razmenjivači sa duplom cevnom pločom**

Kod nekih tehnoloških procesa, ako dođe do propuštanja i mešanja fluida u razmenjivaču toplote, može doći do kontaminacije bezopasnog fluida ili stvaranja eksplozivnih mešavina, što predstavlja veliku opasnost za okolinu. Mesto gde je najverovatnije propuštanje, su spojevi cevi i cevne ploče. U takvim okolnostima, kao mera podizanja bezbednosti od propuštanja spoja cevi i cevne ploče, najčešće se primenjuje dupliranje cevne ploče, neke varijante prikazane su na slici, Sl. 1.78. Otvoreni sklop sa fiksnim omotačem ili demontažnim omotačem može se primeniti

samo za razmenjivače toplote manjih gabarita, kod kojih cevni snop može nositi prednju glavu. Za veće mase glave razmenjivača primenjuje se varijanta pod b) na slici Sl. 1.78. sa omotačem između ploča (zatvorena varijanta), na kojoj su kontrolni otvori sa gornje i donje strane, kao indikatori propuštanja bilo koje cevne ploče. Ako je razmenjivač toplote sa plivajućom glavom, onda se mera zaštite od propuštanja mora primeniti i na nju, što je prikazano na istoj slici pod c). Da bi se umanjile teškoće održavanja kolinearnosti otvora za cevi u pločama često se primenjuje rešenje sa zavarenim cevnom pločama, varijanta pod d), sa prethodno izbušenim kanalima za kontrolu propuštanja fluida na spoju cevi i cevne ploče.



**Sl. 1.78.** Dupla cevna ploča – detalji: a) Otvoren sklop sa fiksnim omotačem, b) Zatvoren demontažni sklop, c) Dupla cevna ploča na sklopu plivajuće glave, d) Zavarena dupla cevna ploča, sa kanalima za kontrolu propuštanja spoja.

Primena razmenjivača toplote sa duplom cevnom pločom je pre svega u hemijskoj i farmaceutskoj industriji i to iz bezbednosnih razloga. Pored navedenih problema pri provlačenju cevi kroz cevne ploče, kod ovih razmenjivača se spoj cevi i unutrašnje cevne ploče može ostvariti samo presovanjem (uvaljivanjem).

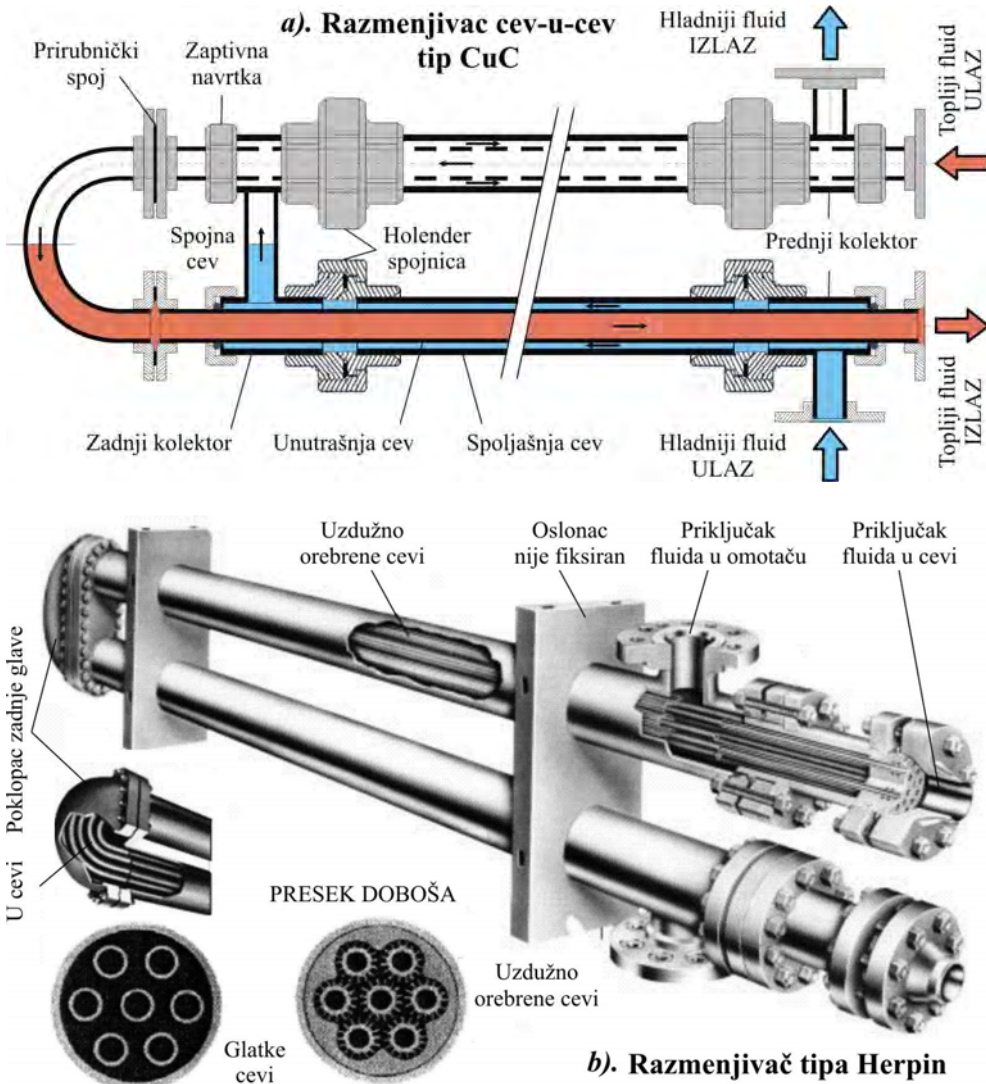
### **f) Razmenjivači tipa cev-u-cev (CuC) i tipa "šnala" (Herpin)**

Razmenjivači toplote, jednostavne konstrukcije koja sadrži samo dve cevi, jedna u drugoj, nazivaju se razmenjivači tipa cev-u-cev ili duple cevi (*Double pipe*). Konstrukcija sa više unutrašnjih U cevi postavljenih u omotač takođe u obliku U-cevi, naziva se razmenjivač tipa šnala, ukosnica ili herpin (Hairpin). Ovi razmenjivači često se pojavljuju kao specifična skupina aparata.

Razmenjivač toplote tipa CuC u obliku U cevi, prikazan na slici Sl. 1.79a, ima suprotnosmerno strujanje, gde topliji fluid struji kroz unutrašnju cev, a hladniji fluid kroz prostor između spoljnje i unutrašnje cevi. Površina razmene toplote je zid unutrašnje cevi. Razmenjivač je moguće rastaviti skidanjem holenderskih spojnicama, zaptivnih navrtki i navojnih prirubica, tako da se unutrašnja cev može izvući iz spoljašnje. Cevni rastavljivi luk unutrašnje cevi omogućava dupliranje prave dužine razmenjivača u obliku U cevi i grupisanje svih priključaka na jednoj strani. Presapanje protoka fluida oko cevi se obavlja preko spojne cevi koja je zavarena na zadnjem kolektoru, dok prednji kolektor ima samo priključak sa prirubnicom. Rastavljeni delovi su jednostavne pozicije, koje se mogu prethodno uraditi, što omogućava brzu završnu montažu aparata. Radni i procesni fluid se



moгу rasporediti bilo u cev ili oko cevi, jer se obe strane površine razmene mogu izuzetno dobro mehanički čistiti. Zavisno od potrebe procesa, strujanje fluida u razmenjivaču može biti suprotnosmerno ili istosmerno.



**Sl. 1.79.** Razmenjivači tipa Duple cevi. Gore, a) Razmenjivač tipa cev-u-cev (CuC) Dole, b) Razmenjivači tipa "Ukosnica", "Šnala", ili Herpin, sa detaljima i arijantama

Prikaz jednog herpin razmenjivača toplote sa delimičnim i poprečnim preseccima prikazan je na slici Sl. 1.79b. Konstrukcija se sastoji od dva kraka dobošastih razmenjivača sa prednjom cevnom pločom, koji su na zadnjem kraju povezani

zajedničkom glavom sa poklopcem, bez cevne ploče. Pri prečniku omotača većem od 300 mm, U cevi se ne savijaju po kružnom već po elipsastom radijusu, što umanjuje visinu poklopca zadnje glave. Pri dovoljno velikom radijusu cevi, moguće je i mehaničko čišćenje unutrašnjosti cevi. Strujanje fluida u cevima i omotaču je uvek uzdužno i paralelno, bez mesta gde pada brzina, pa ovi razmenjivači nemaju sklonosti za zaprljanje po tom osnovu. Ovi aparati nemaju ni poprečne ni uzdužne pregrade, kao ni veći broj prolaza. Oslonci cevi se rade tako da što manje ometaju strujanje fluida u omotaču. Mogu biti dizajnirani i sa mogućnošću izvlačenja snopa U cevi, ako je potrebno čišćenje i inspekcija cevi i omotača. Unutrašnje cevi mogu biti glatke ili uzdužno orebrene, čime se postiže veća površina razmene i kompaktnost konstrukcije.

Prednosti ovih razmenjivača su: Dobro prostrujavanje i visok koeficijent prenosa toplote, mogućnost prihvatanja termičkih dilatacija, velikih razlika temperatura i visokih pritisaka (u cevima preko 800 bara [14]). Glavni nedostaci su, što su konstrukcije najčešće patentirane i nedostupne većem broju proizvođača i što su relativno skupi i neekonomični, naročito pri  $UA > 80$  kW/K.

Cevi koje se koriste za CuC tipove razmenjivača su komercijalno dostupne crne cevi u rasponu 60 – 200 mm (2 – 8 cola) za spoljašnju cev i 20 – 150 mm (3/4 – 6 cola) za unutrašnju cev. Prema Gaju (*Guy* [2.3.2]), veće cevi nisu pogodne zbog velike debljine sloja fluida u kontaktu.

Ako su tehnološke prednosti CuC ili herpin razmenjivača od prvenstvene važnosti, povećanje kapaciteta i površine razmene toplote se može postići:

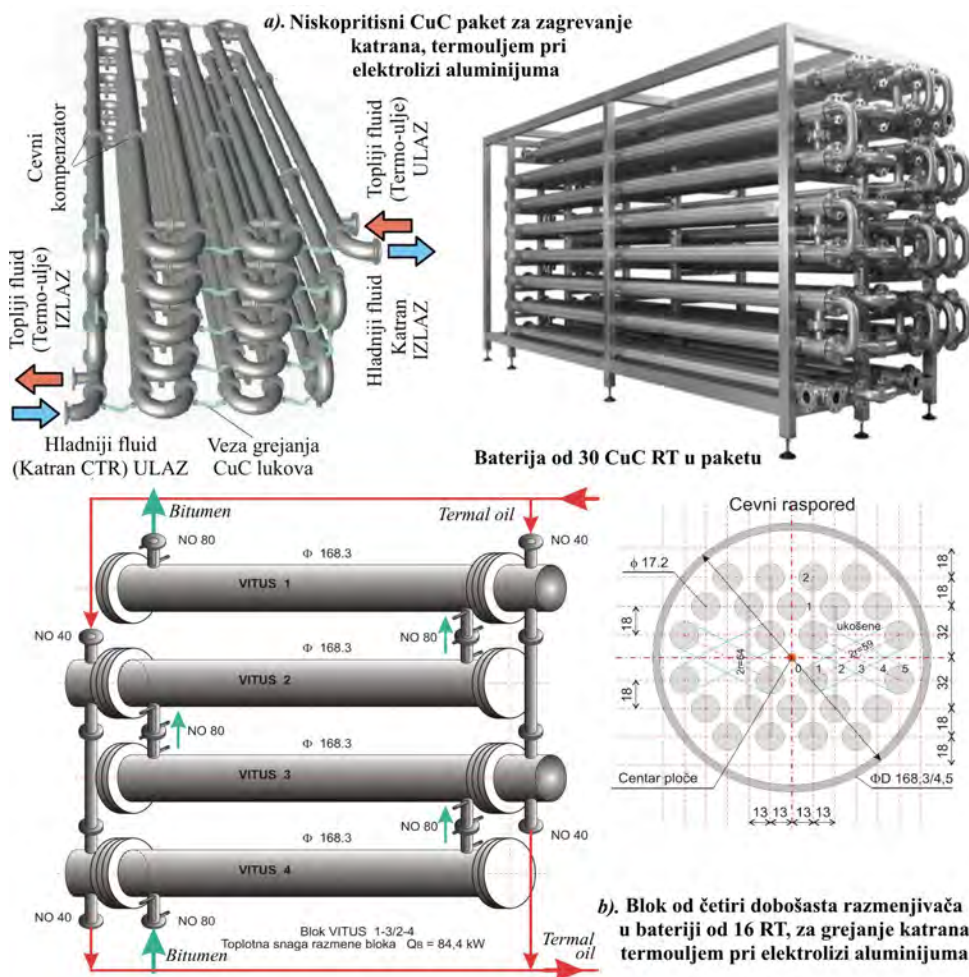
a) Povećanjem prečnika i dužine CuC razmenjivača ili broja unutrašnjih cevi u jednoj spoljašnjoj cevi. Naročito su se razvili herpin razmenjivači velikog prečnika omotača (tzv. multi-cevi), tako da se u praksi nekih proizvođača mogu postići prečnici omotača veći od 300 mm, čak do 800 mm [14]).

b) Orebranjem unutrašnje cevi spolja ili iznutra (ili istovremeno na obe strane), uzdužnim (longitudinalnim) rebri raznih oblika. Orebranjem se pored veće površine razmene, postiže i veći koeficijent prenosa toplote, ali i nešto veći otpori cirkulaciji fluida na strani orebranja.

c) Agregatiranjem više jediničnih CuC ili herpin razmenjivača, mogu se formirati baterije i paketi. Konstrukcija više osnovnih CuC ili herpin jedinica povezanih rednom, paralelnom ili kombinovanom vezom po istom modelu ili u istoj ravni čini jedan blok, a više blokova bateriju. Ako se više baterija poveže paralelno na isti sabirnik i razdelnik dobijamo paket CuC ili herpin razmenjivača. Na ovaj način se može formirati agregatni razmenjivač toplote i preko 1000 m<sup>2</sup> površine razmene, što ima primenu u raznim tehnološkim procesima. Baterije paketa se mogu naknadno dodavati (proširenje procesa) ili delimično stavljati van funkcije, što omogućava zamenu ili fazni remont. Nedostatak agregatnih aplikacija je nekompaktna i teška konstrukcija velike zapremine i visoke cene.

Na slici Sl. 1.80, prikazana je uporedna konstrukcija niskopritisnog CuC razmenjivača toplote i baterija dobošastih razmenjivača toplote za grejanje katrana (Coal Tar Pich – CTP) u industriji aluminijuma, *Rikalović* [95]. Katran se greje od

200 do 208 °C, pomoću termo-ulja temperature 250 °C, i služi kao vezivno sredstvo u izradi elektroda od mlevenog koksa u elektrolitičkom procesu dobijanja aluminijuma. Jedinični CuC razmenjivač sadrži čelične cevi  $\Phi 168,3$  spolja i  $\Phi 133$  unutra, gde energetski fluid struji oko cevi, a procesni u unutrašnjoj cevi. Više takvih jedinica dužine 6 m formira bateriju, a više paralelnih baterija formira paket ukupne površine razmene toplote od 129 m<sup>2</sup>, i toplotnog kapaciteta 350 kW (za 30 jedinica). Karakteristika konstrukcije je da topliji fluid struji oko cevi samo u pravom delu aparata, dok su cevni lukovi u prirubničkom spoju, tipa luk-u-luk, gde posebni tok toplijeg fluida struji oko cevi i služi za topljenje očvrslе mase katrana pri prekidu rada. Tok katrana je kontinualan, a tok energijskog fluida oko cevi je povezan visokootpornim fleksibilnim crevima (videti sliku).



Sl. 1.80. Uporedni prikaz baterija CuC razmenjivača i dobošastih razmenjivača, istog prečnika za potrebe zagrevanja katrana termo-uljem u elektrolizi aluminijuma.



Čišćenje unutrašnje cevi u kojoj struji katran je omogućen demontažom lukova preko prirubničkog spoja. Za kompenzaciju razlike termodilatacija spoljne i unutrašnje cevi predviđeni su cevni kompenzatori na spoljašnjoj cevi.

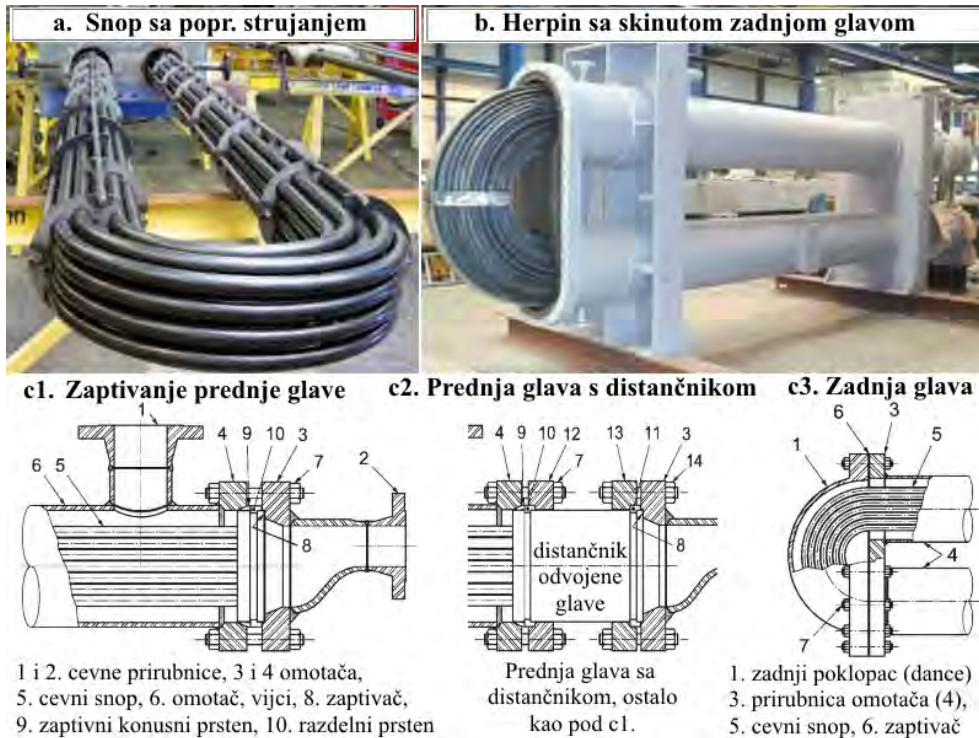
Alternativno rešenje za baterije CuC razmenjivača, mogu biti dobošasti razmenjivači takođe povezani u blok. Prema pomenutoj analizi (Rikalović [95]) za isti proces, grejanja CTR pomoću termo fluida u industriji aluminijuma, odgovara baterija dobošastih razmenjivača od 4 bloka, koji svaki ima po 4 jedinice. Jedan takav blok je prikazan na slici Sl. 1.80b. Na preseku jediničnog razmenjivača vidi se da sadrži 13 U cevi  $\Phi$  17,2 mm, koje su smeštene u omotač od cevi  $\Phi$  168,3 mm. Ovaj relativno mali jedinični razmenjivač dužine oko 2,5 m, tipa RT21p-168,3-Fe17,2/2, ima površinu  $A=2,81 \text{ m}^2$ , odnosno za 16 jedinica ima ukupnu površinu razmene  $A_s=44,96 \text{ m}^2$ , što je skoro tri puta manje od paketa od 30 cevi CuC cevi.

Iz ove analize može se zaključiti na prvi pogled, da je povoljniji dobošasti razmenjivač u odnosu na CuC rešenje, jer ima manji broj jedinica, manju težinu, manji pad pritiska, ne zahteva kompenzatore ni poseban cirkulacioni krug cevnih lukova, a ima prednosti pri ugradnji i održavanju i nižu cenu investicije. Međutim, odlučujući nedostatak dobošastih razmenjivača u ovom slučaju je pristup i čišćenje međucevnog prostora u omotaču gde struji katran, kao i sporiji start, odnosno postojanje slepih prostora za topljenje očvrslog katrana. U drugim tehnološkim uslovima baterijska konfiguracija dobošastih razmenjivača može biti daleko ekonomičnija i povoljnija u odnosu na CuC razmenjivače.

CuC i herpin razmenjivači toplote se najčešće koriste u procesima sa relativno niskim protocima i visokim temperaturama ili pritiscima fluida nosioca toplote. Posebna im je prednost fleksibilnost i jednostavno održavanje. Ako su konfigurisani u pakete, predviđa se magacinska rezervna baterija koja se može ugraditi bez prekida procesa rada. Iako je cena osnovne jedinice CuC ili herpin razmenjivača povoljna, u slučaju agregatiranja u baterije i pakete, cena po jedinici površine uopšte ne pada (čak neznatno i raste), a potreban prostor za ugradnju i manipulaciju pri održavanju rapidno raste. Pad pritiska fluida može biti značajno visok u i oko cevi, imajući u vidu agregatne konstrukcije baterija sa rednom vezom, pa se kod viskoznih fluida posebno mora obratiti pažnja na troškove energije za pumpanje fluida. Smanjenje nedostataka agregatnih malih jedinica razmenjivača doneo je intenzivan razvoj velikih multicevnih herpin razmenjivača.

Herpin razmenjivači znatno smanjuju broj sekcija dovode do smanjenja površine razmene, jer imaju najefikasniji dizajn zbog potpuno suprotnosmernog toka i omogućavanja temperaturnog ukrštanja (temperatura toplijeg fluida na izlazu je niža od temperature hladnijeg fluida na izlazu). Oni imaju mogućnost ostvarenja velikog odnosa protoka fluida u omotaču i cevi, zbog mrežne konfiguracije koja se može prilagoditi zahtevu. Oni takođe omogućuju visoke temperaturne razlike (čak do  $150^\circ\text{C}$ ), jer imaju odvojene cevne ploče na ulazu i izlazu. Pored toga dobro podnose različite termodilatacije omotača i cevi jer cevi zbog velikih lukova dobro samokompenziraju. Veliki cevni lukovi omogućuju upotrebu cevi većih prečnika i

lakše čišćenje, ali glavna prednost se postiže mogućnošću vađenja cevi iz omotača rešenjem posebnog zaptivanja u glavi razmenjivača i otvaranjem elipsaste glave na kraju razmenjivača, što je prikazano na slici Sl. 1.81.



**Sl. 1.81.** Veliki Herpin razmenjivač: a. Cevni snop sa poprečnim pregradama, b. Herpin razmenjivač sa skinutim poklopcem zadnje glave. c. Šematski prikaz konstrukcije prednje i zadnje glave (c1, c2 i c3) prema API preporukama [S9.7]

Herpin razmenjivači uvek imaju potpuni suprotnosmerni tok, iako mogu imati i poprečno strujanje (kao na slici). Glavni problem herpin razmenjivača je zaptivanje prednje glave i složena izrada zadnje glave. Ako je prednja glava demontažna, cevna ploča se izvlači sa snopom, pa je neophodno posebno zaptivanje glave (videti API preporuke [S9.7]) koje je složeno i obuhvaćeno uglavnom patentnom zaštitom. Mnogo jednostavniji slučaj je ako prednja glava zavarena i nedemontažna.

Milan R. Rikalović

# DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

**Knjiga I: KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**



**Naredne stranice su u prekidu !**



Dispoziciju nastavka teksta na sledećoj strani videti u sadržaju.

**Ako želite kompletan tekst - NARUČITE KNJIGU**

### e) Nemetali

Nemetali za razliku od metala sadrže znatno manji broj hemijskih elemenata, ali su veoma zastupljeni u prirodi u raznim oblicima i brzi rast tehničke primene.

**Plastika ili polimeri** se sve više koristi kao materijal u hemijskoj industriji, zbog svoje rezidentnosti prema koroziji i velikom broju agresivnih medija. Sadrži velike molekule povezane u dugačke lance koji se ponavljaju (monomeri). Iako se pojam *polimer* često koristi kao sinonim za plastiku, u polimere se ubraja i veliki broj prirodnih i sintetičkih materijala, sastavljenih od ugljenika, vodonika i kiseonika a ponekad sadrže još i hlor, fluor i azot, a dobijenih preradom prirodnih sirovina (celuloze) ili sintezom iz frakcija nafte. Dele se na tri glavne grupe:

1. Plastomeri (termoplasti) su sintetički polimeri čiji su molekuli dugi, linearni ili razgranati lanci. Osnovno svojstvo plastomera je da zagrevanjem omekšaju ili se rastope, a hlađenjem očvrstu, pri čemu ne menjaju svojstva.

2. Elastomeri su sintetički polimeri čiji su molekuli međusobno još povezani manjim brojem poprečnih veza. Odlikuju se savitljivošću ili rastegljivošću pri sobnoj temperaturi, kao guma,.

3. Duromeri (duroplasti) su sastavljeni od umreženih polimernih molekula, što im daje tvrdoću, pa se ne mogu preoblikovati zagrevanjem i lako se lome.

Glavne dobre osobine polimera su: dobri su toplotni i električni izolatori, otporni su na dejstvo vode i nekih kiselina i baza ali ne i na organske rastvarače, ne korodiraju u atmosferi, lako se oblikuju, dobro podnose vibracije i imaju nizak koeficijent trenja. Imaju visoku biološku rezidentnost, što je uzrok velikih

**TAB. 1.36.** Mehaničke osobine i cene plastike [39]

Mehaničke osobine i relativni odnos cena	Zatezna čvrstoća MPa=N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti GPa=kN/mm <sup>2</sup>	Gustina kg/m <sup>3</sup>	Relativni odnos cena prema polietilenu
Vrste materijala				
Polivinilhlorid PVC	55	3,5	1400	1,5
Polietilen niske gustine	12	0,2	900	1
Polipropilen PP	35	1,5	900	1,5
Politetrafluoretilen PTFE	21	1	2100	30
GRP poliester	100	7	1500	3,0
GRP epoksi	250	14	1800	5,0

ekoloških problema. Ipak glavni nedostatak im je niska čvrstoća, zapaljivost i neotpornost na visokim temperaturama. Međutim, kada se ojača ugljenikovim ili staklenim vlaknima, čvrstoća plastika može biti kao kod mekog čelika, i na povišenim temperaturama, pa se koristi za izradu opreme pod pritiskom i cevi. U tabeli TAB. 1.36, date su mehaničke osobine i relativne cene plastike. U procesnoj industriji koriste se sledeći polimeri:

Politetrafluoretilen (PTFE), poznat je pod trgovačkom nazivu - teflon, Otporan je na sve hemikalije, osim na bazne rastvore i jedinjenja fluora. Može se koristiti na temperaturama do 250 °C, ima nisku čvrstoću, koja se tehnički može povećati

dodavanjem vlakna od stakla i ugljenika, što je skup proces. Upotreba teflona, zbog svoje stabilnosti, najčešća je u oblasti zaptivanja i filtriranja.

**GPR poliester** je plastični materijal ojačan staklenim vlaknima, koji se najčešće koristi kao termo-otporna plastika u postrojenjima hemijske industrije. Ima dobru čvrstoću i otpornost na koroziju usled dejstva širokog spektra hemikalija a pogodan je i za izradu veoma složenih oblika, pa i za izradu opreme pod pritiskom.

**GPR epoksidi**, ili često pod nazivom epoksidne smole su otporne na razblažene kiseline, neorganske soli i mnoge rastvarače, ali su slabo otporni na baze. Ako se armiraju staklenim vlaknima epoksidne smole se mogu koristiti u oblasti hemijskih postrojenja, ali su skuplje od poliestera. Visok sadržaj staklenih vlakana povećava čvrstoću, ali slabi otpornost na dejstvo kemikalija.

**Staklo** je keramički materijal koji se pored široke primene u raznim oblastima može koristiti za izradu cevi (prečnika do 0,5 m). Cevi se mogu koristiti i za izradu razmenjivača toplote, destilacionih i apsorpcionih kolona. Za zaptivanje spoja cevi i cevne ploče upotrebljava se teflon traka. Staklo je krt materijal, pa gde postoji opasnost od havarija usled pucanja stakla i mogućnosti povreda, staklena oprema se štiti spoljašnjim zaštitnim oklopom ili se oblaže plastičnim trakama.

**Ugljenik**, impregniiran hemijski otpornim smolama, može se koristiti za izradu cevi i specijalne opreme, posebno razmenjivača toplote, (cevi i omotač). Ovaj materijal ima visoku toplotnu provodljivost i otpornost na većinu hemikalija, osim oksidnih kiselina, koncentracije veće od 30%.

#### **1.5.4. Osnovni poluproizvodi za izradu dobošastih razmenjivača toplote**

Dobošasti razmenjivači toplote u principu nemaju mnogo pozicija za izradu, a takođe broj različitih materijala je mali. To su uglavnom standardni ili tipizirani sledeći poluproizvodi: metalne ploče i limovi, danca, cevi, zaptivači rastavljivih ili dilatacionih spojeva, prirubnice, vijčane veze, armatura i fitting.

##### **a) Lim i ploče**

To su standardni metalni proizvodi u obliku lima ili ploča najčešće od čelika, a mogu biti i od obojenih metala ili nemetala. Koriste se pre svega za izradu cevno omotača (doboša ili plašta), za izradu cevnih ploča i prirubnica, segmentnih pregrada, oslonaca i ostalih elemenata u zavisnosti od konstrukcije razmenjivača. Limovi se dobivaju toplim ili hladnim valjanjem od početnog čeličnog ingota.

**Toplo valjani limovi** su vrlo važni proizvodi od čelika. Prema debljini dele se na debele (>5 mm), srednje (3-4,75 mm) i tanke (<3 mm). Mogu se isporučiti u obliku koturova ili tabli. Za maloserijsku i pojedinačnu proizvodnju razmenjivača toplote su važnije isporuke lima u tablama i velikim asortimanom debljina lima. Uobičajene tržišne dimenzije tabli tankih toplovaljanih limova su 1000 x 2000 mm. Srednji i debeli limovi do 15 mm isporučuju se uobičajeno u širinama 800 do 2050 mm i dužinama do 6 m, specijalno do 12 m. Limovi debljine preko 15 mm (do 250

mm) su širine 1500 do 2450 mm, a dužine do 6000 mm. u zavisnosti od namene i narudžbine, prema EN 10051:2010. Toplovaljani limovi se uglavnom izrađuju od konstrukcionih čelika, čelika za brodogradnju, od ugljeničnih konstrukcionih čelika, kotlovskih i čelika za sudove pod pritiskom. Valjana površina može biti sa ostacima praškastog nevaljanog oksida gvožđa karakterističnog za valjanje lima na povišenim temperaturama, lužena (dekapirana) sa jedne ili obe strane sa koje su pomoću hlorovodonične kiseline uklonjeni ostaci praškastog oksida ili rebrasta površina na koju su utisnuti u pravilnom rasporedu oblici romba ili suze. Lužena površina može biti nauljena ili nenauljena. Ivice lima mogu biti neravne (valjačke) ili ravne (obrezane). Postupci dobijanja su povezani sa tehnologijom rada opreme.

**Hladno valjani limovi** se koriste uglavnom u slučajevima kada se zahteva poboljšana površina, npr. limovi za izvlačenje i karoserijski limovi. U novije vreme svi limovi ispod 1,5 mm se obrađuju hladnim valjanjem. Pri hladnom valjanju neophodno je smanjiti oksidnu koru putem luženja, najčešće u sumpornoj kiselini. Dimenzije hladnovaljanih tabli, zavise od konstrukcije valjačkih stanova i najčešće su 700 do 1500 mm, a dužine 2 do 4 m. Postupak hladnog valjanja se najčešće primenjuje za konstrukcione čelike, bele i pocinkovane limove. S obzirom na asortimane raspoloživih debljina, retko se koriste za razmenjivače toplote.

Najčešće korišćeni toplovaljani čelični limovi od konstrukcionih čelika i čelika za opremu pod pritiskom (PED) prikazani su u tabeli TAB. 1.37.

**TAB. 1.37.** Uporedna tabela najčešće korišćenih toplovaljanih limova

Konstrukcioni toplovaljani limovi			Toplovaljani limovi PED čelika		
EN 10027-1	DIN 17100	JUS C.B0.500	EN 10027-1	DIN 171565	JUS C.B4.014
<b>S 235 JRG2</b>	RSt 37-2	Č 0361	<b>P 235 GH</b>	H I	Č 1202
<b>S 235 JO</b>	St 37-3 U	Č 0362	<b>P 265 GH</b>	H II	Č 1204
<b>S 235 J2G3</b>	St 37-3 N	Č 0363	<b>P 295 GH</b>	17 Mn4	Č 3133
<b>S 275 J2G4</b>	/	/	<b>P 355 GH</b>	19 Mn6	/
<b>S 275 JR</b>	St 44-2	Č 0451	<b>16 Mo 3</b>	15 Mo3	Č 7100
<b>S 275 JO</b>	St 44-3 U	Č 0452	<b>13 CrMo 4-5</b>	13 CrMo 44	Č 7400
<b>S 275 J2G3</b>	St 44-3 N	Č 0453	<b>10 CrMo 9-110</b>	CrMo 9 10	Č 7401
<b>S 355 JR</b>	/	Č 0561	<b>11 CrMo 9-10</b>	/	/
<b>S 355 JO</b>	St 52-3 U	Č 0562	Tolerancije debljine toplovaljanog lima date su u EN 10051 zavisno od dimenzija		
<b>S 355 J2G3</b>	St 52-3 N	Č 0563			
<b>S 355 K2G3</b>	/	/			

**Nerđajući limovi** najčešće se isporučuju u tablama sledećih debljina: 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,2 1,25 1,5 2,0 2,5 3,0 4,0 5,0 6,0 8,0 10,0 12,0 15,0 20, 25,0 30,0 35,0 40,0 45,0 50,0 mm, dimenzija: 1000 x 2000, 1250 x 2500 i 1500 x 3000 mm. Prema EN 10088-2:2002 postupak izrade i kvalitet površine ovih limova je:

- 1D Toplo valjan, termički tretiran, bajcovan, površina gruba i mutna,
- 1Q Toplo valjan, poboljšan, bajcovan, površina gruba i mutna,
- 2H Hladno doraden, ojačan valjanjem, površina svetla,

- 2E Hladno valjan, termički tretiran, odstranjena kora, površina hrapava i mutna,
- 2D Hladno valjan, termički tretiran, bajcovan, površina glatka,
- 2B Hladno valjan, termički tretiran, bajcovan, naknadno valjan, površina glatka, finija od 2D,
- 2R Hladno valjan, svetlo žaren, površina glatka, sjajna, reflektivna,
- 2G Brušen ili poliran (jednostrano), površina umerena tekstura,
- 2J Brušen (četkan jednostrano), površina umerena tekstura,
- 2K Fino poliran,  $Ra < 0,5$  nm (jednostrano), površina - umerena tekstura,
- 2W Valjan prema kalupu sa obe strane, dekorativni, dizajn po dogovoru.

Za pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju razmenjivača toplote je bitna raspoloživost i asortiman limova u tablama, a naročito mogućnost segmentnog sečenja debelih limova prema zahtevanim dimenzijama, jer uticaj zaliha lagra i neiskorišćenog materijala na kalkulativnu cenu proizvoda može biti veliki.

### b) Danca

Sa bočne strane doboša, razmenjivači toplote su zatvoreni fiksnim ili demontažnim elementima koji se nazivaju glave, ravna, ispupčena ili udubljena danca, zatvarači, podnice, slepe prirubnice ili slično. Danca su pre svega sinonim za neravne zatvarajuće elemente, kojima se postiže znatno smanjenje debljine materijala u odnosu na ravne površine.

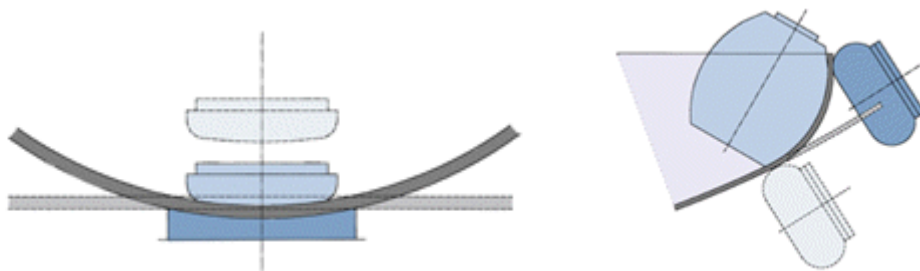
Danca se rade najčešće od čelika, a mogu biti i od obojenih metala, retko od nemetala, a njihov oblik i dimenzije mogu biti standardizovane ili oblikovane prema karakteristikama mašina za izradu danaca (interni standardi). Metalna danca se izrađuju toplim ili hladnim postupkom presovanjem ili rolovanjem iz ravnog kružnog lima, tzv. rondele. Topli postupak je skuplji zbog velikog broja alata i energije za grejanje rondele do crvenog usijanja, ali su potrebne manje sile za deformaciju materijala pa je pogodan za veće debljine limova manjeg prečnika rondele i velike serije. Hladni postupak je jeftiniji za veće asortimane a manje serije i manje debljine limova. Na slici Sl 1.95, prikazan je uobičajeni postupak toplog presovanja i hladnog rolovanja danaca.



**Sl. 1.95.** Toplo presovanje danaca na presi Siempelkamp (Nemačka) 150 MN – levo, desno – Boldrini (Italija) mašina za rolovanje danaca prema DIN, NF ili ASME.

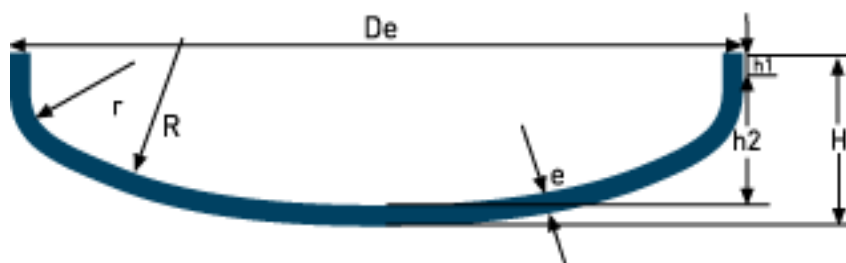


Izrada danaca postupkom sfernog izvlačenja i bočnog rolovanja (eng. *dishing and flanging*) se odvija u dva koraka. U prvom koraku, slika Sl. 1.96., izvlači se sferni deo danca, a u drugom koraku rotiranjem ronđele između specijalno oblikovanih valjaka vrši se bočno savijanje prema zahtevanom profilu danca.



Sl. 1.96. Dva koraka pri izradi danaca: Levo – izvlačenje sfernog dela danca (eng. *dishing*), Desno – bočno rolovanje danca (eng. *flanging*)

Danca po obliku osnove mogu biti kružna, elipsasta, pravougaona (kofer danca) ili drugog nepravilnog oblika. Za dobošaste razmenjivače toplote koriste se kružna danca, a specijalno elipsasta ili kofer danca. Prostorna forma pravilnih danaca formira se u zavisnosti od rotirajuće površine, najčešće su to krug (poluloptasta danca), elipsa (elipsoidna danca) ili kombinacija sfere i torusa (torisferična danca). Za posude pod pritiskom najekonomičnija su torisferična i elipsoidna danca. Asortiman danaca se formira u zavisnosti od odnosa prečnika sfere i torusa i odnosa prečnika poluosu profilne elipse prema prečniku osnove danca. Obodni omotač se najčešće sastoji od ravnog cilindra i dela torusa, a bočni zatvarač ili kalota je deo sfere ili elipsoida. Za najčešće korišćena danca dobošastih razmenjivača toplote (plitka i duboka torisferična i elipsoidna danca), osnovne dimenzije prema EN 13445 prikazane su na slici Sl. 1.97.



Sl. 1.97. Osnovne dimenzije danca, za posude pod pritiskom, EN 13445

Oznake osnovnih dimenzija danca:

$De$  – spoljašnji prečnik osnove danca

$Di$  – unutrašnji prečnik osnove danca

$R$  – unutrašnji prečnik kalote (eng. *dish*)

$r$  – unutrašnji prečnik zaobljenja (eng. *knuckle*)

$Dd$  – Prečnik diska za izradu danca (ronđela)

$e$  – debljina danca

$h1$  – visina cilindra danca

$h2$  – visina savijanja danca

$H$  – Ukupna visina danca

$V$  – Zapremina danca

Međusobni odnosi dimenzija danaca, utvrđuju se prema nameni opreme. Za najčešće primenjivana standardizovana danca posuda pod pritiskom važe relacije:

<i>Plitko torisferično dance</i> <i>Klopper – DIN 28011,</i> <i>(isto kao JUS M E6.020)</i>	<i>Duboko torisferično dance</i> <i>Korbbogen – DIN 28013,</i> <i>(isto kao JUS M E6.021)</i>	<i>Elipsoidna danca</i> <i>ASME VIII div.1</i> <i>Odnos osa 2:1</i>
$R = De, r = R/10, h_1 \geq 3,5e$ $h_2 = 0,1935 De - 0,455 e$ $H = h_2 + h_1 + e$ $Dd = 1,11 De + 1,85 h_1$ $V(h_2) = 0,1(Di)^3$	$R = 0,8 De, r = 0,154 De, h_1 \geq 3e$ $h_2 = 0,255 De - 0,635 e$ $H = h_2 + h_1 + e$ $Dd = 1,16 De + 2 h_1$ $V(h_2) = 0,1298 (Di)^3$	$R \approx 0,9 De, r \approx 0,17 De$ $h_2 = Di/4$ $H = h_2 + h_1 + e$ $V(h_2) \approx 0,52 \cdot Di^2 \cdot h_2$

Materijal danaca je najčešće isti kao i materijal omotača razmenjivača, a to su ugljenični čelici S235JR, S275JR, S355J2+N, ..., (EN 10025), P265GH, 295GH, P355GH, ..., (EN 10028-2), P355NL1, ..., (EN 10028-3). Po ASTM standardu to su SA 285 Gr. C, SA 516 Gr. 60, SA 516 Gr. 70, ...

Od nerđajućih čelika najčešće se koriste prema ASTM A240 (EN 10028-7) sledeći čelici: AISI 304 (1.4301), AISI 304L (1.4307), AISI 321 (1.4541), AISI 316 (1.4401), AISI 316L (1.4404), AISI 316Ti (1.4571), AISI 310S (1.4845), ...

Danca se rade i od drugih materijala, npr. aluminijum (5083, 5186), bakar i slično.

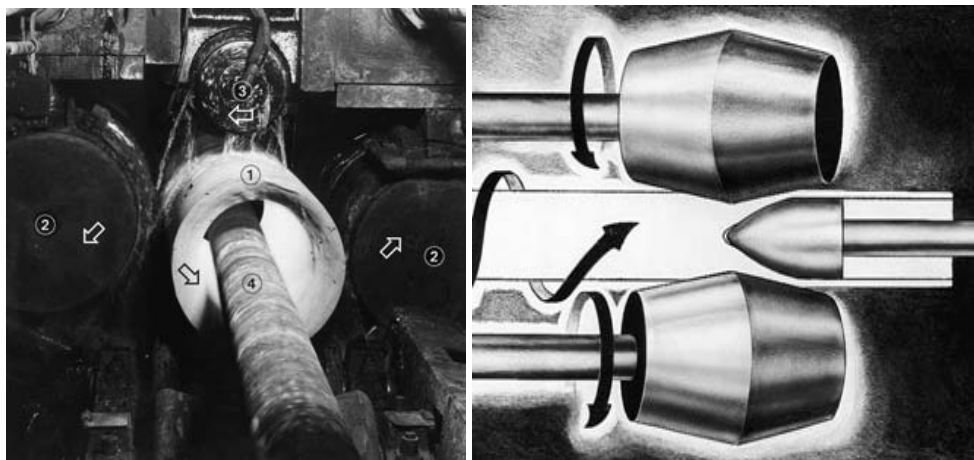
### c) Cevi

Dobošasti razmenjivači toplote kao osnovnu površinu za razmenu toplote imaju cev. Cev se može definisati kao zatvorena površina, čiji se poprečni presek po dužini ne menja, a koja je otvorena na podužnim krajevima. Prema poprečnom preseku cevi možemo podeliti na: okrugle ili cilindrične, ovalne (elipsaste) i kvadratne (opštije – pravougaone). Zatvorena površina cevi može biti bez šava ili sa šavom (zavarene cevi). Moguće je da postoje i cevi drugačijeg poprečnog preseka, koje nisu od važnosti za razmenjivače toplote. Osnovna cev može se, iz razloga povećanja površine kontakta fluida ili povećanja efikasnosti prelaza toplote, dodatno modifikovati orebrenjem ili deformacijom (usukane ili uvrnute cevi i valovite cevi). Forma cevi po dužini najčešće je prava ili savijena u obliku slova «U». Materijal od koga se izrađuju cevi razmenjivača toplote može biti čelik (uključujući i nerđajući čelik), nikl, bakar, aluminijum, titanijum, legure obojenih metala, zatim nemetali (grafit, plastika, staklo). Najvažniji kriterijum pri izboru materijala cevi je kompatibilnost s fluidom koji teče kroz nju, zatim radni pritisci i temperature. Uticaj radnih pritisaka pored vrste materijala utiče i na debljinu zida cevi. U principu, instalacije visokog pritiska zahtevaju jake materijale kao čelik ili nerđajući čelik. Uticaj visokih ili niskih radnih temperatura najviše se manifestuje na sastav materijala, odnosno na njegove mehaničke osobine, pre svega čvrstoću. Na bazi iskustva vodećih proizvođača cevi i opreme pod pritiskom, početni izbor osnovnog materijala cevi, može se izvršiti na bazi sledećih preporuka.

<b>Materijal cevi</b>	<b>Oblast primene</b>	<b>Temperaturni opseg</b>
Nerđajući čelik	Visoki pritisci i temperature	-255°C do 605°C
Ugljenični čelik	Visoki pritisci i temperature,	-29°C do 425°C
Bakar	Niski pritisci i temperature	-40°C do 205°C
Aluminijum	Niski pritisci i temperature	-40°C do 205°C
Monel 400 <sup>TM</sup>	Aplikacije morske vode	-198°C do 425°C
Inkonel C276	Visoko dejstvo korozije	-198°C do 535°C

Dve glavne grupacije cevi prema načinu izrade su bešavne i šavne cevi.

**Bešavne cevi** se izvlače iz punog materijala i tako odmah dobijaju profil, dok se šavne cevi posle formiranja profila uzdužno zavaruju (dakle imaju šav ili zavar). Bešavne cevi se uglavnom rade pomoću nekoliko unapređenih patentiranih tehnoloških postupaka. Na slici Sl. 1.98, prikazan je *Mannesmanov postupak* probijanja uzorka trnom. Bešavne cevi prema postupku dobijanja, mogu se podeliti na: toplo valjane cevi, hladno valjane cevi, hladno vučene cevi i ekstrudirane cevi. Toplo valjane bešavne cevi se posle probijanja u vrućem stanju šalju na dalje valjanje, do dobijanja konačnog spoljnog prečnika (obično 32 do 630 mm) i debljine zida (obično 2,5 - 75 mm). Hladno valjane bešavne cevi mogu biti manjih



**Sl. 1.98.** Levo – Postupak izrade bešavnih cevi metodom probijanja (piercing) ingota sa poprečnim valjanjem (VALLOUREC & MANNESMANN TUBES), 1-šuplji omotač, 2- radni valjci, 3-pomoćni valjak, 4-nosač sa probojnim trnom.

Desno – Principijelni prikaz postupka izrade početne bešavne cevi.

dimenzija od toplovaljanih, obično spoljni prečnik 5 do 200 mm, a debljina zida 2,5 do 12 mm. Hladno vučene cevi se dobijaju izvlačenjem (pilgerovanje), umesto valjanjem (česta je kombinacija valjanja i izvlačenja). Ovim postupkom mogu se dobiti cevi spoljnih prečnika 8 do 230 mm, debljine zida 0,5 do 25 mm, visoke tačnosti izrade i visokog površinskog kvaliteta. Metodom ekstrudiranja ili istiskivanja na toplo, mogu se dobiti početne bešavne cevi spoljnog prečnika do 230 mm, od raznih materijala uključujući i nerđajuće čelike.

**Zavarene (šavne) cevi** izrađuju se iz metalnih traka (skelp) podužnim ili spiralnim savijanjem pomoću velikog broja valjaka, a zatim se spoj zavaruje, slika Sl. 1.99. Prečnik zavarene cevi može biti u veoma širokom opsegu, kreće se od oko 6 do 2500 mm, a debljina zida od 0,5 do oko 40 mm. Osnovna razlika ova dva postupka izrade je u tome što, za podužno zavarene cevi, za svaki prečnik cevi potrebna je druga širina trake, dok se spiralne cevi mogu raditi iz iste širine trake za različite prečnike. Zbog toga je spiralna izrada cevi pogodnija za velike spoljašnje prečnike, uglavnom u rasponu od 500 mm do 2500 mm, [*manesman*].



**Sl. 1.99.** *Principijelni postupak izrade šavnih cevi, levo – podužno (longitudinalno) zavarene cevi, desno – spiralno zavarene cevi.*

Postoji dugotrajna dilema, koje cevi su bolje bešavne ili zavarene (šavne). Argumenti u prilog bešavnih cevi se odnose na veću statičku nosivost, otpornost na koroziju i izbegavanje ispitivanja bez razaranja po celoj dužini cevi. Zavarene cevi su pak jeftinije, imaju uže dimenzione tolerancije, manju debljinu zida, manji ekscentricitet spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika, bolji kvalitet unutrašnje površine i mogu se proizvesti cevi većeg spoljnog prečnika i veće dužine. Bešavne cevi su u prednosti za veće debljine zida i male prečnike, jer je u tom području mera, otežano oblikovanje zavarenih cevi. Još uvek postoje slučajevi kada se propisima izričito ne dozvoljava upotreba šavnih cevi. Usavršavanjem postupka zavarivanja i kontrole zavarenog spoja, učestalost zavarenih čeličnih cevi je drastično povećano i sada iznosi oko dve trećine u odnosu na jednu trećinu bešavnih cevi [*manesman*]. Kad su u pitanju nerđajuće cevi, zahvaljujući novim tehnologijama preciznog hladnog valjanja u kombinaciji s brzim postupcima zavarivanja, zavarene cevi su postale dominantne na tržištu i njihova zastupljenost dostiže 80% ukupne proizvodnje cevi [*outokumpu*]. Uzdužno zavarene cevi od nerđajućeg čelika sa zavarenim spojem u zaštiti inertnim gasom primenjuju se i za opremu pod pritiskom, a otpornost na koroziju i koeficijent zavarenog spoja je isti kao i osnovnog metala. U stvarnosti, obe vrste cevi mogu imati potreban kvalitet, trajnost, otpornost na koroziju i pouzdanost, pa odluka hoće li se koristiti bešavne ili zavarene cevi prvenstveno zavisi od odnosa debljine zida i prečnika cevi, kao i od tolerancije dimenzija. Cena šavnih cevi je znatno niža od bešavnih, što je osnovni razlog njihove dominacije.

Cevi od obojenih metala i njihovih legura takođe se mogu raditi kao šavne ili bešavne, ali zbog svoje visoke plastičnosti, cevi od ovih materijala uglavnom se rade kao bešavne postupkom toplog ili hladnog istiskivanja (ekstruzija), pri čemu je postupak na hladno jeftiniji, sa boljim kvalitetom površina i užim tolerancijama.

**Čelične prave glatke cevi** najčešće se koriste za izradu cevnog registra dobošastih razmenjivača toplote. Mogu se izrađivati od raznih čelika, kao bešavne ili šavne cevi. Nelegirani čelici za cevi, prema EN 10027-1, imaju početne simbole S – za opšte konstrukcije, P – za opremu pod pritiskom, E -za mašingradnju i L – za cevovode. Iza vrednosti mehaničke karakteristike u oznaci čelika dolaze dve grupe dodatnih simbola: grupa 1 – udarni rad loma ili termička obrada, grupa 2 – namena. Značenje ovih simbola je: H – za visoke temperature, L – za niske temperature, M – termo-mehanički valjan, N – normalizovan, Q – žaren, R – na sobnoj temperaturi, T – za izradu cevi. Legirani čelici za cevi, gde spadaju i nerđajući čelici (koji moraju imati >5% najmanje jednog legirajućeg elementa) označavaju se kako je ranije navedeno prema hemijskom sastavu (EN 10027-1, T.14). Primer oznake za nerđajući čelik prema EN 10088-2: X20CrMoV12-1, sastava 0,20% C, 12% Cr; 1% Mo; 0,55% Ni; 0,35% V, gde X – oznaka znači da je sadržaj bar jednog elementa veći od 5% (Cr). Cevi od nerđajućih čelika često se označavaju i prema američkim standardima AISI i SAE.

Prema načinu izrade i uslovima isporuke (EN 10210:2006) cevi za opšte konstrukcije (engl. *Hollow structural sections - HSS*) su velika grupacija svih oblika cevi, šavnih i bešavnih, koje se mogu koristiti i za razmenjivače toplote koji nisu u okviru opreme pod pritiskom. Nelegirani čelici za ove cevi najčešće imaju oznake: S235JRH, S275JOH, S355JOH, S275J2H, S355J2H, S275NH, S275NLH, S355NH, S355NLH, S420NLH, S460NH, S460NLH.

Za opremu pod pritiskom koriste se cevi izradene prema EN 10216-1 za sobne temperature, EN 10216-2 za povišene temperature (uključujući i kotlovske cevi), EN 10216-3 cevi od sitnozrnog čelika, EN 10216-4 za niske temperature i EN 10305-1 za precizne hladno vučene cevi. Za dobošaste razmenjivače toplote najčešće se koriste cevi prema EN 10216-2 i 10216-4.

Bešavne cevi prema EN 10216-1 isporučuju se toplo oblikovane u dva kvaliteta TR1 (transport fluida) i TR2 (PED oprema), čija su mehanička svojstva prikazana u tabeli TAB. 1.38, a preporučene dimenzije cevi u tabeli TAB. 1.42.

**TAB. 1.38.** Mehanička svojstva PED čelika na sobnoj temperaturi, prema EN 10216-1:2004

Oznaka čelika		Osobine pri zatezanju						Osobine pri udaru		
Naziv	Broj čelika	Gornja granica razvlačenja $R_{eH}$ za debljinu zida T (mm)			Zatezna čvrstoća $R_m$	Min izduženje		Minimalna apsorbovana energija KV (J) na temp. u °C		
		do 16	16-40	40-60		A%		podužno		poprečno
		MPa	MPa	MPa	MPa	poduž.	popr.	0	-10	0
P195TR1	1.0107	195	185	175	320-440	27	25	-	-	-
P195TR2	1.0108	195	185	175	320-440	27	25	40	28	27
P235TR1	1.0254	235	225	215	360-500	25	23	-	-	-
P235TR2	1.0255	235	225	215	360-500	25	23	40	28	27
P265TR1	1.0258	265	255	245	410-570	21	19	-	-	-
P265TR2	1.0259	265	255	245	410-570	21	19	40	28	27

Cevi prema EN 10216-1 moraju proći hidrostatički test ili elektromagnetni test na zaptivenost, o čemu mora postojati inspeksijski dokument u skladu s EN 10204, ili drugom metodom po zahtevu kupca. Ove cevi se izrađuju u dužinama do 6 m (tolerancija +10 mm), 6-12 m (tolerancija + 15 mm) i preko 12 m sa dogovorenom dužinskom tolerancijom.

Bešavne cevi, prema EN 10216-2 izrađuju se od različitih čelika, pogodne su za upotrebu na povišenim temperaturama (kotlovske cevi), čija su mehanička svojstva prikazana u tabeli TAB. 1.39, a preporučene dimenzije cevi u TAB. 1.41.

**TAB. 1.39.** Mehanička svojstva PED čelika na povišenoj temperaturi, prema EN 10216-2:2004

Oznaka čelika		Debljina zida	Minimalna čvrstoća $R_{p0,2}$ u MPa, izduženje 0,2% na temperaturi u °C											
Naziv	Broj čelika		mm	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
P195GH	1.0348	<16	175	165	150	130	113	102	94	-	-	-	-	
P235GH	1.0345	<60	198	187	170	150	132	120	112	108	-	-	-	
P265GH	1.0425	<60	226	213	192	171	154	141	134	126	-	-	-	
20MnNb6	1.0471	<60	312	292	264	241	219	200	186	174	-	-	-	
16Mo3	1.5415	<60	243	237	224	205	173	159	156	150	146	-	-	
8MoB5-4	1.5450	<16	368	368	368	368	368	368	368	-	-	-	-	
14MoV6-3	1.7715	<60	282	276	267	241	225	216	209	203	200	197	-	
10CrMo5-5	1.7338	<60	240	228	219	208	165	156	148	144	143	-	-	
13CrMo4-5	1.7335	<60	264	253	245	236	192	182	174	168	166	-	-	
10CrMo9-10	1.7380	<60	249	241	234	224	219	212	207	193	180	-	-	
11CrMo9-10	1.7383	<60	323	312	304	296	289	280	275	257	230	-	-	
25CrMo4	1.7218	<60	-	315	305	295	285	265	225	185	-	-	-	
20CrMoV13-5-5	1.7779	<60	-	575	570	560	550	510	470	420	370	-	-	
15NiCuMoNb5-6-4	1.6368	<60	422	412	402	392	382	373	343	304	-	-	-	
X11CrMo5+I	1.7362+I	<100	156	150	148	147	145	142	137	129	116	-	-	
X11CrMo5+NT1	1.7362+NT1	<100	245	237	230	223	216	208	196	181	167	-	-	
X11CrMo5+NT2	1.7362+NT2	<100	366	350	334	332	309	299	289	280	265	-	-	
X11CrMo9-1+I	1.7386+I	<60	187	186	178	177	175	171	164	153	142	120	-	
X11CrMo9-1+NT	1.7386+NT	<60	363	348	334	330	326	322	316	311	290	235	-	
X10CrMoVNb9-1	1.4903	<100	410	395	380	370	360	350	340	320	300	270	215	
X20CrMoV11-1	1.4922	<100	-	-	430	415	390	380	360	330	290	250	-	

Bešavne cevi prema EN 10216-3, imaju takođe oznaku namene "P" – za opremu pod pritiskom, ali imaju sitnozrnastu strukturu. Struktura zrna kod ovih čelika, prema *Euronorm 3* mora biti veća od 6, a zavisi od legiranja, toplotne obrade, ili prekrystalizacije. Na smanjenje veličine zrna utiče aluminijum, niobijum, vanadijum ili titanijum, Ovi čelici su žilavi, pa su pogodni za niskotemperaturne aplikacije, međutim u zavisnosti od dodatne obrade mogu se koristiti i za povišene temperature. Za niske temperature, dodatna oznaka ovih čelika je NL1, QL i QL1, a za posebno niske temperature dodatna oznaka je NL2 i QL2, dok za povišene temperature dodatna oznaka je NH i BP, (značenje dodatnih oznaka videti u TAB. 1.27). Prema minimalnoj granici razvlačenja  $R_{p0,2}$  na sobnoj temperaturi ovi čelici su raspoređeni u pet nivoa, P275, P355, P460, P620, P690, Cevi izrađene po standardu EN 10216-3 moraju biti hidrostatički ispitane, a preporučene dimenzije cevi su date prema EN 10220, prikazane u tabeli TAB. 1.41.

Bešavne cevi prema EN 10216-4 za niske temperature aplikacije, izrađuju se kao bešavne cevi postupkom na toplo ili hladno, a obavezno se ispituju na nepropusnost (hidrostatički ili elektromagnetni test proizvođača). Uticaj niskih temperatura na mehanička svojstva materijala već je razmotren u tački 1.5.1 b) ovog odeljka. Osnovne mehaničke osobine ovih čelika date su u tabeli TAB. 1.40, a preporučene dimenzije cevi, prema EN 10220 prikazane su takođe u TAB. 1.41.

**TAB. 1.40.** Mehanička svojstva čelika za niske temperature aplikacije, prema EN 10216-4:2004

Oznaka čelika		Debljina zida mm	Granica razvlačenja $R_{eH}$ ili $R_{p0.2}$ [MPa]	Zatezna čvrstoća $R_m$ [Mpa]	Minimalna apsorbovana energija udara KV (J) po podužnoj osi cevi, na temperaturi u °C										
Naziv	Broj čelika				-196	-120	-110	-100	-90	-60	-50	-40	-20	+20	
P215NL	1.0451	<10	215	360-480	-	-	-	-	-	-	-	40	45	55	
P255QL	1.0452	<25	255	360-490	-	-	-	-	-	-	40	45	50	60	
P265NL	1.0453	<25	265	410-570	-	-	-	-	-	-	40	45	55	55	
26CrMo4-2	1.7219	<40	440	560-740	-	-	-	-	-	40	40	45	50	60	
11MnNi5-3	1.6212	<40	285	410-530	-	-	-	-	-	40	45	50	55	70	
13MnNi6-3	1.6217	<40	355	490-610	-	-	-	-	-	40	45	50	55	70	
12Ni14	1.5637	<25	345	440-620	-	-	-	40	45	50	55	55	60	65	
X12Ni5	1.5680	<25	390	510-710	-	40	45	50	55	65	65	65	70	70	
X10Ni9	1.5682	<40	510	690-840	40	50	50	60	60	70	70	70	70	70	

Areal dimenzija bešavnih cevi prema standardu EN 10220, za potrebe razmenjivača toplote (serije 1, 2 i 3), dat je u suženom opsegu u tabeli TAB. 1.41.

**TAB. 1.41.** Areal dimenzija bešavnih čeličnih cevi prema EN 10220:2003 usklađeno sa EN 10216-1, EN 10216-2, EN 10216-3 i EN 10216-4

Serija spoljaš. prečnika cevi			Debljina zida cevi $T$ u mm																
1	2	3	1,6	1,8	2	2,3	2,6	2,9	3,2	3,6	4	4,5	5	5,5	6,3	7,1	8	8,8	10
10,2																			
	12																		
	12,7																		
13,5																			
		14																	
		16																	
17,2																			
		18																	
		19																	
		20																	
21,3																			
		22																	
		25																	
		25,4																	
26,9																			
		30																	
		31,8																	
		32																	
33,7																			
		35																	
		38																	
		40																	
42,4																			



Mehanička svojstva šavnih cevi prema oznaci materijala data su u navedenim standardima šavnih cevi, a mogu se koristiti iz odgovarajućih tabela za bešavne cevi od istih materijala. Preporučene dimenzije šavnih cevi utvrđene su u standardu EN 10220, suženo za potrebe razmenjivača toplote, počev od debljine zida cevi 1,4 mm za izabrane prečnike cevi do 42,4 mm i date u tabeli TAB. 1.42.

**TAB. 1.42.** Areal dimenzija šavnih cevi prema EN 10220:2003 usklađeno sa EN 10217-1, EN 10217-2, EN 10217-3 i EN 10217-4 (sve iz 2004)

Serija spoljaš. prečnika cevi			Debljina zida cevi T u mm												
1	2	3	1,4	1,6	1,8	2	2,3	2,6	2,9	3,2	3,6	4	4,5	5	5,6
10,2															
	12														
	12,7														
13,5															
		14													
		16													
17,2															
		18													
	19														
	20														
21,3															
		22													
	25														
		25,4													
26,9															
		30													
	31,8														
	32														
33,7															
		35													
	38														
	40														
42,4															

Posebno mesto zauzimaju bešavne cevi od nerđajućih čelika, EN 10216-5, gde su za razmenjivače toplote najvažniji austenitni čelici, čije su osobine date u tabelama standarda za sobne temperature (Table 6) i  $R_{p0,2}$  i  $R_{p1,0}$  za povišene temperature (Table 9) kao i  $R_{p0,2}$  i  $R_{p1,0}$  u slučaju puzanja (Table 10).

Kao što je ranije napomenuto upotreba zavarenih cevi za opremu pod pritiskom je u značajnom trendu porasta u odnosu na bešavne cevi, zbog jeftinije izrade i povećane sigurnosti spoja, tako da je razvijena serija standarda EN 10217 sa grupacijama materijala kao kod bešavnih cevi (EN 10216) i to:

- EN 10217-1, cevi kružnog preseka od nelegiranog čelika sa utvrđenim osobinama na sobnoj temperaturi u kvalitetu TR1 i TR2, oznaka P195, P235 i P265.
- EN 10217-2, cevi kružnog preseka od nelegiranog i legiranog čelika izradene postupkom elektrozavarivanja sa osobinama na povišenim temperaturama. Uobičajeni čelici za ove cevi su: P195GH, P235GH, P265GH, 16Mo3.

- EN 10217-3, cevi kružnog preseka od legiranog finoznog čelika. Čelici za ove cevi imaju oznake P275NL1, P275NL2 P355N, P,355NH, P355NL1, P355NL2, P460N, P460NH, P460NL1 i P460NL2.
- EN 10217-4, cevi kružnog preseka od nelegiranog čelika, zavarene postupkom elektrozavarivanja sa osobinama utvrđenim za niske temperature. Cevi ove grupe izrađuju se od čelika oznake: P215NL, P265NL.
- EN 10217-5, cevi od nelegiranog i legiranog čelika proizvedene postupkom elektrolučnog zavarivanja u zaštitnom sloju, sa osobinama utvrđenim za povišenu temperaturu. Ova grupacija cevi radi se od čelika oznaka, P235GH, P265GH i 16Mo3, prečnika od 406,4 mm i ne koristi se za registar razmenjivača toplote.
- EN 10217-6, cevi od nelegiranog čelika zavarene postupkom elektrolučnog zavarivanja u zaštitnom sloju, sa osobinama utvrđenim za niske temperature. Ova grupacija cevi radi se od čelika oznaka, P215NL, P265NL, prečnika od 406,4 mm i ne koristi se za registar razmenjivača toplote.
- EN 10217-7, zavarene nerđajuće cevi, izrađene od austenitnog i austenitno-feritnog nerđajućeg čelika, koje se primenjuju u tehnologiji opreme pod pritiskom otporne na koroziju na sobnoj, a takođe i pri niskim ili povišenim temperaturama. Šavne cevi od nerđajućih čelika zbog svojih specifičnih osobina rade se u arealu manjih prečnika i debljina zida, što je utvrđeno zajedno sa tolerancijama izrade u standardu EN ISO 1127, isto kao i za bešavne cevi, a prikazano u tabeli TAB. 1.44. Standard EN 10217-7 za cevi od nerđajućih čelika imaju u nazivu početni simbol "X" i obuhvata veći broj osobina za feritne, martenzitne i austenitne čelike (od kojih su neke navedene u priložima knjige). Za potrebe ove knjige izabrani su najčešće korišćeni austenitni nerđajući čelici za šavne cevi otporni na koroziju, debljine do 60 mm kompatibilni oznakama AISI (videti TAB. 1.35), za izbor minimalne čvrstoće  $R_{p1,0}$  što je potrebno za Proračun čvrstoće (pog. 3.), TAB. 1.43.

**TAB. 1.43.** Mehanička svojstva izabranih šavnih cevi debljine do 60 mm od austenitnih nerđ. čelika otpornih na koroziju, na sobnoj i povišenim temperaturama, prema EN 10217-7:2005

Oznaka čelika			min. Granica razvlačenja	Minimalna čvrstoća $R_{p1,0}$ u MPa, izduženje 1,0% na temperaturi u °C											Temp. limit
EN 10027-1	EN 10027-2	AISI	Na sob. temp. $R_{p1,0}$ [MPa]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	°C
X5CrNi 18-10	1.4301	304	230	218	191	172	157	145	135	129	125	122	120	120	300
X2CrNi 19-11	1.4306	304L	215	200	181	162	147	137	127	121	116	112	109	108	350
X5CrNiMo 17-12-2	1.4401	316	240	230	211	191	177	167	156	150	144	141	139	137	300
X2CrNiMo 17-12-2	1.4404	316L	225	217	199	181	167	157	145	139	135	130	128	127	400
X2CrNiN 18-10	1.4311	304LN	305	282	240	210	187	175	167	161	156	152	149	147	400
X6CrNiNb 18-10	1.4550	347	240	232	211	196	186	177	167	161	156	152	149	147	400
X6CrNiMoTi 17-12-2	1.4571	316Ti	245	232	218	206	196	186	175	169	164	160	158	157	400

**TAB. 1.44.** Areal dimenzija austenitnih nerđajućih čeličnih cevi, bešavnih EN 10216-5 i šavnih EN 10217-7, prema EN ISO 1127:1997

Serija spoljaš. prečnika cevi			Debljina zida cevi $T$ u mm												
1	2	3	1	1,2	1,6	2	2,3	2,6	2,9	3,2	3,6	4	4,5	5	
	6														
	8														
	10														
10,2															
	12														
	12,7														
13,5															
	14														
	16														
17,2															
	18														
	19														
	20														
21,3															
	22														
	25														
	25,4														
26,9															
	30														
	31,8														
	32														
33,7															
	35														
	38														
	40														
42,4															

**Prave glatke cevi od obojenih metala**, najčešće su od bakra ili legura bakra. Bakar za izradu cevi ima oznaku Cu-DHP ili CW024A (videti tačku 1.5.2 pod d) koji je dezoksidisan fosforom, čistoće 99,9%. Odgovarajuća UNS oznaka je C12200. Mehanička svojstva bakra na temperaturama uobičajenim za toplotne mreže nisu značajno niže u odnosu na sobnu temperaturu, tako da do 120 °C, nije neophodno umanjivati dozvoljenu zateznu čvrstoću (EN 1057).

Cevi registra od obojenih metala najčešće se rade prema standardima:

EN 1057:2006, standard za bešavne okrugle cevi od bakra ili od legure bakra za vodu, gas, sanitarne i grejne instalacije, prečnika 6 do 267 mm.

EN 12449:2016, standard za bešavne vučene cevi od bakra kružnog preseka za opštu namenu, spoljašnjeg prečnika od 3 do 450 mm i debljine od 0,3 do 20 mm.

EN 12451:1999, standard za bešavne vučene cevi kružnog poprečnog preseka od bakra i legura bakra za razmenjivače toplote, kondenzatore, isparivače i opremu za desalinaciju, spoljašnjeg prečnika od 6 do 76 mm i debljine zida od 0,5 do 3 mm.

EN 12452:2012, standard za valjane orebrene - bešavne cevi od bakra i legura bakra za razmenjivače toplote, spoljašnjeg prečnika od 6 do 35 mm i debljine zida dela bez rebara od 1 do 3 mm, sa visinom rebara do 1,5 mm.

U zavisnosti od vrste fluida, temperatura i pritiska, mogu se koristiti bešavne bakarne cevi prema navedenim standardima kao meke, polutvrde i tvrde. Prema EN 1057:2006, instalacione bakarne cevi Cu-DHP imaju sledeće osobine:

Stanje bakra	Oznaka EN 1173	Spoljašnji prečnik (mm)	Min. zatezna čvrstoća ( $R_m$ ) (MPa)	Izduženje $A_{min}$ (%)
Meko	R220	6 – 54	220	40
Polutvrdo	R250	6 – 159	250	20
Tvrdo	R290	6 – 267	290	3

a prema EN 12451 i EN 12452 za razmenjivače toplote se koriste specijalne cevi:

Stanje bakra	Oznaka EN 1173	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	Namena Standard
Polutvrdo	R250	min 250	150	Kondanzatori i RT, EN 12451
Tvrdo	R290	min 290	250	Kondanzatori i RT, EN 12451
Meko	R220	min 220	45	Uvaljano orebrenje EN 12452

Osobine dezoksidisanog bakra prema vrlo pouzdanom Nemačkom institutu za bakar ([www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de)) su:

Gustina: na 20°C - 8940 kg/m<sup>3</sup>, na 1083°C - 8330 kg/m<sup>3</sup>, pri čemu je promena gustine veoma mala i linearna sa promenom temperature.

Koeficijent linearnog izduženja, zavisi od temperaturnog područja,

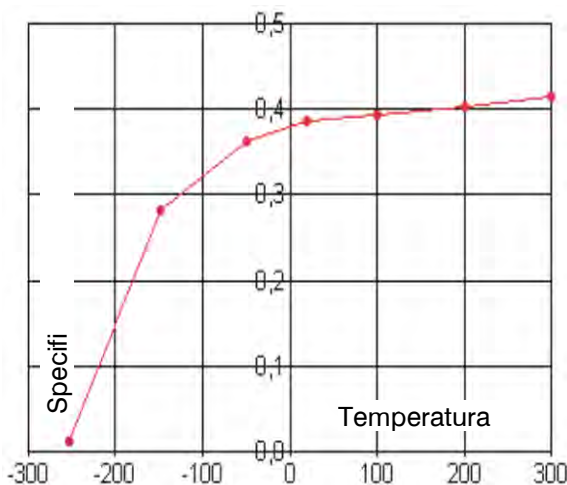
za područje -191 do 16°C je  $14,1 \times 10^{-6}$  [1/K],

za područje 20 do 100°C je  $16,8 \times 10^{-6}$  [1/K],

za područje 20 do 200°C je  $17,3 \times 10^{-6}$  [1/K],

za područje 20 do 300°C je  $17,7 \times 10^{-6}$  [1/K].

Specifični toplotni kapacitet je skoro nepromenljiv na temperaturama višim od 20°C, videti donji dijagram, slika Sl. 1.100.



Temperatura [°C]	Specifični toplotni kapacitet [J/(g·K)]
-253	0,013
-150	0,282
-50	0,361
20	0,386
100	0,393
200	0,403
300	0,415

**Sl. 1.100.** Zavisnost specifičnog toplotnog kapaciteta od temperature za dezoksidisan bakar Cu-DHP, prema Deutsches Kupferinstitut

Toplotna provodljivost Cu-DHP bakra takođe je slabo promenljiva veličina sa porastom temperature, uzima se vrednost ne manja od 330 [W/mK], na višim temperaturama može biti i malo veća.

Modul elastičnosti za hladno oblikovane proizvode od Cu-DHP bakra skoro da linearno pada pri porastu temperature i iznosi 132 GPa (kN/mm<sup>2</sup>) na sobnoj temperaturi (20°C), a 118 GPa na temperaturi od 300°C.

Prema EN 1057, preporučene su dimenzije bakarnih cevi prema spolnjem prečniku i debljini zida, a takođe i minimalni poluprečnici savijanja cevi. U donjoj tabeli dat je pregled dimenzija bakarnih cevi, koje se najčešće koriste za RT:

Spoljašnji prečnik i tolerancija (mm)	Debljina zida cevi (mm)	Tolerancija(%)		Min. radius savijanja (mm)		
		zid <1mm	zid ≥1mm	unutrašnji	neutralna osa	
10	± 0,04	0,6 0,7 0,8 1	± 10	± 13	35	40
12	± 0,04	0,6 0,7 0,8 1	± 10	± 13	39	45
14	± 0,04	0,8 1	± 10	± 13	43	50
15	± 0,04	0,7 0,8 1	± 10	± 13	48	55
16	± 0,04	1	± 10	± 13	52	60
18	± 0,04	0,8 1	± 10	± 15	61	70
22	± 0,05	0,9 1 1,1 1,2 1,5	± 10	± 15	–	–
28	± 0,05	0,9 1 1,2 1,5	± 10	± 15	–	–

Za razmenjivače toplote, prema EN 12451 koriste se bešavne cevi od bakra i legura bakra prečnika 5 do 76 mm i debljine zida 0,35 do 2,5 mm. Najčešće su u upotrebi cevi prečnika 8 do 35 mm, debljine zida 0,5 do 2 mm. Cevi se rade od čistog bakra (Cu-DHP) polutvrdog i tvrdog stanja (R250 i R290), prave ili u oliku U-cevi. Najznačajnije osobine materijala za cevi razmenjivača toplote od bakra i legura bakra prikazani su u tabeli TAB. 1.45. Koriste se sledeće legure:

Aluminijumska bronza, oznaka CuAl5As (numerička oznaka CW300G prema EN 1412:1995, (oznaka prema ASTM B111 UNS C60800) sadrži 4-6,5% aluminijuma i arsena 0,1-0,4%. Ova bronza je otporna na udare, toplotu i kiseline, naročito je otporna na koroziju u morskoj vodi, zahvaljujući stvaranju alumine (Al-oksida) na površini, koja deluje kao barijera protiv korozije.

Kupro-nikl, legura bakra i nikla sa dodacima gvožđa i mangana se najčešće koristi kao materijal cevi za razmenjivače toplote u morskoj vodi, jer je veoma otporna na piting koroziju hlorida, pri čemu ima visoku duktilnost i dobru toplotnu provodljivost. Najzastupljenije su legure sa 10% i 30% nikla (90/10 i 70/30, (prema UNS oznaka je C70600 i C71500, ASTM B466/B466M), pri čemu legura sa manjim sadržajem nikla se preporučuje za sobne ili malo povišene temperature morske vode i brzine u cevima 2,2-2,5 m/s (max. do 4 m/s) za čistu vodu, pri čemu ne ispod 0,8-1 m/s ako ima opasnosti od depozita. Legura sa višim sadržajem nikla je pogodna za teže uslove rada (rashladna voda, para, kondenzat). Za te uslove

kupro-nikl 70/30 je najpogodniji materijal za cevi do isključivosti. Preporučene brzine za čistu vodu su 3-3,5 m/s, ali ne ispod 1-1,2 m/s sa prisustvom depozita. Više podataka od proizvođača cevi ([www.metalalloyscorporation.com](http://www.metalalloyscorporation.com)).

Admiralitet bronza (specijalni mesing), legura bakra i cinka sa dodatkom kalaja pogodna je za cevi visoke otpornosti na koroziju u umereno zaprljanoj rečnoj vodi i čistoj morskoj vodi. Koriste se za izradu kondenzatora i isparivača, hladnjaka i grejača u klima ili rashladnim instalacijama.

Mesingane cevi, legura bakra i cinka sa dodatkom arsena (As) koji se ponaša kao inhibitor protiv gubitka cinka iz legure. Standard EN 12451 daje specifikaciju mesinganih cevi sa dodatkom aluminijuma (AlZn20Al2As - boja naginje zlatnoj) i bez dodatka aluminijuma (AlZn30As - boja naginje svetlo žutoj). Ove legure imaju optimalnu otpornost prema koroziji, dobru čvrstoću i obradivost. Naročito su pogodne mesingane cevi sa dodatkom aluminijuma za kondenzatore rashladnih instalacija hlađenih morskom vodom saliniteta preko 0,2%, a dokazana je i otpornost na dejstvo korozije-erozije za brzine vode do 2,5 m/s.

S obzirom na to, da je glavna primena cevi od bakra i legura bakra u sredinama sa agresivnim uticajem fluida, pri izboru legure i njenog sastava neophodno je raspolagati potvrđenim podacima o rezidentnosti materijala na radne fluide, kao i termomehaničke osobine na radnim temperaturama i pritiscima. Pored pomenutog Nemačkog instituta za bakar, obilje podataka za primenu cevi od bakra i legura bakra, naročito pod dejstvom morske vode vrste daje i Američko udruženje za razvoj bakra (Copper Development Association Inc. - [www.copper.org](http://www.copper.org)).

Prema EN 12451 za preporučene materijale cevi od bakra i legura bakra za razmenjivače toplote u tabeli TAB. 1.45, date su vrednosti zatezne čvrstoće i granice razvlačenja, kao i izduženja i proširenja (po obimu cevi) za sobne temperature (uobičajeno do 40°C).

**TAB. 1.45.** Mehanička svojstva materijala od bakra i legura bakra, prema EN 12451:1999

Oznaka materijala			Zatezna čvrstoća	Granica razvlačenja	Izduženje	Proširenje (Drift expansion)
Simbol prema EN 12451	Broj prema EN 1412	Stanje materijala	$R_m$ [MPa]	Na sob. temp. $R_{p0.2}$ [MPa]	A [%]	[%]
Cu-DHP Dezoksidisan Cu	CW024A	R250 polutvrdo	250	150	20	20
		R290 tvrdo	290	250	5	-
CuAl5As Al bronza	CW300G	R350 žareno	350	110	50	30
CuNiNi10Fe1Mn Kupro-Nikl 90/10	CW352H	R290 žareno	290	90	30	30
		R310	310	220	12	20
		R480	480	400	8	8
CuNiNi30Fe2Mn2 Kupro-Nikl 70/30	CW353H	R420 žareno	420	150	30	30
CuNiNi30Mn1Fe Kupro-Nikl 70/30	CW354H	R370 žareno	370	120	35	30
		R480	480	300	12	20
CuZn20Al2As Specijalni mesing	CW702R	R340 žareno	340	120	55	30
		R390 žareno	390	150	45	30
CuZn28Sn1As Admiralitet bronza	CW706R	R320 žareno	320	100	55	30
		R360 žareno	360	140	45	30
CuZn30As Mesing	CW707R	R340 žareno	340	130	45	30

Za radne fluide na povišenim temperaturama, čvrstoća bakra i njegovih legura opada što se mora uzeti u obzir pri dimenzionisanju opreme. Vrednosti granice razvlačenja ili dozvoljenog opterećenja za legure bakra u zavisnosti od temperature detaljnije su obrađeni u američkim standardima (videti ASME B31-Cevovodi, posebno B31.1 - Cevovodi u energetici i KGH instalacijama i B31.3 - Cevovodi u procesnoj industriji). Ipak, najpouzdaniji podaci o karakteristikama materijala na povišenim temperaturama mogu se dobiti od proizvođača u atestnoj dokumentaciji, kao što je u donjoj tabeli prikazana granica razvlačenja za cevi razmenjivača toplote japanskog proizvođača "Shinko Metal Products".

Materijal cevi DRT	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [MPa] = [N/mm <sup>2</sup> ], na temperaturi (°C)						
	Sobna	100	200	300	400	500	550
Al mesing	246	234	223	209	129	71	-
Cu-Ni 90/10	106	-	89	85	86	-	79
Cu-Ni 70/30	144	-	129	119	104	-	93

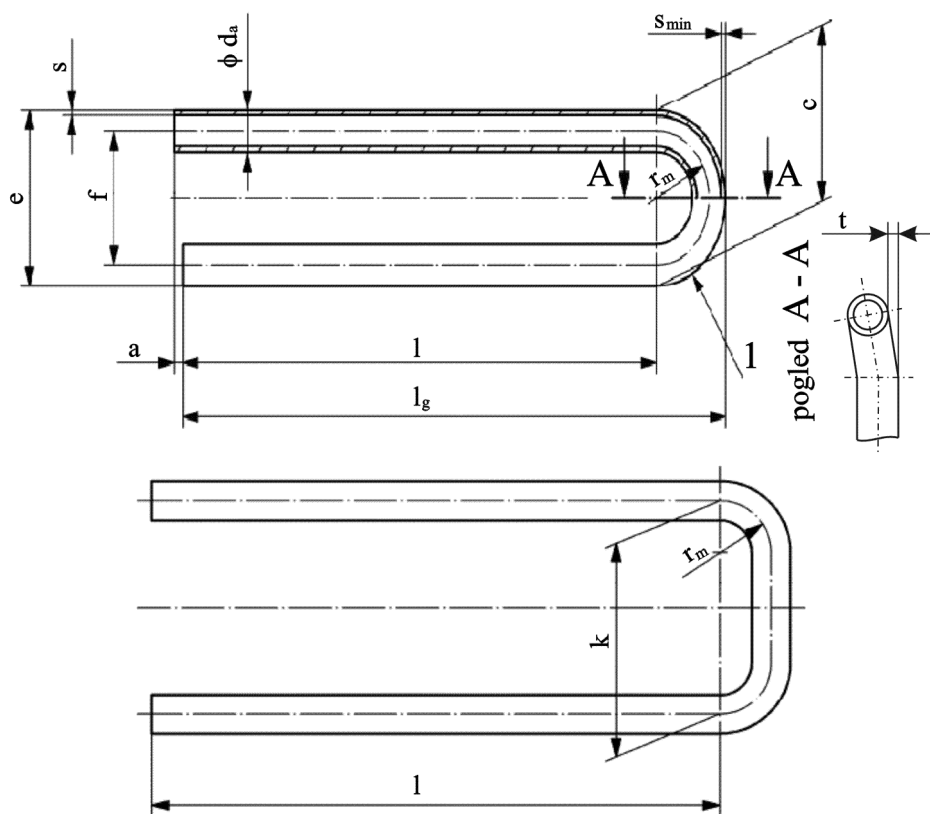
**U cevi**, su česta konfiguracija pravih šavnih ili bešavnih cevi u obliku latiničnog slova "U", pogodna za dobošaste razmenjivače toplote sa jednom cevnom pločom. Pored U cevi u primeni su i tzv "kofer" U cevi, koje umesto jednog luka od 180°, imaju dva razmaknuta luka od 90°, slika Sl. 1.101. Materijal U cevi je isti kao za prave cevi, (crni i obojeni metali). Savijanje se najčešće obavlja kod proizvođača cevi, ali zbog velikog broja promenljivih parametara (prečnik cevi, poluprečnik savijanja i dužina) neophodna je prethodna narudžba, tako da veći proizvođači razmenjivača uglavnom izrađuju sopstvene U cevi.

Najvažniji parametri U cevi su radijus savijanja i deformacija zida cevi na luku (spoljašnji zid luka se stanjuje, a unutrašnji zadebljava). Za formiranje cevnog registra od U cevi značajan je minimalni poluprečnik savijanja, koji zavisi od mnogo uticaja, a najvažniji su pored čvrstoće i elastičnosti materijala spoljašnji prečnik i debljina zida cevi. Veći minimalni poluprečnik savijanja se dobija za veće prečnike cevi, manje debljina zida i manje elastične materijale. Valovite cevi imaju manji minimalni poluprečnik savijanja od glatkih cevi izrađene od istog materijala istih mera. Preporučeni poluprečnici savijanja U cevi, prema DIN 28179 dati su u tabeli TAB. 1.46. Na slici Sl. 1.101, prema istom standardu prikazane su oznake i osnovne mere U cevi i kofer U cevi.

**TAB. 1.46.** Poluprečnik savijanja U cevi prema prečniku i debljini zida, DIN 28179:2007

Spoljašnji prečnik cevi (mere u mm)	Minimalni poluprečnik savijanja $r_{m \min}$ U cevi, za debljinu zida cevi $s$ (mere u mm)					Poluprečnik savijanja kofer U cevi (mere u mm)
	1,2	1,6	2,0	2,6	3,2	
$d_a$						Poluprečnik krivine $r_m$
16	30	24	20	-	-	40
20	47	34	26	23	-	50
25	-	51	37	35	27	60
30	-	62	42	38	35	80
38	-	-	52	47	42	100





**Sl. 1.101.** Mere "U" cevi, prema DIN 28179:2007, gore tip "R", dole tip "K" - kofer  
 Oznake u mm: a - Razlika u dužinama krakova, c - Spoljašnja mera U cevi na mestu luka, da - Spoljašnji prečnik cevi, e - Spoljašnja mera U cevi na mestu krakova, f - Osnovno rastojanje krakova U cevi, k - Osnovno rastojanje kofer U cevi na mestu luka, l - Dužina pravog dela U cevi, l<sub>g</sub> - Ukupna dužina po osi U cevi, r<sub>m</sub> - Srednji poluprečnik (radijus) savijanja U cevi, s - debljina zida cevi, s<sub>min</sub> - Minimalna debljina zida cevi na luku, t - Dozvoljeno odstupanje luka u odnosu na ravan U cevi.

Prema američkom standardu TEMA X [S1], poluprečnik savijanja ne sme biti manji od dvostrukog spoljašnjeg prečnika cevi ili unapred dogovoren između kupca i dobavljača. TEMA standard propisuje i maksimalno stanjenje cevi na spoljašnjem luku od 17%. Pored toga u zavisnosti od ugovorene isporuke može se zahtevati i maksimalna ovalnost preseka na luku U cevi. Posebno treba napomenuti, da u zavisnosti od vrste materijala i njegove duktilnosti, na mestu hladnog savijanja mogu nastati zaostali naponi, koji mogu uticati na nosivost cevi pri njenom opterećenju pod dejstvom pritiska i temperature i stvaranje inicijalnih pukotina i pojačanog dejstva korozije u eksploataciji. U takvim slučajevima obavezno je uklanjanje zaostalih napona, postupkom toplotne obrade. Toplotna obrada se vrši delimično, samo da delu cevi u okolini savijanja (slika Sl. 1.102).

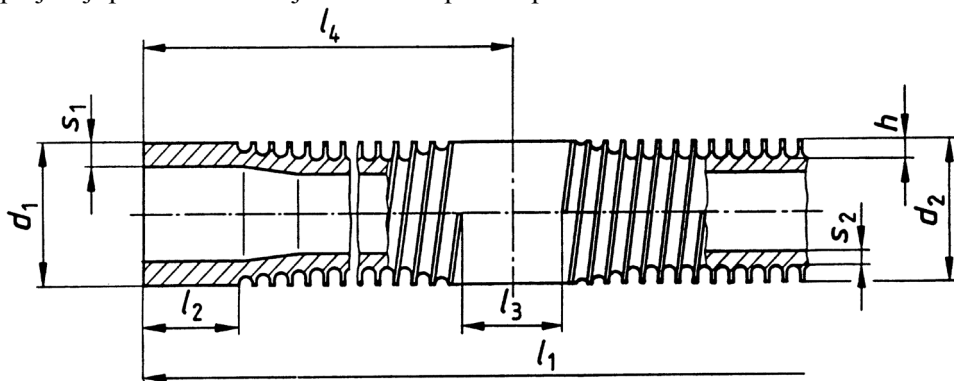


**Sl. 1.102.** Paketi U cevi složeni prema prečniku cevi i prema poluprečniku savijanja, TPS Technitube (Nemačka). Gornja desna slika prikazuje toplotno obrađene U-cevi. Detalji toplotne obrade (žarenje) mogu se videti u AD-Merkblatt HP 7/3 [S8].

**Orebrene cevi i cevi neokruglog preseka**, su posebno dizajnirane cevi, za postizanje viših vrednosti prolaza toplote, preko povećanja površine razmene toplote ili povećanog transfera zbog izazvane turbulencije strujanja, ili zbog dejstva oba faktora istovremeno. Već je naveden, u odeljku 1.1. podtačka A3, pregled tzv. razmenjivača toplote sa razuđenim površinama razmene toplote, gde orebrene cevi čine dominantnu grupaciju, sa veoma različitim modalitetima orebrenja.

Orebrene cevi u grupaciji dobošastih ili šire u grupaciji cevnih razmenjivača toplote, prema položaju u cevi mogu biti sa spoljašnjim, unutrašnjim ili orebrenjem sa obe strane. Prema položaju rebara u odnosu na podužnu osu cevi, mogu biti poprečna ili podužna orebrenja, a prema visini rebara mogu biti visoka, srednja i niska, pa čak i mikro izbrazdane površine cevi. Oblici rebara, upotrebljeni materijali i način spajanja sa osnovnom cevi su veoma različiti i najčešće povezani sa specifičnom namenom ili tehničkim rešenjem proizvođača. Imajući u vidu da je tehnologija izrade orebrenja povezana sa duktilnošću materijala, obojeni metali i njihove legure su prvi izbor materijala. Standard EN 12452 uređuje izradu valjanih, orebrenih, bešavnih cevi od bakra i legura bakra za potrebe razmenjivača toplote. Opseg mera ovih cevi je 6 - 35 mm spoljašnjeg prečnika i debljine zida dela bez rebara 1 - 3 mm, sa visinom rebara do 1,5 mm. Preporučeni materijali i njihove osobine su u skladu sa EN 12451. Orebrene cevi imaju niz spiralnih integralnih

rebara na spoljašnjoj površini dobijenih hladnim oblikovanjem, slika Sl. 1.103, dok spoljašnji prečnik orebrenja obično ne prelazi prečnik neorebrenne cevi.


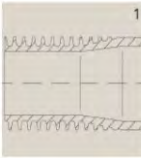

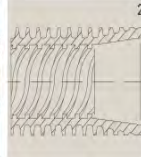

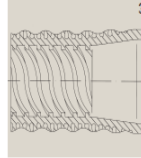

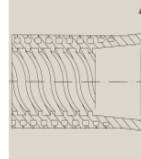

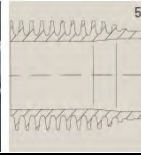

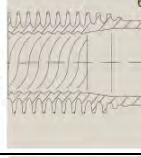

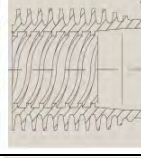

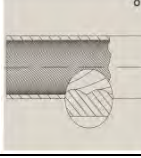


**Sl. 1.103.** Orebrene cevi, prema EN 12452:2012. Oznake u mm:  $d_1$  - Spoljašnji prečnik neorebrenne cevi,  $d_2$  - Spoljašnji prečnik orebrenne cevi,  $l_1$  - Ukupna dužina cevi,  $l_2$  - Dužina neorebrenne cevi,  $l_3$  - Dužina središnje neorebrenne sekcije,  $l_4$  - Dužina neorebrenne sekcije od kraja cevi,  $h$  - Visina orebrenja,  $s_1$  - Debljina zida neorebrenne cevi,  $s_2$  - Debljina zida orebrenne cevi.

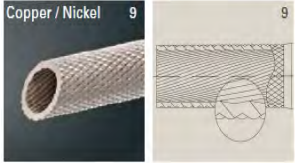
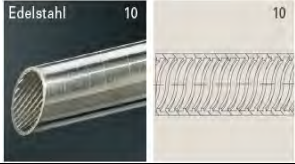

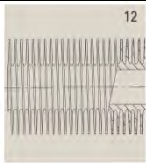
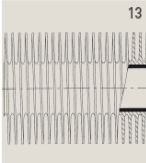
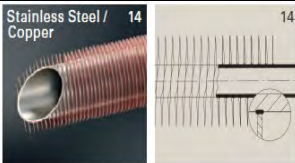
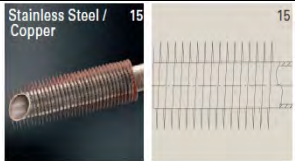
Primer oznake valjanih orebrenih cevi: EN 12452 - CuNi10Fe1Mn - R290 - 22 x 1,25 - N19 x H1,5 ili opisno, orebrena cev prema standardu EN 12452 od materijala CuNi10Fe1Mn (ili CW352H), tvrde R290, nominalnog spoljašnjeg prečnika 22 mm, nazivne debljine zida 1,25 mm, broj rebara po inču 19 i visine orebrenja 1,5 mm. Vodeći globalni proizvođači orebrenih površina razvili su široku lepezu ovih proizvoda, izrađenih presovanjem, zavarivanjem ili lemljenjem. Tipovi spoljašnjeg orebrenja izrađenih presovanjem prema internom standardu proizvođača "Profins" UK, ([www.profins.com](http://www.profins.com)) prikazani su na slici Sl. 1.23. U SAD je u ekspanziji razvoj orebrenih razmenjivača toplote, različitih tipova uključujući cevne i dobošaste razmenjivače toplote za oblast KGH, petrohemije i energetske efikasnosti (Trufin - zaštićena robna marka orebrenih cevi *Wolverine finn tube*, [www.wlv.com](http://www.wlv.com)), dok u Evropi, naročito Nemačkoj, postoji velika i raznovrsna ponuda orebrenih cevi od različitih materijala (npr. TPS - *Technitube Röhrenwerke GmbH*, [www.tpsd.de](http://www.tpsd.de) ili *Schmöle GmbH*, [www.schmoele.de](http://www.schmoele.de)).

Osnovna primena orebrenih cevi sa visokim rebrima je kod vazdušno hladjenih razmenjivača toplote. Na gasnoj strani pri normalnim brzinama je vrlo nizak koeficijent prenosa toplote, pa je potrebna povećana površina razmene, koja se postiže visokim orebrenjima. Nisko i srednje orebrene cevi se koriste pri razmenama toplote sa promenom faze (kondenzacija i isparavanje). Nisko orebrene cevi se koriste za kondenzaciju pare, jer pored povećane površine razmene imaju i efekat inicijalne tačke početka kondenzacije.

Interna klasifikacija orebrenih cevi prema *Wolverine* prikazana je na slici Sl. 1.104, prema nazivu, materijalu izrade, vrsti i visini orebrenja, lokaciji (spolja ili unutar cevi) i broju rebara na jediničnoj dužini cevi od 1 inča.

Tip orebrenje cevi	Izvedba	Skica		Orebrenje spolja	Orebrenje unutra
<b>A. Intergralno izrađene orebrene cevi</b>					
1. Trufin® S/T Materijal: Titanijum	Nisko orebrene cevi Visina orebrenja: Do 1,5 mm			Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 16 – 40	Nema orebrenja - glatko
2. Trufin® S/TT (Turbo-chil) Materijal: Nerđajući čelik	Nisko orebrene cevi Visina orebrenja: Do 1,5 mm			Broj rebara na cevi dužini 1" f.p.i = 16 – 40	Broj unutrašnjih grebena 6 - 40
3. Trufin® S/TK (cevi za kondenzatore) Materijal: Nerđajući čelik	Specijalno izrađena spoljašnja struktura orebrenja			Posebno oblikovan profil orebrenja	Broj unutrašnjih grebena 10 - 30
4. Trufin® S/TV (cevi za isparivače) Materijal: Nerđajući čelik	Specijalno izrađena spoljašnja struktura orebrenja			Posebno oblikovan profil orebrenja	Broj unutrašnjih grebena 10 - 30
5. Trufin® W/H Materijal: Aluminijum	Srednje orebrene cevi Visina orebrenja: 3 - 4,5 mm			Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 11	Nema orebrenja - glatko
6. Trufin® W/HS Materijal: Nerđajući čelik	Srednje orebrene cevi Visina orebrenja: 3 - 4,5 mm			Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 11	Unutrašnja površina valovita
7. Trufin® W/HT (cevi za kondenzatore) Materijal: Bakar	Srednje orebrene cevi Visina orebrenja: 3 - 4,5 mm			Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 11	Broj unutrašnjih grebena 6 - 10
8. I / R- Cevi za isparivače Materijal: Bakar	Integralne cevi sa glatkom spoljašnjom površinom			Nema orebrenja - glatko	Izbrazdana površina

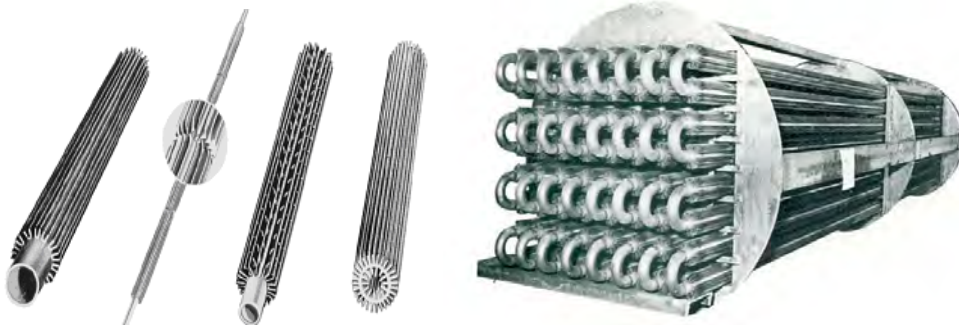
nastavak slike sa prethodne strane

Tip orebrenje cevi	Izvedba	Skica	Orebrenje spolja	Orebrenje unutra
9. S / RX - Cevi za isparivače Materijal: Kupro-Nikl	Specijalna spoljašnja struktura -nareckano		Nareckane piramidalne kvržice	Ožljebljena unutrašnja površina
10. Sigurnosna (spoljna) cev Materijal: Nerdajući čelik	Za dalju obradu u sigurnosnu cev		Nema orebrenja - glatko	Broj unutrašnjih grebena 60- 40
11. Koch Heat Transfer Company TWISTED TUBE® Houston, Texas, USA	Twisted cevi - Usukane ili uvrnute cevi		Nema orebrenja - glatko Promena forme preseka cevi	Nema orebrenja - glatko. Promena forme preseka cevi
12. Trufin® H/R Materijal: Metal	Visoko orebrenje cevi Visina orebrenja: 6 - 11 mm		Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 9	Nema orebrenja - glatko
13. Trufin® L/C Materijal: Metal	Visoko orebrenje cevi Visina orebrenja: 6 - 11 mm		Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 9	Sa unutrašnjom cevi
<b>B. Orebranje zavareno na cevi</b>				
14. Laserfin® Materijal: Nerdajući čelik / bakar	Visoko orebrenje, laserski zavarene cevi Visina orebrenja: 5 - 17 mm		Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 5 - 13	Nema orebrenja - glatko
15. Corrofin® Materijal: Nerdajući čelik / bakar	Visoko orebrenje, lemljene cevi Visina orebrenja: 5 - 13 mm		Broj rebara na cevi dužine 1" f.p.i = 5 - 14	Nema orebrenja - glatko

**SI. 1.104.** Razni tipovi porečno orebrenih cevi Wolferine, prema izvedbi i mestu orebrenja  
A: Integralno orebrenje cevi, B: Orebranje zavareno na cev. Specifično prikazane **twisted**  
cevi (poz.11 pod A) su bez orebrenja, ali sa promenljivom formom površine i preseka.



Pored uobičajenih poprečnih u praksi se koriste i podužna orebrenja. Podužno orebrene cevi se upotrebljavaju u slučaju opcije podužnog strujanja i kada je od značaja efikasna drenaža prostora oko cevi, Sl. 1.105. Podužna rebra su najčešće u I, L ili U profilu, koji se elektrootporno zavaruje na osnovnu cev.



**Sl. 1.105.** *Levo – tipovi uzdužno orebrenih cevi TPS-Tecnitube, a) standardne, b) presečene i uvrnute, c) perforirane, d) orebrenje spolja i iznutra. Desno – paket uzdužno orebrenih cevi.*

U odeljku klasifikacija razmenjivača toplote, u delu A3. razmenjivači sa razudeim površinama, (Sl. 1.25) je revolucionarni brend proizvođača Koch Heat Transfer SAD - *twisted cevi*, koje su prisutne na tržištu od 1985 god. Mnogobrojne prednosti primene ovih cevi ipak su umanjene zbog slabe raspoloživosti na tržištu, što im otežava primenu kod pojedinačne proizvodnje i manjih serija.

Razmenjivači sa *twisted* cevima imaju sledeće dominante prednosti, kao:

- Eliminirana potreba poprečnih pregrada, jer se cevi u trouglastom rasporedu međusobno dodiruju, a fluid se slobodno kovitla u njihovom međuprostoru,
- Visok koeficijent prenosa toplote sa obe strane cevi usled turbulencije, povećanje u odnosu na glatke cevi i do 40%,
- Ravnomerni raspored protoka, odnosno brzina fluida po dužini i površini preseka prostora oko cevi, što eliminiše mrtve zone i kao rezultat daje manje površine razmene, manje zaprljanje i niži pad pritiska,
- Konstruktivne osobine cevi daju konstantnu i ravnomernu brzinu strujanja, što u celini može eliminirati pojavu vibracija i napona usled termičkih dilatacija, pa se po efikasnosti ovi dobošasti razmenjivači najviše približavaju kompaktnim.

#### **d) Armatura, fitting i pribor**

Ostala posebna oprema, uređaji, poluproizvodi ili dodatna tehnička rešenja, koji su u užem ili širem obimu u sastavu razmenjivača, obuhvaćena je terminima: armatura, fitting i pribor. U zavisnosti od postavljene granice sistema, razmenjivač toplote se može tehnički posmatrati integralno u sklopu tehnološkog procesa ili kao nezavisan uređaj. U širem smislu, sistemom se obuhvata niz prateće opreme kao

što su: sigurnosna, zaustavna, blokadna i druga armatura, regulaciona armatura, armatura za punjenje, pražnjenje i odzračivanje, takođe i merna armatura, deo cevne instalacije i standardnog fittinga (cevni lukovi, čepovi itd.) i oslonci. U užem smislu – razmenjivač kao nezavisan uređaj, može sadržati priključke za punjenje, pražnjenje i odzračivanje, priključke za mernu armaturu (sa ili bez armature), kao i oslonce i vešaljke, za montažu i transport, a takođe dilatacione kompenzatore, info-tablice, oznake i sl. Nabrojani elementi neće se posebno razmatrati jer su široko dostupni, osim pojedinačno u sklopu tehničkog rešenja, npr. kompenzatori.

### 1.5.5. Elementi zaptivnih spojeva

Tehničko rešenje rastavljivog spoja pod dejstvom pritiska uvek je pomoću zaptivača – zaptivni spoj. Pored ovog naziva koriste se i termini prirubnički ili vijčani spoj ili prirubničko-vijčani spoj. Sklop se sastoji od tri komponente: nosive zaptivne površine (prirubnica), zaptivača i vijčane veze za stvaranje i održavanje naponskog stanja na zaptivaču. Pouzdanost funkcije najviše zavisi od navedenih komponenti, ali i od fluida koji je zatvoren u okviru postrojenja, da li je otrovan, zapaljiv, eksplozivan, radioaktivan, itd. kao i njegovog energetskog nivoa (koji karakterišu pritisak i temperatura). Svaka rastavljiva površina pod pritiskom u funkciji mora se smatrati kao zatvorena, odnosno mora se zaptivati. Često se koristi i termin nepropusnost kao negacija propusnosti, ali je pogodniji termin zaptivenost koji podrazumeva gradaciju propuštanja, jer ne postoji stanje apsolutne nepropusnosti, već samo ograničena propusnost koja podrazumeva "curenje" spoja pod određenim uslovima. Zbog toga, nepropusnost prirubničko-vijčanih spojeva ne podrazumeva "apsolutno čvrst sklop" (nula curenje), već zaptivenost u okviru zahteva. Održavanje relativne nepropusnosti spoja, podrazumeva njegovu funkciju u punom pogonu aparata pod dejstvom pritiska, temperature i protoka fluida, kao i stanju mirovanja, kada može biti pod dejstvom samo pritiska. Detaljnu analizu nepropusnosti i curenja spoja videti u fabrikaciji spojeva, tačka 4.2.8. Zaptivne površine na bilo kom mestu dobošastih razmenjivača toplote su statičke, odnosno nema relativnog kretanja između njih u toku razmene toplote. Ovi spojevi se pojavljuju kao granični element priključaka razmenjivača toplote u tehnološkim postrojenjima ili cevnim instalacijama, ili kao element rastavljivosti aparata, koji zbog veličine i specifičnosti povezivanja se posebno dimenzioniše prema standardnim procedurama, videti odeljak 3.3. U ovom razmatranju, ovaj spoj se posmatra kao komponenta priključka, koji kod razmenjivača toplote može biti zaptivni spoj ili samo priključna prirubnica ili navojni nastavak, u zavisnosti od obima isporuke. U slučaju da se priključni element isporučuje bez elemenata spoja, on se zatvara zaštitnim maskama od upadanja stranih tela, bez zaptivanja.

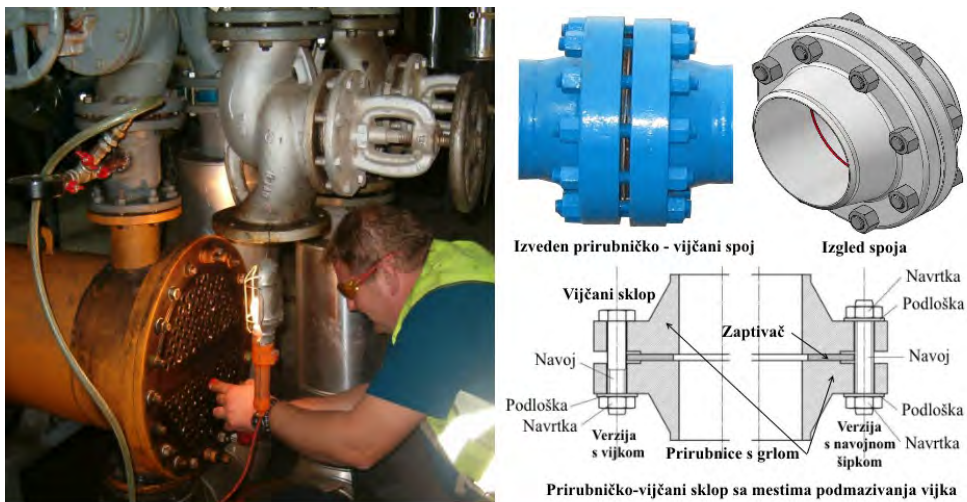
Pored komponenti prirubničkog spoja, naročitu važnost ima procedura izbora i izrade spoja. Procedura je naročito dobila na značaju pojavom smernica dobre prakse, u SAD ASME PCC-1:2019 i ASME PCC-2:2015, a u Evropi tzv. BAT smernicama (*Best available techniques*) asocijacije ESA [N9], u skladu sa standardima EN 1591 i EN 13555. Cilj ovih smernica je kontrolisano propuštanje



(curenje) i izrada spoja. Smernice posebno ističu važnost osposobljenosti osoblja (*bolteri*) u proceduri, a čine ih razni profili: inženjeri, tehničari, instalateri, sa certifikatom. Montaža prirubničkog spoja zahteva detaljnu kontrolu, a naročito:

- Sve kontaktne površine obe prirubnice: ravnost - radijalno i obodno, stanje korozije površina, mehanička oštećenja i stanje ožljebljenih nalegajućih površina;
- Stanje obavezno nove zaptivke, zacepljenost ili nejednakost debljine, zaptivač se ne sme premazivati mašću ili lepkom i mora se tačno centrirati;
- Vijčani komplet (vijak, navrtka i podloška) mora imati ispravan navoj, navijati se slobodno rukom, podmazanih površina trenja i obeležen po redosledu;
- Posebno je važno zatezanje i dotezanje vijaka po definisanom redosledu, kao i postupak kontrole opterećenja vijaka (obrtni moment).

Informativno na slici Sl. 1.106, su prikazani prirubnički spojevi pri kontroli cevne ploče razmenjivača toplote, lokalni prirubnički sklop i sastavni delovi sklopa sa mestima podmazivanja vijčanog kompleta pri montaži. Detaljniji sadržaj pomenutih direktiva pri fabricaciji prirubničkih spojeva dat je u tački 4.2.8.



**Sl. 1.106.** Prirubničko-vijčani zaptivni spoj. *Levo: Izgled spojeva razmenjivača toplote (pri pregledu cevne ploče). Desno: Elementi prirubničko-vijčanog sklopa sa mestima podmazivanja vijčanog sklopa pri montaži.*

### a) Zaptivači

Deo koji obavlja funkciju zaptivanja naziva se zaptivač (brtva, dihtung, ...) koji je izrađen od kompresibilnih materijala, a ima ulogu da pod opterećenjem sprečava nekontrolisani prolaz fluida. Zaptivač mora biti deformabilan da ispuni neravnine zaptivnih površina, a takođe i dovoljno elastičan da spreči istiskivanje i puzanje pod dejstvom sila pritiska. Opterećenje zaptivača se postiže dejstvom sile steznih elemenata (prirubnice) na zaptivne površine usled pritezanja vijaka.

Zaptivač će ostvariti svoju funkciju, ako su ispunjeni sledeći uslovi:

- Izdržava radne pritiske i ograničava curenje fluida preko površina naleganja.
- Hemijski je postojan na dejstvo fluida koje zaptiva.
- Dovoljno se deformiše da obezbedi intiman spoj površina naleganja.
- Podnosi temperature fluida bez ozbiljnih oštećenja sopstvenih performansi.
- Dovoljno je elastičan i otporan na puzanje da u toku vremena rada obezbedi neprekidno zaptivanje (bez naknadnog curenja i dotezanja spoja).
- Da zadrži integritet (ne dođe do drobljenja) usled opterećenja u toku montaže.
- Ne kontaminira i ne oštećuje fluide koje zaptiva.
- Ne izaziva ili podstiče koroziju na površinama naleganja spoja.
- Da se jednostavno i lako uklanja u toku zamene.

Izbor materijala za zaptivanje razmenjivača toplote nije jednostavan zadatak. Postoji veliki broj različitih rešenja prirubničkih spojeva koje takođe imaju uticaj na izbor tipa i materijala zaptivača. U prošlosti, često se koristila skraćenica "TAMP" (temperatura, aplikacija, medijum i pritisak) kao dovoljna informacija za preporuku zaptivača. Danas, pored njih potrebni su i podaci kao što su: materijal i kvalitet obrade prirubnice, klasa i broj vijaka podeonog kruga. Osim toga, promenjena je i definicija uspešnosti zaptivanja merenjem propuštanja (curenja) prema klasi nepropusnosti (EN 13555), detaljnije u tački 4.2.8.

Prema većini klasifikacija zaptivači mogu biti od sledećih materijala:

- Elastomerni materijali (elastomeri)
- Vlknasti materijali
- Ostali nemetalni materijali
- Metalni materijali

Radi lakšeg snalaženja u zaista velikom broju materijala za zaptivače ovde će se navesti prema gornjoj klasifikaciji osnovne osobine zaptivnog materijala. Međutim, ako su potrebne detaljnije informacije i dokazi za rezidentnost zaptivača prema radnom fluidu, potrebno je konsultovati proizvođača.

**Elastomeri** su "prvi izbor" za listaste zaptivače. Najčešće to su:

- Butil guma (ili IIR - polimerizacija 98% izobutilena sa 2% izoprena) ima dobru otpornost na ozon, pogodan za blage kiseline, lužine i estre, ali neotporan na ulja.
- Hipalon (polietilen modifikovan hlorom i sumpor-dioksidom) ima izanrednu otpornost na kiseline i lužine, dobru otpornost na ulja i svojstva zaštite od požara.
- EPDM (Etilen-propilen guma) ima dobru otpornost na ozon, pare, jake kiseline i lužine, ali nije pogodan za rastvarače i aromatične ugljovodonike.
- Viton (fluorelastomer -fluorovani ugljovodonik) je otporan na kiseline, alifatske ugljovodonike, ulja i agresivne fluide, ali ne i za amine, estre, ketone ili pare.
- Prirodna guma (NR – natural rubber) ima odlična svojstva oporavka posle dejstva opterećenja, dobru otpornost na većinu neorganskih soli, blagih kiselina i lužina. Ne preporučuje se za ulja i rastvarače, ili dejstvo ozona, kiseonika ili sunca.
- Neopren (hloropren, CR, sintetički kaučuk) je veoma otporan na dejstvo ulja, ozona i vremenskih uticaja. Pogodan je za umerene kiseline, lužine i soli, a takođe i za naftne derivate, ulja i goriva. Ne preporučuje se za jake kiseline i ugljovodonike.

- Perbunan (nitrilna guma, NBR) ima poboljšanu otpornost na dejstvo kemikalija i uticaja temperature od neoprena. Otporan je na ugljovodonike i ulja, a nije pogodan za hlorisane ugljovodonike, estre, ketone i jaka oksidaciona sredstva.

- Silikon (polimerizovani siloksan) ima izvrsna temperaturna svojstva, otporan na dejstvo ozona i sunca, ali je neotporan za mnoge ugljovodonike i pare.

- Neolit guma (SBR styrene-butadiene rubber) veoma je pogodan za pneumatike, otporan na dejstvo slabih organskih kiselina i umerenih hemikalija, ali nije pogodan za jake kiseline, većinu ugljovodonika i ozon.

**Vlaknasti materijali** su presovani pomoću vezivnih supstanci u kompaktni proizvod, od koga se izrađuju zaptivači raznih formi. Vlakna su najčešće sintetička, ali mogu biti i prirodna. Iz ove grupacije najzastupljeniji su sledeći materijali:

- Kevlar (aramid, aromatični poliamid) ima veliku čvrstoću i stabilnost za aplikacije srednjih temperatura. Ove osobine nastaju procesom fibrilacije, odnosno cepanjem i orijentacijom polimernih lanaca.

- Azbest je od 1890-ih, najčešći materijal koji se koristi za zaptivanje prirubnica, zbog osobine prilagodljivosti za široki spektar aplikacija, dostupnosti i cene. Međutim danas se izbacuje iz upotrebe zbog ekološke neprihvatljivosti. Azbest se pojavljuje u više različitih klasa vlaknastih minerala, od kojih je najvažniji tzv. beli azbest (krizotil) – hidratisan silikat magnezijuma, koji sadrži i male tragove aluminijuma i gvožđa, od čega zavisi boja krizotila koja varira od čisto bele do sivo-zelene. Azbest je nezapaljiv i slab provodnik toplote do oko 450°C, kada gubi svoju hemijsku kristalnu strukturu. Azbest je inertan i nije toksičan na dodir, miris ili gutanjem. Azbestna prašina pri kontinualnom dejstvu u većim količinama je kancerogena, pa je zabranjen u većini zemalja, ali ne i u svim (npr. Rusija, Kina, Indija, Brazil). U Srbiji zabrana proizvodnje i prometa proizvoda koji sadrže azbest regulisana je Pravilnikom o ograničenju i zabrani proizvodnje, prometa i korišćenja hemikalija (SG RS br 90/2013 [N26], na bazi EU direktive 1999/77/EC [N12]).

- Ugljenična vlakna imaju visoku toplotnu provodljivost, što omogućuje brzo hlađenje i izdržljivost pri radu na visokim temperaturama. Rezydentna su na hemijske uticaje u širokom spektru i zato se koriste u rasponu *pH od 0 – 14*.

- Celulozna vlakna su pogodna za niske temperature i srednje pritiske.

- Staklo je neorganski kompleks metalnih silikata. Posедуje dobru čvrstoću i umerenu otpornost na hemikalije. Pogodan za srednje i visoke temperature.

- Veštačka mineralna vuna (eng. MMMF-man made mineral fibre), radi se od stakla, kamenih minerala, keramike, zgure itd. Pogodna je za aplikacije koje rade na srednjim ili visokim temperaturama.

**Ostali nemetalni materijali** obuhvataju sve ostale nemetale od kojih se izrađuju zaptivači, koji mogu biti prirodni, veštački ili kombinovani. Najveći broj novih materijala za zaptivanje pripadaju ovoj grupi, a najvažniji su:

- Fleksibilni grafit je uglavnom čist grafit bez smola i neorganske ispune (95% ugljenik), moguća je kombinacija sa metalima. Ima veliku otpornost na hemikalije i upotrebljiv je na temperaturama do 400°C, čak i do 2500°C u inertnoj sredini.

- Mica (vermikulit - prirodni magnezijum-aluminijumski silikat, mineral grupe mica) ima karakterističnu laminarno-listastu strukturu, fleksibilnost, elastičnost i žilavost. Posедуje izvrsnu toplotnu stabilnost i hemijsku otpornost.

- Pluta je prirodni materijal organskog porekla dobijen od endemskog drveta. Ima osobinu elastičnosti i nepropustljivosti, prilično dobro se oporavlja posle dejstva opterećenja i relativno je inertan. Nedostatak je fleksibilnost i mehanička čvrstoća.

- PTFE (politetrafluoretilen) ima izuzetno širok opseg hemijske otpornost (praktično podoban za sve osim za slobodni fluor i bazne metale). Ima visok stepen kompresije, što omogućuje prilagođavanje površinskim neravninama prirubnica, jednostavan za upotrebu, ima nisku propustljivost i izuzetno mali koeficijent trenja. Nedostatak je neotpornost na uticaj zračenja, kao i sklonost otpuštanju i puzanju.

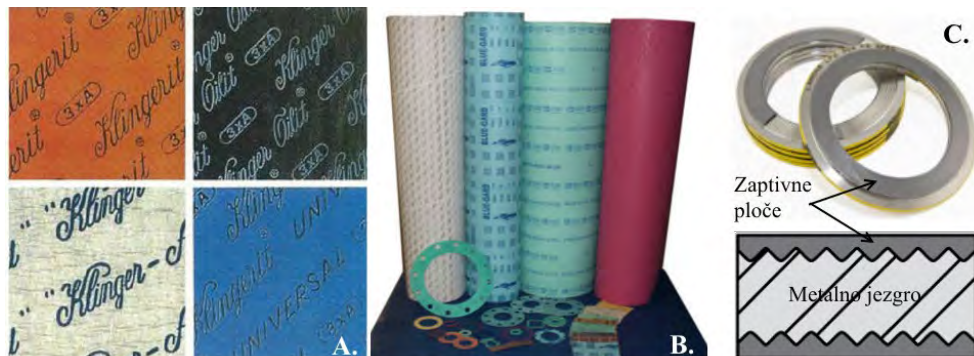
- TEADIT je ekspandirani PTFE (naziva se i ePTFE) ima sve dobre osobine PTFE, ali je mekši i odlično popunjava sve neravnine steznih prirubnica, pa je zato potrebna manja sila stezanja. On je prva opcija zaptivača dobošastih razmenjivača toplote, jer uglavnom za aplikacije nižih i srednjih temperatura zamenjuje azbest.

**Metalni materijali** koji se najčešće koriste za izradu zaptivača sadrže: ugljenični čelik, nerđajuće čelike, titan, razne vrste legura, aluminijum i bakar. Mogu biti izrađeni od jednog ili kombinacije više metala u raznim oblicima i veličinama. Pogodni su za visoke temperature, pritiske i agresivne medije. Teško se mogu klasifikovati kao grupe za posebnu primenu i uglavnom su patentirani.

Podela zaptivača prema konstrukcionom rešenju može biti u tri kategorije:

- meki zaptivači (nemetalni)
- polu-metalni zaptivači
- metalni zaptivači

**Meki zaptivači** (nemetalni), pogodni su za širok raspon opštih i agresivnih fluida, ali su ograničeni na niske ili srednje pritiske. Dostupni su u obliku ploča ili već oblikovani prema tehničkom rešenju. Najčešće upotrebljavani materijali su: elastomeri, komprimovana azbestna vlakna (CAF-compressed asbestos fibre) ili komprimovana vlakana bez azbesta (asbestos-free), grafit, PTFE, pluta, itd. Za dobošaste razmenjivače toplote za najveći broj aplikacija odgovaraju CAF zaptivači (gde je dozvoljena upotreba), zatim bezazbestni, PTFE, ePTFE i grafit. CAF-komprimovane azbestne ploče imaju sve pogodnosti za upotrebu osim ekoloških. Na slici Sl. 1.107A, prikazan je izgled CAF ploča, koje se izrađuju najčešće u tri kategorije prema pritisku i temperaturi (do 250°C i 20 bara, do 350°C i 40 bara i preko 350°C i 40 bara). Pojavljuje se u različitim bojama u zavisnosti od dodatnog materijala. Ako ima crnu boju, u pitanju je grafit, veoma pogodan za visoke temperature, ali je veoma krt i nezgodan za transport i ugradnju. Dimenzije ovih ploča su širine 1,5 m, dužine 2,4 ili 6 m, a debljine se kreću od 0,5 mm do 6 mm. U novije vreme, s tendencijom rasta koriste komprimovana vlakna bez učešća azbesta, umesto koga se ubacuju vlakna ugljenika, stakla i aramida. U nekim osobinama ovi materijali nadmašuju svoje azbestne ekvivalente, ali su obično manje mehanički čvrsti i pri rukovanju zahtevaju više pažnje. Na Sl. 1.107B je prikazan arsenal bezazbestnih zaptivača, zatim PTFE i ePTFE.



**Sl. 1.107.** Razni materijali zaptivača RT: A. CAF – Komprimovana azbestna vlakna u obliku ploča za izradu zaptivača, B. Komprimovana bezazbestna vlakna u obliku ploča takođe za izradu zaptivača, C. Kamprofile zaptivači. Metalno jezgro može biti od raznih čelika uključujući i nerđajuće čelike. Zaptivni materijal može biti mek, PTFE, grafit i sl.

**Polu-metalni zaptivači** su složene konstrukcije, koje sadrže metalne i nemetalne materijale. Metalni deo daje mehaničku čvrstoću i nosivost zaptivača. Koriste se za niske i visoke temperature i pritiske. Glavne vrste su: Kamprofile, armirano meki zaptivači (grafit, CAF, itd), valovito metalni i spiralni zaptivači.

- Kamprofile zaptivači, Sl. 1.107C, sadrže nazubljeno metalno jezgro, a sa obe strane je zaptivni materijal. Za dobošaste razmenjivače veoma je pogodan za rad u teškim uslovima, koriste se za pritiske do 250 bara i temperature do 1000°C. Ovi zaptivači su u posebnoj ekspanziji, razvijene su različite konstrukcije sa raznim kombinacijama metalnog jezgra i zaptivnog materijala, naročito grafita. Nedostatak za veću upotrebu je ograničena mogućnost lokalne izrade i posebne narudžbine za netipične mere. Mogu se više puta upotrebiti jer imaju delimičnu sposobnost regeneracije, ali postoji i rizik oštećenja zaptivnog materijala od strane prirubnica.

- Valovito metalni i spiralni zaptivači su namenjeni za izuzetno teške uslove rada u nuklearnim postrojenjima, zatim u izrazito agresivnim postrojenjima, dok za konvencionalne dobošaste razmenjivače toplote nisu od posebnog značaja.

**Metalni zaptivači** su novi karakteristični tipovi konstrukcija kao što su: pločasti metalni zaptivači (ravni ili valoviti - CMG), prstenasti zaptivači (kružnog ili poligonalnog profila), metalni zaptivači zavarene konstrukcije itd. Prstenasti zaptivači se koriste za velike i specijalne prirubnice, konstruisani za upotrebu na visokim pritiscima i temperaturama, prvenstveno u petrohemijskoj industriji. Kontaktne površine zaptivača i prirubnica su male, pa nastaje vrlo visok površinski pritisak, zbog toga materijal zaptivača mora biti mekši od materijala prirubnica.

**Osnovni postupak izbora zaptivača** je proces koji se zasniva na postupku sužavanja izbora prema zadatim uslovima. Ranije su kako je navedeno korišćeni kriterijumi za izbor zaptivača zasnovani na parametrima: temperatura-aplikacija-medij-pritisak, međutim u današnje vreme pokazalo se da je to nedovoljno i da

postoji još značajnih uslova za pravilan izbor. Prema evropskoj agenciji ESA [N9], mogu se izdvojiti sledeće glavne grupe kriterijuma izbora: performanse, ostale komponente spoja, standardi, propisi i kompetencije, detaljno u tački 4.2.8.

Performanse čine radni uslovi koji postoje i koji se menjaju tokom radnog perioda. Temperatura procesa nije samo najviša temperatura koja se dostiže, već i njena varijacija tokom rada (to se kod razmenjivača uvek događa), a zatim bitan je i nivo najniže temperature i promena agregatnog stanja fluida. Pritisak nije samo najviši pritisak, već i njegova dinamika (skokovi pritiska), kao i da li se tokom rada pojavljuje vakum. Takođe je od značaja i dejstvo pritiska zavisno od temperature. Performanse nekih zaptivača zavise od debljine, npr. pri povećanju debljine može efikasnost zaptivanja opasti ili čak gubiti integritet komponenti. Sastav i agregatno stanje fluida je sledeća uticajna performansa, kao i da li fluid sadrži čvrste čestice, koja su hemijska svojstva fluida (pH vrednost) i njegova koncentracija. Ključna pitanja za prehrambenu i farmaceutsku industriju je kontaminacija sadržaja usled dejstva zaptivača, a uopšte pitanje hemijske reakcije zaptivača i fluida, oksidacija i kontaminacija. Dakle, hemijska kompatibilnost fluida i materijala zaptivke mora postojati i biti garantovana od strane proizvođača.

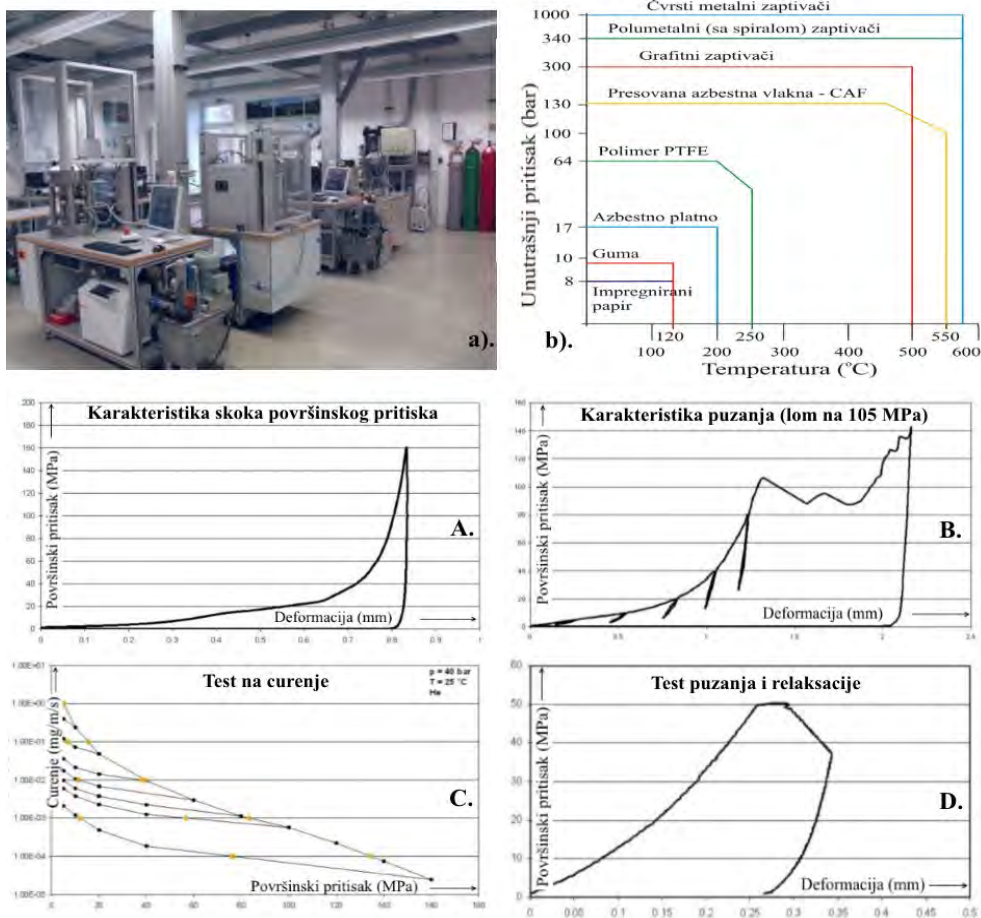
Dizajn zaptivnog spoja je vrlo važan u određivanju ispravne forme i izbora materijala zaptivača (kod razmenjivača toplote to su prirubnice i vijčani sklop). Oni su uglavnom izrađeni od metala, ali treba imati u vidu sve veću upotrebu plastike ili stakla (za takvu primenu neophodni su zaptivači za niskopritisne napone). Postoji mnogo različitih tipova standardizovanih prirubnica i geometrija, od kojih veoma zavisi intenzitet površinskih napona na zaptivaču. Zatezanje vijčanog spoja je različito u zavisnosti od oblika i veličine nalegajuće površine i njene mehaničke obrade a takođe i od vrste zaptivača. Detaljnije o dizajnu ovih komponenti videti dalje u ovoj tački i posebno u tački 4.2.8. Stanje prirubnica se može pogoršati tokom vremena usled mehaničkog oštećenja, deformacije ili korozije, što može uticati i na promenu izbora zaptivača tokom eksploatacije.

Standardi i propisi su normativi koji se primenjuju u mnogim aplikacijama, na bazi kojih je potrebno uskladiti izbor svih komponenti zaptivnog sklopa. To su npr. ASME B16.20, EN 12560:2003 (dimenzije zaptivača) ili API 6A (smernice za kupovinu) koji definišu materijale, tipove konstrukcije, dimenzije itd. Postoji i ekološki uticaj materijala, npr. nemački propisi TA Luft [N17], gde su ograničene emisije propustljivosti zaptivača. Mogu postojati i druga ograničenja, kao npr. minimalni kriterijum zaptivanja u slučaju požara (API 6FB).

Kompetencije su kriterijumi koji se moraju ispuniti nakon što su ispunjeni svi prethodni zahtevi, koji definišu ugradnju zaptivača a koju moraju ispuniti operateri. Osoblje (bolteri) raznih profila: inženjeri, tehničari, instalateri, moraju imati sertifikat iz svog domena, što ih čini kompetentnim za ugradnju zaptivnog spoja. Postoje razne veštine koje omogućavaju obavljanje ovih poslova, npr. postavljanje zaptivača velikog prečnika na visini, pravilno naleganje na zaptivnim površinama, tehnika obeležavanja, zatezanja i dotezanja vijčanih spojeva, itd. Ova pravila su regulisana različitim propisima, npr. pomenuti ESA, ASME PCC-1, EN 1591-4 itd.



Za utvrđivanje ovako složenih karakteristika zaptivača u Evropi je donet standard EN 13555, kojim se regulišu parametri zaptivača i postupci ispitivanja. Na osnovu njega su formirane specijalne akreditovane laboratorije u kojima se vrši ispitivanje zaptivača i izdaju odgovarajući certifikati, slika Sl. 1.108, a), na bazi posebnog softvera (npr. u Nemačkoj Amtec GmbH – [www.amtec.eu](http://www.amtec.eu)). Postoje čak javne baze podataka zaptivača, npr. [www.gasketdata.org](http://www.gasketdata.org) (Nemačka) za veliki broj vodećih proizvođača zaptivača, kao što su npr.: Chesterton GmbH, Kempchen Dichtungstechnik GmbH, globalni Flexitallic Ltd, James Walker Ltd (Engleska), Klinger AG (Švajcarska), a moguća je i izrada karakteristika zaptivača po zahtevu.



**Sl. 1.108.** Karakteristike zaptivača: a) Laboratorija za ispitivanje, b) Opšti izborni dijagram materijala zaptivača, A.,B.,C.,D. Karakteristični dijagrami ispitivanja zaptivača.

Postoji pravilo, da je prva faza eliminacije nepodobnih materijala zaptivača izdržljivost na temperaturi i pritisku medijuma koji se zaptiva, što je prikazano na



bazi mnogih ispitivanja na slici Sl. 1.108, b). To naravno nije dovoljno, već je potrebno koristiti i rezultate ispitivanja, slika Sl. 1.108, A,B,C,D, ipak iskustvo pokazuje da nema poznatog zaptivača, koji zadovoljava sve zahtevane uslove, već postoji najprihvatljiviji izbor uz određena ograničenja i kompromis.

Za veliki broj razmenjivača toplote koji rade u poznatim uslovima sa fluidima kao što su voda i para za standardne prirubničke priključke, koriste se takođe standardizovane veličine zaptivača od raznih materijala, poznati kao meki zaptivači (ranije uglavnom od azbestnih materijala). To su standardi EN 12560 u Evropi i ASME B16.21 u SAD. Međutim, kada su u pitanju specifični ili opasni fluidi, potrebna je detaljna analiza na bazi laboratorijskih ispitivanja, uz konsultaciju velikog broja tabela hemijske otpornosti zaptivnih materijala na iste ili grupe sličnih fluida zasnovane na relevantnoj literaturi. Pri konačnom izboru neophodna je potvrda proizvođača, da njihov zaptivač odgovara karakteristikama dostavljenih fluida. Zaptivači nestandardnih spojeva razmenjivača toplote se proračunavaju i dimenzionišu po posebnom postupku (videti odeljak 3.3).

Pravilan izbor i montaža zaptivača treba da obezbedi zaštitu od curenja fluida izvan predviđenih granica. Važno pravilo za meke zaptivače: Pri demontaži razmenjivača toplote iz bilo kojih razloga, pri ponovnoj montaži uvek ugraditi nove zaptivače. To sigurno utiče na smanjenje mogućeg curenja, a cena novog zaptivača je manja od troškova nastalih usled naknadnih demontaže i montaže. Korišćeni zaptivači postaju krti i gube potrebnu elastičnost pri adaptiranju površini zaptivanja i zahtevaju veće sile zatezanja vijaka, što može ugroziti ceo zaptivni spoj.

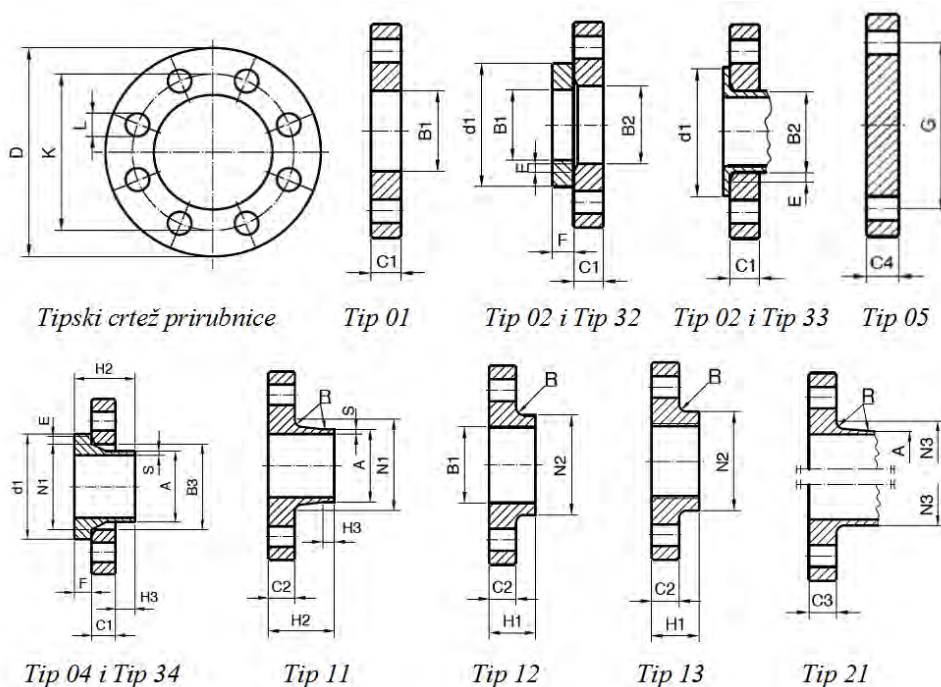
## **b) Prirubnice**

Prirubnice su najčešće standardizovani elementi dobošastih razmenjivača, kao rešenje rastavljivih spojeva i komponenta održavanja pritiska na zaptivače za obezbeđenje nepropusnosti, ili kao element povezivanja razmenjivača u instalaciju postrojenja. Kao element rastavljivih spojeva pojavljuje se u sklopu doboša i glava razmenjivača ili u sklopu plivajućih glava, dok se kao element instalacionog povezivanja pojavljuje na mestu priključaka aparata. Ovde se razmatraju standardne prirubnice u bilo kom sklopu razmenjivača toplote.

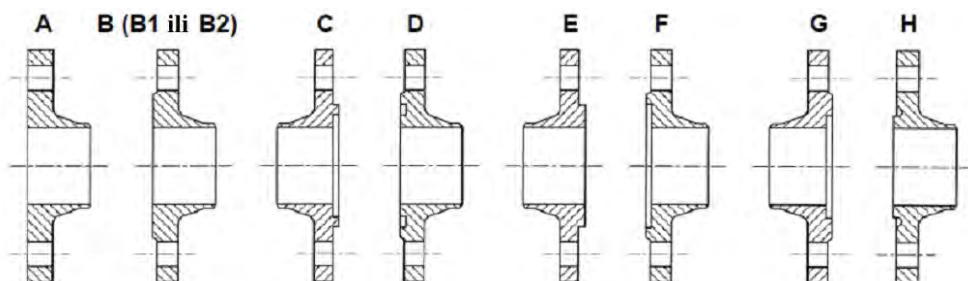
Nekada dominantni standardi za cevne prirubnice ISO 7005-1 i DIN (mere DIN 2501 i drugi grupe DIN 25xx i DIN 26xx), odnosno ANSI/ASME B16.5, u Evropi su zamenjeni prilično različitim standardom EN 1092:2008 u odnosu na prethodni DIN. On se sastoji iz 4 dela u zavisnosti od materijala izrade: *1-čelične prirubnice; 2-prirubnice od livenog gvožđa; 3-prirubnice od legura bakra i 4-prirubnice od legura aluminijuma*. Serija kružnih čeličnih prirubnica obuhvata nazivne pritiske PN 2,5-400 i nominalne prečnike DN 10-4000. Na slici Sl. 1.109, prikazani su tipovi konstrukcije prirubnica ravne površine zaptivanja (oblik A), a u tabelama TAB. 1.47. kondenzovani pregled mera prirubnica prema EN 1092-1.

Oblik površina zaptivanja prirubnica prema EN 1092-1 može ravan (kao na slici Sl. 1.109) ili oblikovan kao na slici Sl. 1.110 prema konstrukciji zaptivača. Za dobošaste razmenjivače koristi se uglavnom ravan oblik zaptivanja - oblik A, ili sa

uzdignutim čelom - oblik B1. Što se tiče hrapavosti površine zaptivanja, oblici A, B1, E i F imaju veću hrapavost, a oblici B2, C, D, G i H manju hrapavost.



**Sl. 1.109.** Tipovi prirubnica prema EN 1092-1:2008: Tip 01-Ravna za zavarivanje, Tip 02-Slobodna (leteća) prirubnica, sa prstenom za zavarivanje (Tip 32) i preklapljeno-pertlovanim krajem cevi (Tip 33), Tip 04-Slobodna prirubnica i prstenasti nastavak za zavarivanje (Tip 34), Tip 05-Slepa prirubnica. Tip 11-Prirubnica sa grlom, Tip 12-Prirubnica sa glavčinom na zavarivanje, Tip 13-Navojna prirubnica sa glavčinom, Tip 21-Integralna PED prirubnica.



**Sl. 1.110.** Oblik zaptivne površine prirubnica prema EN 1092-1:2008: A-Ravna, B-sa uzdignutim čelom (B1-veća, B2-manja hrapavost), C-sa jezičkom (ispustom), D-sa žljebom, E-sa naglavkom, F-sa udubljenjem, (E i F muško-ženski spoj), G-sa naglavkom za O-prsten, H-sa žljebom za O-prsten.









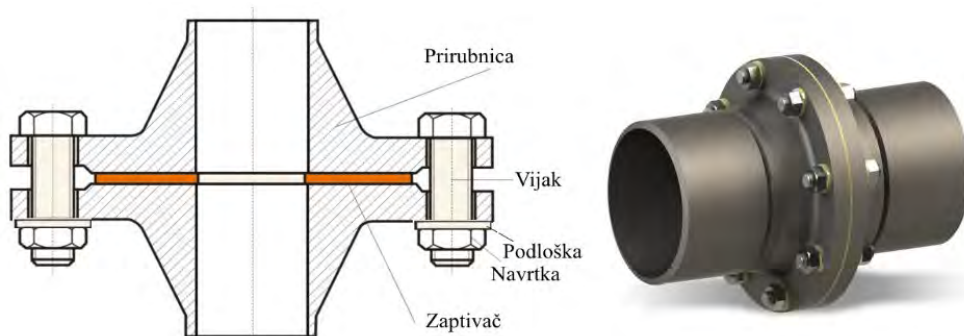
Prirubnice se označavaju standardom izrade, tipom konstrukcije, nazivnim prečnikom, nazivnim pritiskom i materijalom izrade. Na primer oznaka prirubnice tipa 11, oblika zaptivne površine B2, nazivne veličine DN 200, grla debljine 9 mm, nazivnog pritiska PN 100, izrađena od materijala P245GH ima oznaku:

Prirubnica EN 1092-1/11/B2/DN 200-9/PN 100/P245GH, ili kraće DN 200, PN 16.

Izdržljivost prirubnica je deklarirana za radne pritiske jednake nazivnom pritisku za uslove rada na referentnoj temperaturi PN (RT, -10 do +50°C). Za više radne temperature radni pritisci su niži od nazivnih pritisaka i zavise od izabranog materijala prirubnice i njegovog tzv. **p/t** rejtinga, koji se može preuzeti iz tablica u prilogu Tab.PBI-702, karakteristika materijala ili aproksimativno iz standarda EN 1092-1, aneks F i G. Npr. za nerdjajući čelik AISI 316L (1.4404) za radni pritisak PS=13 bara, vrednost nominalnog i radnog pritiska za temperaturu od 100°C iznosi PN/PS=16/15,1; za temperaturu 150°C je PN/PS=16/13,7; za temperaturu 200°C je PN/PS=16/12,7<13; za temperaturu 300°C je PN/PS=16/11<13. Iz navedenog sledi da za temperature od 200 i 300 °C treba izabrati prirubnice PN 25, a ne PN 16.

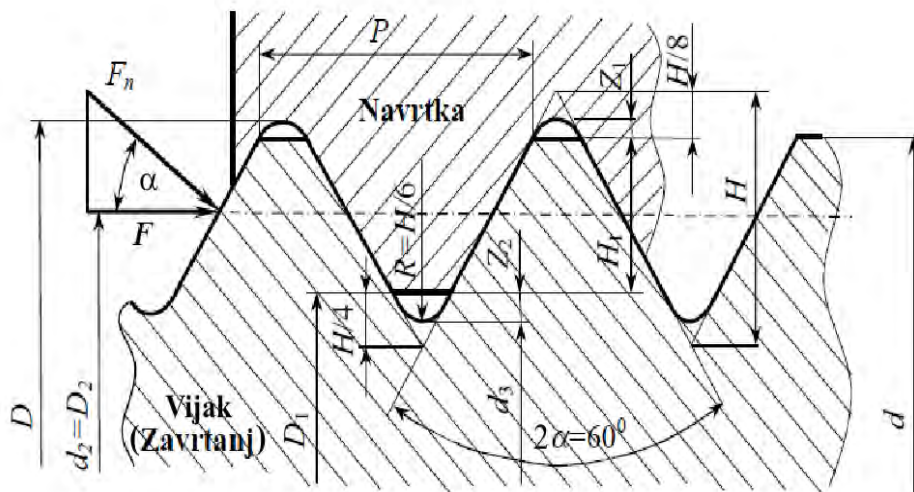
### c) Vijčani sklop

Vijčani sklop (zavrtnji) su standardizovani elementi za spajanje ili stezanje prirubnica priključaka razne opreme i cevne mreže, a koriste se i za povezivanje rastavljivog spoja cevne ploče, glava i omotača dobošastih razmenjivača. Zadatak sklopa u spoju cevne ploče je povezivanje različitih delova razmenjivača u kompaktnu celinu, i obezbeđenje potrebne sile za stvaranje dovoljnog napona pritiska na zaptivnoj površini spoja koji sprečava curenje, propuštanje ili mešanje fluida u razmenjivaču toplote. Sklop sadrži vijak, navrtku i podlošku, što se vidi na slici Sl. 1.111. u prirubničkom spoju dve prirubnice i zaptivača.



Sl. 1.111. Vijčani spoj prirubnica, levo – presek, desno izgled.

Osnovni element svakog vijka je navoj koji karakteriše ugao profila, koji u metričkom sistemu iznosi prema standardu ISO 261  $2\alpha=60^\circ$ . Oblik profila sklopa vijka i navrtke sa osnovnim dimenzijama prikazan je za metrički navoj na slici Sl. 1.112. Stvarni profil (podebljana linija) nastaje zaobljavanjem podnožja navoja.



**Sl. 1.112.** Oblik i mere metričkog navoja prema ISO 261:1998 (mala slova se odnose na vijak, a velika na navrtku)  $D$ ,  $d$  – nazivni prečnik ( $D > d$ ),  $D_1$  – prečnik svetlog otvora navrtke,  $d_3$  – prečnik jezgra vijka,  $D_2 = d_2$  – srednji prečnik navoja,  $2\alpha$  – ugao profila zavojnice,  $H$  – teorijska dubina navoja,  $H_1 = (d - D_1)/2$  – dubina nošenja navojnog para,  $P$  – korak navoja,  $Z_1$ ,  $Z_2$  – temeno skraćenje navoja navrtke i vijka. Ugao zavojnice  $\varphi$ , je ugao koji čini razvijena zavojnica na srednjem prečniku navoja, gde je  $\text{tg } \varphi = P/d_2 \pi$ .

Metrički navoj u zavisnosti od koraka navoja standardizovan je prema ISO 261 kao normalni, a prema ISO 724 kao fini navoj. U zavisnosti od nazivnog prečnika, navoji su podeljeni u tri stepena prioriteta, što je prikazano u tabeli TAB-1.48, I stepen prioriteta je dominantan. Metrički navoj se označava sa  $Md$  (krupni navoj), odnosno  $MdxP$  (sitni ili fini navoj), npr. M 16 (korak je 2,5), ili M 20x2. Ostale dimenzije i mere navoja od značaja za DRT, date su u tabeli TAB-1.49.

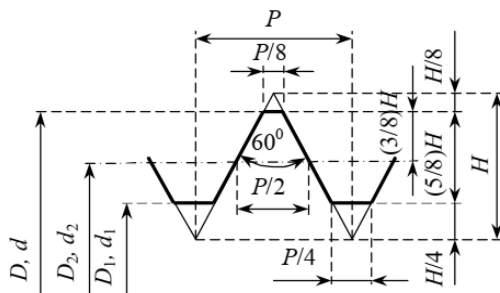
Iako postoji veoma širok dijapazon oblika i dimenzija vijaka, za dobošaste razmenjivače toplote koriste se vijci sa šestostranom glavom, ređe sa okruglom glavom, a sasvim retko vijci za tačno naleganje, videti tabelu TAB-1.50.

Materijali za izradu vijaka za razmenjivače toplote su prema starim JUS standardima bili u skladu sa ISO 898-1 i nosili naziv, čelici za vijke (ČV). Čelici za vijke su se razvrstavali prema klasi čvrstoće, a ne vrsti materijala. Ona se sastojala od dva broja razdvojena tačkom, na primer 5.6 ili 12.9. Prvi broj pomnožen sa 100 označava zateznu čvrstoću, a proizvod prvog i drugog broja pomnožen sa 10 označava napon tečenja materijala. Vrednosti su izražene u  $\text{N/mm}^2$ . Na primer klasa čvrstoće 5.6 predstavlja zateznu čvrstoću od  $500 \text{ N/mm}^2$  i napon tečenja  $5 \cdot 6 \cdot 10 = 300 \text{ N/mm}^2$ . Klasa čvrstoće navrtke se označava jednim brojem koji se odnosi na zateznu čvrstoću. Čvrstoća materijala navrtke je za jednu klasu niža od čvrstoće zavrtnja iz razloga što je napon u navoju navrtke niži, zbog većeg prečnika, a i zbog toga što je navrtka jeftinija i lakša za zamenu.



**TAB. 1.48.** Korak navoja prema nominalnom prečniku i stepenu prioriteta, ISO 261[59]

Nominalni prečnik			Korak		Nominalni prečnik			Korak	
Stepen prioriteta			Krupan korak	Sitan korak	Stepen prioriteta			Krupan korak	Sitan korak
I	II	III			I	II	III		
1			0,25	0,2			32		2 1,5
	1,1		0,25	0,2		33		3,5	(3) 2 1,5
1,2			0,25	0,2	36	39		4	3 2 1,5
	1,4		0,3	0,2			35, 38		1,5
1,6			0,35	0,2			40	4	3 2 1,5
			0,35	0,2				4,5	3 2 1,5
2	1,8		0,4	0,25	42	45		5	4 3 2 1,5
			0,45	0,25	48				4 3 2 1,5
2,5	2,2		0,45	0,35			50		3 2 1,5
3			0,5	0,35		52		5	4 3 2 1,5
	3,5		0,6	0,35			55 58	5,5	4 3 2 1,5
4			0,7	0,5	56			5,5	4 3 2 1,5
	4,5		0,75	0,5		60			4 3 2 1,5
5			0,8	0,5			62		4 3 2 1,5
		5,5		0,5	64	68		6	4 3 2 1,5
6			1	0,75			65		4 3 2 1,5
		7	1	0,75			70		6 4 3 2 1,5
8			1,25	1 0,75	72	76			6 4 3 2 1,5
		9	1,25	1 0,75			75		4 3 2 1,5
10			1,5	1,25 1 0,75			78 82		2
		11	1,5	1 0,75	80				4 3 2 1,5
12			1,75	1,5 1,25 1		85, 95			6 4 3 2
	14		2	1,5 1,25 1	90, 100	105,115	135		6 4 3 2
		15		1,5 1	110, 125	120,130	145		6 4 3 2
16			2	1,5 1	140	150			6 4 3 2
		17		1,5 1			155, 165		6 4 3
	18		2,5	2 1,5 1	160	170	175, 185		6 4 3
20			2,5	2 1,5 1	180	190	195, 205		6 4 3
	22		2,5	2 1,5 1	200	210	215, 225		6 4 3
24			3	2 1,5 1	220	240	230, 235		6 4 3
		25		2 1,5 1	250		245		6 4 3
	27			1,5			255, 265		6 4
		26	3	2 1,5 1		260	270, 275		6 4
		28		2 1,5 1	280		285, 290		6 4
30			3,5	(3) 2 1,5		300	295		6 4



$$H = (\sqrt{3}/2)P$$

$$D_2 = D - 2(3/8)H = D - 0,6495P$$

$$d_2 = d - 2(3/8)H = d - 0,6495P$$

$$D_1 = D - 2(5/8)H = D - 1,0825P$$

$$d_1 = d - 2(5/8)H = d - 1,0825P$$

TAB. 1.49. Izabrane dimenzije od značaja za DRT, metrički navoj, ISO 261 [59]

Nomin. prečnik $d=D$ mm		Korak $P$ mm	Srednji prečnik $d_2=D_2$ mm	Dubina nošenja $H_1$ mm	Noseći preseki $A_S$ mm <sup>2</sup>	Prečnik jezgra $d_3$ mm	Ugao zavojnice $\phi$ stepeni
I	II						
<b>Metrički navoj krupnog koraka</b>							
1		0,25	0,838	0,135	0,460	0,693	5,43
1,2		0,25	1,038	0,135	0,732	0,893	4,38
1,6		0,35	1,373	0,189	1,270	1,170	4,64
2		0,40	1,740	0,217	2,070	1,509	4,19
2,5		0,45	2,208	0,244	3,390	1,948	3,71
3		0,50	2,675	0,271	5,030	2,387	3,41
	3,5	0,60	3,110	0,325	6,780	2,765	3,51
4		0,70	3,545	0,379	8,780	3,141	3,60
	4,5	0,75	4,013	0,406	11,3	3,580	3,41
5		0,80	4,480	0,433	14,2	4,019	3,25
6		1	5,350	0,541	20,1	4,773	3,41
8		1,25	7,188	0,677	36,6	6,466	3,17
10		1,5	9,026	0,812	58,0	8,160	3,03
12		1,75	10,863	0,947	84,3	9,853	2,94
	14	2	12,701	1,083	115	11,546	2,87
16		2	14,701	1,083	157	13,546	2,48
	18	2,5	16,376	1,353	193	14,933	2,78
20		2,5	18,376	1,353	245	16,933	2,48
	22	2,5	20,376	1,353	303	18,933	2,24
24		3	22,051	1,624	353	20,319	2,48
	27	3	25,051	1,624	459	23,319	2,18
30		3,5	27,727	1,894	561	25,706	2,30
	33	3,5	30,727	1,894	694	28,706	2,08
36		4	33,402	2,165	817	31,093	2,19
	39	4	36,402	2,165	976	34,093	2,00
<b>Metrički navoj sitnog koraka</b>							
8		1	7,350	0,541	39,2	6,773	2,48
10		1,25	9,188	0,676	61,2	8,466	2,48
12		1,25	11,188	0,676	92,1	10,466	2,04
16		1,5	15,026	0,811	167	14,160	1,82
20		1,5	19,026	0,811	172	18,160	1,44
24		2	22,701	1,082	384	21,546	1,61
30		2	28,701	1,082	621	27,546	1,27
36		3	34,051	1,623	865	32,319	1,61
				$A_S = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$ $R = 0,14434P$ $d_3 = d_1 - H/6$ $R_{\min} = 0,125P$ $d_{3\min} = d_1 - 2a$ $d_{3\max} = d_1 - 2b$ $a = H/4 - R_{\min} = 0,107H$ $b = R_{\min} \left[ 1 - \cos \left[ \frac{\pi}{3} - \arccos \left( 1 - \frac{T_{d2}}{4R_{\min}} \right) \right] \right] + \frac{T_{d2}}{2}$			

TAB. 1.50. Pregled izabranih vijaka i navrtki najčešće korišćenih za DRT [59]

d mm	Sa šestostranom glavom				Sa okruglom glavom			Prečn. otvora			Za tačno naleganje	Za utvrđivanje položaja			
	h	h <sub>n</sub>	s	e	D	h <sub>u</sub>	s <sub>u</sub>	P	F	SG	D <sub>2</sub>	d <sub>1</sub>	c	c <sub>1</sub>	s <sub>c</sub>
6	4	5	10	11,5	10	6	5	6,4	6,6	7	7,2	4,5	3,5	1,8	9
8	5,5	6,5	13	15	13	8	6	8,4	9	10	9,2	6	5	2,5	11
10	7	8	17	19,6	16	10	8	10,5	11	12	11,2	7	5,5	3	14
12	8	10	19	21,9	18	12	10	13	14	15	13,2	9	7	3,5	17
14	9	11	22	25,4	21	14	12	15	16	17	15,2				
16	10	13	24	27,5	24	16	14	17	18	19	17,2	12	9	4,5	19
18	12	15	27	31,2	27	18	14	19	20	21	19,2				
20	13	16	30	34,6	30	20	17	21	22	24	21,3	15	9	5	22
22	14	18	32	36,9	33	22	17	23	24	26	23,3				
24	15	19	36	41,6	36	24	19	25	26	28	25,3	18	11	6	27
27	17	22	41	47,3				28	30	32					
30	19	24	46	53,1	45	30	22	31	33	35		23	14	8	36
33	21	26	50	57,7				34	36	38					
36	23	29	55	63,5	56	36	27	37	39	42		28	14	10	46
39	25	31	60	69,3				40	42	45		s <sub>c</sub> – otvor ključa			
42	26	34	65	75	63	42	32	43	45	48		P – Posebno fina klasa			
45	28	36	70	80,8				46	48	52		F – Fina klasa			
48	30	38	75	86,5	72			50	52	56		S – Srednja, G – Gruba klasa			

**Klasa čvrstoće:** 6 8.8 10.9  
**Za b < l:** b=2d+6 za l < 125mm  
 b=2d+12 za l=12..200  
 b=2d+25 za l > 200mm  
 ISO 4014 – klasa A i B  
 ISO 4016 – klasa C  
**Za b = l:** ISO 4017 – klasa A i B  
 ISO 4018 – klasa C  
**Dužine l:** 6 8 10 12 15 18 20 22 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200

**Fina klasa**  
 ISO 4762  
 b=2d+12  
 8.8 12.9  
 6.150 160..200

**Navrtke:**  
 Klasa čvrstoće: 4 5 6 8 10  
 ISO 4032, 4033, 4034

**Fina klasa**  
 ISO 4762  
 c  
 d<sub>1</sub>

**Klasa čvrstoće:**  
 8 8.8

**Dužine:** 12 15 18 20 25 30 35 40 45 50 60 70 80 90 100 120 140 160 180 200

Noviji ISO 898 deo 1 i 2 je zadržao postojećih 9 klasa čvrstoće, ali je došlo do delimičnih izmena karakteristika materijala po klasama čvrstoće i usklađivanja sa novim standardima za materijale. Sada su po novim ISO standardima razdvojeni vijci (deo 1) i navrtke (deo 2). Standard ISO 898-1 utvrđuje mehanička i fizička svojstva vijaka izrađenih od ugljeničnih i legiranih čelika na temperaturama okoline 10-35°C. U tabeli TAB-1.51 prikazane su prema navedenom standardu ISO 898-1 osnovne karakteristike materijala za izradu vijaka. Klase vijaka su u dve grupe: Vijci prečnika do 16 mm su klase do 8.8, a preko, klase 8.8 i više.

**TAB. 1.51.** Pregled materijala za vijke i osnovne osobine prema ISO 898-1:2013

Materijal Karakteristike materijala	Klasa čvrstoće vijaka d ≤ 16 d > 16									
	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	8.8	9.8	10.9	12.9
Ugljen.čelik sa i bez adit. <sup>1</sup>	da	da	da	da	da	-	-	-	-	-
Ugljen.čelik gašen i žaren <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	da	da	da	da	-
Ugljen.čelik sa aditivima gašen i žaren <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	da	da	da	da	-
Leg. čelik gašen i žaren <sup>4,5</sup>	-	-	-	-	-	da	da	da	da	da
Zat. čvrstoća $R_m$ , MPa nom	400	400	500	500	600	800	800	900	1000	1200
Zat. čvrstoća $R_m$ , MPa min	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
Gran. elast. $R_{eL}$ , MPa nom	240	-	300	-	-	-	-	-	-	-
Gran. elast. $R_{eL}$ , MPa min	240	-	300	-	-	-	-	-	-	-
Gran. plast. pri elong. nom	-	320	-	400	480	-	-	-	-	-
0,48d $R_{p0.2}$ , MPa min	-	340	-	420	480	-	-	-	-	-
Gran. plast. $R_{p0.2}$ , MPa nom	-	-	-	-	-	640	640	720	900	1080
Gran. plast. $R_{p0.2}$ , MPa min	-	-	-	-	-	640	660	720	940	1100
Napon opterećenja $s_p$ , MPa	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970

<sup>1</sup> Ugljenični čelik, max. 0,55 %C, 0,05 %P, 0,06 %S, sa ili bez dodatnih aditiva, Bor (B), detalji u standardu.

<sup>2</sup> Ugljenični čelik, max. 0,25-0,55 %C, 0,25 %P, 0,025 %S, gašen (austenizacija) i žaren na 425 °C.

<sup>3</sup> Ugljenični čelik, 0,15-0,40 %C, max. 0,25 %P, 0,025 %S sa aditivima (B, Mn, Cr), gašen i žaren na 425 °C.

<sup>4</sup> Legirani čelik, 0,20-0,55 %C, max. 0,25 %P, 0,025 %S, gašen i žaren na 425 °C.

<sup>5</sup> Ugljenični čelik, 0,28-0,50 %C, 0,25 %P, 0,025 %S sa aditivima (B, Mn, Cr, Mo), gašen i žaren na 380 °C.

NAPOMENA: Prema ISO 898-1 u tabelama T-4,5,6 i 7 daje se minimalna sila zatezanja, kao i sila ispitivanja preporučenih grubih i finih metričkih navoja.

Uticaj povišenih temperatura na mehanička svojstva vijčanih spojeva može uticati na funkcionalne performanse spoja (propuštanje – curenje spoja). Ako je temperatura okoline niža od 150°C nema štetnog uticaja usled promene mehaničkih svojstava materijala. Pri temperaturama 150 – 300°C, vijčana veza slabi i dolazi do pada zatezne sile vijka i propustljivosti. To znači da proračunska čvrstoća vijaka opada progresivno s porastom temperature, što se može videti iz tabele TAB-1.52. Informacije o izboru materijala vijaka za čelike i legure nikla na povišenim ili niskim temperaturama mogu se pronaći u standardima EN 10269 i ASTM F2281.

Na povišenim temperaturama, čvrstoća nerđajućih čelika opada. Prema EN ISO 3506-1 preporučuje se umanjeno čvrstoće na sobnoj temperaturi iz tabele TAB. 1.53, sledećim faktorom za austenitne čelike u zavisnosti od temperature

Temperatura okoline	> 100°C	> 200°C	> 300°C	> 400°C
A2, A3, A4, A5 $R_{eL}$ i $R_{p0.2}$ u %	85	80	75	70

**TAB. 1.52.** Pad proračunske čvrstoće vijaka na povišenim temperaturama

Klasa čvrstoće	Temperatura				
	+ 20 C°	+ 100 C°	+ 200 C°	+ 250 C°	+ 300 C°
	Donja granica razvlačenja $R_{et}$ ili 0,2%-napon na granici razvlačenja $R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>				
4.6-2	240	210	190	170	140
5.6	300	250	210	190	160
8.8	640	590	540	510	480
10.9	940	875	790	745	705
12.9	1100	1020	925	875	825

Za dobošaste razmenjivače toplote koji rade u agresivnim sredinama, vijčani spoj može biti od nerđajućih čelika. Prema normi EN ISO 3506 nerđajući čelici podeljeni su na grupe (A-austenitni, C- martenzitni i F-feritni), tipove i klase čvrstoće. Najčešće se koriste austenitni čelici, grupa A (posebno tip A2 i A4), čije su karakteristike prikazane u tabeli TAB-1.53. Tipovi nerđajućih čelika se razlikuju prema hemijskom sastavu, što je za austenitne čelike prikazano u tabeli TAB-1.54.

**TAB. 1.53.** Mehaničke karakteristike nerđajućih vijaka, grupa A, EN ISO 3506-1:2009

Grupa čelika	Tip čelika	Klasa čvrstoće	Opseg prečnika	Vijci		
				Zatezna čvrstoća $R_m$ <sup>1)</sup> N/mm <sup>2</sup> min.	0,2%-granica razvlačenja $R_{p0,2}$ <sup>1)</sup> N/mm <sup>2</sup> min.	% izduženje pri kidanju $A$ <sup>2)</sup> mm min.
Austenitni	A1, A2 A3, A4 i A5	50	≤ M 39	500	210	0,6 d
		70	≤ M 24 <sup>3)</sup>	700	450	0,4 d
		80	≤ M 24 <sup>3)</sup>	800	600	0,3 d

<sup>1)</sup> Napon zatezanja se računa na osnovu poprečnog preseka napregnutog vijka (vidi prilog A ili DIN EN ISO 3506-1).  
<sup>2)</sup> Procentualno izduženje pri kidanju mora se odrediti prema 6.2.4 na odgovarajućoj dužini vijka a ne na golim uzorcima. d je nazivni prečnik.  
<sup>3)</sup> Za elemente za spajanje sa nazivnim prečnikom navoja d > 24 mm, mehaničke karakteristike moraju se ugovoriti između korisnika i proizvođača. Oni se moraju označiti sa tipom čelika i klasom čvrstoće prema ovoj tabeli.

**TAB. 1.54.** Hemijske karakteristike materijala nerđajućih vijaka, grupa A, EN ISO 3506-

Struktura nerđajućeg čelika	Tip čelika	Hemijski sastav, maseni udeo u %								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
Austenit	A1	0,12	1	6,5	0,2	0,15-0,35	16-19	0,7	5-10	1,75-2,25
	A2	0,10	1	2	0,05	0,03	15-20	-	8-19	4
	A3	0,08	1	2	0,045	0,03	17-19	-	9-12	1
	A4	0,08	1	2	0,045	0,03	16-18,5	2-3	10-15	4
	A5	0,08	1	2	0,045	0,03	16-18,5	2-3	10,5-14	1

Navrtke kao deo vijčanog spoja obrađene su u standardu ISO 898-2 od vrlo sličnih (ali ne istih) materijala. Navrtke se izrađuju u dve visine: normalna i visoka pri čemu odnos visine i nazivnog prečnika navoja navrtke  $m/D$  za navoje M5-M39 iznosi 0,8-0,88 kod normalne navrtke, a 0,9-0,98 kod visoke navrtke. Klasa čvrstoće navrtke se označava samo jednom brojem (prvi broj oznake vijka), ima samo pet klasa, redom 5, 6, 8, 10 i 12. Optimalni spoj vijka i navrtke je sa istom klasom čvrstoće, a visoka navrtka se koristi za spojeve sa većim opterećenjem.

S obzirom na to da su vijci često u sklopu sa prirubnicama i zaptivačima, za opremu pod pritiskom je posebno razvijena grupa standarda EN 1515:2009.

EN 1515-1	Prirubnice i njihovi spojevi, vijci i navrtke - Deo 1: Izbor vijaka i navrtki Primenjuje se za izbor mera i materijala vijaka i navrtki za prirubnice prema seriji standarda EN 1092 a koje nose oznaku PN i prirubnica prema seriji standarda EN 1759 a koje nose oznaku Class.
EN 1515-2	Prirubnice i njihovi spojevi, vijci i navrtke - Deo 2: Klasifikacija materijala za vijke za prirubnice od čelika koje nose oznaku PN. Ovaj standard obuhvata klasifikaciju materijala za vijke u kombinaciji sa grupama materijala za prirubnice od čelika prema EN 1092-1 a koje nose oznaku PN.
EN 1515-3	Prirubnice i njihovi spojevi, vijci i navrtke - Deo 3: Klasifikacija materijala za vijke za čelične prirubnice, koje nose oznaku Class. Ovaj evropski standard odnosi se na klasifikaciju materijala za vijke, koji se koriste u kombinaciji sa prirubnicama od čelika prema EN 1759-1 označene sa Class.
EN 1515-4	Prirubnice i njihovi spojevi, vijci i navrtke - Deo 4: Izbor vijaka i navrtki za opremu koja je predmet Direktive 97/23/EC za opremu pod pritiskom. Ovim standardom se standardni i dodatni zahtevi za mere, materijale i tehničke uslove za isporuku vijaka i navrtki, za prirubnice oznake PN i Class.

Za potrebe opreme pod pritiskom ne predviđaju se vijci klase čvrstoće 4.6 i 6.8, a ostali materijali za vijke su razvrstani prema odnosu "r" čvrstoće materijala prirubnice i vijka u tri nivoa:

- Nizak nivo, odnos "r" je manji od onog koji se koristi za proračun standardne prirubnice. Ovi vijci se koriste u slučaju manjeg bezbednosnog rizika (npr. za vodu), kao i u slučaju ako se proračunom dobijaju prevelike prirubnice.

- Normalan nivo, odnos "r" odgovara onom (unutar definisanih granica) koji se koristi u standardnom proračunu prirubnice. Ovi vijci se koriste u celom rasponu  $p/t$  rejtinga, ako ne postoje druga ograničenja.

- Visok nivo, odnos "r" je mnogo veći od onog koji se koristi za proračun standardne prirubnice. Ovi vijci se koriste u istom slučajevima kao normalni nivo, ali pri montaži obratiti pažnju da ne dođe do oštećenja prirubnice, koja je slabija.

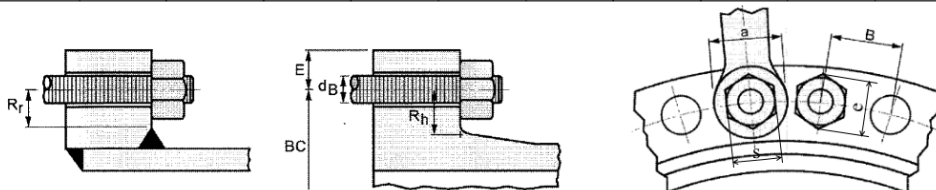
Materijali za prirubnice i vijčane veze u sklopu za opremu pod pritiskom su međusobno uslovljeni. Prema standardu EN 1092-1, čelični materijali za prirubnice prema vrsti fluida i njegovom pritisku i temperaturi svrstani su u grupe, prema sastavu, nameni i ključnim osobinama (27 grupa oznaka 1E0 do 16E0) i oni se prema standardu EN 1515-2 uparuju sa preporučenim materijalima za vijke u zavisnosti od klase čvrstoće vijaka. To su jako duge tabele. Konkretizacija, izbora vijaka za opremu pod pritiskom (PED oprema) u skladu sa direktivom 97/23/EZ data je u standardu EN 1515-4, međutim treba imati u vidu da je promenjena direktiva, sada je 2014/68/EU [N3]. Vijčani spoj ima šetougaoni oblik glave i navrtke, a izbor zavisi od PN ili klase, temperaturskog područja primene, uticaja korozije i vrste i materijala zaptivanja. Postoji veliki izbor kombinacija.

Prema TEMA standardu [S1], za prirubničke spojeve DRT daju se neke od geometrijskih mera koje su proračunske veličine čvrstoće konstrukcije (Pog. 3), čiji je izvod dat u tabeli TAB. 1.55, više u tački 2.2.2. i prilogu, Tab. PBI-701. Prema TEMA standardu, minimalne veličine vijaka prema klasi razmenjivača su:

- Klasa R (rafinerije nafte), minimalni prečnik navoja je 3/4" (M20),
  - Klasa C (opšta komercijalna namena), minimalni prečnik navoja je 1/2" (M12),
  - Klasa B (hemijski procesi), minimalni prečnik navoja je 5/8" (M16).
- Prizak u tabeli je u SI sistemu mera, pa ima odstupaju u odnosu na ISO standarde.

**TAB. 1.55.** Mere prirubničkih spojeva prema TEMA X standardu [S1], (izvod do M30)  
Napomena: Glava ključa (a) prema navrtki ANSI B18.2.2)

Veličina vijka dB	Navoj		Mere navrtke		Razmak vijaka B	Radijalni otklon Rh	Radijalni otklon Rr	Obodni otklon E	Glava ključa a	Veličina vijka dB
	Korak (mm)	Presek (mm <sup>2</sup> )	Otvor ključa (s)	Obodna mera (e)						
M12	1.75	72.396	21.00	24.25	31.60	20.64	15.40	15.40	38.00	M12
M14	2.00	99.773	24.00	27.71	35.60	22.36	16.90	16.90	42.50	M14
M16	2.00	138.324	27.00	31.18	39.70	24.10	19.50	19.50	47.00	M16
M18	2.50	167.966	30.00	34.64	43.70	26.25	21.50	21.00	51.50	M18
M20	2.50	217.051	34.00	39.26	46.80	28.20	23.00	22.50	53.00	M20
M22	2.50	272.419	36.00	41.57	51.50	30.50	26.50	26.00	60.00	M22
M24	3.00	312.748	41.00	47.34	57.50	33.50	29.50	29.00	66.00	M24
M27	3.00	413.852	46.00	53.12	65.00	38.00	31.00	30.50	75.00	M27
M30	3.50	502.965	50.00	57.74	69.90	40.50	33.00	32.50	80.00	M30



Podložne pločice su dodatni element vijčanog spoja čija je osnovna uloga poboljšanje prenosa obrtnog momenta navrtke u aksijalno opterećenje vijka. Iako nisu obavezan element, njihovom ugradnjom ostvaruju se sledeće prednosti:

- značajno smanjenje trenja između navrtke i nalegajuće površine spoja, što povećava tačnost i ponovljivost postupka i smanjenje obrtnog momenta,
- smanjuje zamor spoja,
- povećava ravnomernost prenosa sila i poboljšava performanse zaptivača,
- sprečava oštećenje nalegajućih površina,
- smanjuje deformaciju komponenti i olakšava odvrtanje spoja.

Dimenzije podložnih pločica variraju u zavisnosti od standarda, a osnovne mere običnih ravnih podložki prema ISO 7089 date su u tabeli TAB-1.56.

**TAB. 1.56.** Mere podložne pločice za vijke prirubnice doboša, prema EN ISO 7089:2000

Geometrija ravne podložne pločice	Modul OK	M10 OK17	M12 OK19	M16 OK24	M20 OK30	M24 OK36	M27 OK42	M30 OK46	M36 OK55
	d1 (mm)	10,5	13	17	21	25	28	31	37
	d2 (mm)	20	24	30	37	44	50	56	66
	h (mm)	2	2,5	3	3	4	4	4	5



Zaštita vijčanih spojeva od korozije izvodi se pomoću površinskih filmova od hemijski otpornijih materijala. Ti filmovi se mogu stvarati nanošenjem ili difuzijom. U postupke zaštite od korozije vijaka spadaju fosfatiranje, bruniranje i elektrolitičke metode (galvanizacija pomoću nikla, hroma, kadmijuma ili cinka što je najčešće), pri čemu se dobiju se vrlo tanki zaštitni površinski slojevi, oko 1 do 2  $\mu\text{m}$ . Jedan od postupaka zaštite od korozije vijaka je pasivizacija, koja nastaje formiranjem površinskog sloja nekog oksida na površinama vijčanog materijala. Debljina ovog nanosa je veoma mala, ne prelazi nekoliko atoma, a osnovna uloga mu je zaštita od korozije u okolnoj sredini. Čelikov oksid se ne vezuju dovoljno čvrsto sa površinom osnovnog metala i sklon je odvajanju, zato se malo koristi, međutim oksidi aluminijuma, bakra, magnezijuma, titana i cinka uspeavaju da uspostave trajne veze sa osnovnim metalom štiteći ga protiv korozije pomoću zaštitnog sloja oksida koji se zove sloj pasivizacije. Pasivizacija se najčešće izvodi posle cinkovanja oksidom hroma, poznata kao plavo hromiranje – trovalentnim hromom, a koriste se i žuto hromiranje i maslinasto-zeleno hromiranje.

#### 1.5.6. Procedura izbora materijala

Izbor materijala i kompatibilnost između materijala i procesnih fluida su važna pitanja, posebno u pogledu zaštite od korozije i (ili) radu na povišenim temperaturama. Materijal razmenjivača toplote može biti predodređen njegovom konstrukcijom, tako na primer, kompaktni razmenjivači toplote da bi imali nisku cenu, rade se od materijala male specifične težine i visoke toplotne provodljivosti. Dobošasti i cevni razmenjivači toplote mogu takođe u pogledu materijala biti prilagođeni procesu, ali van toga imaju najviše slobode u izboru materijala.

Prema *Olbrajtu* (Albright) [37], preporučuje se procedura u četiri koraka za izbor materijala za izradu procesne opreme.

U prvom koraku, potrebno je odrediti kriterijume koji utiču na selekciju materijala, uključujući specifične zahteve o ugradbenoj sredini i da li su oni od ključnog uticaja na rad proizvoda.

U drugom koraku utvrđuju se informacije o osnovnim uticajima korozije i drugih štetnosti koji se javljaju u tehnološkom procesu ili njegovoj okolini.

Treći korak predviđa izbor osnovnih materijala za izradu proizvoda.

U četvrtom koraku potrebno je proveriti doslednost izabranih materijala u tehničkoj dokumentaciji.

Projektni obrazac materijala služi za organizovan pregled tehničkih podataka izbora materijala i za komunikaciju različitih faza projekta. Obrazac treba da je što jednostavniji, da ne koči ili zbunjuje usled viška nepotrebnih podataka. Pored toga on mora sadržati dovoljno prostora za unošenje primedbi koje nastaju tokom procesa, a odnose se na bitne karakteristike i fazne uticaje, čime se postiže zaštita od neuspeha u početnoj fazi, ukoliko nisu uzeti u obzir bočni ili paralelni uticaji na izradu proizvoda. Koriste se dva tipa obrasca: za jednostavne i za složene proizvode. U tabeli TAB-1.57, dat je primer obrasca za izbor materijala proizvoda.

**TAB. 1.57.** Opšti obrazac izbora materijala za jednostavan proizvod

- 
1. Fluid: (naziv i hemijska formula) \_\_\_\_\_
  2. Agregatno stanje: (tečnost, gas, mešavina) \_\_\_\_\_
  3. Opasnost u dodiru ili mešanju sa vodom: (da, ne) \_\_\_\_\_
  4. Radna temperatura: minimalna \_\_\_\_\_ maksimalna \_\_\_\_\_
  5. Radni pritisak: minimalni \_\_\_\_\_ maksimalni \_\_\_\_\_
  6. Step en korozivnosti: (nema, slab, srednji, visok) \_\_\_\_\_
  7. Dodaci koji mogu izazvati pukotine u materijalu: \_\_\_\_\_
  8. Termički tretman posle zavarivanja, PWHT: (da ili ne) \_\_\_\_\_
  9. Napomena: \_\_\_\_\_
- 

Za većinu procesne tehnologije, izbor materijala se temelji na uslovima rada, a ne na projektnim uslovima. Glavni izuzetak su minimalne temperature, za koje inženjering kodovi zahtevaju materijal otporan na krti lom. Osnovne informacije proističu iz temperature, pritiska, koncentracije i praga dozvoljene korozije, a dobijaju se iz podataka procesa rada, testiranja, pilot postrojenja, laboratorijskog ispitivanja, ili iz dostupne literature. Dopunske informacije ili izuzetci su veoma značajni, jer utiču na procenu rizika od ranog neuspeha izabranog materijala i mogu se klasifikovati kao:

1. Uticaj kontaminacije proizvoda. Hrana, lekovi, industrija polimera i finih hemijskih procesa, uopšteno su osetljivi procesi na zaprljanje. Iako ugljenični čelici mogu biti otporni na koroziju, često mogu kontaminirati proces. Štete od krhotina nastale usled korozije mogu biti opasne za proces i na krajnji proizvod. Površina prenosa toplote u razmenjivačima toplote obično su mesta nastanka primarnih krhotina od korozije. Uopšte, čak iako je stepen korozije prihvatljiv za projektovanje opreme, stepen kontaminacije proizvoda je odlučujuć.

2 Pouzdanost. Neki procesi primarno zahtevaju sigurnost u toku rada. Na primer, površine koje razdvajaju vatru i vodu moraju biti pouzdani zbog opasnosti za ljude i velike štete koja nastaje usled pucanja kontaktne površine. To može biti razlog da propisi ili korisnici opreme uslovljavaju upotrebu određenih bezbednih materijala, kao i zabrana uotrebe drugih materijala.

3. Iskustvo u primeni. Pri izboru materijala, "zdrav razum", uvek treba da je kriterijum prioriteta, pogotovu za specijalne slučajeve. Isto tako, prethodno iskustvo na drugim postrojenjima (dobro i loše) se mora uzeti u obzir. Izbor materijala zavisi i od prioriteta u radu opreme. Ako na primer, u skupom postrojenju, pored osnovne opreme postoji i rezervna oprema, onda rezervna oprema ne služi za kontinuirani rad, već za kratko premošćavanje rada u fazi remonta ili otkaza glavne opreme, opravdano je za rezervnu opremu koristiti jeftinije materijale. Takođe, ponekad je samo deo opreme izložen teškim uslovima rada, na primer jedna strana razmenjivača, dok preostali deo opreme radi u običnim uslovima, pa ne zahteva upotrebu specijalnih ili skupih materijala.

**Postupak izbora materijala** odvija se u tri osnovne faze:

U prvoj fazi, koristi se projektni obrazac materijala i minimalni projektni uslovi. Prema minimalnoj temperaturi treba odabrati materijal odgovarajuće žilavosti. Maksimalna temperatura se koristi za izmenjeni izbor, ako je potrebno, za dobijanje zadovoljavajuće otpornosti na koroziju ili toplotnu izdržljivost. Ako dođe do izmene materijala, postupak se mora ponoviti kako bi se osigurali da materijal ima izdržljivost na minimalnim projektnim temperaturama.

U drugoj fazi se razmatra uticaj visokih temperatura i uticaj korozije. Preliminarno izabrani materijal treba proveriti za rizik od termičke destrukcije na maksimalnoj projektnoj temperaturi (puzanje, grafitizacija ili pojava sigma-faze). Uticaj korozije se razmatra nezavisno ili u kombinaciji uticaja visokih temperatura, a ekološki uticaji se razmatra u završnoj fazi izbora materijala. Ako rad na maksimalnim temperaturama uzrokuje kasniji krti lom materijala na nižim radnim temperaturama, proizvođač je obavezan pripremiti odgovarajuća uputstva za bezbednu upotrebu u celom području rada. Dejstvo korozije se procenjuje za izabrani materijal na osnovu karti korozije, ispitivanja ili prethodnog iskustva.

U trećoj završnoj fazi izabrani materijal se ocenjuje prema evidentiranim dopunskim kriterijumima, spoljnim uticajima i uticajima koje on vrši na spoljnu sredinu (ekološki uticaj). Svaka promena materijala u toku procesa izbora, mora se kontrolisati na kriterijume prethodnog postupka. Kao što je naglašeno, za postupak izbora materijala ne postoje gotova rešenja i moguće su jednako dobre varijante.

U nekim slučajevima, naročito kod tipskih proizvoda potrebno je uraditi modernizaciju izbora materijala, uzimajući u obzir nove materijale i nova saznanja o postojećim materijalima i tehnologijama. Treba napomenuti i uticaje na izbor materijala koje može imati naručilac ili korisnik, koji zahteva upotrebu skupljih materijala ili obrade materijala koja nije opravdana. Nakon što korisnik razume tehničke razloge za izbor materijala koje je izabrao projektant, pitanje izbora postaje problem upravljačke odluke. Međutim, ako naručilac zahteva korištenje materijala koji ne ispunjavaju minimalne zahteve, u tom slučaju, prvenstvo moraju imati bezbednosni uslovi.

**Definisanje osobina izabranog materijala** je procedura koju treba predvideti posle konačnog izbora materijala. Svojstva, kao prirodne osobine materijala mogu imati razne vidove, a glavne grupe kao što je navedeno na početku ovog odeljka su: fizička, hemijska, mehanička i tehnološka svojstva. Za potrebe izrade proizvoda najvažnije su mehaničke osobine, gde se ističu zatezna čvrstoća, modul elastičnosti, žilavost, tvrdoća, zamor i puzanje materijala. Na ove osobine može u velikoj meri uticati visoka i niska temperatura.

Standardne vrednosti svojstava se obično utvrđuju na sobnoj temperaturi od 20 °C (tzv. udobni laboratorijski uslovi), ali se tradicionalno koriste i drugi referentni uslovi: 0 °C zbog njene lake reprodukcije, 15 °C jer je to prosečna temperatura na površini Zemlje, a može biti i 25 °C ako se osobine utvrđuju za materijale potopljene u nekoj kupki. Ove razlike u temperaturskim uslovima merenja imaju mali uticaj na vrednost svojstava materijala koji se koriste za izradu

razmenjivača toplote, pa se uglavnom nazivaju vrednostima na sobnoj temperaturi. Mnogo važnija su svojstva materijala na povišenim ili niskim temperaturama u zavisnosti od radnih temperatura fluida u razmenjivaču. Podaci o zateznoj čvrstoći i granici tečenja čelika na povišenim temperaturama su dosta dobro pokriveni EN standardima (videti tabele u ovom odeljku ili u prilogima), međutim oni ne sadrže sve podatke o materijalu kojima raspolaže proizvođač ili distributer u formi atesta materijala. Podaci su uglavnom raspoloživi za temperature u razmaku po 50 ili 100 °C, a za srednje radne temperature fluida vrednosti treba odrediti interpolacijom. Detaljnije razmatranje o merodavnim čvrstoćama materijala može se videti u poglavlju 3. Proračun čvrstoće razmenjivača.

---

## POGLAVLJE 2

---

# KONSTRUKCIJA DOBOŠASTIH RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Ako razmenjivač toplote posmatramo kao uređaj u tehnološkom sistemu koji obavlja funkciju razmene toplote između fluida, onda se nezaobilazno uočavaju dva termina: fluidi i uređaj. Razmena toplote se može odvijati samo pomoću fluida, zato ih opravdano i zovemo nosiocima toplote. Fluidom se smatra ne samo materija sa svojim osobinama, već i njen protok, odnosno mehanički potencijal koji je u stanju da obezbedi neprikidni dotok fluida zadatih osobina. Drugi termin je uređaj-razmenjivač toplote, koji obezbeđuje smeštaj i uređeno strujanje fluida. Dakle fluidi nisu slobodni, već su uslovno rečeno "zarobljeni" u uređaju u kome se kreću od ulaza ka izlazu. Ako je jedan fluid u uređaju, on ne može razmenjivati toplotu (može samo akumulirati toplotu u masi aparata), dakle mora postojati najmanje dva fluida. Upravo ta činjenica da moraju postojati najmanje dva fluida koji struje kroz uređaj podiže značaj uređaja, jer se pomoću njega obezbeđuje zahtevano strujanje, kao i dispozicija svakog fluida u uređaju.

Uređaj kao naprava tehnološki je besmislen ako nema funkciju. Funkciju dobija tek ako kroz njega struje fluidi čija se promena stanja očekuje. Istina je da se kroz svaki razmenjivač kroz koji struje dva fluida ostvaruje neka razmena toplote po nekoj zakonitosti i neka promena stanja fluida. Pravi tehnološki cilj se postiže predvidivom promena stanja fluida, uređenim odnosom strujanja i konstrukcije.

Dobošasti razmenjivači toplote (kao i bilo koji tip razmenjivača toplote) svojom konstrukcijom moraju obezbediti uređenu razmenu toplote. Dakle, konstrukcija razmenjivača obezbeđuje ne samo geometrijska rešenja uređaja, već i dispoziciju i tok fluida u okviru geometrije. To se postiže postupkom konstruisanja u zadatim uslovima. Za gotovu konstrukciju aparata i zadate parametre fluida mehanizam razmene toplote se ne može promeniti, već samo kvantifikovati.

## 2.1. DIZAJN KOMPONENTI DOBOŠASTIH RAZMENJIVAČA TOPLOTE

U poglavlju 1.3. nabrojane su i opisane standardizovane komponente dobošastih razmenjivača toplote (dominantno TEMA standard), kao i preporuka namene tipiziranih konstrukcija. Oblikovanje i dimenzionisanje proizvoda u celini i njegovim sastavnim delovima sadržano je u terminu dizajn (engl. design). Iako su standardima preporučena rešenja tipskih konstrukcija dobošastih razmenjivača, projektovanje je tek na početku, jer komponente mogu imati veliki broj varijacija i modaliteta prema obliku, veličini i geometriji. Oblikom komponenti se određuje tehničko rešenje u funkciji namene, veličinom se definiše gabarit i izdržljivost konstrukcije, a geometrijom takva konfiguracija strujanja fluida u aparatu koja obezbeđuje ostvarenje zadate tehnološke funkcije. Sve navedeno mora biti usklađeno sa izabranim materijalima komponenti i bezbednosti ljudi, okoline i procesa. Zamršenost i komplikovanost tehnički jednostavnog proizvoda dodatno otežava činjenica da postoji povratni uticaj termotehničkog mehanizma razmene na geometriju konstrukcije, pa završetak projektovanja može biti samo početak novog proračuna sa drugom geometrijom. Ukoliko projektant nema dovoljno iskustva teško će se snaći u svojevrsnom tehničkom lavirintu. Olakšanje donosi procedura, odnosno redosled postupaka, što ističu mnogi autori, a čemu teži i ova knjiga.

Dizajniranje komponenti dobošastih razmenjivača toplote treba da reši i uskladi dva osnovna zadatka, prvi mehanički – da razdvoji tokove fluida i obezbedi izdržljivost konstrukcije na dejstvo opterećenja usled pritiska i temperature, kojima su fluidi izloženi i drugi konfiguracijski – da obezbedi takvo strujanje fluida za najveći ili barem optimalni prolaz toplote od jednog ka drugom fluidu. **Konfiguracijom konstrukcije** se obezbeđuje tzv. **aranžman strujanja fluida** (fluid flow arrangement), koji karakteristiše i međusobni odnos strujanja fluida nosioca toplote u razmenjivaču toplote, dakle to je nedvosmisleni skup parametara koji definišu strujanje u aparatu (više o tome videti u odeljku 2.2).

S obzirom na činjenicu da su u razmenjivaču toplote najmanje dva fluida, postoje minimalno četiri mogućnosti strujanja fluida kroz aparat: topliji fluid u cevi a hladniji oko cevi i obrnuto, kao i da ulaz fluida u aparat bude sa iste ili suprotne strane. Sve se ovo odnosi na aparat iste konstrukcije. Čak i da su fluidi i njihovo stanje na ulazu u aparat isti, promenom varijante strujanja izlazni parametri i toplotna snaga razmene biće veoma različiti, što znači da bilo kakva simetričnost ili proporcionalnost ovde ne postoji. Dakle može se zaključiti da pored konstrukcije razmenjivača toplote na razmenu toplote i izlazne parametre fluida utiče i aranžman strujanja. Iako aranžman strujanja fluida nije konstrukciona veličina, on ima bitan uticaj na razmenu toplote i konstrukciju komponenti razmenjivača toplote. Njegov značaj je toliki da ga većina autoriteta postavlja na prvo mesto, pre

konstrukcije aparata, pa ga s pravom možemo uvrstiti kao element geometrije razmenjivača toplote. **Geometrija razmenjivača** obuhvata sve elemente aparata koji utiču na toplotnu snagu razmene i stanje fluida na izlazu iz aparata, to su dakle: oblik i dimenzije aparata, dispozicija fluida, broj prolaza fluida i kao posledična veličina konstrukcije, koja se najčešće definiše kao površina razmene toplote aparata. Geometrija razmenjivača obezbeđuje jednoznačnost uređaja, što znači da aparati iste geometrije sa fluidima istog stanja na ulazu imaju istu toplotnu snagu razmene i iste parametre na izlazu. To ipak nije jedina geometrija istih parametara na izlazu, jer kao što je već rečeno postoji veoma mnogo geometrija razmenjivača koje će imati istu toplotnu snagu i iste parametre fluida na izlazu, dok parametri u samom aparatu i tok razmene toplote mogu biti veoma različiti.

### 2.1.1. Dispozicija fluida u razmenjivaču toplote

Raspored fluida je osnovno i najvažnije pitanje za svaki tehnološki proces sa razmenjivačem toplote. Postoji pravilo da se prvo bira raspored fluida, pa onda razmenjivač. Ostali nekonstruktivni uticajni parametri, kao: termičke performanse, pitanje zaprljanja, revizija i održavanje, termičke dilatacije, pitanje bezbednosti ljudi i okoline itd., imaju odlučujući uticaj na cenu, ekonomičnost i bezbednost postupka, ali ne i tehnološki uticaj. Fluidi su odabrani u tehnološkoj studiji i poznate su njihove karakteristike ili veličine stanja, najbitnije su: agregatno stanje, temperatura, pritisak, gustina, specifični toplotni kapacitet, viskoznost i toplotna provodljivost. Nazive fluida možemo nazvati prema smeru toplotnog fluksa:

**Topliji fluid (Hot fluid) – primar – onaj koji predaje toplotu.**

**Hladniji fluid (Cold fluid) – sekundar – onaj koji prima toplotu.**

Prema Koulsen-Ričardsonu [39, Ch12], postoji nekoliko osnovnih i opštih pravila i uticaja koji određuju raspored fluida, baziranih na iskustvu i pojačanju prednosti a umanjenu nedostataka dobošastih razmenjivača toplote, kao na primer:

1. Korozija. Mesto fluida koji ima veće ili izrazito korozivno dejstvo je u cevi. To smanjuje broj pozicija koje se moraju raditi od nerđajućih ili livenih materijala, što značajno umanjuje cenu razmenjivača toplote.
2. Zaprljanje. Fluid sa većim zaprljanjem smestiti u prave cevi. U cevima su dozvoljene veće brzine, pa je manje taloženje, pored toga cevi se jednostavnije čiste mehaničkim metodama. Za U-cevi pri manjem zaprljanju nema čvrstog pravila, pri većem zaprljanju nisu preporučene.
3. Temperatura. Ako su temperature fluida tako visoke da je neophodna upotreba posebnih (skupljih) materijala, onda takav fluid treba smestiti u cev. Isto se odnosi i na opasne ili veoma skupe fluide. Za fluide koji su na umerenim temperaturama, ovaj uslov je manje važan, ali postoji povoljnost postavljanja toplijeg fluida u cevi zbog smanjenja disipacije toplote u okolinu.
4. Pritisaci. Fluid višeg pritiska treba da struji kroz cevi. Mali prečnik cevi i nominalne debljine zida mogu lakše podneti visoke pritiske i zbog manjeg odnosa obimne površine i mase utiču na smanjenje cene konstrukcije aparata.



Ako iz drugih razloga fluid višeg pritiska mora biti u omotaču, preporučuje se da omotač bude manjeg prečnika, a veće dužine.

5. Pad pritiska. Pad pritiska veoma zavisi od brzine fluida, ali i od viskoznosti i lokalnih otpora. U principu više viskozni fluid je povoljnije smestiti oko cevi, jer i pri manjim brzinama nastupa turbulentno strujanje i viši koeficijent prelaza toplote. Kritični Rejnoldsov broj za turbulentni protok u omotaču je oko 200.
6. Protok fluida. Fluid sa manjim protokom smestiti u cevi, jer je u cevi lakše ostvariti veći broj prolaza i na taj način povećati brzinu strujanja.
7. Koeficijent prelaza toplote. Fluid nižeg koeficijenta prelaza toplote treba smestiti u plašt. To može omogućiti upotrebu orebrenih cevi, za povećanje površine razmene na toj strani.

Ako radi lakšeg pozicioniranja, u središte pažnje postavimo dispoziciju fluida, onda najvažniji parametri fluida treba da imaju sledeće karakteristike:

Fluid koji struji oko cevi (u omotaču)

- treba da ima niži pad pritiska,
- treba da ima niži koeficijent prelaza toplote,
- treba da ima viši koeficijent viskoznosti,
- treba da bude fluid sa promenom faze, ako je potrebno.

Fluid koji struji unutar cevi (kroz cevi)

- treba da ima veće zaprljanje,
- treba da bude na višem pritisku,
- treba da bude fluid sa višim korozivnim dejstvom,
- treba da bude fluid koji sadrži više čvrstih čestica,
- treba da bude rashladna voda, ako je u pitanju hlađenje.

Za horizontalne ribojlere iz tehnoloških razloga, procesni fluid treba da struji u omotaču, grejni fluid (para ili vrelo ulje) treba da struji kroz cevi.

8. Materijal konstrukcije takođe utiče na mesto cirkulacije fluida u razmenjivaču, ali se ovde stvari mogu posmatrati obrnuto, materijal konstrukcije će se birati prema vrsti fluida, čija je lokacija prethodno izabrana. Samo izuztno, dispozicija fluida će se birati na osnovu materijala, ako je on izabran na osnovu drugih kriteijuma. Detalje o izboru materijala aparata, prema potrebi, pogledati u poglavlju 1.5. knjige.

### **2.1.2. Preporuke izbora konstrukcije osnovnih komponenti dobošastih razmenjivača toplote**

Glavne komponente dobošastih razmenjivača toplote su: cevi, pregrade, omotač, prednja i zadnja glava, cevna ploča, priključci i oslonci na fundament. Kompenzator dilatacija je takođe važna komponenta, koja se može pojaviti u slučaju da se koriste prave cevi. U prethodnom poglavlju (tačke 1.3.3, 1.3.4. i 1.5.4.) su opisane standardizovane i uobičajene konstrukcije delova dobošastih razmenjivača toplote, međutim, velika raspoloživost različitih materijala i širok opseg dimenzija mogu pri izboru oduzimati previše vremena za rešenja koje praksa

nije potvrdila. Zbog toga su nastale brojne preporuke u formi standarda, smernica (Guideline) ili "dobre inženjerske prakse" (eng. SEP - sound engineering practice), zatim preporuke autoriteta nastale iz teorijskog i praktičnog iskustva, kao i vodećih proizvođača razmenjivača toplote. Pored konstruktivnih, postoji i niz tehnoloških preporuka, postupaka i alata za izradu pojedinih komponenti, gde su najvažniji postupci za spoj cevi i cevne ploče. Preporuke nisu naravno usaglašene i teško je utvrditi kriterijume kako ih koristiti, ali svako novo rešenje mora imati moćno obrazloženje ako je u suprotnosti sa preporučenim konstrukcijama.

Prioritetne preporuke su standardi i smernice strukovnih udruženja kao standardi grupe DIN28xxx – Cevni snop razmenjivača toplote (nem. Rohrbündel Wärmeaustauscher), smernice VDI-Wärmeatlas [3], američki standardi, TEMA [S1], API 660 = ISO 16812 [S9.1], a zatim preporuke velikog broja dominantnih autora, pre svega Saunders [2 Ch4.2], Taborek [2 Ch3.3, Ch3.4], Shah-Sekulić [1] i drugi. Preporuke vodećih proizvođača su najmanje praktične, jer uglavnom služe kao promocija inovativnih tehnologija i za proširenje tržišta, a manje kao edukacija ili referentna literatura (npr. razmenjivači sa usukanim- twisted cevima).

Formalno, postoje dve vrste preporuka: 1. konstrukcije sa tipskim rešenjem ili numeričke vrednosti koje se mogu primeniti u određenom slučaju. 2. Preporuke koje se mogu primeniti posle prethodne analize, proračuna ili dimenzionisanja predmetne konstrukcije. Kompletan dizajn aparata se sastoji od niza procedura gde je neophodno praviti mnogo kompromisa između osnovnih zahteva, kao što su optimalna toplotna snaga, dozvoljeni pad pritiska, tehnološki izrade, laka upotreba i održavanje, visoka bezbednost a niska cena izrade. Zadatak projektanta je da inkorporira mnoštvo preporuka i modaliteta u celinu razmenjivača. Kao dobar korak u tom zadatku može biti razmotranje sledećih značajnih uticajnih faktora:

**Različite dilatacija materijala snopa cevi i doboša.** Ove dilatacije nastaju kao posledica razlika u temperaturama. Doboš može dilatirati u više pravaca, dok snop cevi ima dominantno linijsko širenje. Usled nepravilne konstrukcije dolazi do savijanja cevi i deformacija cevnog spoja i cevne ploče, što u krajnjem slučaju može dovesti do havarije cevi ili spoja. Razna rešenja plivajućih glava i plivajućih cevni ploča su standardna opcija, međutim mora se obratiti pažnja na različite lokalne temperaturne razlike (npr. kod većeg broja prolaza fluida) koje uzrokuju pojavu poprečnih sila i momenta uvijanja cevni snopa koji može sprečiti ili otežati slobodnu dilataciju. Takođe usled dilatacija, može nastati i nezaptiveni preveliki razmak između cevni snopa i doboša (usled konstrukcije plivajuće glave) pa nastaje zaobilazanje fluida oko paketa i pad razmene toplote.

**Curenje fluida iz cevi ili omotača.** Curenje može biti vidljivo i nevidljivo. Vidljiva curenja su ona koja izlaze u okolinu, iz glava omotača, doboša i spojnih prirubnica, a nevidljiva između fluida na spoju cevi i cevni ploče, površini cevi ili plivajućoj konstrukciji. Naročitu pažnju zahteva geometrija cevni ploče, npr. mali razmak između otvora u cevni ploči može izazvati deformaciju cevni ploče prilikom uvaljivanja cevi ili preklapanja zavara koji dovode do porasta zaostalih

napona, koji se pojačavaju pri temperaturskim dilatacijama. To može dovesti do pojave curenja, koja se ne otkriva pri ispitivanju na hladno.

**Održavanje u eksploataciji.** Ovo vrlo važan faktor održivosti konstrukcije, a među njima prvo mesto zauzima mogućnost i postupak mehaničkog čišćenja. Na mehaničko čišćenje odlučujuće utiče izbor prečnika i raspored cevi.

**Dužina razmenjivača.** Poznato je opšte proizvođačko pravilo, što duže cevi, to je veća efikasnost razmene toplote i niži trošak izrade, sve do komercijalno lako dostupnih dužina cevi (6m, eventualno 12m). Međutim ovo pravilo najčešće nije primenljivo, jer drugi uticaji, pre svega montažni, ali i mogućnost mehaničkog čišćenja dugih cevi, utiču da razmenjivač bude kraći. Manje dužine cevi treba podesiti da budu deljive celim brojem bez ostatka komercijalne dužine cevi, kako bi se smanjila veličina otpada pri izradi.

**Karakter strujanja u omotaču sa poprečnim pregradama.** Broj i dizajn pregrada u dobošu je moćan alat, od čega zavisi intenzitet razmene toplote, karakter strujanja i pad pritiska, naročito u laminarnom području. Za najčešće korišćene segmentne pregrade, pri laminarnom strujanju, otpor strujanja glavnom poprečnom strujnom toku je veći od obilaznog toka kroz prostor omotač-krajnje cevi i omotač-poprečne pregrade. To utiče da ta dva toka imaju veliki negativni uticaj i taj uticaj progresivno raste s povećanjem broja pregrada (odnosno usled smanjenja razmaka između poprečnih pregrada), jer se povećava razlika pada pritiska glavne i obilazne struje. Pored toga, zbog lošeg mešanja različitih tokova pri laminarnom strujanju, pada srednja temperaturna razlika i pada toplotna snaga razmene, iako to izgleda protivrečno. Zato je neophodno kontrolisati ovu pojavu i ići na najmanju tehnički moguću i ekonomski isplativu toleranciju rastojanja za obilazno strujanje ili predvideti zaptivne trake. Pri turbulentnom strujanju, usled većih brzina strujanja dolazi do manjeg obilaznog toka, a takođe i do boljeg mešanja fluida i povećanja toplotne snage razmene, pa su dozvoljene veće tolerancije obilazne struje. Iako manji preseki doboša pre dovode do nastanka turbulentnog strujanja, to neće dovesti do porasta efikasnosti razmene toplote, jer odnos prostora obilaznog i glavnog toka može porasti, (zato što postoji minimalna granica razmaka omotača i cevnog registra), pa su razmenjivači malog prečnika doboša osetljiviji na laminarna strujanja u omotaču. Na smanjenje pada pritiska pri poprečnom strujanju pored povećanja razmaka između pregrada može se uticati i brojem preseka pregrade, tako da pored singl, postoje i duple i triple pregrade, kao i pregrade bez cevi u oknu (prozoru pregrade). Duple pregrade su prva opcija za smanjenje pada pritiska u omotaču, dok triple pregrade u velikoj meri ispravljaju poprečnu struju, a pored toga značajno povećavaju razmak oslonca velikom broju cevi, pa se izbegavaju. Pregrade tipa bez cevi u oknu su veoma zanimljive, jer kod njih se između singl pregrada bez povećanja razmaka ubacuju pregrade sa dva okna, koji ne utiču na povećanje poprečne brzine, već na bolju raspodelu strujnog toka i bržu pojavu turbulencije. Povećanje razmaka između pregrada utiče na bržu pojavu nepovoljnih vibracija cevnog snopa izazvanih protokom, što se najlakše otklanja ubacivanjem pregrada sa dva okna, bez značajnog uticaja na pad pritiska.

Pored segmentnih pregrada postoji čitav niz alternativnih pregrada za ubrzanje turbulencije fluida u omotaču uz istovremeno oslanjanje cevi cevnog snopa, o čemu će biti reči u narednoj tački ovog odeljka.

**Standardne preporuke i rešenja.** Detalji tipskih konstrukcija u skladu sa TEMA standardom navedeni su u poglavlju 1, klasifikacija RT odeljak 1.3, dobošasti RT tačka 1.3.3. Pored njih postoji još dosta preporučenih rešenja koja su dalja razrada standardizovanih konstrukcija, kao i preporuka u kojim uslovima i u okviru kojih granica se mogu koristiti u praksi. Mogućnosti primene i odnosi prema tehničkim parametrima tipiziranih TEMA konstrukcija, prema Shah-Sekulić [1], mogu se videti u tabeli TAB.2.1, za tipove zadnje glave razmenjivača.

**TAB. 2.1.** *Mogućnosti primene tehničkih rešenja na TEMA konstrukcije razmenjivača*

<i>Tehnički parametar</i>	<i>Fiksna cevna ploča</i>	<i>U cevi</i>	<i>Plivajuća glava spoljašnje pakovanje</i>	<i>Plivajuća cevna ploča spoljašnje zaptivanje</i>	<i>Izvlačeća plivajuća glava</i>	<i>Plivajuća glava sa dvodelnim prirubnicom</i>
<b>TEMA tip zadnje glave</b>	<b>L,M,N</b>	<b>U</b>	<b>P</b>	<b>W</b>	<b>T</b>	<b>S</b>
Demontažni cevni snop	Ne	Da	Da	Da	Da	Da
Zamena cevnog snopa	Ne	Da	Da	Da	Da	Da
Mogućnost dilatacije	Da, uz <sup>a</sup>	Da	Da	Da	Da	Da
Zamena pojed. cevi	Da	Da <sup>b</sup>	Da	Da	Da	Da
Hemijsko čišćenje cevi	Da	Da	Da	Da	Da	Da
Mehan. čišćenje u cevi	Da	Da <sup>c</sup>	Da	Da	Da	Da
Mehan. čišćenje oko cevi	Ne	Da <sup>d</sup>	Da <sup>d</sup>	Da <sup>d</sup>	Da <sup>d</sup>	Da <sup>d</sup>
Potreban vijčani spoj za unutrašnje zaptivanje	Ne	Ne	Ne	Ne	Da	Da
Koristi se za ugradnju duple cevne ploče	Da	Da	Da	Ne	Ne	Ne
Broj prolaza u cevi	Bilo koji	Parni broj	Bilo koji <sup>e</sup>	Jedan ili dva <sup>f</sup>	Bilo koji <sup>g</sup>	Bilo koji <sup>g</sup>
Približni klirens Du-Dotl	11-18	11-18	25-50	15-35	95-160	35-50 mm
Relativna cena prema U	2	1	4	3	5	6

a) uz ugradnju kompenzatora u doboš;

b) ali samo spoljašnjih U cevi

c) unutar cevi samo specijalnim alatom,

d) oko cevi samo za kvadratnu konfiguraciju

e) za neparan broj prolaza potreban aksijalni priključak na zadnjoj glavi

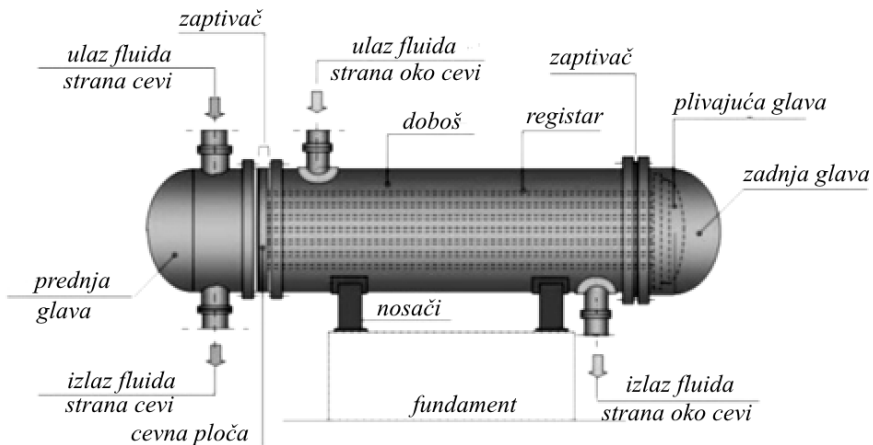
f) Za dva prolaza fluida u cevi, priključak fluida mora biti na stacionarnoj glavi

g) Za neparni broj prolaza priključak se mora izvući iz plivajuće glave, potreban je kompenzator.

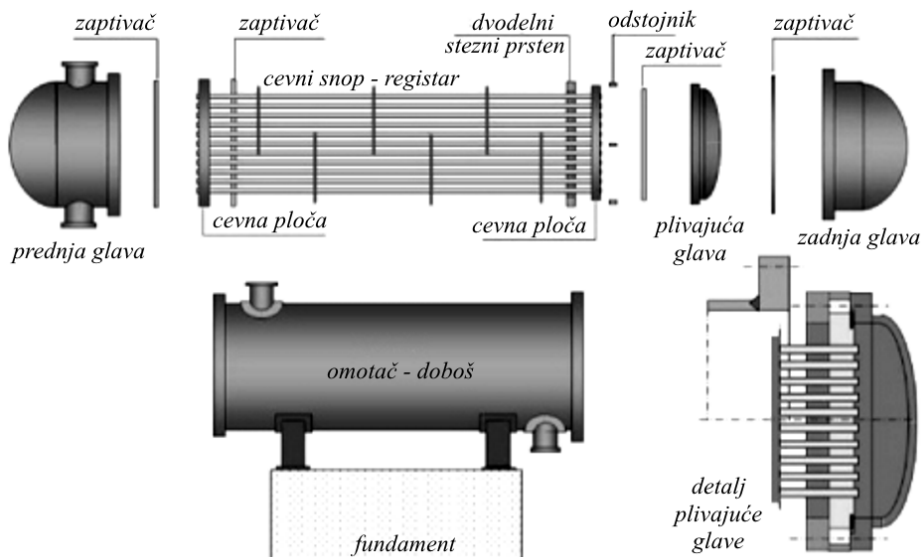
U prethodnom razmatranju su navedeni osnovni uticajni faktori na izbor konstrukcionih rešenja. Pri izradi projektne dokumentacije, pored proračunskih veličina (naročito za PED opremu) postoji veliki broj konstrukcionih detalja koji se ne proračunavaju već usvajaju kao sublimisano prethodno lično iskustvo ili rešenja zasnovana na bazi standarda i merodavne literature. Međutim, pre usvajanja preporuka potrebno je izvršiti analizu mogućnosti primene imajući u vidu radne tehnološke uslove, raspoloživu opremu za izradu i izričite zahteve naručioca.

## 2.2. KONSTRUKCIONI DETALJI I PREPORUKE DOBOŠASTIH RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Radi sistematizacije i uvida u konstrukcione detalje koje treba razmotriti, na slici Sl. 2.1, prikazan je tipski dobošasti razmenjivač toplote u montažnoj celini, a na slici Sl. 2.2, za isti razmenjivač prikazani su osnovni sklopovi i pozicije.



Sl. 2.1. Osnovne konstrukcione pozicije razmenjivača u sklopu, TEMA tip BES



Sl. 2.2. Osnovne konstrukcione pozicije rastavljenog razmenjivača TEMA tip BES

Navedene osnovne pozicije dobošastog razmenjivača toplote imaju terminološku i pojmovnu povezanost sa veličinama koje se razmatraju u narednim poglavljima kao što su: geometrija aparata, konfiguracija strujanja, fabrikacija i sl.

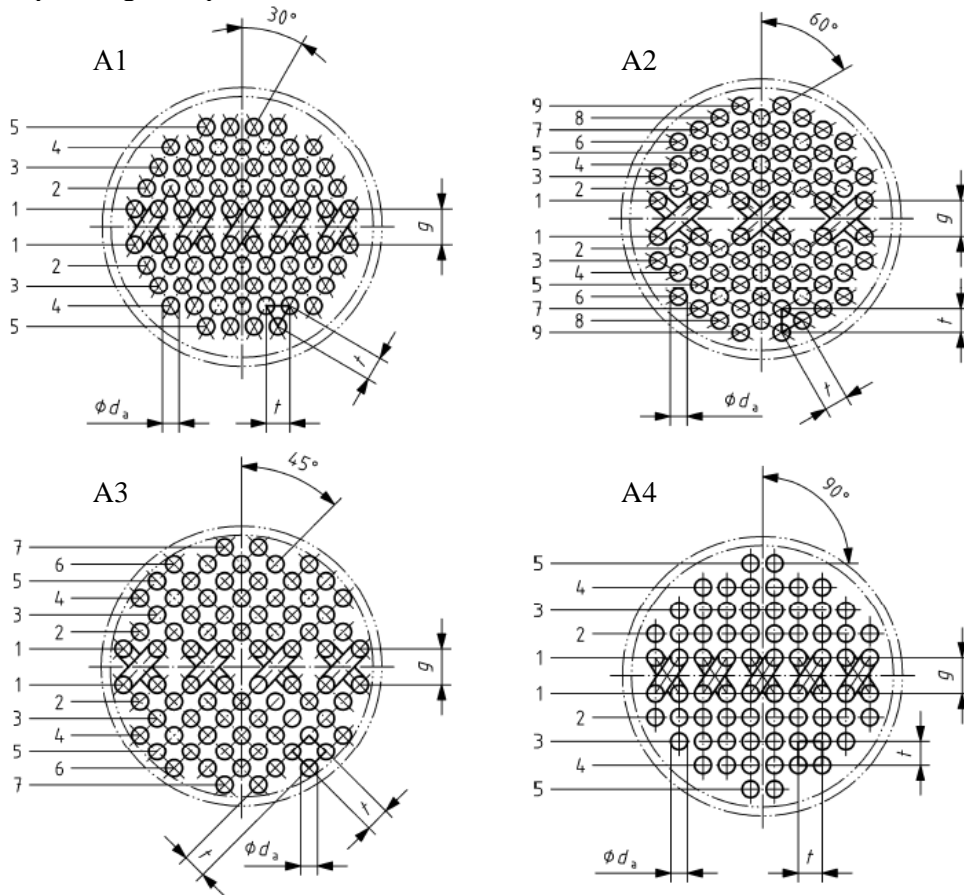
### 2.2.1. Cevi razmenjivača toplote

Cevi su kao polufabrikati detaljno obrađene u tački 1.5.4.c), gde su dati podaci za glatke, orebrene i U cevi za najčešće korišćene materijale: čelik, nerđajući čelik i bakar. Veoma važan konstruktivni element kod izrade U cevi je minimalni osni poluprečnik savijanja ( $R_{m \min}$ ), zbog plastičnih deformacija koje nastaju pri savijanju, stanjenja cevi na spoljašnjem zidu luka i smanjenju izdržljivosti na dejstvo pritiska fluida. Za često korišćene čelične U cevi, prema DIN 28179 u tabeli TAB. 1.46 dat je minimalni poluprečnik savijanja u zavisnosti od prečnika i debljine zida cevi. Savijanje cevi će se ovde detaljnije razmotriti. Uočljivo je da za najmanje debljine zida značajno raste minimalni poluprečnik savijanja. Karakterističan odnos osnovnog poluprečnika savijanja i spoljnog prečnika cevi,  $R_{m \min}/d_s$  za tankozide cevi je veći od 2, dok je za veće debljine zida, taj odnos 1,25-1,5. Tema standard (RCB-2.31) preporučuje odnos  $R_{m \min}/d_s \geq 2$ , pri čemu maksimalno stanjenje cevi na spoljašnjem luku mora biti ispod 17%, isto propisuje i ASTM A 688-08 ali sa maksimalnim stanjenjem od 20%. Standard API 660 dodatno pooštrava kriterijume ukoliko nije obezbeđena saglasnost kupca, pa tako propisuje upotrebu cevi za razmenjivače toplote minimalnog prečnika  $d_s = 19,05$  mm (3/4") debljine zida minimalno 2,11 mm za ugljenične i niskolegirane čelike, 1,65 mm za bakar i legure bakra, 1,473 mm za nerđajuće čelike i 1,067 mm za titanijum. Za savijanje U cevi API propisuje odnos  $R_{m \min}/d_s \geq 3$ , a ako je odnos manji, mora se povećati debljina zida cevi za vrednost stanjenja zida usled savijanja, sve do 17%. Za nerđajuće cevi od nikla i njegovih legura namenjenih za razmenjivače toplote, standard ASTM B 163-08 daje minimalne prečnike savijanja u zavisnosti od spoljnog prečnika cevi i debljine zida. Npr. za često korišćene cevi, minimalni osni poluprečnika savijanja je:

- cevi do  $\phi 12,7$  x (1,17 - 1,45),  $R_{m \min} = 30,2$  mm,
- cevi do  $\phi 12,7$  x (1,45 - 3,05),  $R_{m \min} = 25,4$  mm,
- cevi do  $\phi 15,9$  x (0,94 - 1,45),  $R_{m \min} = 30,2$  mm,
- cevi do  $\phi 15,9$  x (1,45 - 3,05),  $R_{m \min} = 25,4$  mm,
- cevi do  $\phi 19,0$  x (1,24 - 1,45),  $R_{m \min} = 31,8$  mm,
- cevi do  $\phi 19,0$  x (1,45 - 2,77),  $R_{m \min} = 30,2$  mm,
- cevi do  $\phi 25,4$  x (1,24 - 1,47),  $R_{m \min} = 50,8$  mm,
- cevi do  $\phi 25,4$  x (1,47 - 2,77),  $R_{m \min} = 44,5$  mm.

Evropski standard za cevi od bakra i njegovih legura za razmenjivače toplote je EN 12451, a u SAD ASTM B395/B395M. Američki standard predviđa odnos  $R_{m \min}/d_s \geq 2,2$  za bakarne cevi oznake UNS, C71500 i C71520 debljine zida do 1,24 mm a za debljine zida do 1,47 mm odnos  $R_{m \min}/d_s \geq 2$ . Minimalno stanjenje zida U cevi na mestu savijanja ne sme biti veće od 10% prečnika cevi.

Imajući u vidu da potreba za malim poluprečnicima savijanja U cevi proističe iz zahteva popunjenosti cevima prostora u središtu cevne ploče, a da se to može postići ukrštenim ili ukošenim U cevima, većeg poluprečnika savijanja, to se generalno može preporučiti odnos  $R_{m \min}/d_s = 2,5$  do 3. Na taj način se može eliminisati mogućnost tzv. "faltanja cevi", kao najčešća plastična deformaciju usled malog poluprečnika savijanja i malih debljina zida cevi. Prema nemačkom standardu DIN 28179:2007 na slici Sl. 2.3. prikazane su konstrukcije mrežnog rasporeda gde su prvi redovi sa ukrštenim U cevima.

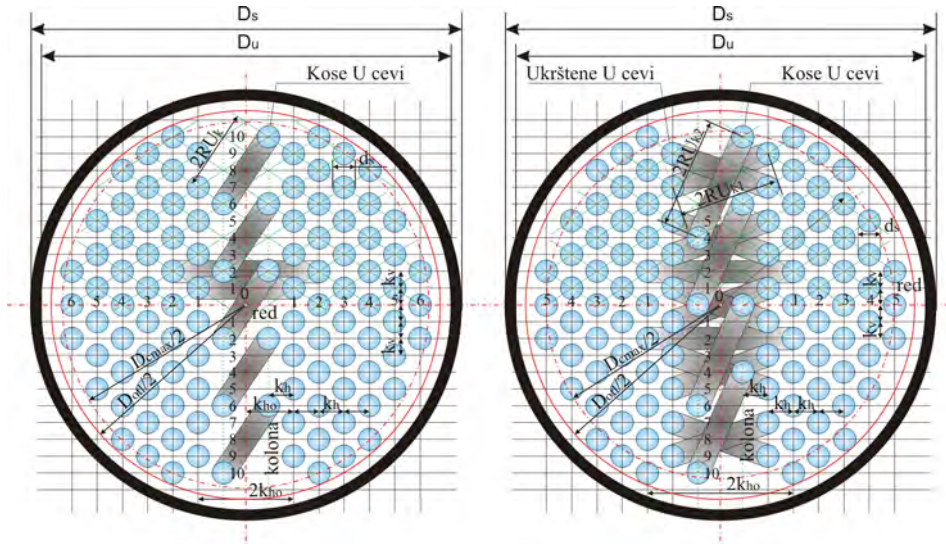


**Sl. 2.3.** *Principiska skica mrežnog rasporeda sa prvim redom ukrštenih U cevi, prema DIN 28179:2007, A1 – Trouglasti raspored 30°, A2 – Trouglasti raspored 60°, A3 – Kvadratni raspored 45°, A4 – Kvadratni raspored 90°. g – početni mrežni dvokorak, t – minimalni mrežni korak (tube pitch),  $d_a=d_s$  – spoljni prečnik cevi.*

U zavisnosti od geometrijskih veličina kod ukrštenih cevi može doći do preklapanja unutrašnje i spoljnje U cevi, kao i slučaja da poluprečnik savijanja ukrštenih cevi i dalje bude manji od minimalno dozvoljenog (naročito slučaj A1 i

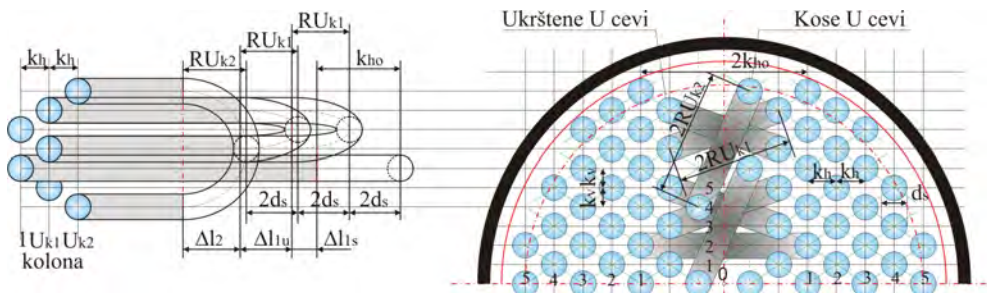


A4). U takvim situacijama mogu se primeniti nestandardna rešenja sa kosim cevima, dva reda kosih ili ukrštenih U cevi ili njihove kombinacije, slika Sl. 2.4.



**Sl. 2.4.** Realni horizontalni mrežni raspored sa kosim i ukrštenim U cevima, LEVO: Prva kolona sa kosim U cevima, DESNO: Prva kolona sa kosim U cevima većeg prečnika savijanja, druga kolona sa ukrštenim U cevima. Oznake su prema nomenklaturi, odeljak 2.2 Geometrija razmenjivača toplote.

Da bi se kose ili ukrštene U cevi mogle ubaciti u cevni paket, njihova dužina mora biti kraća od dužine prvog reda neukošenih cevi, slika Sl. 2.5. Prvi red (kolona) neukošenih U cevi ima početni korak  $k_{ho}$  ili veći, od čega zavisi da li će



**Sl. 2.5.** Skraćenje kosih i ukrštenih U cevi, na bazi standarda DIN 28179

se ispod njega ubaciti jedna ili više kolona ukrštenih ili kosih U cevi, koraka  $k_h$  prema osi cevne ploče. Korak između kosih cevi mora biti minimalno  $2 d_s$ , ali veći od tube pitch. Poluprečnik savijanja kosih ili ukrštenih cevi zavisi od početnog koraka  $k_{ho}$  i broja koraka ukošenja, prema slici Sl. 2.5., biće:

$$2RU_{k1} = \sqrt{(z_1 k_v)^2 + (2k_{ho} - 2k_h)^2}, \quad 2RU_{k2} = \sqrt{(z_2 k_v)^2 + (2k_{ho} - 4k_h)^2}. \quad (2.1)$$

U izrazu (2.1),  $z_1$  i  $z_2$  su celi parni brojevi, kojim se podešava broj obuhvaćenih koraka kose U cevi da bi se dobio poluprečnik savijanja  $RU_k \geq R_{m \min}$ . Izraz je napisan za slučaj horizontalnih U cevi, a ako su U cevi vertikalne, korak  $k_h$  treba zameniti korakom  $k_v$  (detaljnije poglavlje 2.2). Sve U cevi imaju istu dužinu pravog dela ( $L_g$ ) do početka savijanja, dok ukrštene i kose U cevi moraju biti kraće za  $\Delta l$  da bi stale unutar U cevi najmanjeg prečnika savijanja. Sa slike Sl. 2.5. se vidi:

$$\Delta l_{1s} = RU_{k1} - 2d_{s,,} - k_{ho}, \quad \Delta l_{1u} = 2d_{s,,}, \quad \Delta l_2 = RU_{k2} - RU_{k1} + 2d_s. \quad (2.2)$$

Skraćenja se sumiraju zavisno od položaja kosih U cevi i iznose:

$$\begin{aligned} \text{spoljašnja ukrštena U cev:} \quad & \Delta l = \Delta l_{1s} = RU_{k1} - 2d_{s,,} - k_{ho} \\ \text{unutrašnja ukrštena U cev:} \quad & \Delta l = \Delta l_{1s} + \Delta l_{1u} = RU_{k1} - k_{ho} \\ \text{kosa U cev:} \quad & \Delta l = \Delta l_{1s} + \Delta l_{1u} + \Delta l_2 = RU_{k1} + RU_{k2} - 2k_{ho} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Izmerena minimalna debljina zida U cevi na spoljašnjem luku mora biti veća od računski dobijene debljine prema jednačini (2.4), DIN 28179:

$$s_{\min} \geq s_o \frac{2R_m + d_s}{2(R_m + d_s)} = s_o \frac{R_m/d_s + 0,5}{R_m/d_s + 1}, \quad (2.4)$$

gde je  $s_o$  dozvoljena debljina zida cevi pre savijanja,  $R_m$  osni poluprečnik savijanja cevi, a  $d_s$  prečnik cevi koja se savija. Za  $R_m/d_s = 1,25$ , dobija se  $s_{\min} \geq 0,78 s_o$ , za  $R_m/d_s = 2$ ,  $s_{\min} \geq 0,83 s_o$ , a za preporučeno  $R_m/d_s = 2,5$ , dobija se  $s_{\min} \geq 0,86 s_o$ .

Prema TEMA standardu [88], računa se potrebna debljina zida cevi pre savijanja u zavisnosti od debljine zida cevi iz mehaničkog proračuna.

$$s_o = s_{\min} \left( 1 + \frac{d_s}{4R_m} \right) = s_{\min} \left( 1 + \frac{1}{4R_m / d_s} \right), \quad (2.5)$$

gde su unete iste oznake kao prema DIN standardu. Za odnos  $R_m/d_s$  redom 1,25 2 i 2,5, dobija se  $s_o = 1,2 s_{\min}$ ,  $s_o = 1,125 s_{\min}$ ,  $s_o = 1,1 s_{\min}$ , ili recipročne vrednosti  $s_{\min} = 0,83 s_o$ ,  $s_{\min} = 0,89 s_o$ ,  $s_{\min} = 0,91 s_o$ , što je nešto veće nego po DINu. Pri izboru standardne debljine zida usvojene cevi, praktičnije je koristiti TEMA standard, jer merenje debljine zida cevi posle savijanja nije potrebno.

Milan R. Rikalović

# DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

**Knjiga I: KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**



**Naredne stranice su u prekidu !**



Dispoziciju nastavka teksta na sledećoj strani videti u sadržaju.

**Ako želite kompletan tekst - NARUČITE KNJIGU**

---

## POGLAVLJE 3

---

# PRORAČUN ČVRSTOĆE KONSTRUKCIJE DOBOŠASTIH RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Kao što je u uvodnom razmatranju naglašeno, razmenjivači toplote su se razvili kao uređaji u kome se vrši i kontroliše razmena toplote, dakle generalno fluidi koji učestvuju u razmeni ne moraju biti zatvoreni, već slobodni prema okolini. Međutim, da bi se fluidima u procesu razmene toplote lakše upravljalo, neophodno je zatvaranje fluida u prostor u kome se kontroliše protok, agregatno stanje, koncentracija itd., što se najčešće postiže promenom pritiska u odnosu na okolinu. Uspostavljanje razlike pritiska između fluida i okoline još uvek ne znači da je sistem zatvoren, jer fluidi mogu pre ulaska i posle izlaska iz razmenjivača toplote biti slobodni. Veliki broj razmenjivača rade u režimu, gde se jedan fluid uzima kao raspoloživi resurs za hlađenje ili grejanje, kao npr. rečna, jezerska ili morska voda, vazduh i sl. Za njihovu cirkulaciju se koriste pumpe ili ventilatori koji podižu pritisak u razmenjivaču toplote. Kao što znamo razmenjivači toplote nemaju pokretne delove, ali u njima se nalaze fluidi koji moraju cirkulisati i bez njih nema razmene toplote. Osnovna komponenta dobošastih razmenjivača toplote je cev, koja razdvaja fluide, a uz sadejstvo sa ostalim komponentama (doboš, cevna ploča, pregrade itd.) obezbeđuje prostor za smeštaj i cirkulaciju fluida. Sklop čisto mehaničkih komponenti čini napravu ili konstrukciju razmenjivača toplote u kome se obavlja ciljana razmena toplote. Dakle, bilo koji razmenjivač toplote ima svoju konstrukciju, koja ga odvaja od okoline i čini proizvodom. Konstrukcija ima svoju geometriju (definiciju i dimenzije oblika) i sposobnost da izdrži dejstvo određenih opterećenja ili sila, ali u ograničenom intezitetu i čije prekoračenje mogu izazvati deformacije ili čak lom komponenti ili havariju. Opterećenja konstrukcije mogu biti funkcionalna ili unutrašnja (od dejstva procesa) i spoljašnja (sila zemljine teže, dejstvo vetra, seizmičke sile itd.). Izdržljivost konstrukcije na dejstvo svih

opterećenja koje izazivaju lom naziva se nosivost, otpornost ili čvrstoća konstrukcije, dok je krutost konstrukcije otpornost prema nastanku deformacija. Konstrukcija mora imati minimalnu čvrstoću i bez dejstva opterećenja, koja mu obezbeđuje samonosivost ili održanje oblika u predviđenom vremenu trajanja.

Razmatranje čvrstoće dobošastih razmenjivača toplote je čisto mehanička stvar, koja nije povezana sa procesom razmene toplote i podleže zakonitostima nauke o čvrstoći kao grane mehanike. Konstrukcija razmenjivača je kombinacija termičkih i strujnih zahteva u razmeni toplote, međutim konačna forma i dimenzije konstrukcije nastaju tek posle proračuna čvrstoće. Čvrstoća konstrukcije je pitanje integriteta uređaja i njegove bezbednosti na ljude i okolinu u toku rada ili mirovanja uređaja. Mirovanje uređaja znači da nema prinudne cirkulacije fluida, ali to ne isključuje postojanje unutrašnjih opterećenja na konstrukciju uređaja koji su prevashodno posledica dejstva pritiska fluida. Pritisak je veličina stanja fluida, pomoću koje se utiče na agregatno i energetska stanje fluida, takođe i na sposobnost cirkulacije fluida kroz uređaj. Iz teorije strujanja fluida je poznato da kretanje ili cirkulacija fluida kroz konstrukciju razmenjivača izaziva otpor strujanju koji fluid savladava na bazi razlike pritiska na ulazi i izlazu iz aparata.

Istorijski gledano, značaj i uticaj čvrstoće konstrukcije uređaja za razmenu toplote je neprekidno rastao. Prvobitni razvoj razmenjivača povezan je sa parnim mašinama, koje su istina imale za dominantni cilj pretvaranje toplote u mehanički rad, a razmena toplote je bila prateća pojava. Početne konstrukcije postrojenja su bile usmerene na funkciju pretvaranja pritisne energije fluida u mehanički rad i bez potrebnog proračuna ili iskustva u eksploataciji. Zanemarivanje opasnog uticaja razlike temperatura i pritiska u konstrukciji parnih mašina dovelo krajem XIX i početkom XX veka do većeg broja havarija sa velikim brojem ljudskih žrtava, naročito u Americi (navodi se samo eksploziju parobroda Sultana – 1800 mrtvih i eksploziju bojlera u fabrici obuće u Broktonu – 58 mrtvih i ogromna materijalna šteta). Reakcija državnih organa je bila uspostavljanje prvih ASME pravila za konstruisanje bojlera za dozvoljene radne pritiske 1913 god. Ova pravila su odmah dala rezultate, broj nesreća se drastično smanjio, iako je broj konstrukcija rapidno povećan. Razvojem i proširenjem ovih normativa utvrđen je odlučujući uticaj pritiska na dimenzionisanje posuda i opreme, tako da je formirana posebna grupacija tzv. opreme pod pritiskom (OPP) ili PED opreme (eng. Pressure equipment directive). Pojam "dimenzionisanje" znači određivanje odlučujuće dimenzije uređaja i komponenti koji za izabrani materijal i dizajn konstrukcije obezbeđuje njegovu nosivost pod uslovima dejstva opterećenja. Odlučujuća dimenzija je najčešće debljina materijala, na koju dominantno utiču osobine materijala, vrsta konstrukcije i opterećenje. Zbog toga je dimenzionisanja opreme poslednja proračunska operacija, nakon koje nisu dozvoljene nikakve intervencije na konstrukciji, ili uslovima rada uređaja, koji mogu promeniti njenu nosivost.

Vremenom, posle ASME standarda i druge zemlje su donosile nacionalne normative za posude pod pritiskom, kao Nemačka – AD 2000, Engleka – BS 5500, Francuska – CODAP, Rusija – GOST, bivša Jugoslavija JUS grupa M.E2.xxx,

konačno u Evropskoj zajednici standard EN 13445 [S2], sa kojim su usaglašeni svi nacionalni standardi članica zajednice i drugih zemalja u postupku pridruživanja, o čemu je detaljnije bilo reči u poglavlju 1. ove knjige.

U SAD, normativi ASME imaju najdužu tradiciju upotrebe, a pored SAD koriste se u drugim zemljama i ostvaruju najveći globalni uticaj. ASME VIII div 1 [S10.1] – Pravila za konstrukciju kotlova i posuda pod pritiskom, a postoje i div 2 – Alternativna pravila i div 3 – Alternativna pravila konstrukcija posuda pod visokim pritiskom. Pored ovog standarda ASME izdaje dodatna pravila preko svog komiteta "Post Construction Committee – PCC od 1995" koja obrađuju pitanja opreme pod pritiskom posle izrade, tako PCC-1 [S10.2] iz 2019 daje pravila za ispitivanje i održavanje PED opreme, a PCC-2 [S10.3] iz 2015 daje pravila za popravku PED opreme (veoma korespondentan standardu ISO 24817 [S5]). Dodatna pravila PCC su veoma prijemčiva za razne slučajeve u praksi, pa su često citirana u poglavlju 4. – Fabrikacija razmenjivača toplote. TEMA standard [S1] i standardi API [S9] (naročito API 660) nemaju proračunske kodove čvrstoće konstrukcije PED opreme, ali imaju veliki broj pravila procedure i preporuka proračuna komponenti, naročito onih koji pripadaju nePED konstrukcijama.

U Evropi većina zemalja je imala svoje nacionalne standardne kodove za opremu pod pritiskom, do pojave harmonizovanih EN standarda PED opreme, koje primenjuju pod oznakom nacionalnog standarda (npr. u Srbiji SRPS EN 13445), dok su najrazvijenije zemlje Evrope zadržale i svoje standarde, koje su usaglasile sa EN, kao npr. u Nemačkoj AD 2000 [S8] – izdanje 2016. Ovaj nemački standard je posebno interesantan na Balkanu, jer je bio osnova ranijih nacionalnih standarda. Postoji dosta uporednih proračuna PED opreme prema EN 13445 i AD-2000, koji pokazuju da su debljine zidova nešto veće prema AD-2000 u odnosu na EN 13445.

Literatura za čvrstoću konstrukcija je specifična. Skoro da je odvojena od strujno-termičkih razmatranja problematike tehnoloških aparata (gde pripadaju i razmenjivači toplote). Izuzimajući ranija izdanja HEDH [2] gde je veliko poglavle 4. posvećeno mehaničkom dizajnu razmenjivača toplote, retka je literatura koja integralno tretira čvrstoću opreme i razmenu toplote, obično čvrstoća konstrukcije se posmatra kao normativ, propisan od nadležnih institucija, npr. Kuppam [19, poglavlje 11] ili Towler-Sinnott [39, poglavlje 14]. Mnogo češće se mehanički dizajn posmatra kao odvojena oblast, npr. Singh-Soler [64] ili Podhorsky-Krips [65], a najčešća literatura je razjašnjenje procedure standarda, na primer kao: Bednar-1991 [67], Buthod-Megyesy-2001 [68], Far-Jawad-2010 [75], Moss-2013 [69] prema ASME ili Baylac-Koplewitz-2004 [96], Zeman-2006 [71], Ogneowa-2015 [74] prema EN 13445 itd. Od srpske literature nezaobilazni su Propisi o opremi pod pritiskom 1-2, prof. Bogner i ostali - 2013 [86].

Treba napomenuti da u dizajnu konstrukcije postoje dva područja: Propisi, smernice ili direktive za projektovanje, proizvodnju i ocenu usaglašenosti opreme i sklopova pod pritiskom u smislu bezbednosti, zaštite zdravlja i životne sredine i kôdovi ili postupci proračuna čvrstoće komponenti ili celine PED opreme prema standardima ili preporučenim pravilima.

### 3.1. TEHNIČKI PROPISI PED OPREME U EU

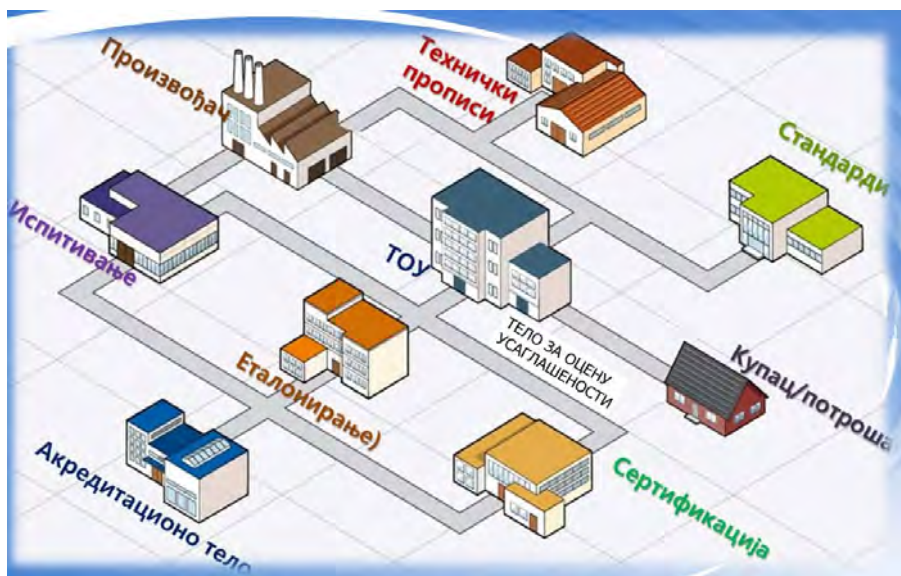
Proizvod ili još šire roba i tržište su oblasti u koje su se iz veoma dobrih namera uključile države ili asocijacije država (npr. EU) da bi korisniku obezbedile kvalitetan i bezbedan proizvod. Da bi se taj cilj ostvario neophodni su propisi, koji mogu biti: Zakoni, Direktive, Uredbe, Odluke itd. Za razliku od standarda, propisi su redovno obavezni, a Zakoni imaju i poglavlja o sankcijama i kaznama subjekata koji ih krše. Deo propisa je tehničke prirode (najčešće Pravilnici) koji regulišu u oblasti primene: procedure dozvola, projektovanja i izrade, obavezne sadržaje, kontrole i ispitivanja, mere bezbednosti itd. S druge strane postoje i tehnička pravila, kao standardi i tehničke preporuke od strane nezavisnih stručnih tela ili udruženja, koji najčešće nisu obavezni, a uz pomoć kojih se rešavaju tehnička pitanja proračuna, projektovanja, izrade, ispitivanja i druga pravila, što je u okviru inženjerske problematike. Vodeću ulogu i u propisima i u tehničkim pravilima imaju najrazvijenije zemlje sveta, a normativi su često veoma slični, ali i dovoljno različiti da predstavljaju prepreke u slobodnom toku robe, a tome doprinose i carine, uvozne dozvole, kontrole i odobrenja, kao i druga ograničenja (jezik dokumentacije, servis, garancije, itd.). U ovim poslovima je angažovan ogroman broj ljudi i specijalista za tumačenje i primenu odgovarajućih propisa. Nije moguće ne koristiti propise pri konstrukciji i stavljanju u promet proizvoda, dok previše bavljenje problematikom regulative vodi u sferu pravnog tumačenja, šta se mora, sme ili može. Mera u kojoj će se koristiti propisi u ovoj knjizi je minimum potreban za razumevanje tehničkih pravila za izradu razmenjivača toplote. Druga dilema je izvor propisa. Postoji obaveza primene nacionalnog zakonodavstva, ali imajući u vidu period tranzicije i usaglašavanja sa evropskom normativom, logično je koristiti evropske direktive, jer će one u Srbiji biti u dominantnoj upotrebi.

Revolucionarne promene u domenu evropskih propisa nastale su pri kraju XX veka uvođenjem u praksu tzv. "Novog pristupa", po kome se direktivama definišu samo bitni zahtevi bezbednosti proizvoda, a da se tehnički sadržaj razrađuje u tzv. **harmonizovanim evropskim standardima** (harmonizovani su zato jer su usaglašeni sa bitnim zahtevima). Ocena usaglašenosti zasnovana je na modulima (globalni pristup), što potvrđuje proizvođač (deklaracija o usaglašenosti) na bazi isprave od ovlašćenog tela za ocenjivanje usaglašenosti (notifikovana tela). Grupe proizvoda koji potpadaju pod novi pristup su: mašine, električni i elektronski uređaji, liftovi, **oprema pod pritiskom**, građevinski proizvodi, itd.

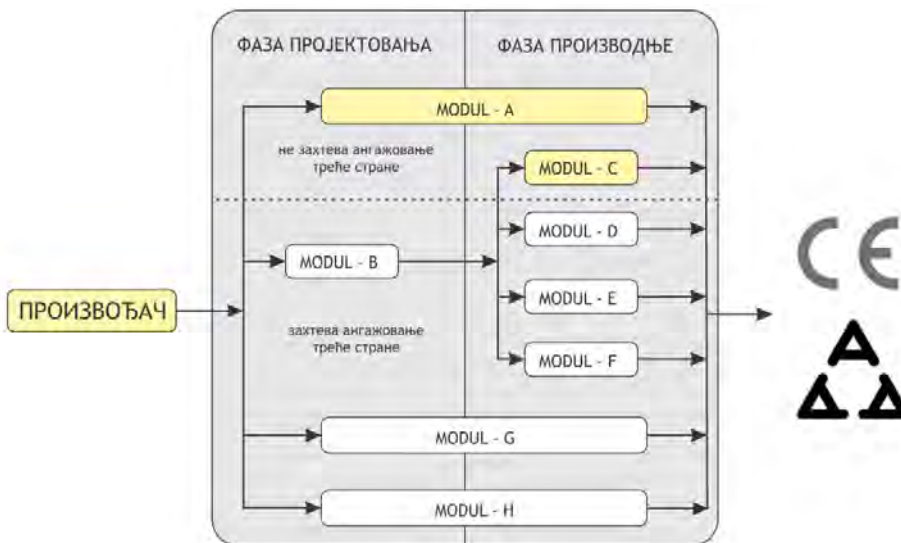
Naravno da postoji i "Stari pristup", po kome su razvijene detaljne procedure od ranije, po nacionalnim propisima svake države, razna odobrenja državnih organa (ministarstva, agencije), potvrde o atestiranju itd., što u praksi veoma dugo traje i otežava protok robe. Grupe proizvoda koje su pokrivene starim pristupom su: Vozila, poljoprivredni i prehrambeni proizvodi, farmacija, hemikalije, tekstil, itd.



Ilustrativni prikaz, novog i globalnog pristupa, dat je na slikama Sl. 3.1 i Sl. 3.2, prema prezentacijama ministarstva privrede ([www.tehnis.privreda.gov.rs](http://www.tehnis.privreda.gov.rs)).



Sl. 3.1. Vrste institucija u kontroli kvaliteta proizvoda prema Novom pristupu EU, (preuzeto sa sajta Ministarstva privrede Srbije [www.tehnis.privreda.gov.rs](http://www.tehnis.privreda.gov.rs))



Sl. 3.2. Tok ocene usaglašenosti proizvoda pomoću modula (Globalni pristup) od proizvođača do stavljanja znaka ispunjenja svih zahteva (znak CE) - prema [www.tehnis.privreda.gov.rs](http://www.tehnis.privreda.gov.rs)

Detaljnija objašnjenja tokova navedenih prikaza biće data u nastavku ovog teksta. Iz institucionalnog prikaza puta proizvoda od proizvođača do potrošača vidi se uloga TOU (tela za ocenu usaglašenosti) kao faktora posle čije ocene proizvod može ići na tržište. Ovlašćenje TOU dobija od akreditacionog tela osnovanog od Vlade na principu nepristrasnosti i poverljivosti za obavljanje poslova ocene kvaliteta i bezbednosti proizvoda u skladu sa propisanom procedurom i važećim propisima i tehničkim pravilima. Dokazi za to su korišćenje standarda i tehničkih propisa i izveštaji specijalizovanih institucija za ispitivanje, etaloniranje i sertifikaciju. Posle izveštaja TOU proizvod se pušta na tržište i dobija znak CE. Detaljni službeni opis procedure EU dat je u Plavoj knjizi [N2], koja je formirana 2000 god., a redovno se dopunjava i ažurira, treba koristiti uvek aktuelno izdanje. U Srbiji trenutno ima više od 60 registrovanih imenovanih tela (TOU), od čega je više od 10 za opremu pod pritiskom, spisak se neprekidno menja. Kategorizacija proizvoda prema stepenu bezbednosti određuje proceduru koju treba sprovesti u radu TOU na bazi utvrđenih modula (Sl. 3.2), o čemu će biti još reči u primeni procedura na proizvode pod pritiskom.

Razmenjivači toplote, ako su oprema pod pritiskom (PED) najviše podležu propisima direktive EU br. 2014/68/EU [N3], koja je usvojena 2014 god, koja se delimično primenjuje od 2015 god. a u potpunosti od 2016 god. Ova direktiva se odnosi na planiranje i projektovanje, proizvodnju i ocenjivanje usaglašenosti opreme pod pritiskom i postrojenja pod pritiskom većim od 0,5 bar. Prethodna direktiva 97/23/EU je važila 17 godina, a promenjena je najviše zbog klasifikacije grupa fluida (1 i 2, videti kasnije) i usklađivanja sa Regulativom CLP-1272/2008 za klasifikaciju, obeležavanje i pakovanje opasnih materija. U bivšoj Jugoslaviji godinama je bio raširen u upotrebi Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom [N21], koji su podržavali standardi grupe JUS M.E2. ... za proračun komponenti na bazi DIN standarda.

Direktiva 2014/68/EU je od esencijalne važnosti za dizajn konstrukcije novih razmenjivača toplote, dok za razmenjivače toplote proizvedene pod drugim propisima, postoji veći broj tumačenja i preporuka, kako ih treba prevesti i uskladiti sa važećom regulativom. Direktiva u regulativnom delu pored opštih odredbi sadrži i propisane obaveze proizvođača, klasifikaciju PED opreme, kao i aktivnosti i obaveze tela za ocenjivanje usaglašenosti (TOU), dok u tehničkom delu direktive u nekoliko priloga su navedene mere bezbednosti, postupci u toku projektovanja i proizvodnje, kao i dijagrami i moduli za ocenu usaglašenosti. Veoma dobar pregled direktive i drugih propisa u datom trenutku, kao i primera proračuna PED opreme, dat je u knjizi prof. Bognera i ost. – Propisi o opremi pod pritiskom [86] u izdanju ETA, Beograd 2013 god. Takođe postoje izveštaji o postupcima primene novih EN propisa u oblasti PED opreme sa raznih seminara i konferencija organizovanih od strane stručnih organizacija ili ministarstava vlade, kao i pokrenut sajt Ministarstva privrede, [www.tehnis.privreda.gov.rs](http://www.tehnis.privreda.gov.rs). Ipak sve to nije dovoljno za rutinsku primenu EN regulative i naročito standarda, koji nisu dovoljno jezički prilagođeni niti praktično objašnjeni za primenu u praksi.

Broj i uticaj institucionalne regulative je u intenzivnom porastu, bez obzira na Nove pristupe, harmonizaciju propisa, bezbednost i zaštitu okoline u cilju slobode tržišta, već sada je učešće regulative veće od tehničke kreativnosti, a "tumači propisa" su sve zaposleniji, da bi se izbegla opasnost da nešto nije uzeto u obzir ili nepravilno primenjeno. Naročito je nepovoljna tendencija malih izmena u novim izdanjima, što zahteva neprekidno praćenje propisa i gomilanje arhiva. Pri pisanju ove knjige bilo je nemoguće "pohvatati" sve važeće propise u datom trenutku, zato se pored propisa redovno navodi godina izdanja uz generalno upozorenje da pre primene propisa, isti se moraju ažurirati prema najnovijoj verziji. Zbog značaja PED regulative u proizvodnji razmenjivača toplote, u daljem delu teksta će se razmotriti osnovna EN direktiva za opremu pod pritiskom.

### 3.1.1. Osnovne odredbe regulativnog dela direktive PED opreme

Direktiva 2014/68/EU se koristi i primenjuje za projektovanje, proizvodnju i ocenjivanje usaglašenosti opreme i sklopova pod pritiskom pod dejstvom najvećeg dozvoljenog pritiska PS iznad 0,5 bara (*nadpritisak* - tzv. *manometarski pritisak*). Direktiva važi i za opremu pod dejstvom plamena (kotlovi i sl.), ali su za nju predviđeni posebni standardi. Direktiva se ne primenjuje na jednostavne posude pod pritiskom (direktiva br. 2014/29/EU), što se odnosi na serijski proizvedene zavarene posude unutrašnjeg nadpritiska iznad 0,5 bara, namenjene za vazduh ili azot, a koje nisu izložene dejstvu plamena. Takođe direktiva se ne primenjuje za niz specifične opreme, za koju važe posebni tehnički propisi, kao i na posude za tečnost sa pritiskom gasa iznad tečnosti ispod 0,5 bara (detaljnije u direktivi).

Oprema pod pritiskom, podrazumeva i obuhvata sledeće: posude, cevovode, sigurnosne uređaje i pribor pod pritiskom, kao i elemente pripojene delovima ove opreme, kao što su prirubnice, spojnice, oslonci, uške za nošenje itd. Posuda znači zatvoren prostor projektovan i izrađen da sadrži fluide pod pritiskom, a koji može sadržati posebne podprostore (komore) i priključke za vezu s drugom opremom. Prema tome, razmenjivači toplote se mogu svrstati u posude. Sigurnosni uređaji su predviđeni za zaštitu opreme pod pritiskom od prekoračenja dozvoljenih vrednosti pritiska, kao što su sigurnosni ventili, presostati, termostati, regulatori itd. Pribor pod pritiskom su uređaji koji imaju kućišta pod pritiskom. Pritisak je relativni pritisak u odnosu na atmosferski pritisak (razlika *apsolutnog i atmosferskog pritiska*), prema tome vakuum ima negativnu vrednost pritiska. *Najveći dozvoljeni pritisak* PS znači najveći pritisak za koji je oprema projektovana, njega utvrđuje proizvođač na mestu postavljanja sigurnosnog uređaja ili najvišem mestu opreme. Ostale definicije parametara su navedene na mestu proračuna ili u priložima knjige.

Važne su odrednice subjekata u prometu proizvoda, tako je "*proizvođač*" svako fizičko ili pravno lice koje proizvodi opremu ili sklop pod pritiskom pod svojim imenom ili trgovačkim znakom ili ih koristi za sopstvene potrebe. *Ovlašćeni predstavnik* je fizičko ili pravno lice koje je proizvođač pismeno ovlastio da određene zadatke obavlja u njegovo ime, *uvoznik* je lice koje opremu pod

pritiskom stavlja na tržište zemlje ili EU, dok je *distributer* lice u lancu prometa koje nije ni proizvođač ni uvoznik, a proizvod stavlja na raspolaganje tržištu.

Proizvođač ima obavezu da PED opremu proizvede u skladu sa osnovnim sigurnosnim zahtevima iz priloga Direktive ili po dobroj inženjerskoj praksi, prema propisanoj tehničkoj dokumentaciji i proceduri TOU i da na takav proizvod istakne znak CE. Proizvođač čuva tehničku dokumentaciju i EU izjavu o usaglašenosti najmanje deset godina od dana stavljanja proizvoda u promet. Radi identifikacije proizvoda ili njegovog dela, proizvođač je obavezan utvrditi jedinstveni broj i svoje registrovano ime i dostupnu adresu, a uz proizvod dostaviti pisano uputstvo za upotrebu i bezbednosne podatke. Ovlašćeni predstavnik mora prema ugovoru raspolagati potrebnom dokumentacijom, uvoznik ne sme stavljati u promet PED opremu bez dokaza o usaglašenosti i potrebne dokumentacije razumljive korisniku, dok distributeri pored raspolaganja dokumentacijom o proizvodu, moraju voditi računa o uslovima skladištenja i transporta proizvoda. Potrebno je napomenuti da ukoliko uvoznik ili distributer PED opremu plasiraju pod svojim imenom ili znakom, onda se smatraju proizvođačem.

PED proizvodi, proizvedeni u skladu harmonizovanim normama EU, smatraju se usaglašenim s osnovnim sigurnosnim zahtevima (iz Priloga direktive). Isto se odnosi i na upotrebljene materijale ako imaju evropska odobrenja.

Kategorija opreme pod pritiskom se utvrđuje na bazi rastućeg nivoa opasnosti utvrđenog na bazi fluida koji se nalazi u PED opremi, vrsti opreme prema dejstvu plamena i fizičkim uslovima fluida u opremi (pritisak, zapremina i proizvod pritiska i zapremine) Prema navedenim zahtevima fluidi se klasifikuju u dve grupe: 1 - opasni fluidi, 2 - svi ostali fluidi.

### **Grupa 1 – Opasni fluidi**

To je grupa fluida, supstanci i smesa klasifikovane kao opasni fluidi prema fizičkoj opasnosti i nivou opasnosti za zdravlje, a mogu biti eksplozivni, zapaljivi, otrovni ili oksidirajući, prema Uredbi EZ br. 1272/2008 [N6], a za Srbiju u Spisku klasifikovanih supstanci [N22], (SG 22-2020), raspoređenih u 17 razreda i to:

- Nestabilni eksplozivi i eksplozivi iz odeljaka 1.1., 1.2., 1.3., 1.4. i 1.5.;
- Zapaljivi gasovi kategorije I. i II.;
- Oksidirajući gasovi kategorije I.;
- Zapaljive tečnosti kategorije I. i II.;
- Zapaljive tečnosti kategorije III. pri najvišoj dozvoljenoj temperatura iznad tačke zapaljivosti;
- Zapaljive čvrste materije kategorije I. i II.;
- Samoreagirajuće materije i smese tipa od A do F;
- Samozapaljive (piroforne) tečnosti kategorije I.;
- Samozapaljive čvrste materije kategorije I.;
- Materije i smese koje u dodiru s vodom otpuštaju zapaljive gasove kategorije I., II. i III.;
- Oksidirajuće tečnosti kategorije I., II. i III.;
- Oksidirajuće čvrste materije kategorije I., II. i III.;

- Organski peroksidi (R-O-O-R, R slobodni radikali) tipa od A do F;
- Akutna oralna toksičnost, kategorije I. i II.;
- Akutna dermalna toksičnost, kategorije I. i II.;
- Akutna inhalacijska toksičnost, kategorije I., II. i III.;
- Specifična toksičnost za ciljane organe – jednokratno izlaganje, kategorije I.

### **Grupa 2 – Svi ostali fluidi koji nisu svrstani u grupu 1.**

Ako su posuda sastoji od više komora, klasifikacija se vrši prema komori koja ima najvišu kategoriju, a ako posuda sadrži više fluida, klasifikacija se vrši na bazi fluida koji zahteva najvišu kategoriju.

#### **Postupci usaglašenosti**

Postupci ocenjivanja usaglašenosti elemenata PED opreme se utvrđuju prema kategoriji opreme (I – IV) i to prema sledećim modulima:

Kategorija I = Modul A;

Kategorija II = Moduli: A2, D1, E1;

Kategorija III = Moduli: B1 + D, B1 + F, B2 + E, B2 + C2, H;

Kategorija IV = Moduli B2 + D, B2 + F, G, H1;

Objašnjenje i postupci ocene usaglašenosti utvrđeni su u Prilozima (videti dalje).

Prema kategoriji opreme proizvođač može birati predviđene module usaglašenosti ili izabrati modul više kategorije. Sprovođenje modula se obavlja uz kontrolu tela za ocenu usaglašenosti (TOU), a upotrebljeni materijali moraju biti izrađeni prema harmonizovanim standardima ili imati posebno Evropsko odobrenje za materijale.

#### **Procedure usaglašenosti, deklaracija usaglašenosti i znak CE**

Procedure registracije i rada tela za ocenjivanje usaglašenosti su mahom pravna pitanja, koja moraju biti ažurna u periodu izrade PED opreme, iz kojih proističe završna deklaracija usaglašenosti i ispunjavanje uslova za postavljanje znaka CE.

EU izjavom o usaglašenosti ili deklaracijom o usaglašenosti proizvođač potvrđuje da su ispunjeni osnovni zahtevi bezbednosti definisani u Prilozima, prema formi obrasca iz Priloga. Deklaracija mora biti na jeziku zemlje plasmana opreme PED.

Oznaka CE čiji su detalji izgleda i veličine propisani Uredbom EZ 765-2008 [N7], mora biti čitljiva i neizbrisiva, a stavlja se na vidljivo mesto opreme ili po potrebi i na komponente opreme. Iza oznake CE se nalazi identifikacioni broj TOU ako je ono uključeno u fazu upravljanjem proizvodnje. Oznaka CE se mora postaviti pre nego što je PED oprema plasirana na tržište.

### **3.1.2. Tehnički prilozi uz direktivu PED opreme**

Sastavni deo Direktive 2014/68/EU za PED opremu su Prilozi u kojima su dati tehnički detalji za realizaciju pojedinih zahteva iz normativnog dela Direktive.

#### **A. Prilog I – Osnovni sigurnosni zahtevi**

Ovo je ključni i obavezni deo Direktive. Proizvođač je dužan analizirati opasnosti i rizike koji se odnose na PED opremu, a posledice su dejstva pritiska, dok projektovanje i izrada opreme mora uzeti u obzir sprovedenu analizu. Prilikom izbora konstrukcije opreme proizvođač primenjuje sledeća načela:

- Eliminacija ili umanjenje predviđenih opasnosti u najvećoj meri;
- Primena mera zaštite za opasnosti koje se ne mogu otkloniti;
- Navedi opasnosti koje nisu otklonjene ali se mogu otkloniti pri ugradnji;

Ako postoji mogućnost pogrešne upotrebe opreme pri ugradnji ili eksploataciji, ona mora biti onemogućena, ili ako to nije moguće sprovesti, onda navedena u uputstvu za upotrebu ili znakom upozorenja na opremi.

#### **a) Osnovna pravila pri projektovanju**

Pri projektovanju opreme pod pritiskom potrebno je uzeti sve faktore kako bi se osigurala njena bezbednost u periodu upotrebe opreme. Osnovne mere ove zaštite su korišćenje odgovarajućeg koeficijenta sigurnosti i metoda projektovanja koje uzimaju u obzir sve relevantne načine otkaza opreme.

#### **1. Projektovanje za odgovarajuću čvrstoću materijala**

PED oprema treba biti projektovana za odgovarajuća opterećenja prema nameni u uslovima rada, pri čemu se uzimaju u obzir sledeći faktori:

- Unutrašnji odnosno spoljašnji pritisak;
- Temperatura okoline i radna temperatura;
- Statički pritisak i masa sadržaja u radnim i ispitnim uslovima;
- Opterećenja usled dejstva saobraćaja, vetra i zemljotresa;
- Sile i momenti kao reakcije od oslonaca, priključaka, cevovoda itd.;
- Korozija i erozija, dejstvo zamora materijala itd.;
- Razlaganje nestabilnih fluida.

Uzimaju se u obzir razna istovremena opterećenja i verovatnoća njihovog dejstva.

Čvrstoća materijala se uzima prema proračunskoj ili eksperimentalnim metodama, posebno za slučaj ako je proizvod PS·V<6000 bar·L, ili PS·DN<3000 bar.

#### **Proračunska metoda projektovanja**

##### **a) Opterećenja od pritiska**

Dozvoljena opterećenja PED opreme su ograničena razumno predvidljivom otkazu u radnim uslovima. Stoga se primenjuju koeficijenti sigurnosti koji proizilaze iz proizvodnje, stvarnih uslova rada, napona, metoda proračuna i karakteristika i ponašanja materijala. To se postiže na jedan (ili kombinacijom) od sledećih načina projektovanja, primenom formula, analitičkih postupaka ili mehanikom loma, o čemu će biti više reči u daljem tekstu ovog odeljka.

##### **b) Otpornost (izdržljivost)**

Pri projektovanju treba koristiti proračune za postizanje odgovarajuće otpornosti ili izdržljivosti opreme pod pritiskom, pri čemu proračunski pritisak ne sme biti manji od najvećeg dozvoljenog pritiska, za pregradni zid komora posude merodavan je najveći pritisak jedne u odnosu na najmanji pritisak susedne komore. Potrebno je uzeti u obzir i uticaj temperature na granice sigurnosti i koncentracija napona.

Karakteristike materijala moraju biti dokumentovane. Čvrstoću materijala određuje granica razvlačenja na proračunskoj temperaturi ili granica 0,2% odnosno 1,0% trajne deformacije. Značajne su sledeće karakteristike materijala: zatezna čvrstoća, čvrstoća na puzanje, zamor materijala, Jangov modul (modul elastičnosti), energija loma savijanjem, udarna žilavost, faktor zavarenog spoja i sl.

### c) Stabilnost

Ako izračunata debljina zida komponente ne obezbeđuje stabilnost konstrukcije, potrebno je preduzeti odgovarajuće mere, radi rizika u transportu i rukovanju.

#### Projektovanje eksperimentalnom metodom

Projektovanje se može izvesti ispitivanjem reprezentovanog uzorka, postupkom ispitivanja koji je prihvaćen od tela za ocenjivanje usaglašenosti (TOU), pri čemu osnovne mere opreme i karakteristike materijala se moraju utvrditi pre početka ispitivanja. Programom ispitivanja utvrđuje se izdržljivost na pritisak odsustvom popuštanja konstrukcije i deformacija izvan dozvoljenih vrednosti, zatim u slučaju rizika od puzanja ili zamora merenjem vremena rada na određenoj temperaturi ili broja ciklusa na određenom nivou opterećenja ili drugih uslova po zahtevu.

#### **2. Mere za bezbedan rad i rukovanje**

Korišćenje opreme pod pritiskom mora biti bezbedno u odnosu na predvidljiv rizik, a posebna upozorenja treba predvideti za sledeće situacije: uključenje i isključenje opreme, ispuštanje sigurnosnih i rasteretnih uređaja, opremi koja sprečava fizički pristup dok je PED oprema pod dejstvom pritiska ili vakuma, dejstvu visokih površinskih temperatura i sl. Oprema koja ima otvore za reviziju mora imati zaštitu ili upozorenje od otvaranja, ako je opasno dejstvo fluida od temperature ili pritiska.

#### **3. Način ispitivanja**

PED oprema treba biti tako projektovana da je moguće izvesti potrebna ispitivanja radi bezbednosti opreme, a ako sve komponente nisu dostupne za ispitivanje, onda se konstruktivnim rešenjem mora obezbediti pristup njima, npr. razdvajanjem, revizionim otvorima i sl., ili na drugi način ako otvaranje nije moguće.

#### **4. Način pražnjenja i odzračivanja**

Pražnjenje i odzračivanje PED opreme mora biti predviđeno postupkom da se izbegnu štetna dejstva, kao što su: hidraulični udar, implozija, korozija ili nekontrolisane hemijske reakcije. Ove mere moraju omogućiti bezbedan postupak čišćenja, inspekcije ili održavanja u toku eksploatacije.

#### **5. Korozija ili drugi hemijski uticaji**

Osiguranje od korozije i drugih hemijskih uticaja se obezbeđuje potrebnim dodatkom debljine materijala.

#### **6. Habanje**

Ukoliko postoji mogućnost erozije ili abrazije, projektom se mora predvideti dodatak debljine materijala ili upotreba zaštitnih obloga, prevlaka ili zamena delova koji su usled dejstva erozije i abrazije oštećeni, što se navodi u uputstvima.

#### **7. Sklopovi**

Ukoliko postoje sklopovi koji se sastavljaju, isti moraju biti pogodne konstrukcije i obezbeđeni za ispravno povezivanje (npr. sklop omotača i registra razmenjivača).

#### **8. Postupci za punjenje i pražnjenje opreme**

Projektom PED opreme treba predvideti armaturu ili priključke za punjenje i pražnjenje fluida. Pri punjenju moraju se predvideti mere zaštite, naročito u slučaju prepunjavanja ili porasta pritiska iznad dozvoljenog, a pri pražnjenju nekontrolisani odvod fluida. U oba slučaja priključci moraju biti bezbedni i pouzdani.



## **9. Zaštita od prekoračenja dozvoljenih graničnih vrednosti**

Ukoliko je u toku rada PED opreme moguće prekoračenje dozvoljenih graničnih vrednosti (npr. pritiska ili temperature) ista mora imati ugrađene uređaje za zaštitu ili priključke za zaštitu. Zaštitni uređaji su sigurnosni pribor, indikatori ili alarmi koji se aktiviraju u slučaju prekoračenja graničnih vrednosti u opremi.

## **10. Sigurnosni uređaji**

Sigurnosni pribor, prema projektu, mora biti pouzdan i namenjen za tu funkciju.

Ovaj pribor se posebno održava i periodično ispituje, a mora biti bezbedan od otkaza u radu i da ima samodijagnostiku kvara.

Uređaji za ograničenje pritiska moraju obezbediti PED opremu od dejstva trajnog prekoračenja pritiska. Međutim, projektom može biti dozvoljeno kratkotrajno prekoračenje dozvoljenog pritiska, pre aktiviranja zaštitnog uređaja.

Uređaji (instrumenti) za praćenje temperature opreme u toku procesa, moraju imati odgovarajuće vreme odziva u skladu s funkcijom merenja.

## **11. Spoljnji požar**

Prema potrebi, PED oprema može imati pribor ili priključke za taj pribor, u zavisnosti od njene namene, radi ograničenja štete od spoljašnjeg požara.

### **b) Proizvodnja**

Proizvodnja je skup svih aktivnosti na izradi i integritetu proizvoda, naročito:

#### **1. Proizvodni postupci**

Proizvođač je dužan da sprovede projektom predviđene postupke u toku izrade PED proizvoda, koji obuhvataju operacije pripreme izrade komponenti opreme koji bi mogli štetno uticati na mehanička svojstva, kao što su npr. obaranje ivica ili priprema za zavarivanje. Nerastavljivi spojevi moraju biti izvedeni pod kontrolom odgovarajućeg kvalifikovanog osoblja, a za opremu II, III i IV kategorije pod kontrolom i odobrenjem TOU ili imenovanih tela za kontrolu tih spojeva. Ispitivanje bez razaranja (IBR) nerastavljivih spojeva obavlja kvalifikovano osoblje, a za opremu kategorije III i IV kvalifikovanost ispitivača mora da odobri imenovano telo kontrole nerastavljivih spojeva. Termička obrada komponenti se predviđa u slučaju da postupkom obrade može doći do bezbednosne promene svojstava materijala. Sledljivost je obavezna u toku proizvodnje PED opreme, čime se omogućuje identifikacija materijala od prijema do završnog ispitivanja.

#### **2. Završno ocenjivanje**

Završno ocenjivanje PED proizvoda se sprovodi u tri koraka. Završna kontrola (inspekcija) podrazumeva vizuelni pregled i proveru priloženih dokumenata, uzimajući u obzir kontrolu u toku izrade ( za pozicije koje su zatvorene za pregled). Ispitivanje pritiskom, podrazumeva hidrostatičko ispitivanje fluidom pod pritiskom navedenim u dokumentaciji, ili za serijski proizvedenu opremu na statističkoj osnovi. Ukoliko hidrostatičko ispitivanje nije moguće, primenjuju se druge priznate metode. Kontrola sigurnosnih uređaja je završni korak ocenjivanja, ako su isti predviđeni u sklopu PED opreme.

#### **3. Oznake i natpisi**

Osim oznake CE, moraju se navesti i sledeći podaci:

a) za svu opremu pod pritiskom

- godina proizvodnje,
- identifikacioni podaci PED opreme, kao: tip, serija, serijski ili fabrički broj,
- bitni (najveći i najmanji) radni parametri (pritisak, temperatura i sl.).

b) dodatni parametri, zavisno od vrste PED opreme (bezbednost ugradnje, održavanje, periodični pregledi u toku rada itd.), kao što su:

- zapremina V, PED opreme u litrima (L),
- nazivni prečnik priključnih cevovoda DN,
- ispitni pritisak PT u barima (bar) i datum ispitivanja pritiskom,
- podešeni pritisak sigurnosnih uređaja u barima,
- izlazna snaga opreme pod pritiskom u kW,
- priključni napon V u voltima,
- osnovna namena,
- koeficijent punjenja u kg/L,
- najveća masa punjenja u kg,
- masa prazne posude u kg,
- grupa fluida.

c) prema potrebi – upozorenja na poznatu nepravilnu upotrebu za svu opremu pod pritiskom

#### **4. Način postavljanja oznaka i natpisa**

Podaci navedeni pod a), b) i c) moraju se postaviti na pločici čvrsto postavljenoj na opremi, izuzev u slučaju izbegavanja ponavljanja oznaka (npr. za cevovode istog sklopa) ili je PED posuda malih dimenzija, tada su dozvoljene nalepnice.

#### **5. Uputstva za rad**

Kada se oprema pod pritiskom stavlja na tržište, mora imati odgovarajuća uputstva za korisnike sa potrebnim sigurnosnim podacima, koja se odnose na sledeće:

- montažu, uključujući sklanjanje delova opreme,
- puštanje u rad,
- upotrebu,
- održavanje, uključujući provere od strane korisnika.

Uputstva moraju da obuhvataju podatke koji se nalaze na opremi pod pritiskom, osim identifikacije i serije, a gde je primereno dokumentima, crtežima i šemama.

Uputstva moraju sadržati i opasnosti prilikom nepravilne upotrebe opreme.

#### **c) Materijali**

Materijali PED opreme moraju biti izdržljivi u predviđenom veku trajanja, radnim i ispitnim uslovima, zatim otporni na hemijsko dejstvo fluida, krti lom ili starenje materijala. Materijal mora imati dokumentovana svojstva prema harmonizovanim standardima ili evropskom odobrenju, dok za opremu III i IV kategorije, odobrenje za upotrebu materijala mora dati imenovano telo. Upotrebljeni materijal mora biti u skladu sa specifikacijom materijala. Za glavne delove PED opreme II, III i IV kategorije, proizvođač mora izdati sertifikat kontrole materijala, a to može biti dokument od proizvođača materijala ako je u sistemu osiguranja kvaliteta, potvrđen od strane odgovarajućeg kontrolnog tela.

**d) Posebni zahtevi za PED opremu izloženu plamenu ili riziku od pregrevanja**

Ova PED oprema obuhvata parne kotlove pod dejstvom plamena, vrelvodne kotlove, pregrejače i dogrejače, kotlove za spaljivanje otpada, elektrokotlove sa uronjenim grejačima itd., kao i procesnu opremu za zagrevanje i PED opremu za preradu hrane. Ova PED oprema se projektuje i izrađuje tako da se izbegne rizik gubitka sadržaja koji se zagreva i dođe do pregrevanja. Za tu svrhu potrebno je preduzeti posebne mere zaštite kao što su: ograničenje radnih parametara dovoda i odvoda toplote i održavanje nivoa tečnosti radi sprečavanja rizika od pregrevanja, obezbeđenja mesta za uzimanje uzoraka radi kontrole taloga ili korozije, kao i mere za sprečavanje štete od pojave taloga, omogućavanje odvođenja toplote nakon prestanka rada opreme i preduzimanje mera za izbegavanje akumulacije zapaljivih smesa ili pojave tzv. povratnog plamena.

**e) Posebne mere za cevovode**

Odnosi se na cevovode koji su pod pritiskom, radi sprečavanja visokog opterećenja usled izduženja, na prirubnicama, priključcima, osloncima itd. zatim zaštita od hidrauličnog udara, korozije, kondenzacije gasova, zamora materijala, vibracija i turbulencije itd. U slučaju da su u cevovodu fluidi grupe 1, potrebno je predvideti zaštitu od prosipanja i nekontrolisanog pražnjenja. Za podzemne trase cevovoda potrebno je predvideti označavanje, radi održavanja i inspekcije.

Ove mere se navode radi kontinuiteta priloga, a nisu potrebne za PED opremu.

**f) Posebni kvantitativni zahtevi za određenu PED opremu**

Ovi zahtevi važe kao opšte pravilo. Ne primenjuju se u slučaju nepozivanja na određene materijale i ne primenjivanja harmonizovanih standarda, u tom slučaju proizvođač dokazuje da je postignut zahtevani nivo bezbednosti.

**a) Označavanje dozvoljenih napona**

- $R_{e/t}$  granica razvlačenja (napon tečenja) na proračunskoj temperaturi za:
  - gornja granica razvlačenja (ako imaju gornju i donju granicu);
  - 1,0 % granice razvlačenja za austenitne čelike i nelegirani aluminijum;
  - 0,2 % granice razvlačenja u drugim slučajevima.
- $R_{m/20}$  najmanja zatezna čvrstoća na temperaturi od 20 °C.
- $R_{m/t}$  zatezna čvrstoća na proračunskoj temperaturi.

Za dozvoljeni glavni membranski napon (membrana je oblik posude, kao sfera, cilindar i sl., male debljine zida prema drugim dimenzijama) u slučaju statičkog opterećenja i temperatura koje ne izazivaju puzanje, granične vrednosti su:

- za feritne čelike, koji uključuju normalizovani čelik, a isključuju sitnozrnasti čelik, uzima se  $2/3 R_{e/t}$  i  $5/12 R_{m/20}$ ,
- za austenitne čelike, ako njegovo izduženje prelazi 30%, uzima  $2/3 R_{e/t}$  ili alternativno ako izduženje prelazi 35%, uzima se  $5/6 R_{e/t}$  i  $1/3 R_{m/t}$ ,
- u slučaju aluminijuma, uzima se  $2/3 R_{e/t}$ , a za legure aluminijuma isključujući gašenjem očvrstnute legure (percipacija), uzima se  $2/3 R_{e/t}$  i  $5/12 R_{m/20}$ .

**b) Koeficijent zavarenog spoja ne sme prelaziti sledeće vrednosti:**

- 1, za opremu koja se ispituje razaranjem, i za IBR serije zavarenih spojeva,
- 0,85, za opremu IBR (ispitivanje bez razaranja) na slučajnom uzorku,

- 0,7, za opremu koja se ispituje samo vizuelnom kontrolom.
- c) Uređaji za ograničenje pritiska namenjeni PED opremi  
Ovi uređaji dozvoljavaju trenutni porast pritiska do 10% dozvoljenog pritiska.
- d) Hidrostatički ispitni pritisak
  - 1,25 koeficijent povećanja dozvoljenog pritiska pri dozvoljenoj temperaturi,
  - 1,43 koeficijent povećanja dozvoljenog pritiska,
 Usvojeni hidrostatički pritisak je veći od dve navedene vrednosti.
- e) Karakteristike (svojstva) materijala

Ako nema drugih kriterijuma, smatra se da je čelik dovoljno žilav pod sledećim uslovima. Ako pri ispitivanju zatezne čvrstoće standardnim postupkom njegovo izduženje nije manje od 14%, a udarna energija loma izmerena na ispitnom uzorku prema EN ISO 148-1 Charpy V-test, nije manja od 27 J, na temperaturi najviše na 20 °C, ali da nije veća od najmanje predviđene radne temperature.

### B. Prilog II – Dijagrami za ocenjivanje usaglašenosti

Kategorija i moduli postupka usaglašenosti definisani su u normativnom dela Direktive, oni se nalaze u sledećem međusobnom odnosu:

Kategorija I = Modul A;

Kategorija II = Moduli: A2, D1, E1;

Kategorija III = Moduli: B1 + D, B1 + F, B2 + E, B2 + C2, H;

Kategorija IV = Moduli B2 + D, B2 + F, G, H1;

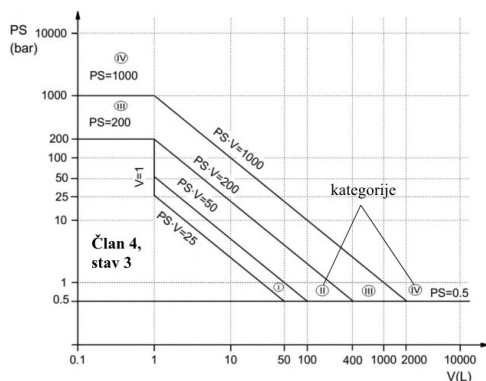
gde su modul B1 odnosi na projektovanje, a modul B2 na proizvodnju.

Sigurnosni pribor je klasifikovan u kategoriju IV. Međutim, izuzetno se može klasifikovati i u kategoriju opreme za koju je proizveden.

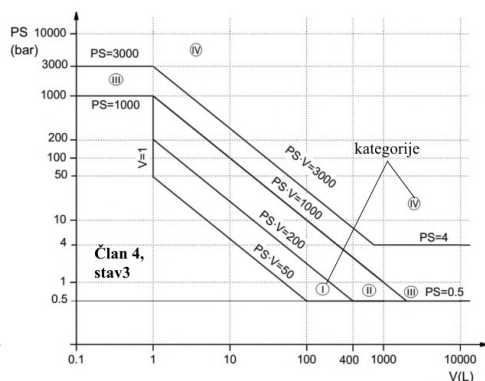
Pomoćni uređaji PED opreme se klasifikuju prema najvećem dozvoljenom pritisku PS, zapremini V ili nazivnoj veličini DN, ili prema namenskoj grupi fluida.

Dijagrami za ocenjivanje usaglašenosti u zavisnosti od najvećeg dozvoljenog pritiska (PS) i zapremine (V) formiraju područja kategorije opreme.

Utvrđeni su sledeći dijagrami za posude definisane u članu 4 Direktive:



Sl. 3.3. Dijagram 1, PED opreme



Sl. 3.4. Dijagram 2, PED opreme

**Dijagram 1.** Za gasove, utečnjene gasove, pare i tečnosti čiji je pritisak pare na najvećoj temperaturi veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u sledećim granicama:

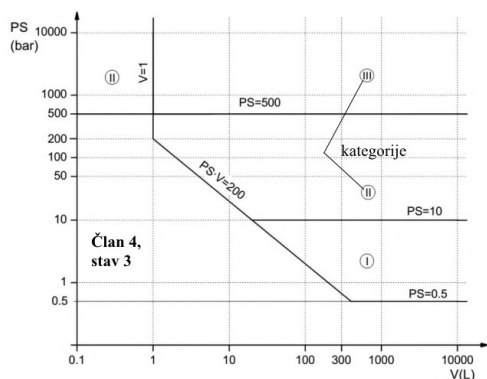
grupa fluida – 1, zapremina veća od 1 L, proizvod  $PS \cdot V > 25 \text{ bar} \cdot \text{L}$ , ili pritisak  $PS > 200 \text{ bara}$ . (član 4, stav 3), slika Sl. 3.3.

**Dijagram 2.** Za gasove, utečnjene gasove, pare i tečnosti čiji je pritisak pare na najvećoj temperaturi veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u sledećim granicama:

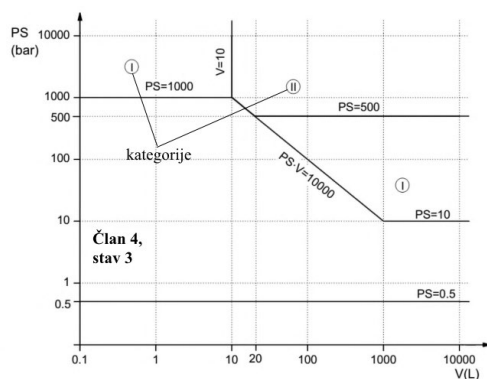
grupa fluida – 2, zapremina veća od 1 L, proizvod  $PS \cdot V > 50 \text{ bar} \cdot \text{L}$ , ili pritisak  $PS > 1000 \text{ bara}$ ., kao i prenosivi aparati za gašenje požara i boce na aparatima za disanje (min. kategorija III), slika Sl. 3.4.

**Dijagram 3.** Za tečnosti čiji je pritisak pare na najvećoj temperaturi veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u granicama:

grupa fluida – 1, zapremina veća od 1 L, proizvod  $PS \cdot V > 200 \text{ bar} \cdot \text{L}$ , ili pritisak  $PS > 500 \text{ bara}$ . (član 4, stav 3), slika Sl. 3.5.



Sl. 3.5. Dijagram 3, PED opreme

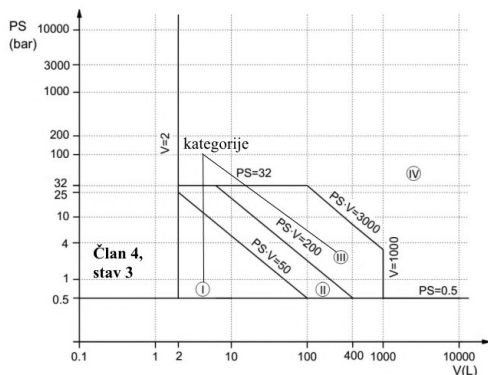


Sl. 3.6. Dijagram 4, PED opreme

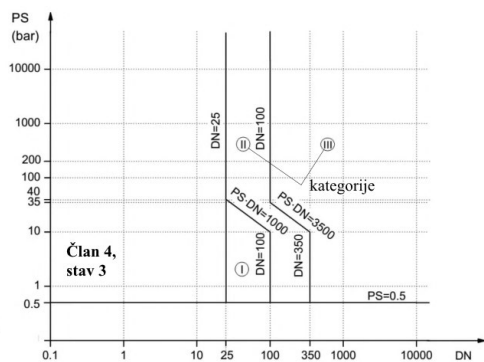
**Dijagram 4.** Za tečnosti čiji je pritisak pare na najvećoj temperaturi veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u granicama: grupa fluida – 2, pritiska  $PS > 10 \text{ bara}$ , proizvod  $PS \cdot V > 10000 \text{ bar} \cdot \text{L}$ , ili pritisak  $PS > 1000 \text{ bara}$ . (oprema za toplu vodu), slika Sl. 3.6.

**Dijagram 5.** PED oprema pod dejstvom plamena ili rizikom od pregrevanja, namenjena za proizvodnju pare ili vrele vode, na temperaturama iznad  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  i zapremine  $V$  veće od 2 L i lonci za kuvanje, slika Sl. 3.7.

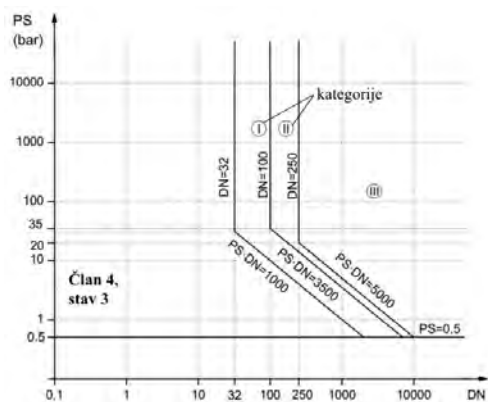
**Dijagram 6.** Cevovodi za gasove, utečnjene gasove i tečnosti čiji je pritisak pare na najvećoj temperaturi veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u sledećim granicama: grupa fluida – 1, DN veće od 25, slika Sl. 3.8.



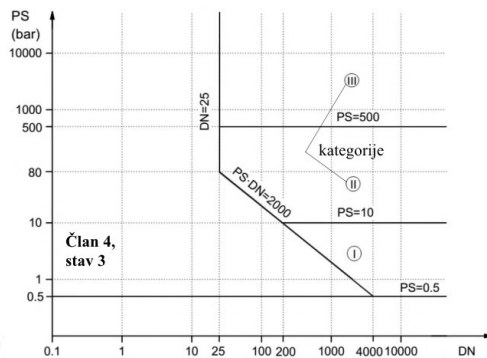
Sl. 3.7. Dijagram 5, PED opreme



Sl. 3.8. Dijagram 6, PED opreme



Sl. 3.9. Dijagram 7, PED opreme



Sl. 3.10. Dijagram 8, PED opreme

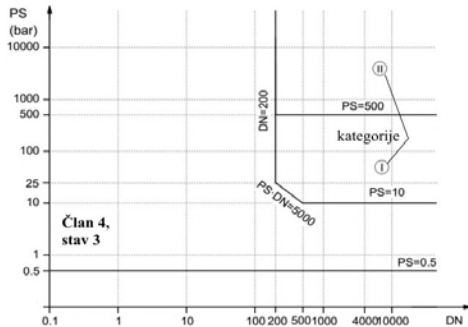
Dijagram 7. Cevovodi za gasove, utečnjene gasove i tečnosti čiji je pritisak pare na najvećoj temperaturi veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u sledećim granicama:

grupa fluida – 2,  $DN > 32$ , proizvod  $PS \cdot DN > 1000$  bara, slika Sl. 3.9.

Dijagram 8. Cevovodi za tečnosti kod kojih pritisak na najvećoj dozvoljenoj temperaturi nije veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u sledećim granicama:

grupa fluida – 1,  $DN > 25$ , proizvod  $PS \cdot DN > 2000$  bara, slika Sl. 3.10.

Dijagram 9. Cevovodi za tečnosti kod kojih pritisak na najvećoj dozvoljenoj temperaturi nije veći od 0,5 bara iznad standardnog atmosferskog pritiska (1013 mbar) u sledećim granicama: grupa fluida – 2,  $PS > 10$  bara,  $DN > 200$ , proizvod  $PS \cdot DN > 5000$  bara, slika Sl. 3.11.



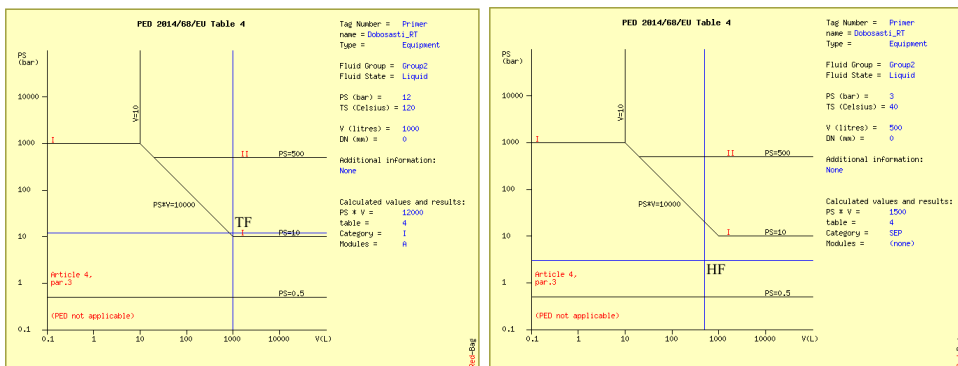
Sl. 3.11. Dijagram 9, PED opreme

Treba napomenuti, da postoji dosta izuzetaka, gde na primer za neke uslove se dobija kategorija niža po dijagramu od one koju treba usvojiti, ili za neke uslove se fiksno može odrediti kategorija. Zato je potrebno proveriti pre konačnog usvajanja kategorije opreme važeću verziju PED Direktive.

Određivanje kategorije opreme pod pritiskom na bazi izabranih fluida i opreme, vrši se na osnovu položaja tačke izbora na odgovarajućem dijagramu, što nije dovoljno brza niti ugodna procedura. Za manuelan rad, neophodno je imati blanko sve dijagrame PED opreme, zatim odrediti grupe dijagrama prema vrsti PED opreme i izabrati dijagram na bazi zadatih parametara pa tek onda ucrtati linije ordinata (vertikalno je pritisak, a horizontalno prema vrsti opreme). Srećom, postoje na internetu slobodni i jednostavni programi za određivanje kategorije i crtanje odgovarajućeg dijagrama, kao što je inženjerski portal Red Bag, ([www.red-bag.com](http://www.red-bag.com)). Potrebno je zadati sledeće podatke: vrsta opreme, grupa fluida, dozvoljen pritisak i temperatura i zapreminu prostora posude (i eventualno dodatne podatke PED opreme), onlajn se dobijaju rezultati, kao u sledećem primeru.

**Primer 3.1.** Odrediti dijagram ispitivanja usaglašenosti i kategoriju sledeće opreme: Dobošasti RT, kao topliji fluid struji ulje grupe 2, PS=12 bara, TS 120°C, u zapremini posude V= 1000 L, a kao hladniji fluid struji rashladna voda grupe 2, PS=3 bara, TS 40°C, u zapremini posude V= 500 L.

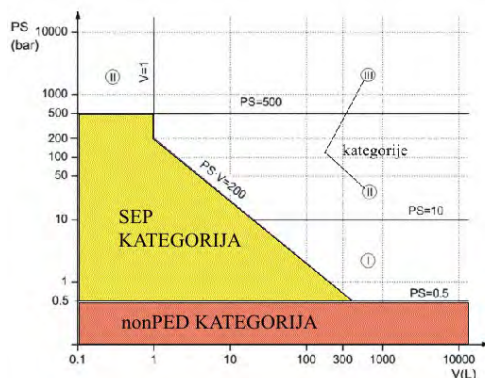
**Rešenje:** Postoje dve nezavisne zapremine izabranog RT: Za topliji fluid prema Red Bag ([www.red-bag.com](http://www.red-bag.com)), (oko cevi) iz dijagrama br. 4, Sl. 3.12. (levo) dobija se I kategorija, a za hladniji fluid (u cevi) iz dijagrama br. 4, Sl. 3.12. (desno) dobija se SEP kategorija. Za I kategoriju toplijeg fluida predviđa se ocena usaglašenosti prema Modulu A, dok za SEP kategoriju (dobra inženjerska praksa) nema modula i taj deo opreme nije posuda pod pritiskom, (detaljnije o tome videti u nastavku teksta).



Sl. 3.12. Dijagrami kategorije iz Primera 3.1. za topliji (levo) i hladniji fluid (desno)



### Komentar kategorija, SEP kategorija, nonPED oprema



**Sl. 3.13.** Područje kategorija opreme, prema dijagramu 3 (slika Sl. 3.5.)

Kategorije opreme su razvrstane po dijagramima prema izgledu opreme (D1-D4 posude, D5 kotlovi pod dejstvom plamena, D6-D9 cevovodi), agregatnom stanju i grupi fluida (gasovi ili tečnosti, grupa 1 ili grupa 2), najvećim pritiskom i proizvodom (PS·V) najvećeg pritiska i zapremine. Dijagram obuhvata kategorije (I do IV), tzv. SEP kategoriju i nonPED kategoriju, videti sl: Sl. 3.13. NonPED kategorija, oprema nije pod pritiskom, ona je ispod linije PS=0,5 bara. Preostali prostor ispod linije minPS·V PED opreme i min. kategorisanog pritiska pokriva SEP

kategorija, ili PED oprema koja se radi po "dobroj inženjerskoj praksi", eng. "SEP - Sound Engineering Practice", odnosno smernicama uz direktivu 2014/68/EU [N4], raspoloživa ver.6 iz 2020 god. Smernica se sastoji od odgovora na izabrana pitanja PED opreme, razvrstanih u 10 grupa, povezanih za član i stavku Direktive sa obrazloženjem i datumom prihvatanja. Smernica B-04 daje odgovor na pitanje – koja je vrsta PED opreme razmenjivač toplote. Odgovor je RT je posuda, a može biti cevovod (cev-u-cev) samo ako je gas hladniji fluid u KGH instalacijama. Drugi primer smernica B-19, kako posmatrati dve odvojene komore razmenjivača toplote, a odgovor je posebno, dok kategoriju posude određuje komora više kategorije.

Može se zaključiti da je oprema SEP kategorije, PED oprema i podleže postupku izrade PED opreme, ali nema nadležnost imenovanog tela, pa stoga nema deklaraciju niti se postavlja CE znak usaglašenosti. Imajući u vidu pogodnosti SEP kategorije da oprema ne podleže TOU pri izradi i eksploataciji, [Rikalović](#) predlaže da se to koristi u konstrukciji dobošastih razmenjivača toplote, ako je PS·V blizu granice SEP kategorije, a zapremina se može smanjiti i RT pređe u SEP kategoriju.

#### C. Prilog III – Postupci ocenjivanja usaglašenosti

Za svaki Modul daje se procedura ocenjivanja usaglašenosti, što neizbežno vodi ponavljanju postupka, zato se detaljnije daje procedura za Modul A, a zatim za sledeće module samo karakteristične razlike u proceduri.

##### **Modul A:** (Unutrašnja kontrola proizvodnje)

Ovim modulom proizvođač ispunjava zahteve iz Direktive, zbog čega na sopstvenu odgovornost daje izjavu da je ispunio sve zahteve iz Direktive za taj modul.

##### Tehnička dokumentacija

Proizvođač, sam ili u svojoj režiji izrađuje tehničku dokumentaciju, na osnovu koje se sprovodi ocenjivanje usaglašenosti i koja sadrži analizu i procenu rizika. Ona mora da sadrži sve elemente za proizvodnju i rad PED opreme, naročito: Tehnički

opis, sklopni crtež i radioničke crteže i šeme komponenti i podsklopova itd., opise i specifikacije za razumevanje dokumentacije, spisak harmonizovanih standarda, koji su primenjeni u dokumentaciji, kao i opis primenjenih rešenja za ispunjavanje bezbednosti iz Direktive, ako nisu primenjeni harmonizovani standardi. Kao prilog, dokumentacija mora da sadrži rezultate proračuna, izvršenih pregleda i izveštaje ispitivanja sprovedenih u toku izrade proizvoda.

#### Proizvodnja

Proizvođač, sam ili u svojoj režiji izrađuje proizvod i obezbeđuje nadzor nad izradom u skladu s tehničkom dokumentacijom i zahtevima Direktive.

#### Znak usaglašenosti (CE) i deklaracija usaglašenosti (EU izjava)

Proizvođač sam postavlja oznaku CE na proizvod i delove u slučaju potrebe, a takođe sam sastavlja deklaraciju o usaglašenosti, koju dostavlja nadležnim telima.

Na kraju ovog odeljka prikazaće se detalji znaka usaglašenosti i deklaracije.

#### Ovlašćeni predstavnik

Postavljanje znakova i deklaracije u njegovo ime i odgovornost može vršiti i ovlašćeni predstavnik, ako je to predviđeno dokumentom o ovlašćenju.

#### **Modul A2:** (Unutrašnja kontrola proizvodnje i nasumične provere PED opreme)

Ovaj modul je proširen Modul A, nasumičnom i neprijavljenom kontrolom izrade PED opreme u kome TOU proverava da li proizvođač uistinu sprovodi proceduru Direktive. Na odgovornost TOU proizvođač može postaviti njegov indent broj.

#### **Modul B:** (Pregled tipa – Tip proizvodnje B2)

Ovim modulom TOU pregleda tehničko rešenje PED opreme i da li ono ispunjava zahteve iz ove Direktive, a sastoji se od ocene primerenosti rešenja i pregledom uzorka koji predstavlja buduću proizvodnju PED opreme (dakle pre proizvodnje).

Zahtev podnosi proizvođač, imenovanom telu (TOU) po sopstvenom izboru, uz izjavu da zahtev nije podnet ni jednom drugom telu. Uz zahtev se podnosi tehnička dokumentacija (sadržaja kao Modula A) i reprezentativne uzorke za predviđenu proizvodnju. TOU može tražiti dodatne dokaze i uzorke. Ovlašćeno telo po zahtevu vrši pregled, a naročito usklađenost s dokumentacijom, upotrebene materijale, postupke spajanja i njihova odobrenja, kvalifikaciju izrade i pregleda, i itd. TOU u dogovoru s proizvođačem dostavlja preliminarni izveštaj koji obuhvata sve preduzete preglede i rezultate tih pregleda, Izveštaj može da sadrži ocenu da izabrani tip proizvodnje ispunjava ili ne ispunjava uslove iz Direktive.

Tip proizvodnje ispunjava uslove, u tom slučaju TOU mora proizvođaču da izda sertifikat o pregledu tipa-tip proizvodnje. Ovaj sertifikat važi 10 godina, bez obzira na eventualne izmene Direktive u tom periodu. Overena tehnička dokumentacija u jednom primerku se vraća proizvođaču, a drugi primerak zadržava TOU.

Tip proizvodnje ne ispunjava uslove, u tom slučaju TOU mora da odbije izdavanje sertifikata o pregledu tipa-tip proizvodnje i izda obrazloženje, na koje se prema dostavljenoj proceduri proizvođač može žaliti.

Imenovano telo neprekidno prati izmene prihvaćenih uslova i Direktive. Ukoliko odobreni tip više ne ispunjava uslove, TOU obaveštava proizvođača da li nastale promene zahtevaju dodatna ispitivanja, a proizvođač obaveštava TOU, o izmenama

koje mogu uticati na bezbednost odobrenog tipa ili valjanosti dobijenog sertifikata. Ukoliko su potrebne izmene radi se dopuna odobrenog sertifikata. Nadležno imenovano telo mora održavati korespondenciju s akreditovanim telom i drugim imenovanim telima o svim sertifikatima koje je izdalo, dopunilo ili povuklo.

**Modul B:** (Pregled tipa – projekat tipa B1)

Ovim modulom TOU pregleda tehničku dokumentaciju PED opreme i da li ona ispunjava uslove ove Direktive, bez dostavljanja uzorka.

Procedura je ista kao kod Modula - Tip proizvodnje B2, samo se isključuje uzorak.

**Modul C2:** (Usaglašenost sa tipom na osnovu unutrašnje kontrole proizvodnje PED opreme i nasumične nadzorne provere imenovanog tela)

Ovim modulom proizvođač ispunjava sve obaveze i garantuje na ličnu odgovornost da je proizvedena PED oprema u skladu s Direktivom.

Za razliku od Modula A2, u ovom modulu radi se o serijskoj proizvodnji PED opreme, za koju pre stavljanja na tržište izabrani TOU od proizvođača vrši pregled uzorka i daje ocenu da li ispunjava zahteve Direktive, a kasnije u toku rada vrši nasumičnu kontrolu proizvodnje ili uzorka. Ako ispitivanje proizvoda sprovodi TOU, proizvođač može pod odgovornošću tog tela staviti njegov indent broj. Sve ostale odredbe su veoma slične Modulu A2.

**Modul D:** (Usaglašenost sa tipom na osnovu kvaliteta proizvodnog postupka)

Proizvođač mora da sprovodi sistem upravljanja kvalitetom i mora da se podvrgne nadzoru pod odgovornošću imenovanog tela. Proizvođač imenovanom telu po svom izboru podnosi zahtev sa izjavom da isti zahtev nije podneo drugom telu, koji sadrži potrebne podatke o tipu PED opreme, dokumentaciju koja se odnosi na sistem kvaliteta, kao i tehničku dokumentaciju za odobren tip proizvoda sa kopijom sertifikata o usaglašenosti za taj tip. Dokumentacija sistema kvaliteta mora da sadrži opise ciljeva kvaliteta, organizacione strukture, odgovornost i ovlašćenja rukovodstva, zatim metode proizvodnje, kontrole, procedure i mere sprovođenja (naročito za nerastavljive spojeve), kao i postupke ispitivanja pre, u toku i na kraju proizvodnje, uz izveštaje o kontroli i način praćenja postizanja kvaliteta.

Imenovano telo ocenjuje sistem kvaliteta, da li je u skladu s harmonizovanim standardima PED opreme, vrši posetu pogonima proizvođača da utvrdi da li je dostavljena tehnička dokumentacija u skladu sa zahtevima Direktive, o čemu obaveštava proizvođača. Proizvođač prema potrebi preduzima mere za ispunjenje zahteva imenovanog tela PED opreme, a da pri tom ne ugrozi odobreni sistem kvaliteta, o čemu obaveštava imenovano telo sistema kvaliteta. Na kraju imenovano telo PED opreme donosi odluku o ispunjenju zahteva uz zaključke ocenjivanja i obrazloženje odluke.

Imenovano telo posle odobrenja, sprovodi nenajavljeni nadzor nad proizvođačem, da li uredno sprovodi mere iz sistema kvaliteta u proizvodnji, ispitivanju i skladištenju. Nadzor se sprovodi kroz periodične revizije tako da se u periodu od 3 godine sprovede kompletan ponovni postupak.

Proizvođač postavlja oznaku CE pod odgovornošću imenovanog tela i postavlja njegov identifikacioni broj. Proizvođač čuva dokumentaciju proizvoda bar 10 god.

**Modul D1:** (Obezbeđenje kvaliteta procesa proizvodnje)

Ovim modulom se propisuje najpre postupak ocenjivanja usaglašenosti proizvodnje PED opreme, kao u modulu B1, a zatim da sprovede postupak ocene sistema kvaliteta podnošenjem zahteva imenovanom telu i na kraju se podvrgne nadzoru imenovanog tela PED opreme (kao za Modul D). U zahtevu za sistem kvaliteta proizvodnje, podnosi se i dokumentacija ocene usaglašenosti PED opreme, koja je u saglasnosti sa sistemom kvaliteta, a procedura se dalje sprovodi prema Modulu D, kao i postupak sprovođenja nadzora nad primenom sistema kvaliteta.

**Modul E:** (Usaglašenost sa tipom na osnovu obezbeđenja kvaliteta PED opreme)

Ovim modulom se opisuje postupak ocenjivanja usaglašenosti u kom proizvođač ispunjava obaveze odobrenog sistema kvaliteta i garantuje na vlastitu odgovornost da je predmetna PED oprema u skladu sa sertifikatom odobrenog tipa opreme. Proizvođač sprovodi proceduru odobrenog sistema kvaliteta i podvrgava se nadzoru imenovanog tela sistema kvaliteta kao u Modulu D.

**Modul E1:** (Obezbeđenje kvaliteta završne kontrole i ispitivanja PED opreme)

Ovim modulom se opisuje postupak ocenjivanja usaglašenosti u kom proizvođač ispunjava obaveze izrade tehničke dokumentacije i proizvodnje i garantuje na ličnu odgovornost da su ispunjeni svi zahtevi ove Direktive. Izrada tehničke dokumentacije i proizvodnja je ista kao u Modulu A, a proizvođač podnosi imenovanom telu za sistem kvaliteta zahtev za PED opremu koju proizvodi. Proces je opisan, samo se ovde odnosi na zahtevanu PED opremu. Proizvođač sprovodi proceduru odobrenog sistema kvaliteta i podvrgava se nadzoru imenovanog tela sistema kvaliteta kao u Modulu D.

**Modul F:** (Usaglašenost sa tipom na osnovu provere PED opreme)

Ovim modulom se opisuje postupak ocenjivanja usaglašenosti u kom proizvođač ispunjava obaveze iz proizvodnje PED opreme i garantuje na ličnu odgovornost da je proizvedena oprema u skladu sa dotičnom PED opremom koja ima sertifikat. TOU proverava usaglašenost proizvedene opreme sa dotičnom PED opremom koja ima sertifikat, što se odnosi na svaku jedinicu proizvedene opreme, o čemu izdaje posebnu potvrdu, ukoliko utvrdi da su ispunjeni uslovi ovog modula.

**Modul G:** (Usaglašenost na osnovu pojedinačne provere)

Ovim modulom se opisuje postupak ocenjivanja usaglašenosti u kom proizvođač izrađuje tehničku dokumentaciju, ali je ne proizvodi, već obezbeđuje da se proizvodnja PED opreme osigurava u skladu s ovom Direktivom. Imenovano telo po izboru proizvođača sprovodi odgovarajuće preglede i ispitivanja i izdaje potvrdu o usaglašenosti i stavlja svoj broj na odobrenu PED opremu.

**Modul H:** (Usaglašenost na osnovu potpunog obezbeđenja kvaliteta)

Ovim modulom se opisuje postupak ocenjivanja usaglašenosti u kom proizvođač upravlja odobrenim sistemom kvaliteta projektovanja, proizvodnje, završne inspekcije i ispitivanja PED opreme, a podvrgava se nadzoru imenovanog tela za sistem kvaliteta. Proizvođač podnosi zahtev imenovanom telu za sistem kvaliteta potrebnu dokumentaciju, proširenom sa tehničkom dokumentacijom PED opreme koju namerava proizvoditi. Imenovano telo proverava sposobnost proizvođača da

implementira sve zahteve Direktive, izrađuje zaključak sa obrazloženjem odluke, o čemu obaveštava proizvođača. U slučaju odobrenja izrade PED opreme imenovano telo sistema kvaliteta sprovodi nadzor naveden u prethodnim modulima.

**Modul H1:** (Usaglašenost na osnovu potpunog obezbeđenja kvaliteta sa pregledom projekta). Ovim modulom se opisuje postupak ocenjivanja usaglašenosti u kom proizvođač upravlja odobrenim sistemom kvaliteta za projektovanje, proizvodnju, završno kontrolisanje i ispitivanje PED opreme i daje garanciju na ličnu odgovornost da je proizvedena oprema u skladu sa odredbama Direktive. Proizvođač podnosi zahtev imenovanom telu sistema kvaliteta za PED opremu koju namerava proizvoditi, koji sadrži pored ostalog tehničku dokumentaciju za jedan model svakog tipa opreme. Imenovano telo ocenjuje sistem kvaliteta u svrhu proizvodnje PED opreme i proverava sposobnost proizvođača da implementira sve zahteve Direktive. Nakon sprovedene procedure,

**DEKLARACIJA O USAGLAŠENOSTI POSUDE POD PRITISKOM**  
**br. (redni broj proizvođača)**

Izjavljujemo da je posuda (**naziv, veličina i oznaka posude pod pritiskom**) projektovana, izrađena i kontrolisana u skladu sa Pravilnikom o tehničkim zahtevima, ... (navesti dokument koji je u skladu sa Direktivom 2014/6/EU)

**Osnovni podaci posude pod pritiskom**

Naziv i adresa proizvođača	
Naziv posude pod pritiskom	
Fabrički broj	
Godina proizvodnje	
Zapremina (litara)	
Naziv radnog fluida	<b>Uneti</b>
Naziv radnog prostora	<b>podatke iz registra</b>
Najveći dozvoljeni radni pritisak [bar]	<b>proizvođača,</b>
Najveća dozvoljena temperatura [°C]	<b>parametre iz dokumentacije</b>
Ispitni pritisak [bar]	<b>posude pod pritiskom,</b>
Ispitna materija	<b>modul usaglašenosti,</b>
Temperatura ispitne materije [°C]	<b>podatke o TOU i</b>
Masa prazne posude [kg]	<b>glavne propise izrade</b>
Označavanje posude	
Kategorija posude	
Oblik i konstrukcijske mere prema crtežu br.	
Sprovedeni postupak ocenjivanja usaglašenosti	
Naziv i adresa tela za ocenjivanje usaglašenosti	
Tehnički propisi	

Mesto i datum



PROIZVOĐAČ

Direktor

(potpis ovlašćenog lica)

**Sl. 3.14.** Forma i sadržaj deklaracije usaglašenosti PED opreme, direktiva 2014/68/EU

imenovano telo izrađuje zaključak sa obrazloženjem odluke, o čemu obaveštava proizvođača. U slučaju odobrenja izrade PED opreme, imenovano telo sistema kvaliteta sprovodi nadzor, na način kao što je navedeno u prethodnim modulima. Proizvođač posebno podnosi zahtev imenovanom telu PED opreme za pregled projekta u skladu sa ranije navedenom procedurom.

Navedeni opisi modula su dati samo u cilju informisanja njihovog sadržaja, a detaljne module treba koristiti iz važeće Direktive, pogotovo za kategorije PED opreme II, III i IV, gde postoji mogućnost izbora različitih modula od strane proizvođača, koji mogu biti od pomoći pri izboru ulova koje treba ispuniti.

### **Prilozi o sadržaju deklaracije i znaku usaglašenosti**

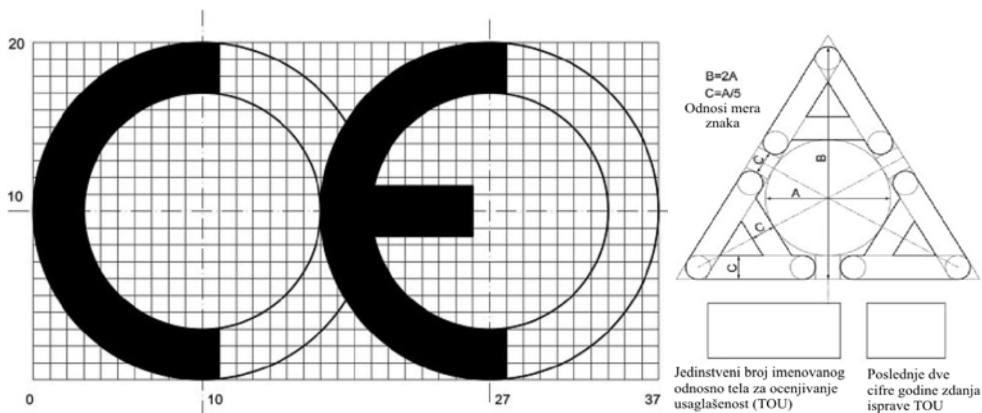
Procedura modula za ocenjivanje usaglašenosti se završava deklaracijom o usaglašenosti i postavljanjem CE znaka, čija forma treba da ima sledeći izgled:

#### **Deklaracija (izjava) o usaglašenosti:**

Za deklaraciju su bitni podaci o proizvođaču i odgovornom licu, sledljivi podaci o opremi i njenim identifikacionim karakteristikama, podaci o TOU i potpis lica koje lično garantuje tačnost navedenih podataka. Na slici Sl. 3.14, dat je primer forme dokumenta deklaracije i njegov sadržaj, kao završni postupak procedure.

#### **Znak usaglašenosti:**

Znak "CE" je jedini dozvoljeni znak usaglašenosti proizvoda u pogledu bezbednosti sa zahtevima evropskih direktiva, prema tome važi i za direktivu PED opreme 2014/68/EU. To nije znak kvaliteta, već samo znak da je proizvod izrađen i pušten na tržište u skladu sa evropskim propisima, videti sliku Sl. 3.15a.



**Sl. 3.15a.** Evropski znak usaglašenosti "CE" PEDopreme **Sl. 3.15b.** Srpski znak "3A" usaglašenosti PED opreme

Stilizovan latinični znak "CE", ima navedeni oblik i proporcije, pri čemu znak mora biti vidljiv i trajan, a visina znaka mora biti najmanje 5 mm. Znak se prvenstveno postavlja na proizvod, a može i na ambalažu ili na dokumentaciju.

Srpski znak usaglašenosti "3A", prikazan je na slici Sl. 3.15b, u obliku jednakokraničnog trougla. Veličina znaka se određuje prema visini B, reda R10, u

mm, prema standardu SRPS A.A0.001:1984, po pravilu najmanje 5 mm. Uz znak se stavlja jedinstveni broj registracije imenovanog tela, kao i poslednje dve cifre godine izdavanja deklaracije, ako je to telo učestvovalo u ocenjivanju procedure. Srpski znak usaglašenosti je jedina oznaka kojom se potvrđuje da je proizvod koji se stavlja na tržište Republike Srbije usaglašen sa zahtevima srpskih propisa. Ovaj znak dakle u Srbiji zamenjuje znak "CE", do stupanja Srbije u Evropsku uniju. Treba napomenuti, da znak "CE" važi u Srbiji za proizvode iz uvoza: Iz praktičnih razloga se srpski znak usaglašenosti stavlja na ambalažu ili dokumentaciju koja prati proizvod. Detaljnije o tome videti u važećim Pravilniku Republike Srbije, ili na portalu Tehnis, Ministarstva privrede.



## 3.2. OPŠTE O PRORAČUNU ČVRSTOĆE DOBOŠASTIH RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Dilema koje propise i kôdove koristiti pri projektovanju i izradi dobošastih razmenjivača toplote, najčešće se rešava prema zahtevu korisnika i propisa države u kojoj se oprema ugrađuje. Za proizvođače koji imaju ambicija da prodaju PED opremu na globalnom nivou, to je dodatni problem za projektante opreme da što više prilagode konstrukciju sa što manjim brojem izmena koji zahtevaju važeći kodovi kupca. Dva glavna konkurentna kôda su evropski i američki, dok je kineska oprema veoma često usklađena prema zahtevu i kôdu kupca, pri čemu kineska oprema dominira velikom proizvodnjom i niskom cenom. U Evropskoj zajednici na bazi direktive opreme pod pritiskom (PED) razvijen je obimni standard EN 13445 [S2] za opremu koja nije izložena plamenu, što je predmet ovog razmatranja. Treba napomenuti, da postoje i evropski normativi za opremu pod dejstvom plamena, kao što su standardi za kotlove EN 12952, EN 12953 ili standardi za prateću opremu. Američki normativi ASME imaju najdužu tradiciju upotrebe, a pored SAD koriste se u velikom broju drugih zemalja, pri čemu ASME VIII div 1 [S10] pokriva istovremeno konstrukciju kotlova i posuda pod pritiskom.

Proračun čvrstoće konstrukcije dobošastih razmenjivača će se razmotriti na bazi standarda EN 13445, dok će se ASME VIII koristiti povremeno za upoređenje postupaka. Zbog nekadašnje čvrste povezanosti JUS standarda sa nemačkim normativima, a i zbog jednostavnosti postupka i prepoznatljive procedure korišćiće se delovi standarda AD 2000 [S8], naročito za prethodno dimenzionisanje opreme. Ostali standardi, kao TEMA [S1], API [S9] ili ISO [S5] se pominju uglavnom kao preporuke za neproračunske komponente. Na bazi direktive 2014/68/EU evropska komisija (EC) svake godine inovira spisak harmonizovanih PED EN standarda.

### 3.2.1. Izbor postupka mehaničkog proračuna čvrstoće

Mehanički proračun čvrstoće za usvojenu konstrukciju PED proračunate opreme obično se izvodi na kraju termičkog proračuna, a pre izrade konačne grafičke dokumentacije za fabrikaciju proizvoda. Pre početka proračuna, ponekad i u toku samog postupka moraju se razrešiti mnogobrojne nedoumice ili varijante procedure, koje zavise od odluke projektanta, a veoma često i od ugovornih uslova, zahteva naručioca, PED zakonodavstva, standarda, inspekcijjskih zahteva itd.

#### **Izbor proračunskog normativnog kôda**

Osnovna procedura mehaničkog proračuna čvrstoće PED opreme, što važi najčešće i za dobošaste razmenjivače toplote zavisi od izbora proračunskog kôda. Naručilac PED opreme, mora u zahtevu dostaviti između ostalog i sledeće podatke:

- Podatke o mestu ugradnje PED opreme, naziv zemlje i bliža lokacija,

- Proračunski kôd i osnovne važeće propise koji se primenjuju za PED opremu,
- Ako se oprema naručuje van zemlje ugradnje, obavezni su podaci distributera ili uvoznika, što podrazumeva zakonodavstvo i proceduru PED opreme te zemlje.

Cela procedura je veoma jednostavna, ako se PED oprema proizvodi i ugrađuje u istoj državi ili države proizvođača i mesta ugradnje koriste iste kôdove (kao što je npr. Evropska zajednica). Ako to nije slučaj, onda je potrebno dosta znanja i veštine da bi se obezbedila ispravna primena PED propisa, uz minimalne naknadne troškove. Za velike serije proizvoda proizvođači znaju unapred za koje je tržište namenjeno i opremaju ga prema dva najčešća koda EN ili ASME. Za druga tržišta različitog kôda i male narudžbine često ne postoji ekonomski interes proizvođača, osim ako nema jakog distributera u zemlji plasmana.

#### **Kontrola i ažuriranje važećih propisa i normativa PED opreme**

Kada su utvrđeni dokumenti za izradu PED opreme, veoma je važno koristiti najnovije izdanje proračunskog kôda, jer se oni stalno menjaju i prilagođavaju najnovijim saznanjima iz predmetne oblasti. Ove promene često mogu biti veoma male, ali zahtevaju kontrolu sadržaja, koji se objavljuju na godišnjem nivou izdanja standarda. Provere standarda projektantima mogu oduzimati puno vremena, ali treba imati u vidu da nepoštovanje ili nepoznavanje novih kodeksa može rezultirati neplaniranim otpadom ili preradom konstrukcije. Slična provera je preporučljiva i za karakteristike materijala, koji su definisani odgovarajućim standardima, što za Evropsku uniju podrazumeva i proveru njihove harmonizacije. Za sve propise koji se koriste zahteva se da budu ažurirani.

#### **Metodologija proračuna PED opreme**

Tipična metodologija proračuna čvrstoće je postupak formulama DBF (eng. design by formulae), ali prisutni su i postupci analizom DBA (eng. design by analysis), kao i metode zasnovane na eksperimentalnim tehnikama DBE. Metoda formulama je klasični postupak proračuna zamenom prethodno utvrđenih vrednosti u standardom preporučenu formulu. Ona se primenjuje uglavnom za statička odnosno ne-ciklična opterećenja, koja se tako deklarišu prema EN 13445-3 ako je broj promena opterećenja najviše do  $n_{ekv}=500$ . U tom slučaju nije potrebna analiza zamora materijala i ispitivanja bez razaranja. Metoda DBA ili direktna putanja (ruta) je alternativna metoda navedenoj DBF, služi kao dopuna za nepredviđene slučajeve, ili za slučaj superpozicija opterećenja (npr. dejstvo pritiska + vetar, seizmika, opterećenje usled cevovoda ili druge opreme, itd.). Ova metoda uključuje najčešće postupak konačnih elemenata (FEA), za šta je neophodna posebna obučenosť. Metoda DBE zasnovana na eksperimentu je predviđena za specijalne slučajeve gde se merenjem dokazuje potrebna geometrijska veličina.

O izboru metode odlučuje projektant, dok se u ovom poglavlju razmatra samo najčešće korišćena metoda proračuna formulama (DBF).

#### **Obim i granice sistema za proračun čvrstoće**

Ovo se pitanje odnosi na slučaj složenih postrojenja, koja sadrži više povezanih jedinica PED opreme, ili složenih tehnoloških sistema različite namene, ili slučaj zamene-proširenja u postojećem funkcionalnom sistemu. Takva složena

postrojenja mogu implicirati različite situacije u zavisnosti od toga da li je projekat integralni ili parcijalni, da li je proizvođač i montažer ista organizacija, kao i od toga da li je predviđena ocena usaglašenosti celog PED sistema (tzv. globalna) ili je usaglašenost nezavisna po sistemima. O tome odlučuje naručilac odnosno korisnik instalacije u saradnji sa izabranim projektantom, koji mora biti posebno iskusan u izboru rešenja koje se ekonomično uklapaju u tok realizacije projekta. U svakom slučaju ovde se razmatra samo izrada DRT kao pojedinačne opreme pod pritiskom.

### **Organizacija proizvodnje PED opreme**

Organizacija proizvodnje DRT ili druge PED opreme može biti integralna u okviru jedne organizacije ili sastavljena iz više delova u kome su projektant i izvođači potpuno nezavisni, ili čak da proizvođač angažuje projektanta i veći broj kooperanata a da on ništa ne proizvodi, već samo preuzima odgovornost i pušta proizvod na tržište pod svojim imenom i svojim žigom. U bilo kojoj organizaciji proizvodnje projekat PED opreme mora sadržati sve elemente konstrukcije, koji su proračunati u skladu sa usvojenim kôdom. Takođe mora sadržati izbor i sledljivost materijala, kao i tehnologiju spajanja (zavarivanje i sl.) i ispitivanja. Svi učesnici u proizvodnji PED opreme moraju se pridržavati projekta i predviđene procedure ispitivanja, dok tok ocene usaglašenosti i angažovanje imenovanih tela najčešće (a to je i najbolje) treba da je u oranzaciji onoga ko se potpisuje kao proizvođač.

### **Tehnika proračuna i upotreba softvera za proračun**

Tok proračuna u skladu s usvojenim kôdom je veoma važna odluka pre ili najkasnije u toku proračuna, nju donosi projektant, ili to može da odluči proizvođač sam ili u konsultaciji s imenovanim telom. Prema metodi formulama, potrebno je navesti osnovni izraz, uneti pojedinačne vrednosti u izraz i dati rezultat proračuna, koji omogućava kontrolu postupka i sledljivost rezultata. To je postupak koji je prihvatljiv većini imenovanih tela ili drugih kontrolora projekta. Problem takvog, a i bilo kojeg drugog računanja je pojava i otkrivanje računskih grešaka, naročito u uslovnim i iterativnim postupcima, kao i sporost, zamornost i izrada velikog broja ponavljanja. Pojava računara je omogućila brze tabelarne proračune (excel), koji dozvoljavaju laku pojedinačnu upotrebu, dobar prikaz rezultata, a uglavnom slabiju sledljivost proračuna. Oni se mogu smatrati kao lični alat projektanta.

Pojava na tržištu integralnih računarskih programa mehaničkog proračuna PED opreme, unapredila je i olakšala izradu projektne dokumentacije, kao:

- Pitanje upotrebe važećih i ažuriranih kôdova se prenosi od projektanta na programera, što može biti značajna ušteda, pogotovo ako se koriste i ažurne baze svojstava materijala. Projektant ima program koji može odmah da koristi.

- Veliku prednost imaju softveri koji umesto nevidljivih postupaka računanja imaju vidljive formule i unešene vrednosti veličina u skladu sa izabranim kôdom, što je prihvatljivo imenovanom telu. Ipak, brojni programi nemaju ovu mogućnost.

- Upotreba lokalnih projektantskih softverskih alata, zahteva dokazivanje ispravnosti inspektorima imenovanih tela. Zato je preporučljiva koordinacija s imenovanim telom u pogledu izbora proračunskog softvera, pogotovo ukoliko imenovana tela rutinski koriste određene softvere u svojoj redovnoj praksi.

### **Odgovarajući softver za proračun čvrstoće DRT**

Zanimljivo je da su prve softvere za razmenjivače toplote radile kompanije globalnog kapaciteta (npr. Danfoss), ali je vreme pokazalo da su takvi softvereri uglavnom komercijalno usmereni, odnosno imaju cilj da kupac što lakše i brže izabere njihov proizvod. Međutim, dalji razvoj je doneo proizvođače softvera koji izrađuju programe za PED opremu, čak posebno za razmenjivače toplote, odvojeno termički i hidraulički dizajn, odvojeno mehanički dizajn, a postoji i integralni softver. Za izradu složenih programa koji obuhvataju i grafički dizajn potrebni su moćni softverski timovi, koji mnogo koštaju. Da bi održali kontinuitet i smanjili pojedinačne cene, softverske kuće pribegavaju cepkanju programa na tzv. module za svaki proračun, kao i apdejtovanju programa na godišnjem nivou.

Upotreba aplikativnog softvera razmenjivača daje sledeće uštede:

1. Ušteda troškova, jer dizajner razmenjivača troši svoje vreme na pripremu i izradu projekta, što je isplativije od cene pretplate na ažurirani softver.
2. Zadržavanje stečenog znanja u proračunima i arhiviranim datotekama. Odlazak dizajnera u tom slučaju ne podrazumeva gubitak tog znanja, već samo kraću obuku novog dizajnera, jer znanje ostaje u formiranim bazama podataka.
3. Jednostavna mogućnost obuke projektanata i inoviranja znanja od strane proizvođača softvera putem onlajn konferencija, seminara i sl.
4. Ušteda vremena korišćenjem postojećih arhiva izvedenog proračuna je veoma velika u odnosu na pregled dokumentacije urađene bez softvera, kao i ušteda vremena u dokazivanju dokumentacije imenovanom telu. Čak i ako postoji dilema u uštedi novca od nabavke integralnog softvera, znatno veći troškovi mogu nastati usled ažuriranja kućnih alata, ispravki grešaka i uhodavanju malih aplikacija.
5. Postojanje biblioteke izvedenog dizajna i arhiva materijala, omogućuje brzu izradu konstruktivnih varijanti i upotrebu alternativnih materijala, a naročitu uštedu daje optimizacija troškova, što poboljšava tržišnu konkurentnost.

Po pitanju upotrebe softvera, stav ASME VIII je neutralan, parafrazirano: Inženjeri projektanti preuzimaju punu odgovornost u primenjenim postupcima proračuna i tačnosti rezultata, pa prema tome kodeks niti zahteva niti zabranjuje korišćenje računara za dizajn ili analizu konstrukcije komponenti prema zahtevima standarda. I pored brojnih prednosti, cena integralnog softvera u grafičkom okruženju u zavisnosti od broja tipova RT je značajna stavka i isplativa je za velike firme i velike serije proizvoda. Za male proizvođače to svakako nije najbolja opcija, jer učešće takvog softvera u jediničnoj ceni proizvoda značajno utiče na njegovu konkurentnost. Prema navodima HEDH [2], mehanički dizajn opreme PED i razmenjivača toplote jedno je od poslednjih područja delatnosti, koje se u procesu dizajna ne oslanja potpuno na softver. Razlozi za zadržavanje ljudske uključenosti su zbog toga, što postoje suptilne razlike u detaljima dizajna koje nude različiti proizvođači ili zahtevaju krajnji korisnici. Proizvođači izradu komponenti mogu analizirati korišćenjem raznih metoda dizajna za različite kôdove, što može biti isključujuće za određene mogućnosti ostalog dizajna. I pored donetih brojnih standarda, još uvek značajno nedostaju standardi u geometriji PED opreme i RT,

što dizajn te opreme čini kreativnom temom u donošenju inženjerskih odluka u kalkulacijama i dilemama tipa "šta ako". Teško je reći koliko treba platiti za softver za opremu pod pritiskom, međutim stara poslovice kaže "dobiješ ono što platiš", a to važi i ovom slučaju. Treba napomenuti, da su softverske greške relativno česte i stalno se otklanjaju (nove verzije, novi trošak), što može dovesti do značajnog rasta troškova na proizvodu. Zato, jeftini softverski programi koji ne poseduju tzv. QA (analiza kvaliteta po fazama) i QC (kontrola kvaliteta na kraju) podršku nisu baš preporučljivi za proizvodnju skupe opreme. Nije lako preporučiti adekvatni softver za mehanički dizajn RT na osnovu internet prezentacija ili na osnovu probnih verzija, jer im nedostaje provera u praksi. Navedeni programi iz perioda pisanja knjige su informacija sa kratkim opisom, bez dokaza tačnosti i pouzdanosti.

- Computer Engineering, Inc. (CEI) USA, ([www.thinkcei.com](http://www.thinkcei.com)) sadrži proračun prema kôdu EN 13445-3 sa unošenjem podataka prema formulama i mogućnostima uključenja u programe grafičkog okruženja.

- Lauterbach Verfahrenstechnik (LV) Karlsruhe Nemačka, ([www.lv-soft.net](http://www.lv-soft.net)), je veoma razgranat program sa modulima za svaku komponentu, prema raznim kodovima uključujući i EN 13445-3 i AD-2000 i bazama podataka materijala.

- Codeware, Inc. Kanada, ([www.codeware.com](http://www.codeware.com)) sadrži program compress za mehanički dizajn RT u ASME kodu, sa integrisanom grafikom u Solidworksu ili Inventoru, a takođe je povezan sa termičkim softverom HTRI ([www.htri.net](http://www.htri.net)) preko programa Xchanger Suite, tako da je veoma rasprostranjen u svetu (65 zemalja).

- Aspen, USA, Aspen Shell & Tube Mechanical ([www.aspentech.com](http://www.aspentech.com)) sadrži veoma rašireni softver za mehanički proračun RT na najprihvaćenijim kodovima sveta, ASME, Section VIII, Div. 1, EN 13445, CODAP, AD-Merkblätter, prema ranije veoma zastupljenom softveru B-JAC.

- PV Elite, (Intergraph), corp. Hexagon, ([www.hexagonppm.com](http://www.hexagonppm.com)) sadrži mehaničko-grafički program prema kodu ASME VIII 1 i 2, EN 13445, PD 5500 i garancijama kvaliteta, sa lokacijama na više mesta u svetu, koja obuhvata i ranije poznate programe COADE i CAESAR.

- P3 Engineering, Holandija, ([www.p3engineering.com](http://www.p3engineering.com)), je program za mehanički dizajn PED opreme, koji je od skora nastao odvajanjem od firme Red Bag, a koji je ranije preuzeo Vessel Engineering Software (VES) glavnog tvorca ovog programa. Program obuhvata kôdove: ASME VIII, EN 13445-3, AD-2000. U okviru programa je poseban modul dobošastih razmenjivača toplote.

Pri odluci o izboru softvera, posebno treba razmotriti evropske programe jer su najbolje prilagođeni EN normativi. Pored proračunskog dela projekat dizajna razmenjivača toplote mora sadržati i grafičku dokumentaciju uključujući i crteže za radioničku upotrebu u proizvodnji. Ukoliko aplikativni softver sadrži izradu grafičke dokumentacije, ona mora biti standardna u odgovarajućoj razmeri. Ukoliko grafički moduli jako poskupljuju softver, grafika se može uraditi opštim softverom, (acad).

Imajući u vidu da ova monografija ima edukativnu namenu, u njoj se ne koristi integralni softver za mehanički dizajn (osim komparativnih prikaza), već se koriste tabelarni programi (excel) za sprovođenje računskih operacija.

Milan R. Rikalović

# DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

**Knjiga I: KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**



**Naredne stranice su u prekidu !**



Dispoziciju nastavka teksta na sledećoj strani videti u sadržaju.

**Ako želite kompletan tekst - NARUČITE KNJIGU**

---

## POGLAVLJE 4

---

# IZRADA I EKSPLOATACIJA DOBOŠASTIH RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Izbor razmenjivača toplote detaljno je razmatran u odeljku 1.4 u pogledu klase i tipa, kao i tehnološki i kriterijalni uticaj na taj izbor. Pokazalo se da je procedura izbora razmenjivača jako osetljivo pitanje, za koju treba izdvojiti dosta vremena, znanja i strpljenja. Zbog toga ne čudi da najveći broj grešaka nastaje upravo zbog pogrešno izabranog tipa razmenjivača toplote, naročito kada se radi o novom tehnološkom procesu a ne postoji prethodno dobro ili loše iskustvo. Može se primetiti različitost pristupa naručioca (korisnika) i ponuđača (proizvođača) pri određivanju tipa razmenjivača toplote. Korisnik želi optimalnu funkciju aparata po najpovoljnijoj ceni, a proizvođač nudi konkurentnu ali njemu raspoloživu opciju. Retki su proizvođači sa širokom lepezom tipova razmenjivača, koji ima ekonomski interes da troši previše vremena na analizu najpovoljnijeg tipa za ponude male vrednosti. Mnogo češće se daje rutinska iskustvena ponuda iz areala proizvodnog programa. Korisnik bez iskustva se rukovodi interesom najniže cene, pogotovo ako se nabavka obavlja preko posrednika kod koga dominira razlika u ceni. Tako nastaje greška pre svega korisnika, jer on zahteva – bira opremu koja mu odgovara.

Korisnik pre nabavke razmenjivača toplote, mora imati projektom određen tip aparata, ili iskusnog tehnologa procesa koji može sam ili uz pomoć eksternog projektanta analizirati i izabrati tip razmenjivača toplote a zatim odrediti režim rada i ostale performanse, prema TEMA standardu [S1] ili slično (M. Rikalović).

Posle ugovaranja nabavke izabranog tipa razmenjivača toplote, otvara se novi zadatak projektantu proizvođača za proračun i konstrukciju aparata i izradu izvođačke dokumentacije za proizvod u skladu sa propisima i standardima, na osnovu čega će se aparat napraviti i isporučiti. To je posao koji najčešće pokriva termin "fabrikacija", odnosno aktivnost proizvođača u radioničkim uslovima.



## 4.1. FABRIKACIJA RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Proizvođač, nakon ugovaranja i izrade konačne izvođačke dokumentacije razmenjivača toplote, obavlja niz aktivnosti: tehničku pripremu pozicionih detalja aparata, podugovaranje kooperanata, izradu specifikacije potrebnog materijala, proveru magacinskog stanja ili nabavku materijala, sledi otvaranje radnog naloga proizvodnje i imenovanje odgovornog izvođača radova. Od tog momenta teče izrada proizvoda ili fabrikacija, koja se odvija u fabričkim halama ili radionicama.

Modaliteti proizvodnje razmenjivača toplote mogu biti: potpuno namenski novi pogoni, adaptacija postojećih kapaciteta za navedene potrebe ili formiranje privremene ili trajne proizvodne linije u postojećim pogonima bez ikakvih promene namene. Dakle, nema posebnih tehničkih ograničenja za organizaciju proizvodnje, čak je moguće tvrditi da je uticaj tržišta dominantiji od tehničkih parametara pogona, jer količina i trajnost tražnje proizvoda istog tipa će omogućiti adekvatan izbor proizvodne linije. Evo jednog primera: hladnjak automobilskih motora (vodeni ili vazdušni) je masovni proizvod, koji da bi bio konkurentan na tržištu zahteva automatsku liniju izrade, postojeći proizvođač tehnološke opreme, zbog srodnosti može se brzo osposobiti za pojedinačnu ili serijsku proizvodnju različitih razmenjivača toplote u postojećim pogonima. Međutim drugi proizvođač, ako ima resurse, a nema liniju proizvodnje, u slučaju velikoserijskog zahteva, može možda oformiti produktivniju liniju izrade proizvoda i imati konkurentniju ponudu.

Najvažniji faktor pokretanja proizvodnje razmenjivača toplote je stručni kapacitet tima za projektovanje i marketing, koji može spojiti termičke i mehaničke komponente proizvoda sa mogućnostima tehničke primene, koji sadrži pouzdanu garanciju energetske efikasnosti u procesu razmene toplote i visoku bezbednost u toku eksploatacije. Danas postoji veliki broj softversko-tehničkih kompanija koje dominiraju u postupku izbora i proračuna razmenjivača toplote, koje se mogu angažovati u raznim oblicima kooperacije, ali to ipak ne isključuje značaj i odgovornost tima proizvođača za transfer znanja i izradu proizvoda. Postoji težnja većine proizvođača razmenjivača toplote širokog spektra za uvođenje u program takvog proizvoda, koji će veličinom serije i obimom prodaje omogućiti stabilnost rada kompanije i održavanje proizvodnje ostalih razmenjivača povremene tražnje. Finansijski udeo proizvoda serije obično bude značajno veći (i do 90%) od udela ostalih razmenjivača. Takvi proizvođači su u povoljnom položaju, ali ukoliko nemaju inovativne sposobnosti u osvajanju novih tržišta, u slučaju da kupac serijskog proizvoda otkáže nabavku, neminovno dolaze u situaciju redukcije proizvodnje i smanjuju radne snage. Rešavanje neizvesnih situacija oko plasmana razmenjivača toplote uglavnom zavisi od stručnosti i preduzimljivosti projektantsko-proizvodnog menadžmenta imajući u vidu složenost kriterijuma i toka izbora razmenjivača toplote (o tome je detaljno diskutovano u odeljku 1.4).

Dobošasti razmenjivači toplote konstrukcije prema TEMA standardu [S1] veoma retko mogu biti masovne serije sa ponavljajućom tražnjom i zato teško mogu biti dominantni proizvod. Međutim, mogućnost univerzalne primene im daje ako ne poziciju prvog izbora, onda svakako poziciju komparativne alternative.

Veliki broj proizvođača dobošastih razmenjivača toplote je nastao iz malih radionica, koje su najpre radile popravke, reparaciju ili izradu novih razmenjivača kao zamenu postojećim, da bi kasnije došli do serijske proizvodnje. Klasifikacija pogona ovih razmenjivača, prema poziciji u okviru procesa proizvodnje, može biti:

- Male prateće radionice montažera KGH instalacija sa kooperativnom podrškom specifičnih operacija i jakim projektantsko-tehničkim sektorom,
- Srednje radionice opšte namene koje sadrže i veće obradne centre i sisteme za vertikalni i horizontalni transport, koje se prema potrebi mogu transformisati kao proizvodne linije za pojedinačnu ili niskoserijsku proizvodnju razmenjivača,
- Posebne namenske radionice različitih veličina za proizvodnju razmenjivača toplote i druge opreme pod pritiskom, koje su u sklopu velikih proizvodnih sistema za tehnološke procese raznih namena ili potpuno nezavisne,
- Prateće dobro opremljene radionice koje su podrška velikih sistema za izradu specifičnih razmenjivača toplote velikih serija (npr. pločasti razmenjivači), gde se mogu proizvoditi razmenjivači drugih tipova (sem dominantnih) radi kompletiranja ponude ili specifičnih zahteva tržišta.



**Sl. 4.1.** Dobro opremljena radionica za izradu dobošastih razmenjivača toplote ALTEX, Kanada. Gore, prednji deo hale za izradu komponenti, dole montažni deo hale.

Na slici Sl. 4.1, prikazan je jedan pogon za pojedinačnu i nisko serijsku proizvodnju dobošastih razmenjivača toplote kompletne izrade od ulaza materijala do izlaza gotovog proizvoda svih tipova i veličina prema TEMA standardu. Pogon je linijskog tipa velike dužine, pokriven sa tri dizalice nosivosti do 120 tona, koji je pogodan za predfabrikaciju komponenti najčešćih tipova radi skraćanja roka izrade.

Naročiti napredak u fabrikaciji dobošastih razmenjivača toplote postignut je u domenu izbora materijala, kvaliteta izrade (naročito u tehnologiji zavarenih spojeva), kontrole izrade i bezbednosti upotrebe, zahvaljujući pre svega TEMA standardu [S1], kao i standardima opreme pod pritiskom. Najčešće prodavani razmenjivači su srednjih prečnika i manjih debljina zida doboša, koji ne zahtevaju skupu opremu za izradu komponenti, a glavni specifični alati vezani su za postupke zavarivanja i izrade spoja cevi i cevne ploče. To daje mogućnost proizvodnje ovih aparata u malim radionicama uz angažovanje kooperanata ako imaju dobru stručnu podršku. Više puta je naglašeno da ovi aparati nisu tehnički složeni proizvodi za izradu, ne zahtevaju specijalne materijale, posebne mašine za obradu, kao ni skupe alate. Zbog tako niskih zahteva, oni se mogu lagano "kopirati", odnosno izraditi isti aparati i bez tehničke dokumentacije, što se u praksi i događa pri izradi rezervnih delova (npr. cevni snop). Izrada i upotreba kopiranih razmenjivača toplote, ako se koriste za potpuno iste tehnološke uslove i ako ne podležu obaveznim propisima (npr. PED oprema) može biti sasvim korektna. Veliki i specijalizovani proizvođači dobošastih razmenjivača kao meru zaštite svojih proizvoda pored inovativnosti i nedostupnosti nekih komponenti, uvode i neke zbunjujuće operacije teške za izradu, koje treba da obeshrabre "kopirante", iako ne donose posebne prednosti u eksploataciji proizvoda. Međutim, procenu da li su u pitanju "zamke" originala, ili inovativnost konstrukcije za bolje performanse rada, može dati samo veoma stručan i iskusen procesni inženjer uz odgovarajuće računске provere i analizu ostalih uticaja, kao npr. održavanje tehnoloških parametara rada, mogućnost rada postojećih cirkulacionih sistema, odnosno pumpi, ugrađenih armatura i regulacije.

Dobošasti razmenjivači toplote imaju značajni broj komponenti koje se mogu izrađivati na univerzalnim mašinama za obradu metala (sečenje, struganje, bušenje), pa za liniju proizvodnje razmenjivača ne mora biti predviđena oprema za opštu mašinsku obradu, već se ista može nalaziti u posebnim odeljenjima, pogonima ili kod kooperanata. Utvrđivanje granice šta se može smatrati opštom mašinskom obradom komponenti, opštom mašinskom obradom sa značajnim uticajem specifičnosti proizvodnje dobošastih razmenjivača toplote, ili potpuno specifičnom obradom nije jednostavna i očigledna. Ako se fabrikacija proizvoda posmatra iz sfere uticaja komponenti na celinu proizvoda, odnosno osetljivost komponente na greške tokom izrade usled čega je poželjna neposredna kontrola finalnog montažera, onda je razumljivo da takva mašinska obrada bude u blizini montažne linije. To se naročito odnosi na izradu doboša, cevne konfiguracije ili bušenje cevni ploča. Zbog toga se preporučuje da linija toka serijske proizvodnje dobošastih razmenjivača i raspored opreme budu kompletni, kao na slici Sl. 4.1.

## 4.2. POSTUPCI FABRIKACIJE KOMPONENTI RAZMENJIVAČA

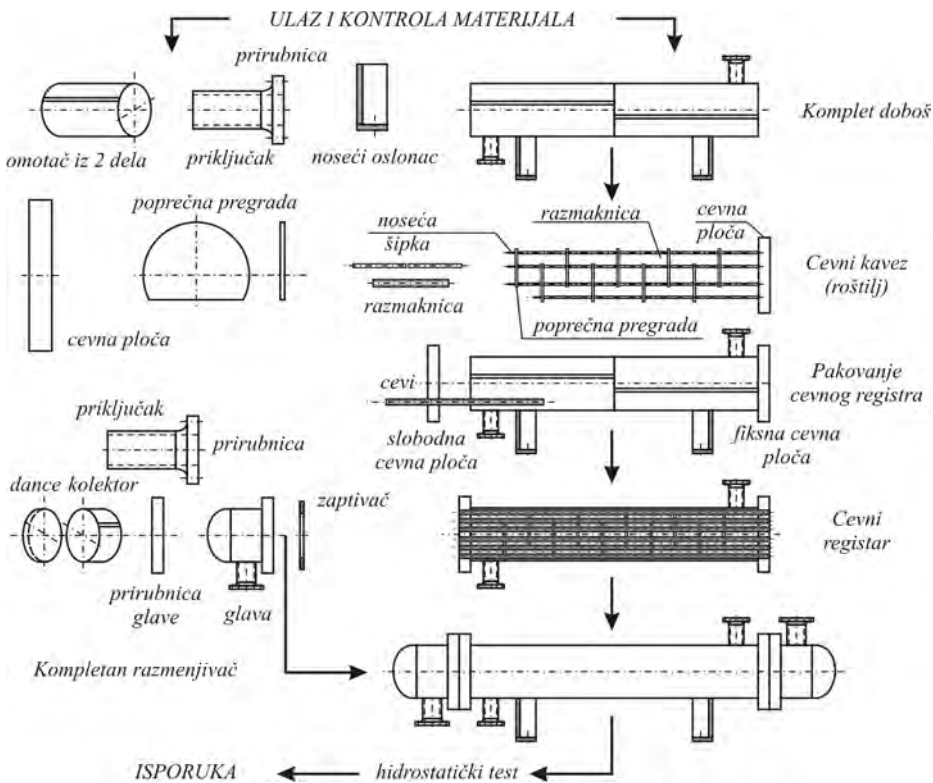
Izrada ili fabrikacija razmenjivača toplote je glavna faza proizvodnje. Ona se sastoji od izrade svih komponenti aparata, obezbeđenja standardnih pozicija i pomoćnog materijala, montaže sklopova i kompletnog proizvoda uključujući i postupak spajanja (zavarivanja), međufaznog i završnog ispitivanja, antikorozivne zaštite, pakovanja i odlaganja do isporuke (magacin). Komponente mogu biti sklopovi ili pojedinačne pozicije koje se izrađuju na osnovu sklopne i radioničke dokumentacije. Dokumentacija treba da sadrži i specifične informacije i upozorenja sa obavezujućim karakterom, kao: zapremina komora pod pritiskom, veličina posebnih opterećenja (npr. od dilatacija), dodaci za uticaj korozije, metode spajanja materijala osim zavarivanja (npr. lemljenje, lepljenje ili valcovanje cevi), posebne obrade ili zaštite površina, termička obrada ili naponsko rasterećenje, kao i postupke i mesta međufaznih i završnih ispitivanja. Komponente se izrađuju raznim vrstama obrade, najčešća je opšta mašinska obrada, koja nije posebno zahtevna. Opšte razmatranje proizvodnje i postupci izrade pozicija mogu se videti detaljno u ref. [76], dok značajan broj praktičnih preporuka u proizvodnji i kontroli opreme pod pritiskom (PED) mogu se naći u knjizi S. Pullarcot [70] (ASME kôd).

Glavne faze proizvodnje razmenjivača toplote su:

1. Identifikacija materijala,
2. Sečenje lima ili segmenata za omotač doboša i glava, rolovanje doboša u celini ili u delovima, sastavljanje i priprema za zavarivanje prema detaljima crteža,
3. Provera dimenzija doboša i glava, zavarivanje poprečnih i uzdužnih šavova, i prema zahtevu kontrola zavara radiografijom ili slično,
4. Provera kružnosti cilindara i mogućnosti uklapanja, uključujući prirubnice,
5. Mašinska obrada cevne ploče, prirubnica, poprečnih pregrada i poklopaca,
6. Sastavljanje plivajuće glave, cevnog registra i probna montaža u doboš,
7. Sastavljanje i zavarivanje prirubnica glava i/ili cevnih ploča i omotača,
8. Izrada spoja cevi i cevne ploča, valcovanjem, zavarivanjem (ili oba postupka),
9. Montaža cevnog registra u omotač i ispitivanje spoja cevi i cevne ploče,
10. Montaža glava i poklopaca glava,
11. Hidrostatičko ispitivanje na izdržljivost i nepropusnost i atestiranje,
12. Antikorozivna zaštita i priprema za isporuku,
13. Izrada prateće dokumentacije uz proizvod.

Proizvodni ciklus započinje ulazom potrebnog materijala iz magacina ili direktno od dobavljača. Identifikuje se sastav i kvalitet materijala prema oznaci u dokumentaciji i na materijalu, kao i prema kvantitativnim vrednostima, gabariti, debljina, vizuelni kvalitet površine i sl. Reklamacije se odmah dostavljaju, jer one uvek zahtevaju dosta vremena za rešenje i mogu uticati na rok proizvodnje.

Organizacija proizvodnje se bazira na bazi radnog naloga, dostavljenoj tehničkoj dokumentaciji i materijalu i odvija se prema planu rukovodioca ili menadžera proizvodnje u skladu sa raspoloživom opremom i ljudskim resursima. Na slici Sl. 4.2, data je ilustracija okvirnog toka izrade sa međufaznim vezama na primeru razmenjivača toplote, TEMA tip BEM.



Sl. 4.2. Okvirni tok izrade dobošastog razmenjivača toplote, TEMA tip BEM

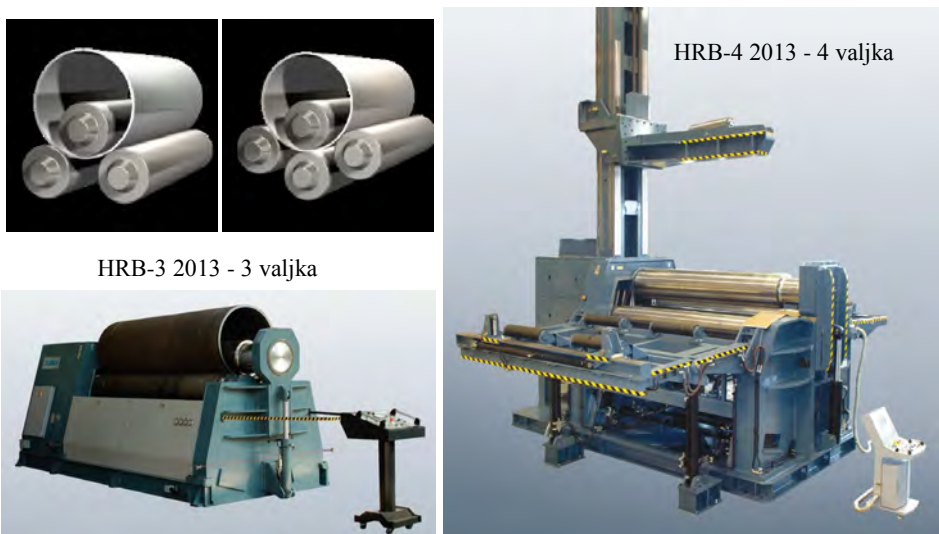
#### 4.2.1. Izrada omotača - rolovanje

Cilindrične komponente dobošastih razmenjivača toplote su pre svega omotač doboša i glava, koje se mogu raditi od gotovih cevi (šavnih ili bešavnih ili od rolovanih (kružno savijenih) cilindara. Bešavne cevi nemaju podužnih varova, dok su šavne cevi isto kao podužno zavareni rolovani cilindri i u određenim uslovima podležu ispitivanju - snimanju zavarenih spojeva.

Rolovanje cilindara je specifična operacija savijanja limova, koja zahteva preciznost u sečenju lima, veštinu pri radu na rol-mašini i održavanje kota u okviru tolerancija pri izradi komponenti koje sadrže cilindre (doboš, glava, itd.). Operacija rolovanja se može izvesti savijanjem lima na hladno ili toplo. Savijanje na toplo se

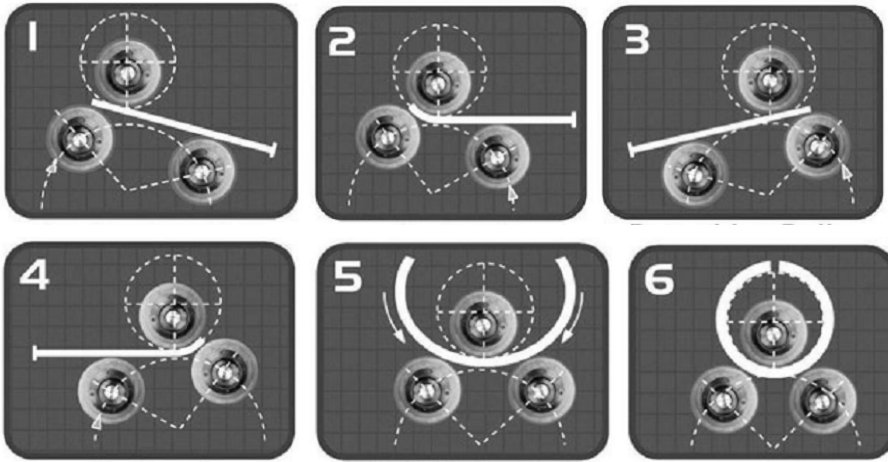
izvodi uglavnom u slučaju krtosti materijala omotača, ili u slučaju velikih debljina i čvrstoće lima, pa se savijanje na hladno praktično i ne može izvesti. Mašine za rolovanje su različite konstrukcije, ali redovno sa valjcima koji svojim položajem obezbeđuju profil omotača i vrše prenos sile i momenta za deformaciju lima. Pogon mašine je najčešće elektromotorni ili hidraulični. Koriste se 3 ili 4 valjka, raznih dužina i prečnika u zavisnosti od dominantne namene. Snaga savijanja lima i veličina pogona raste direktno proporcionalno sa debljinom i dužinom segmenta, a obrnuto proporcionalno sa prečnikom cilindra.

Dobro izveden postupak rolovanja zavisi najviše od dva faktora: mašine za rolovanje i talenta operatera, koji pored znanja i iskustva ima i pravi osećaj za meru bez dodatnih popravki čekićem, dizalicama ili brenerom. Uticaj operatera je od posebnog značaja pri radu sa starim rol-mašinama, koje su jako zastupljene pri izradi razmenjivača toplote kod manjih ili srednjih proizvođača, jer te mašine nisu previše iskorišćene da bi se nabavljale nove savremenije. Nove mašine rade po istom principu rolovanja, ali imaju bolje valjke (bombirane, veće tvrdoće i finije površine), veću bezbednost u radu, visoku automatizovanost procesa i mnoštvo dodatnih pomagala. Naročito je bitna veličina mašine u odnosu uobičajeni radni komad, za veće čvrstoće, debljine i širine materijala valjci imaju veće prečnike, što onemogućava izradu omotača manjih prečnika. Optimalniji rezultati rolovanja postižu se za velike proizvodne razlike u geometriji doboša, ako je na raspolaganju više veličina starijih rol-mašina od jedne visokoautomatizovane.



**Sl. 4.3.** Hidraulične rol-mašine tipa DURMA (Vendo Kereskedelmi Kft. Mađarska)  
 Tip HRB-3 2013 – 3 valjka, gornji  $D=230$  mm, bočni  $D=210$  mm, rol-dužina  $L=2050$  mm,  
 max. debljina lima: predrolovanje ( $s=10$  mm), rolovanje ( $s=13$  mm)  
 Tip HRB-4 2013 – 4 valjka, gornji  $D=230$  mm, bočni  $D=190$  mm, donji  $D=210$  mm, rol-  
 dužina  $L=2050$  mm, max. debljina lima: predrolovanje ( $s=10$  mm), rolovanje ( $s=13$  mm)

Na slici Sl. 4.3, prikazane su moderne hidraulične rol-mašine sa 3 i 4 valjka sa komandnim pultom i mnoštvom opcionih funkcija, počev od bombiranih valjaka do bočnih i vertikalnih nosača za pridržavanje lima. Snaga motora mašine je 11 kW sa većim brojem brzina rada. Mašine ove veličine pokrivaju uobičajene debljine zida omotača razmenjivača, dok za rolovanje većih debljina lima treba razmotriti opcije kupovine posebne mašine ili uslužnog rolovanja kod kooperanata.

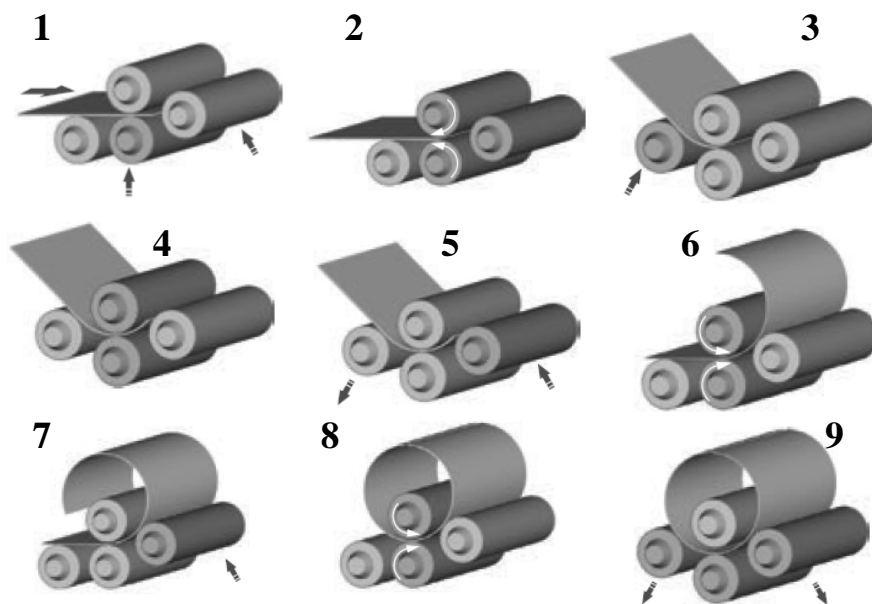


**Sl. 4.4.** *Princip rada rol-mašine sa 3 valjka, bočni valjci su osno okretni i pojedinačno pokretni po krugu rotacije, gornji valjak je osno okretan i opciono se kreće gore-dole: Poz.1 - Poravnanje lima i podizanje bočnog valjka za stezanje lima, Poz.2 - Predsavijanje kraja lima podizanjem drugog bočnog valjka, Poz.3i4 – Isto kao 1-2 na drugom kraju lima, Poz.5i6 – Roloavanje lima okretanjem gornjeg valjka levo-desno i podizanjem donjih valjaka*

Roloavanje sa tri valjka podrazumeva geometriju kruga određenog pomoću tri tačke, čiji se prečnik do sastavljanja smanjuje približavanjem donjih valjaka po zadatom krugu ili spuštanjem gornjeg valjka ka dole, pri čemu se najčešće gornji pogonski valjak okreće i izaziva rolovanje lima. Prednost ovog principa je što u fazi rolovanja nema čvrstog stezanja lima, pa su manje osetljive na površinske neravnine lima, a nedostatak geometrijska nemogućnost savijanja početka i kraja lima (nema trećeg oslonca). Ovaj nesavijeni deo obično iznosi 1,5 - 3,5 puta debljina lima, koji se kasnije mora odseći ili vršiti predsavijanje krajeva lima, kao što je prikazano na slici Sl. 4.4. Predsavijanje inače izaziva najveće opterećenje mašine, jer poluprečnik savijanja dostiže meru gornjeg valjka. Dorađivanje na konačnu meru posle predsavijanja krajeva može se izvesti rolovanjem celog kruga posle mestimičnog zavarivanja krajeva cilindra. Rolovani komad ne može dostići prečnik gornjeg valjka, koji je zbog pogona veći od bočnih valjaka i mora imati demontažni jedan oslonac za skidanje radnog komada. Ako ima potrebe za rolovanjem konusa, bočni valjci moraju imati mogućnost zakretanja po dužini.



Rolovanje sa 4 valjka je otklonilo nedostatak predsavijanja krajeva lima, ali mašine sa 3 valjka i dalje imaju svoje prednosti, jednostaviji rad i niže cene na tržištu. Princip rolovanja sa 4 valjka prikazan je na slici Sl. 4.5, gde je četvrti valjak smešten vertikalno ispod gornjeg valjka i služi za stezanje i rolovanje lima u kombinaciji sa gornjim pogonskim valjkom.

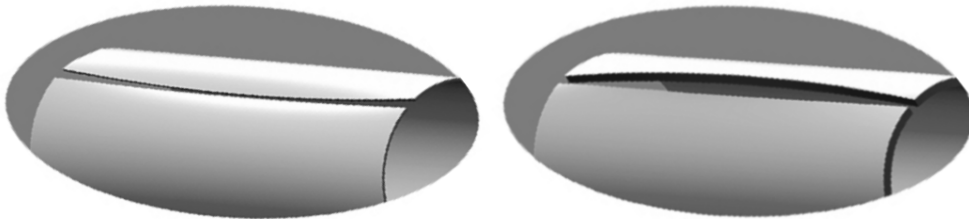


**Sl. 4.5.** *Princip rada rol-mašine sa 4 valjka, bočni valjci su osno okretni i pojedinačno pokretni po krugu rotacije ili piramidalno, gornji valjak je osno okretan, a donji valjak je okretni i opciono kreće se gore-dole: Poz.1 - Poravnanje lima podizanjem desnog bočnog valjka i stezanje lima donjim valjkom, Poz.2,3i4 - Savijanje kraja lima sinhronizovanim podizanjem levog i desnog bočnog valjka uz povremeno rolovanje lima, Poz.5 – Položaj kada je desni bočni valjak zahvatio kraj lima, a levi bočni valja se spušta, Poz.6,7i8 – Rolovanje lima pomoću gornjeg i donjeg valjka uz povremeno pojačanje pritiska desnim i levim bočnim valjkom – do sastavljanja izvodnica cilindra, Poz.9 – Dovođenje na meru, otpuštanje bočnih valjaka, donjeg valjka i vađenje rolovanog komada*

Rol-mašine sa 4 valjka rade brzo i tačno, bez predsavijanja ili okretanja lima uz mogućnost uvođenja lima sa obe strane mašine, a uz pomoć lednog bočnog valjka moguća je izrada pravougaonih ili eliptičnih profila, sve uz manji broj izvršilaca. Za rolovanje konusa bočni valjci takođe moraju imati mogućnost zakretanja po dužini. Rolovanje se odvija bez proklizavanja, jer se sila pritiska ne menja što je prednost, ali je nedostatak ako ima neravnina lima po površini, zbog udarnih opterećenja i mogućnosti nastajanja elipsoidnosti rolovanog dela.

Bez obzira kojom mašinom se vršilo rolovanje lima postoji mogućnost grešaka, koje mogu uticati na dalju izradu doboša. Neprilagođena snaga mašine

otporu deformacije rolovanog lima, može dovesti do ovalnosti na sredini cilindra, što je prikazano na slici Sl. 4.6. Ovalnost ili elipsoidnost može biti interna (unutrašnja) i eksterna (spoljašnja). Ovo odstupanje prečnika cilindra po dužini je posledica većeg ugiba valjka na sredini ili od nedovoljnog kontaktnog pritiska bombiranih valjaka. Podešavanje bombaže kod cilindričnih valjaka iskusni majstori postižu dodavanjem kartona ili tankih limova na sredini valjka. Ako omotač doboša



**Sl. 4.6.** Greške rolovanja lima usled savijanja valjaka: levo – interna ovalnost (zbog nedovoljne sile pritiska bombiranog valjka), desno – eksterna ovalnost (preveliki ugib sredine valjka usled velike sile pritiska)

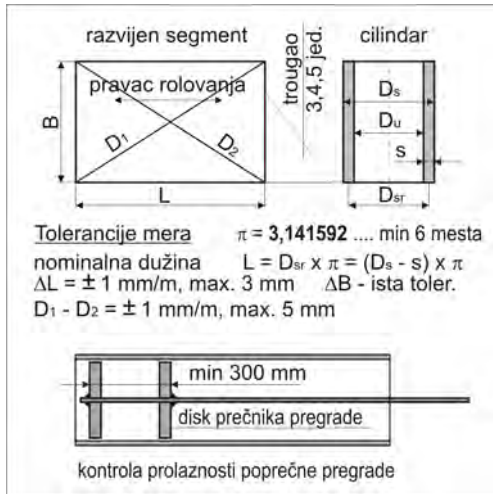
ima malu debljinu a veliki prečnik, veoma je moguće da će doći do ovalnosti po prečniku još u fazi rolovanja usled dejstva gravitacionih sila i nedovoljne krutosti rolovanog komada. U takvim slučajevima je neophodno konzolno pridržavanje komada u fazi rolovanja i privremene ugradnje "zvezde oblika", kao što je to prikazano na slici Sl. 4.7.



**Sl. 4.7.** levo: Konzolno pridržavanje rolovanog segmenta, desno: Ugradnja "zvezde oblika"

Sečenje lima segmenta za rolovanje je mesto nastanka nepopravljivih grešaka. Zato je neophodna kontrola dimenzija i ortogonalnosti pri obeležavanju segmenta na limu. Na slici Sl. 4.8, prikazane su tolerancije mera razvijenog cilindra i dijagonalna kontrola. Za velike komade kontrolu vertikalnosti vršiti pomoću trougla 3,4,5 jedinica koji je sigurno pravougli ( $3^2+4^2=5^2$ ). Svi uzdužni i obodno zavareni spojevi omotača razmenjivača toplote (osim ribojlera) moraju se

kontrolisati sa unutrašnje strane cilindra na zaostale izraštaje zavarivanja, koje treba obrusiti, da pri montaži ne sprečavaju slobodan prolaz cevnog registra. Kod razmenjivača toplote sa demontažnim registrom cilindričnost omotača se



proverava tokom izrade, a konačno kontroliše pomoću alata koji se sastoji od dva metalna diska prečnika kao poprečne pregrade (ili nosači cevi) na rastojanju minimalno 300 mm, koji su centralno zavareni na krutu cev dužine nešto veće od omotača (ISO 16812). Dozvoljeni zazor između unutrašnjeg prečnika omotača i poprečnih pregrada propisan je TEMA standardom (RCB-4.3), ali može biti i veći, ako ne utiče na koeficijent prolaza toplote. Više o toleranciji rolovanja, tačka 2.4.3.

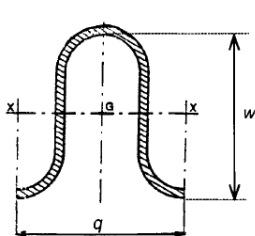
Sl. 4.8. Kontrola i tolerancije mera pri sečenju lima i kontrola prolaznosti pregrade

## 4.2.2. Ostale komponente doboša

Kompletan doboš razmenjivača toplote dobija se dodavanjem elemenata kao: prirubnice, cevne ploče, fiksne glave, kompenzatori, priključci, fiksne pregrade, oslonaci i vešaljke u kombinaciji zavisno od tipa razmenjivača i tehničke dokumentacije. Osnovno pravilo pri izradi doboša razmenjivača je ugradnja svih komponenti pre montaže cevnog registra, zbog oštećenja cevi ili nastanka dodatnih napona pri zavarivanju na dobošu posle montaže. Kod nekih konstrukcija to nije moguće, kao što su svi tipovi sa zavarenom bar jednom cevnom pločom na doboš (npr. tip BEM). U nastavku će se razmotriti neke pozicije kompletiranja doboša.

### a) Kompenzator aksijalnih dilatacija doboša

Kompenzacija termičkih dilatacija razmenjivača toplote se rešava izborom odgovarajuće konstrukcije, kao U-cevni ili razmenjivači sa plivajućom glavom, međutim u specifičnim slučajevima usled temperaturnih šokova ili nemogućnosti

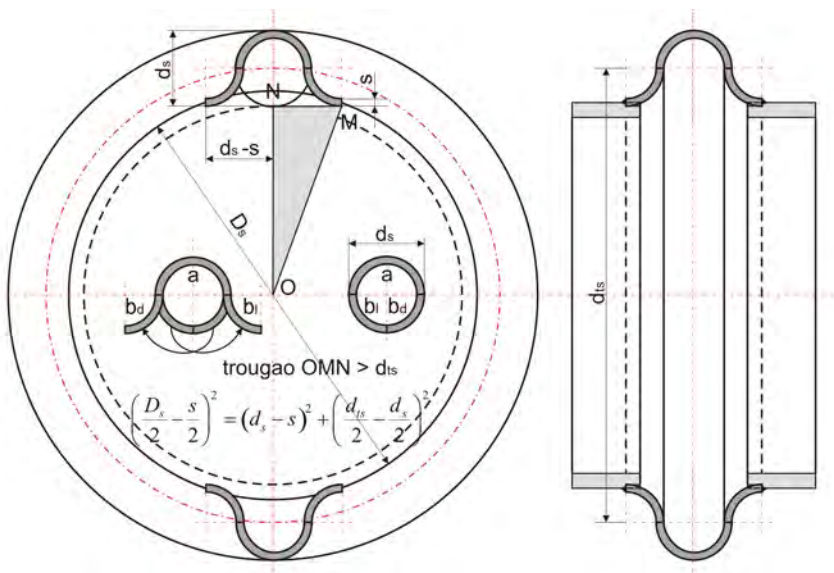


Sl. 4.9. Kompenzatori sa U-mehom, crtež i oznake prema EN 13445. desno: Kompenzatori s debelim zidom za razmenjivače toplote, U.S. Bellows, Inc. USA

slobodne dilatacije, pribegava se ugradnji kompenzatora u omotač doboša. Prema EN 13445-3 deo 14, predviđena su tri modela kompenzatora, a najjednostavniji od njih je model sa U-mehom iz jednog segmenta, prikazan na slici Sl. 4.9, a na slici Sl. 4.10 prikazan je razmenjivač tipa BEM sa centralno ugrađenim kompenzatorom tog modela. Često se radi kompenzator od cevnog torusa nastalog savijanjem šavne cevi, kao na slici Sl. 4.11, za razmenjivače koji nisu PED oprema. Torus se posle savijanja seče po neutralnoj osi, a unutrašnji deo raseca po pola na dve četvrtke koje pre zavarivanja menjaju mesta. Srednji prečnik torusa se može izračunati prema geometriji sa slike. Veću elastičnost ovaj kompenzator postiže ako se torus prethodno spljošti na presi tako da dobije elipsast poprečni presek. Kompenzator se mora ugraditi veoma pažljivo, da ne narušava ostalu geometriju i funkciju oslonca razmenjivača, i da ima priključke za odzračivanje i pražnjenje meha.



**Sl. 4.10.** Dobošasti razmenjivač toplote, TEMA tip BEM, kompenzator sa U-mehom



**Sl. 4.11.** Izrada zavarenog kompenzatora sa jednim mehom od torusa savijene cevi

Milan R. Rikalović

# DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

**Knjiga I: KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**



**Naredne stranice su u prekidu !**



Dispoziciju nastavka teksta na sledećoj strani videti u sadržaju.

**Ako želite kompletan tekst - NARUČITE KNJIGU**

### 4.3. ZAVRŠNO ISPITIVANJE I ISPORUKA DRT

Tokom izrade razmenjivača, neophodno je da se vrši neprekidna kontrola ili inspekcija svih faza procedure fabrikacije proizvoda. Pregled vrše ovlašćene grupe ili pojedinci u okviru proizvođača u skladu sa sistemom uspostavljene kontrole, što je najbolji vid prevencije proizvođača u okviru datih garancija za proizvod. Pored ove nenametnute kontrole u zavisnosti od kategorizacije razmenjivača prema PED proceduri postoje razne vrste obaveznih kontrola u skladu sa zakonima i propisima od strane akreditovanih tela, kao vid javne zaštite od potencijalnih opasnosti u izradi ili eksploataciji. Najzad postoje nezavisne i naručene kontrole širokog obima i namene od strane korisnika, u cilju otkrivanja skrivenih grešaka ili nepravilnosti u radu, kao mere bezbednosne preventive ili veštačenja u slučaju otkaza - havarije u toku eksploatacije. Inspekcije obavljaju stručna i iskusna tela korišćenjem posebne opreme, alata i instrumenata. Veći deo faznih kontrola je razmotren uz fabrikaciju komponenti (npr. ispitivanje zavarenih spojeva) i nije predmet završne kontrole. Završna inspekcija razmenjivača toplote radi se na kraju izrade proizvoda ili pri kraju montaže, ako je to tehnički uslov, koja uključuje ispitivanje izdržljivosti opreme na pritisak i ispitivanje na propustljivost - curenje zaptivnih spojeva.

Proba na izdržljivost opreme na pritisak je sastavni deo propisa PED opreme, EN 13445 [S2], (bez dejstva plamena), EN 12953 (kotlovska postrojenja) i direktive 2014/68/EU [N3] u Evropi, dok je u Americi dominantan standard ASME VIII div.1 [S10] (podržano i TEMA standardom), kao i preporuke API [S9].

#### 4.3.1. Karakteristike i vrste završnog ispitivanja

Ispitivanje razmenjivača toplote zavisi od više parametara koji su posledica zakonskih, tehničkih i ugovornih uslova, kao što su:

- Temperature i pritisak fluida u razmenjivaču toplote,
- Propisi i preporuke o vrsti, obaveznosti i proceduri završnog ispitivanja,
- Tela koja obavljaju, kontrolišu tok i odobravaju rezultate završnog ispitivanja,
- Specifičnosti ispitivanja prema zahtevu korisnika, precizirano ugovorom,
- Naknadna ispitivanja u toku eksploatacije ili posle revizije opreme.

Karakteristike fluida prvenstveno utiču preko svojih fizičko-hemijskih osobina na vrstu ispitivanja, kao i potrebnu energiju za njegovo obavljanje (temperatura i pritisak), a na bazi propisa za opremu pod pritiskom se određuje ispitna procedura. Proizvođač opreme uvek sprovodi završna ispitivanja i o tome izdaje dokument, pri čemu ukoliko razmenjivač toplote podleže nadležnosti ovlašćenog tela mora imati njihovu saglasnost. U skladu sa ugovorom između proizvođača i kupca, mogu se predvideti i druga ispitivanja ili kontrole toka ispitivanja od strane naručioca ili od njega ovlašćene organizacije. Ispitivanja u toku eksploatacije opreme u skladu sa

odredbama propisa ili zahteva korisnika (npr. ispitivanje posle revizije ili zbog pronalazjenja skrivenih grešaka) su nezavisne inspekcije, koje mogu obaviti drugi ovlašćeni izvođači u skladu sa propisima i zahtevom naručioca.

Sve PED posude moraju biti podvrgnute završnom ispitivanju pod pritiskom, kao što predviđa EU direktiva 2014/68, ali i ostali propisi opreme pod pritiskom. Metode ispitivanja se utvrđuju zavisno od mogućnosti primenljivosti u tehnologiji procesa, na bazi čega se mogu klasifikovati:

- a) Hidrostatička proba na ispitni pritisak,
- b) Pneumatski test,
- c) Kombinovani hidrostatičko-pneumatski test,
- d) Ispitivanje na nepropusnost spojeva.

Treba napomenuti da ispitivanje nepropusnosti spojeva ne zamenjuje probu na pritisak i nije obavezna metoda PED opreme, ali je često zahtev korisnika, kao provera curenja zaptivnih spojeva naročito opasnih fluida.

*Hidrostatička proba na ispitni pritisak* je postupak standardnog završnog ispitivanja PED opreme, predviđen standardom EN 13445-5. Ostale metode ispitivanja se primenjuju samo ako je hidrostatička proba neprimerena ili nije moguća. Ispitnim pritiskom se proverava može li oprema mehanički izdržati pritisak definisan kao radno dozvoljen, a da nema nedozvoljenih napona bilo koje komponente ili opreme u celini, odnosno da nema trajnih deformacija ili propuštanja fluida usled dejstva pritiska. Ispitni pritisak mora biti konstantan tokom ispitivanja pod uslovom da se temperatura ispitnog fluida i okoline ne menja i ne sme biti vibracija pritiska na mernom instrumentu. Tok ispitivanja sprovodi proizvođač, čiji operatori održavaju neprekidnu kontrolu postupka i sprovode sve mere bezbednosti. Prema potrebi zavisno od klase posude, ispitivanju može prisustvovati kontrolni organ ovlašćenog tela, dok naručilac opreme ili njegov stručni poverenik može biti neograničeno prisutan.

Visina ispitnog pritiska je veoma važna veličina, ona pokazuje kakav je odnos najvišeg radnog pritiska na radnoj temperaturi i pritiska u toku ispitivanja na temperaturi okoline, pa prema tome i odnos naponskog stanja opreme u navedenim uslovima. Prema ranijim propisima (JUS M.E2.200, pre PED propisa) ispitni pritisak se jednostavno određivao na bazi koeficijenta uvećanja proračunskog (radnog) pritiska i on je uobičajno iznosio 1,3 (1,5) za hidrostatička ispitivanja ili 1,1 za pneumatski test. Na bazi direktive 2014/68/EU i EN 13445 (PED oprema bez dejstva plamena) u Evropi određivanje ispitnog pritiska je postalo složenije. Za određivanje ispitnih pritisaka razmenjivače toplote kao PED posude, u Srbiji važe: Pravilnik o tehničkim zahtevima za projektovanje, izradu i ocenjivanje usaglašenosti opreme pod pritiskom [N27], i EN 13445, u skladu sa izmenjenom direktivom 2014/68/EU. S obzirom da su dobošasti razmenjivači toplote oprema koja se najčešće ugrađuje u ozbiljne tehnološke sisteme, *M. Rikalović* predlaže ako je moguće, završno ispitivanje DRT raditi po proceduri PED opreme, bez obzira da li je PED ili nePED oprema, jer se postiže veća ozbiljnost u proceduri ispitivanja i eliminiše tolerancija za "mala curenja" zaptivnih spojeva) nePED opreme.



Prema EN 13445-5:2009 (stavka 10.2.3.3) ispitni pritisak  $P_{test}$  se računa prema većoj vrednosti dobijenoj prema jednačini (4.6):

$$P_{test} = \max \left( 1,25 P_d \frac{f_a}{f_{Td}} ; 1,43 P_s \right), \quad \text{gde je:} \quad (4.6)$$

- $P_{test}$  [MPa] je ispitni (testni) pritisak meren na najvišoj tački posude,
- $P_d$  [MPa] je projektni (*design*) pritisak na temperaturi  $T_d$  PED opreme,
- $T_d$  [°C] je projektna (*design*) temperatura rada PED opreme,
- $T_s$  [°C] je sobna temperatura, pre početka rada, obično iznosi 20 °C,
- $P_s$  ili  $PS$  je maksimalno dozvoljeni pritisak u posudi na sobnoj temperaturi  $T_s$ ,
- $f_a$  [MPa] je proračunski napon na temperaturi ispitivanja (sobna temperatura),
- $f_{Td}$  [MPa] je proračunski napon na projektnoj temperaturi  $T_d$  opreme.

Proračunski pritisak može biti isti ili veći od projektnog pritiska (npr. uvećan za statičku visinu stuba komponenti koje su ispod najviše tačke položaja manometra posude pri ispitivanju). Pritisak posude na sobnoj temperaturi je obično manji nego pritisak na radnoj temperauri, a oba su manja od projektnog pritiska (detalje videti u poglavlju 3). Za proračun ispitnog pritiska je razumljivo da se uzima najveći dozvoljeni pritisak, odnosno projektni pritisak,  $P=P_s=P_d$ . Odnos napona na sobnoj i radnoj temperaturi ( $f_a/f_{Td}$ ) se uzima za onaj materijal koji je pod dejstvom ispitnog pritiska najveći. Odnos ( $f_a/f_{Td}$ ) je uvek veći od 1, osim u slučaju kada je najviša radna temperatura ispod 20 °C kada je jednak 1. Proračunski naponi  $f_a$  i  $f_{Td}$  na sobnoj i projektnoj temperaturi određuju se prema EN 13445-3 u zavisnosti od stepena sigurnosti, vrste materijala i kategorizacije opterećenja, koja mogu biti normalna (tekući rad) i specifična (kada se uzima uticaj korozije i sl.).

Za normalna opterećenja svih čelika sa izduženjem nakon loma  $A < 30\%$ , izuzev čeličnih liva, sitnozrnih i austenitnih (nerđajućih) čelika je:

$$f_a = \frac{R_m}{2,4}, \quad f_{Td} = \frac{R_{p0,2/T}}{1,5} \quad (4.7)$$

dok je normalno opterećenje za austenitne čelike izduženja nakon loma  $A > 35\%$ :

$$f_a = \frac{R_{p1,0}}{1,5}, \quad f_{Td} = \min \left( \frac{R_{p1,0/T}}{1,2}; \frac{R_{m/T}}{3} \right) \quad (4.8)$$

gde su čvrstoće (naponi) ili granice za određeno stanje materijala (poglavlje 3):

- $R_m$  i  $R_{m/T}$  [MPa] je zatezna čvrstoća materijala na sobnoj i temperaturi  $T$ ,
- $R_{p1,0}$  [MPa] je čvrstoća materijala na sobnoj temperaturi i deformaciji 1%,
- $R_{p0,2/T}$  i  $R_{p1,0/T}$  [MPa] je čvrstoća materijala na temperaturi  $T$  pri dozvoljenoj deformaciji od 0,2% i 1%.

Ispitni pritisak se obavezno unosi u tablicu proizvoda (u barima ili MPa), kao dodatni parametri sa datumom ispitivanja. Uneti podaci moraju biti u skladu sa direktivom 2014/68/EU, o čemu je detaljno bilo reči u odeljku 3.1.

**Primer 4.4.** Odrediti ispitni pritisak za dobošasti razmenjivač toplote tipa 4/2 sa strane fluida u cevi, ako je radni fluid u cevi voda projektnog pritiska 10 bara i temperature 150 °C. Materijal torisfričnog danca i omotača glave je čelik PH265GH, EN 10028-2.

**Rešenje:** Za izabrani materijal PH265GH prema EN 10028-2 se očitavaju sledeće vrednosti:  $R_m=410$  MPa,  $R_{p0.2/150}=223$  MPa (za debljine lima  $t \leq 16$  mm), Proračunski naponi ispitivanja su prema jednačini (4.7): na sobnoj temperaturi  $f_a=410/2,4=170,83$  MPa, na radnoj temperaturi  $f_{a150}=223/1,5=148,67$  MPa. Projektni pritisak je  $P=P_s=P_d=10$  bara (1 MPa), pa prema jednačini (4.6) dobijamo: na sobnoj temperaturi  $P_{test}=1,43$   $P_s=1,43 \cdot 1=1,43$  MPa, na radnoj temperaturi  $P_{test}=1,25$   $P_d$  ( $f_a/f_{a150}$ )  $=1,25 \cdot 1 \cdot (170,83/148,67)=1,44$  MPa. Usvaja se veća od izračunatih vrednosti, dakle  $P_{test}=1,44$  MPa (14,4 bara). Ako usvojimo  $P_{test}=1,5$  MPa, to bi bila ista vrednost kao po "starim" propisima  $P_{test}=1,5$   $P_s=1,5 \cdot 1=1,5$  MPa. Činjenica da razmenjivač toplote ima 4 prolaza u cevi i 2 prolaza u omotaču ne utiče na određivanje ispitnog pritiska, jer komore broja prolaza su pod dejstvom istog pritiska i zaptivači između njih utiču na tok strujanja i trpe samo lokalni pad pritiska. Međutim, svaki fluid ima svoju potpuno odvojenu komoru i ispitivanje se mora sprovesti posebno.

Prikazani postupak se odnosi na ispitivanje nove posude. Ukoliko se pri ispitivanju pokažu nedostaci koji zahtevaju intervenciju na posudi, kao što su popuštanje materijala, deformacije, curenje spojeva i sl. ispitivanje se zaustavlja, obeležavaju se mesta defekta i posuda se rasterećuje od pritiska. Svako popuštanje konstrukcije zahteva poziv projektanta i rad na analizi projekta i utvrđivanju uzroka greške, što može biti povezano sa izradom novih komponenti, povećanju troškova i produženju rokova izrade (vrlo neprijatna komunikacija aktera i traženje odgovornosti). Greške operatera (najčešće curenje zavarenih ili zaptivnih spojeva) mogu biti rutinske, koje se lako otklanjaju, a mogu zahtevati reviziju zavarenih spojeva i njihova ponovna snimanja. Potpuno novo hidrostatičko ispitivanje se vrši posle otklanjanja svih nedostataka po proceduri završnog ispitivanja. Hidrostatička ispitivanja u toku eksploatacije opreme pod pritiskom, mogu biti predviđena u okviru povremenih pregleda, u skladu sa nacionalnim zakonodavstvom. Za Srbiju prema Pravilniku o pregledima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe [N28], kojim su propisani uslovi, rokovi i nivo ispitivanja PED opreme na pritisak u tekućem radu, koja zavise od nivoa opasnosti na ljude i okolinu, ili dužine vremena prekida rada opreme. U slučaju premeštanja opreme s jedne lokacije na drugu, promene projekta ili promene tehnologije rada, kao i radovima na samoj opremi: rekonstrukcija, sanacija ili sl., ispitivanja se vrše u skladu sa projektom. Periodično ispitivanje PED opreme na pritisak iako su mera bezbednosti rada, mogu biti i uzrok oštećenja, smanjenja perioda upotrebe, čak i havarije opreme. Zbog toga se uz saglasnost nadležnih tela sa velikom pažnjom razmatraju i alternativni postupci pregleda (npr. nerazorna ispitivanja), kao i mere smanjenja radnog i ispitnog pritiska u preostalom veku upotrebe opreme.

Pneumatski test je alternativni postupak završnog ispitivanja, prema EN 13445-5:2009 (stavka 10.2.3.4), samo u slučaju ako je ispitivanje hidrostatičnom probom štetno ili nepraktično. Pneumatski ispitni pritisak se računa na isti način kao i hidrostatički, izraz (4.6), ali lokacija ispitivanja zbog opasnosti od eksplozije mora biti u zatvorenom prostoru, (npr. posebna komora) koji može izdržati dejstvo eksplozije, ili posuda mora biti učvršćena u vodenom bazenu uz primenu mera

zaštite od rasprskavanja delova u slučaju eksplozije. Ukoliko navedene mere zaštite nisu moguće, onda je pre pneumatskog ispitivanja obavezno izvršiti testiranje zavarenih spojeva metodom bez razaranja (IBR) i to noseći zavareni spojevi 100% radiografskom metodom (RT), a svi ostali zavareni spojevi metodom penetranta ili magnetnih čestica (PT, MT). Pritisak ispitivanja se mora postepeno povećavati do vrednosti od 50% potrebnog ispitnog pritiska, nakon toga pritisak se povećava u koracima od oko 10% ispitnog pritiska dok se isti ne postigne. Ispitni pritisak se posle pregleda smanjuje na inspekcijski pritisak  $P_i$  prema formuli (4.9):

$$P_i = P_s \frac{f_a}{f_{Td}}, \quad \text{gde su oznake iste kao u (4.6).} \quad (4.9)$$

Određivanje ispitnih pritisaka prema evropskim normama, zbog raznih nedoumica (npr. najveći odnos ( $f_a/f_{Td}$ ) u izrazu (4.6) ponekad bude vrlo veliki), utiče da se u praksi gde je to dozvoljeno, često poziva na stabilan ASME standard (BVPC VIII. div.1, stavka UG-99 hidrostatički test, UG-100 pneumatski test). Po njemu je:

$$P_{Ht} = 1,3 MAWP \frac{S_t}{S_d}, \quad P_{Pt} = 1,1 MAWP \frac{S_t}{S_d}. \quad (4.10)$$

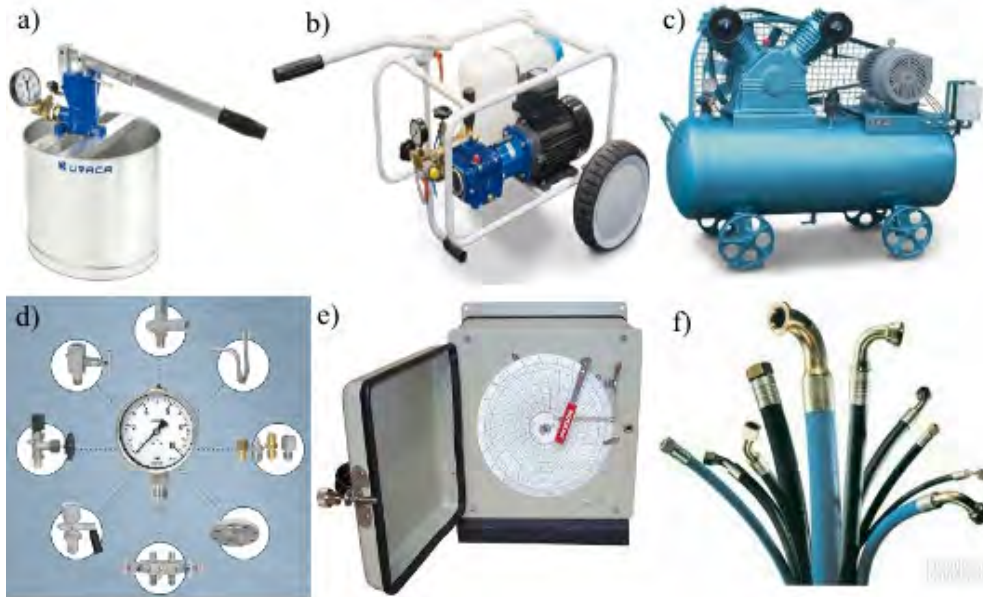
gde su  $P_{Ht}$  i  $P_{Pt}$  hidrostatički i pneumatski ispitni pritisak,  $MAWP$  – najveći dozvoljeni radni pritisak komore posude (maximum allowable working pressure), a  $S_t/S_d$  takozvani najniži odnos naprezanja materijala ispitnog sklopa, na temperaturi ispitivanja -  $S_t$  i na najvišoj radnoj temperaturi -  $S_d$  (tzv.  $LSR$  – lowest stress ratio).

Kombinovano hidrostatičko-pneumatsko ispitivanje je postupak kada se posuda koja se ispituje delimično napuni ispitnom tečnošću, a zatim se podiže pneumatski pritisak iznad nivoa tečnosti. Ovo ispitivanje se u potpunosti sprovodi po proceduri pneumatskog ispitivanja.

#### 4.3.2. Oprema, instrumenti, vreme i brzina ispitivanja

Parametri procedure ispitivanja na pritisak opreme pod pritiskom propisani su osnovnim sigurnosnim zahtevima evropske direktive 2014/68/EU [N3]. Oprema i instrumenti koji služe za sprovođenje postupka su pribor za ispitivanje, oni se privremeno koriste i nisu sastavni deo proizvoda, posle završetka ispitivanja se uklanjaju. Iako ima privremeni karakter pribor za ispitivanje mora imati nosivost iznad ispitnog pritiska, visoku pouzdanost pri upotrebi i tačnost pri merenju. U ispitni pribor spadaju: blokadni i priključni elementi svih otvora na opremi koja se ispituje (kontrapribornice, mufovi, čepovi i sl.), cevni sklop za povezivanje ispitnih komponenti (cevi i fitting, zaporni organi-ventili, visokopritisna fleksibilna creva i sl.), merni i kontrolni instrumenti (manometri, termometri, pisači i sl.) i oprema za podizanje pritiska, kao hidraulične pumpe, kompresori gasa, boce za gas itd. Na slici Sl. 4.126, prikazan je konglomerat pribora za ispitivanje, koji se grupišu u

zavisnosti od vrste, obima i procedure ispitivanja ili zahteva naručioca. To su: instrumenti za merenje ili kontrolu pritiska i temperature, oprema za zaštitu od prekoračenja merenih vrednosti, oprema ili sistemi za podizanje pritiska i cevni elementi, armatura i fitting za povezivanje komponenti u merni sistem.



**Sl. 4.126.** Pribor za ispitivanje opreme na ispitni pritisak: a) Ručna hidraulična pumpa za podizanje hidrostatickog pritiska, b) Elektromotorna hidraulična pumpa, c) Pokretni kompresor za podizanje pneumatskog pritiska, d) Manometar, priključna armatura i fitting za povezivanje pribora, e) Pisač za produženo merenje toka pritiska i temperature pri ispitivanju, f) Razne vrste fleksibilnih visokopritisnih creva

Merni i kontrolni instrumenti služe za merenje ili kontrolu ispitnog pritiska i drugih pratećih veličina u toku ispitivanja. Manometar je najvažniji instrument, čiji opseg pokazivanja mera brojanika treba da je u rasponu 1,5 – 4 puta veći od maksimalnog ispitnog pritiska (EN 13445-5 preporučuje odnos oko 2). Za velike posude ili sisteme može se koristiti više manometara koji mogu imati mogućnost snimanja izmerenih vrednosti. Svi merni uređaji koji prikazuju merenu vrednost ili je zapisuju (pisači) moraju biti kalibrisani prema standardno etaloniranom glavnom instrumentu najmanje jednom godišnje, ili upoređeni (koristi se izraz – umerni tj. upareni sa etalonom) s odobrenim instrumentom ovlašćenog tela (što je povoljnije od kalibracije). Etalonirani manometar je kontrolni instrument kojim se kontroliše tekući (radni) manometar. Period važenja etaloniranih manometara zavisi od klase tačnosti; preko 0,6 je 2 godine a ispod je 1 godina. Kontrolni manometar mora biti klase tačnosti 1,6 za radne pritiske do 40 bara, a klase tačnosti 1 za veće pritiske.

Manometri se deklariraju prema EN 837 na bazi raspona mernog područja, klasi tačnosti, vrsti i veličini priključka i meri kućišta. Merno područje ima 4 grupe: 0-0,6 bara, 0-1 bar, 0-2,5 bara i 0-4 bara, kao i uvećanja faktorom 10. Klasa tačnosti merenja je razvrstana: 0,1; 0,25; 0,6; 1; 1,6; 2,5 i 4. Klasa tačnosti označava dozvoljenu grešku u % tokom merenja. Klase manometara 0,1 do 0,6 primarno se koriste za precizna merenja u laboratorijima (uglavnom etaloni), klase 1 i 1,6 koriste se za ispitivanja (prema EN 12162, dozvoljena greška ispitnog instrumenta je  $\pm 1,5\%$ ), dok klase 2,5 i 4 se koriste u nadzorne svhe bez posebnih zahteva tačnosti. Prema evropskoj direktivi PED oprema (EN 2014/68) manometri ne moraju imati znak "CE", osim za merenje pritiska opasnih materija. Priključci za dovod pritiska su colovni navoj (1/4" do 1/2") i mogu biti spoljašnji i unutrašnji. Nazivna mera kućišta za Burdonove manometre su: 40 i 50 (klase 1,6-4), 63 i 80 (klase 1-4), 100 (klase 0,6-2,5), 160 (klase 0,25-1,6) i 250 (klase 0,1-1,6), dakle veća tačnost – veća nazivna mera. Manometar se odvaja od instalacije zapornim organom, nazvan trokraka manometarska slavina, iako uopšte ne moraju biti slavine, već igličasti ventili. Manometar mora biti postavljen što bliže ispitivanoj posudi, zaštićen od hidrauličnog udara i da u blizini ima mogućnost povezivanja s kontrolnim manometrom. Položaj manometra mora biti vidljiv operateru podizanja pritiska, što je veoma važno za kontrolu prekoračenja i brzine rasta pritiska.

Oprema za podizanje pritiska ima zadatak da podigne pritisak u ispitivanoj instalaciji na nivo merenja, što u praksi podrazumeva da mora imati tehničke mogućnosti ostvarenja pritiska iznad ispitnog pritiska. Podizanje pritiska sistema se ostvaruje dotokom mernog fluida pomoću hidrauličnih uređaja (pumpe ili kompresori) ili iz drugog sistema koji održava pritisak iznad ispitnog pritiska. Podizanje hidrostatičkog pritiska se najčešće obavlja pomoću pumpi, dok podizanje pneumatskog pritiska se odvija pomoću kompresora ili, posuda komprimovanog gasa, a moguće je i iz instalacije komprimovanog vazduha. Svakom ispitivanju na pritisak prethodi korak punjenja instalacije ispitnim fluidom, osim ako je ispitni fluid vazduh, koji je svuda pa i u posudi. Punjenje ispitne instalacije vodom može biti problem za velike zapremine, ako u blizini nije raspoloživ vodeni resurs. Zbog toga je za ponavljajuće slučajeve ispitivanja posuda velikih zapremina (npr. cisterne) pogodno imati na raspolaganju bazen sa vodom iz koga se uzima i u koji se vraća ispitna voda. U proizvodnji dobošastih razmenjivača toplote, veoma retko se pojavljuju velike zapremine, a ako su u proizvodnji velike serije razmenjivača, ekonomično je imati manje priručne rezervoare vode, radi uštede i optimalnog trošenja resursa. Pošto je voda nestišljiv fluid, za podizanje pritiska napunjene instalacije potrebne su visokopritisne pumpe malog protoka. Uglavnom se koriste ručne klipne pumpe za manje zapremine ili električne pumpe za veće zapremine sa regulacijom protoka (videti sliku Sl. 4.126). Najčešće su u upotrebi ručne klipne pumpe do 60 bara (na slici pumpa HP 300, "URACA" Nemačka, cilindar od 28 cm<sup>3</sup>, posuda od 30 litara), koje zadovoljavaju većinu ispitnih pritisaka, ali postoje i pumpe od 100 bara, 200 bara, kao i dvostepene pumpe do 1000 bara i više. Manje električne pumpe imaju protoke do 5 lit/min, dok veliki agregati imaju dve pumpe,

za punjenje protoka 150 do 750 lit/min, i za podizanje pritiska do 20 lit/min. Za punjenje instalacije ispitnim fluidom iz bazena, koriste se posebne niskopritisne pumpe velikog protoka, koje se posle punjenja odvajaju zapornim ventilom. Sva armatura, fitting, cevi i creva kojim se povezuju komponente sistema za ispitivanje, moraju imati otpornost na pritisak iznad ispitnog pritiska. Međutim, imajući u vidu da se ispitni pritisak menja u zavisnosti od proizvoda, prikladno je sav ispitni pribor prilagoditi najvećem pritisku pumpe, dok se veze sa ispitnom posudom (npr. prirubnice) i ispitni manometar prilagođavaju ispitnom pritisku.

Vreme ispitivanja je potrebno vreme za detaljni pregled konstrukcije pod dejstvom ispitnog pritiska, ali ne kraće od 30 min. od momenta postizanja punog opterećenja (TEMA RCB-1.31). Isto minimalno vreme ispitivanja propisano je i u EN 13445-5, tačka 10.2.3.3.8 (standardno hidrostatičko ispitivanje). Treba obratiti pažnju da se navodi minimalno vreme ispitivanja, dok gornja granica vremena ispitivanja nije određena, što se može tumačiti da je oprema trajno otporna na ispitni pritisak. Prema tome naručilac može zahtevati znatno duže vreme ispitivanja ali da je u razumnim granicama. Takozvano "produženo vreme ispitivanja" može biti mera provere nepropusnosti spojeva koji u toku eksploatacije neće biti dostupni (npr. cevna ploča). Produženo vreme ispitivanja može trajati i 24 sata, pri čemu se može postaviti i pisac za trajnu registraciju kolebanja pritiska u toku merenja, iako je nekad dovoljno postaviti običan novinski papir ispod spojnog mesta, koji trajno registruje propuštanje spoja (curenje). Uticaj promene okolne temperature pri dugom vremenu ispitivanja može da utiče na zapreminsku dilataciju ispitnog fluida, što u slučaju rasta temperature izaziva porast pritiska unutar posude, koji može biti viši od ispitnog pritiska i izazvati neprihvatljive deformacije, pa čak i havariju. Kao mera zaštite se obično produženi pritisak smanjuje (npr. na nivo radnog pritiska) ili se preduzimaju mere rasterećenja usled povećanja pritiska. Temperatura vode za ispitivanje ne sme biti niža od 10°C, niti viša od 50°C, ali da je viša od temperature pojave krtog loma upotrebljenog materijala posude.

Brzina podizanja pritiska je naročito bitna kod hidrostatičkog ispitivanja, obično se kaže podizanje pritiska treba da je lagano, bez udarnih opterećenja i skokovitih promena, naročito u zoni dostizanja maksimalnog ispitnog pritiska. Kod nestišljivih fluida, mala povećanja mase u ispitnoj zapremini dovode do velikog skoka pritiska, a pri većim brzinama dotoka dolazi do širenja udarnog talasa, koji u trenutku povećava pritisak iznad dozvoljenog ili izaziva vibracije pritiska, naročito ako postoje "vazdušni džepovi" usled nedovoljnog odzračivanja.

Brzina podizanja pritiska nije posebno kvantifikovana kod vodećih propisa PED opreme, ali kod nekih bezbednosnih preporuka hidrostatičkog ispitivanja se pominje brzina od 10 psi/min (0,69 bar/min) u završnoj fazi podizanja pritiska. Mala brzina podizanja pritiska se kod ručnih klipnih pumpi može postići sporim pokretanjem klipa, ako je manometar sa većim podelama i operater odgovoran, a kod električnih pumpi je neophodno smanjenje protoka i zaštita od prekoračenja pritiska pomoću graničnika pritiska.

### 4.3.3. Procedura ispitivanja na probni pritisak

Propisan tok ispitivanja ili procedura uspostavlja se na bazi iskustva proizvođača i zahteva bezbednosti kao mere zaštite od mogućih opasnosti u toku postupka. Procedura je prilagođena specifičnostima dobošastih razmenjivača toplote, iako u principu korespondira PED opremi. Prema EN 13445, utvrđena je dinamika podizanja pritiska pri ispitivanju: Pritisak se postepeno i lagano podiže na nivo od oko 50% vrednosti utvrđenog ispitnog pritiska, nakon čega se pritisak povećava u fazama od približno 10% od ispitnog pritiska, dok se ne postigne deklarirani ispitni pritisak, što čini dinamiku u 6 koraka. Kao što je navedeno, dostignuti ispitni pritisak prema EN 13445 se mora održavati najmanje 30 minuta. Međutim, bitno je navesti zahtev da se pri svakom prethodnom koraku mora izvršiti vizuelni pregled svih zavarenih površina i spojeva, pri čemu se pre pregleda pritisak mora smanjiti za 10% od nivoa dostignutog pritiska, da bi se prekinulo dejstvo eventualnih neregularnosti.



#### **Legenda: standardni hidrostatički test**

1. Doboš ispitivanog razmenjivača toplote,
2. Postolje razmenjivača,
3. Ručna klipna ispitna pumpa – 50 bara,
4. Manometar pumpe (nije obavezan),
5. Crevo visokog pritiska – 50 bara,
6. Zaporni ventil, slavine pumpe – 50 bara,
7. Zaporni ventil manometarske grupe,
8. Manometarska slavina – igličasti ventil,
9. Radni manometar min  $\varnothing$  100, opsega min  $1,5 \cdot p_i$ , KT 1,6 ili KT 1,0
10. Kontrolna manometarska grupa KT 1,0, pisač ili drugi pribor,
11. Odzračno crevo, do posude
12. Crevo otpornosti na pritisak dovodne tečnosti iz vodovodne mreže ili iz bazena tehničke vode ili druge ispitne tečnosti, kao i odvod pri pražnjenju instalacije.

**Sl. 4.127.** Standardno hidrostatičko ispitivanje dobošastog razmenjivača toplote sa strane doboša i kontrola spojeva cevi i cevne ploče

Dobošasti razmenjivači toplote redovno imaju dva međusobno nepovezana prostora, a sve granične površine i elementi se proračunavaju kao da susedni prostor ima pritisak okoline (nije napunjen). U tom slučaju ispitivanje se sprovodi tako što se svaki prostor ispituje kao samostalna posuda, pri čemu susedni prostori moraju biti otvoreni i dostupni pregledu. Ako posude imaju dva ili više međusobno



nepovezanih prostora, a sve granične površine i elementi su im proračunati na osnovu razlike njihovih proračunskih pritisaka, ispituju se na dva načina: svaki prostor kao samostalna posuda a zatim svi prostori istovremeno. Za pojedinačno ispitivanje razmenjivača toplote u proizvodnim uslovima obično se koristi prema EN 13445-5, tzv. standardni hidrostatički test unutrašnjim dejstvom vode, ispitnim pritiskom utvrđenim pomoću izraza (4.6). Na slici Sl. 4.127, prikazana je ispitna instalacija za hidrostatičko ispitivanje razmenjivača toplote sa strane doboša.

Dobošasti razmenjivači uvek imaju najmanje dva ispitivanja na probni pritisak: sa strane doboša (na slici) i ispitni pritisak fluida oko cevi i sa strane cevi (prednja glava) na ispitni pritisak fluida u cevima. S obzirom da pri ispitivanju posebnih komora sve unutrašnje površine moraju biti otvorene i dostupne pregledu, to znači da se ispitivanje sa strane doboša mora obaviti bez glava, da bi cevne ploče bile dostupne. To tehnički nije problem ako je ispitni pritisak fluida oko cevi veći ili jednak ispitnom pritisku fluida u cevi. Ako je pritisak fluida u cevima ne previše veći od pritiska fluida oko cevi, kako je već pomenuto *M. Rikalović* predlaže povećanje proračunskog (a i ispitnog pritiska) na nivo pritiska u cevima, što utiče da se cevne ploče konformno pregledaju sa skinutim glavama. Ako to nije moguće, jer je pritisak u cevima značajno veći, onda se cevna ploča mora ispitati i pregledati na ispitni pritisak fluida u cevima sa strane glava razmenjivača. Da bi bio moguć pregled cevne ploče od strane doboša, ispitivanje se mora sprovesti bez doboša, samo sa glavama ili ukoliko postoji samo jedna glava, sa delimično izvučenim cevnom snopom. Kontrola spoja cevi cevne ploče sa strane doboša vizuelno ne daje dobre mogućnosti utvrđivanja curenja (osim dugog ispitivanja), čak i ako se utvrdi da ima curenja ne može se lako otkriti njegova lokacija. Ukoliko ima curenja, mesto curenja se mora utvrditi dodatnim metodama (videti kasnije). Ako je tokom ispitivanja bilo neophodno demontiranje cevnog snopa, pri novoj montaži mora se izvršiti novo ispitivanje u sklopu demontiranih spojeva. Na slici Sl. 4.128, vide se primeri iz prakse raznih modela standardnog hidrostatičkog ispitivanja.

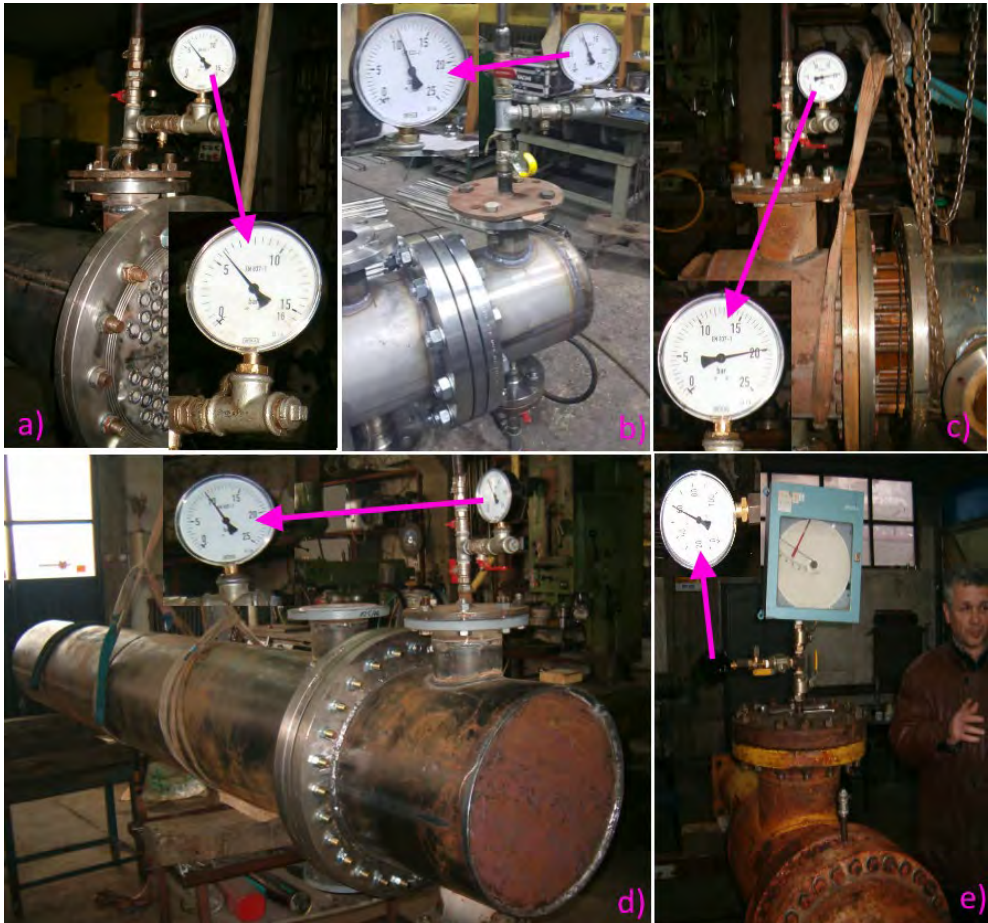
Na bazi propisa opreme pod pritiskom, uslova bezbednosti i iskustva velikih proizvođača može se utvrditi sledeća procedura ispitivanja na pritisak:

1. Hidrostatičko ispitivanje izvodi na svakom proizvodu posle završetka svih radova i pošto su obavljene sve prethodne kontrole i ispitivanja (npr. zavarivanja i kontrola zavarenih spojeva). Izuzetak su samo operacije koje se ne mogu izvesti pre ispitivanja i radovi koji ne utiču na konstrukciju (npr. kozmetičko brušenje).

2. Ispitni pritisak u svim nezavisnim komorama, mora biti prethodno izračunat i označen u dokumentaciji, takođe i unet u identifikacionu tablicu proizvoda.

3. Ukoliko korisnik ima dodatne zahteve u proceduri ispitivanja, kao npr. period održavanja ispitnog pritiska ili zahteve u pogledu kontrole propuštanja, isti moraju biti korespondentni s tehničkom dokumentacijom i odobreni pre početka ispitivanja.

4. Proizvođač aparata treba da ima plan postupka hidrostatičkog ispitivanja, koji obuhvata i imenovanje odgovornog lica i iskusnih operatera. U okviru plana je i dogovor ili obaveštenje naručioca i kontrolnog tela (rok je obično do 7 dana), o terminu i identifikaciji proizvoda na kome će se vršiti ispitivanje na pritisak.



**Sl. 4.128.** Primeri prakse standardnog hidrostatičkog ispitivanje dobošastog razmenjivača toplote, VITUS, Srbija: a) Ispitivanje sa strane omotača,  $P_i=7$  bara; b) Ispitivanje sa strane glave u sklopu,  $P_i=12$  bara; c) Ispitivanje sa strane glave razmenjivača, izvučen registar,  $P_i=20$  bara; d) Završno ispitivanje sa strane glave,  $P_i=10$  bara, e) Specijalno dugo ispitivanje razmenjivača toplote za grejanje gasa magistralnog gasovoda sa pisačem kontinualno u toku 24 sata sa strane glave,  $P_i=60$  bara. Pri istoj temperaturi okoline na početku i kraju ispitivanja dijagram pritiska zatvara krivu (na zahtev naručioca).

5. Ranije, pre oficijelnog postupka ispitivanja proizvoda na ispitni pritisak, proizvođač treba da izvrši povezivanje ispitne instalacije, kao i da blokira sve ostale otvore kontrapribnicama ili čepovima otpornosti iznad ispitnog pritiska. Sistem se puni ispitnim medijumom (voda) do visine radnog pritiska prema proceduri, a zatim proverava na bilo koja curenja proizvoda i instalacije, kao i druge nedostatke, koje ako se pojave odmah treba otklanjati, a na kraju se sistem potpuno rastereti od pritiska. To se sprovodi obično jedan dan pre dana oficijelnog

ispitivanja, a ukoliko otklanjanje nedostataka nije moguće odmah, već zahteva duži period vremena, ispitivanje se otkazuje i utvrđuje novi termin.

6. Posuda na kojoj se vrši ispitivanje na pritisak mora biti postavljena tako da na najnižoj tački priključka se povezuje dovod ispitnog sredstva, a na najvišoj tački se postavlja manometarska grupa i priključci za odzračivanje vazduha. Dobošasti razmenjivači toplote se uglavnom postavljaju horizontalno, a na donjim i gornjim priključcima se povezuje instalacija. Ukoliko postoji više komora koje se posebno moraju odzračivati, obavezni su posebni odzračni priključci predviđeni projektom.

7. Oslonci razmenjivača (najmanje dva) pri ispitivanju moraju biti čvrsti i nosivi za proizvod napunjen tečnošću, pri čemu moraju sprečiti okretanje u toku rada.

8. Ako je tečnost za ispitivanje voda, ista mora biti bakteriološki i hemijski ispravna, naročito ako se uzima izvan instalacije pitke vode (detaljnije u merama bezbednosti). Ako je ispitni fluid druga tečnost (koja je utvrđena dokumentacijom), moraju se predvideti posebne mere u slučaju prosipanja na mestu ispitivanja. Istu predostrožnost treba preduzimati i sa odvodom fluida pri odzračivanju i pražnjenju.

9. Pre početka hidrostatičkog ispitivanja, potrebno je utvrditi temperaturu vode i okoline, a ispitivanje ne sme započeti dok se ne izjednače temperatura metala i vode (obično je dovoljno manje od 2 sata). Temperatura ispitne vode mora biti niža od 50°C (prema ASME VIII 48°C), ali viša od 4°C. Temperatura ispitne prostorije obično je viša od 10°C, ali se mora obezbediti da temperatura prostorije ne pada ispod 7°C u toku zimskih noći u slučaju tzv. produženog ispitivanja. U toku leta treba obratiti pažnju na rast dnevne temperature, što može dovesti do prekoračenja deklarativnog ispitnog pritiska. Ukoliko je predviđeno produženo ispitivanje, treba obezbediti neprekidnu kontrolu ili oboriti ispitni pritisak do visine radnog pritiska.

10. Ispitivanje opreme na ispitni pritisak ne sme započeti ako nisu sprovedene sve mere bezbednosti, što je odgovornost nadležnog rukovodioca proizvođača.

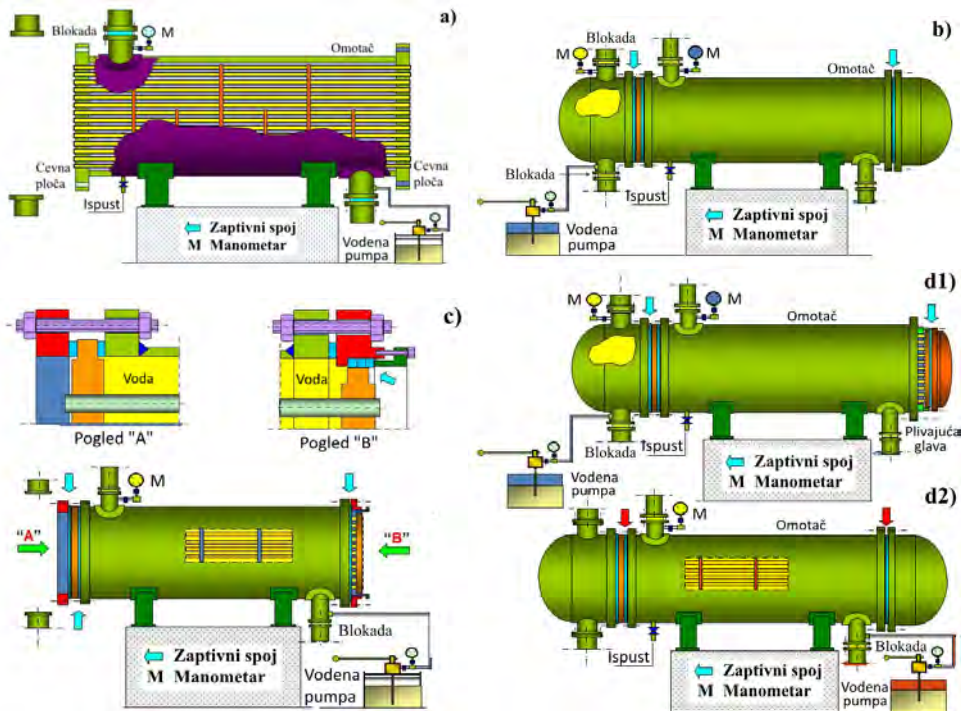
11. Uticaj konstrukcije razmenjivača toplote na plan toka ispitivanja na pritisak je značajan, ali se mora obezbediti sledstveni tok procedure, sa što manje radova na pripremi ili operacijama demontaža-montaža komponenti. Plan mora biti jasan i dostupan kontrolnom telu i naručiocu koji su prisutni ispitivanju na probni pritisak.

U zavisnosti od tipa razmenjivača, postoje različite ispitne instalacije, kao što je prikazano na slici Sl. 4.129, ali uvek postoje najmanje dva ispitivanja: oko cevi (omotač) i u cevi (glave). Ponekad su potrebne dodatne komponente da bi se zatvorio ispitni prostor, kao npr. ako je cevna ploča bez prirubničkog oboda (slika pod c) levo) potrebna je kontraprirubnica. Ispitivanje razmenjivača s plivajućim glavama uvek zahteva dodatne komponente (slika pod c) desno) prilično složene konstrukcije sa dodatnim zaptivanjem. Pored toga neminovno je treće ispitivanje, da bi se ispitao poklopac zadnje glave (videti sliku pod d1 i d2).

12. Posle razjašnjenja eventualnih nejasnosti, odobrenja rukovodioca ispitivanja i saglasnosti kontrolnog tela, operateri započinju tok ispitivanja.

13. Tok ispitivanja se sprovodi u 6 koraka (kao što je navedeno prema standardu EN 13445-5) uz obavezan pregled ponašanja konstrukcije i propuštanja zavarenih i zaptivnih spojeva, kojih ne bi trebalo biti ako je proizvođač prethodno otklonio sve

nedostatke. Međutim, ukoliko u bilo kojem koraku dođe do bilo kakvih problema na ispitivanom proizvodu, ispitivanje se prekida, pritisak se snižava na nivo iz prethodnog koraka (obično za 10%), vrši se pregled problematičnog mesta i donosi odluka o daljem postupku, koji mora biti odobren od strane kontrolnog tela.



**Sl. 4.129.** Varijante hidrostatičkog ispitivanja dobošastog razmenjivača toplote:

a) Oko cevi, cevni snop prave cevi, TEMA AEM, BEM, b) U cevima, prave i U cevi, glave TEMA BEM, BEU, c) Plivajuća glava oko cevi, TEMA BES, d1) Plivajuća glava u cevi, TEMA BEU, d2) Plivajuća glava oko cevi za zadnju glavu, TEMA BEU

Posebno treba naglasiti značaj završnog koraka podizanja ispitnog pritiska, da ne dođe do prekoračenja deklarirane vrednosti na manometru. Operater treba da je naročito obazriv i da veoma lagano podiže pritisak. Ukoliko namerno ili slučajno dođe do prekoračenja najvišeg ispitnog pritiska i zbog toga nastupe neregularnosti na posudi, kontrolno telo će odmah proglasiti ispitivanje neuspešnim i prekinuti dalje ispitivanje. Ispitivanje je uspešno ako posle dostizanja ispitnog pritiska na posudi nema nikakvih deformacija komponenti, propuštanja zavarenih i zaptivnih spojeva, kao ni pada pritiska na ispitnom manometru iznad tolerisane vrednosti. Ako pritisak na ispitnom manometru neprekidno pada i posle utvrđene dozvoljene tolerancije, bez obzira na brzinu pada, to je siguran znak gubitka ispitne tečnosti ili

na posudi ili na ispitnoj instalaciji. Neophodno je oboriti pritisak na nivo radnog pritiska i uporno tražiti mesta propuštanja. Ako se pad pritiska zaustavlja, ali je ispod tolerisane vrednosti, to može biti posledica bar jedne od sledećih mogućnosti:

- Usled zaostalog vazduha došlo je do kompresije zapremine ispitnog fluida. Zaostali vazduh se zadržava u džepovima posuda, delovima posude u kontra padu koji se ne mogu odzračiti, ili napunjen vodeni sistem nije dovoljno odležao da se iz njega izdvoji vazduh, koji se kasnije skuplja u najvišim tačkama posude;

- Ispitni fluid nije temperaturski uravnotežen sa materijalom opreme ili okolnim vazduhom, što dovodi do promene zapremine ispitivanog prostora. Naime, ako je voda toplija od materijala i okoline posude doći će do zagrevanja i temperaturskih dilatacija posude i porasta ispitne zapremine ali i skupljanja vode koja se hladi, a u suprotnom slučaju ako je voda hladnija od posude, ona hladi i komprimuje posudu, ali se istovremeno voda zagreva i širi. U oba slučaja nastaju dva suprotna procesa, a zbirni uticaj najviše zavisi od zapremine i ulazne temperature ispitnog fluida;

- Elastična dilatacija cevi razmenjivača toplote usled dejstva ispitnog pritiska može izazvati malo povećanje ispitne zapremine. Ova pojava može nastati naročito kod razmenjivača toplote sa U cevima pod dejstvom ispitnog pritiska u cevima, jer su cevi slobodne na jednom kraju i mogu se elastično produžiti. Što materijal cevi ima manji modul elastičnosti više se elastično izdužuje (bakar u odnosu na čelik). Uticaj zaostalog vazduha ili temperaturne neuravnoteženosti se može naknadnom intervencijom otkloniti, dok dilatacija cevi usled dejstva ispitnog pritiska može pored pada pritiska izazvati sumnju u debljinu zida cevi ili proračunsku grešku.

Tolerancijsko polje pada ispitnog pritiska nije propisano dominantnim standardima, a praksa pokazuje da ukoliko nema neregularnosti, pad ispitnog pritiska je manji od 1%. *M. Rikalović* preporučuje vizuelnu kontrolu tolerantnog pada pritiska, koja je izvodljiva u praksi. Potrebno je ispitni pritisak podići tek malo iznad zadate crte manometra (deseti deo polja između dve crte), pri čemu ako pritisak ne padne vidljivo ispod zadate crte u ispitnom vremenu ispitivanje se smatra zadovoljavajućim (videti detalje slike Sl. 4.129).

Ispitivanje na pritisak se završava posle saglasnosti kontrolnog tela da nema neregularnosti, proizvod se rasterećuje od pritiska i pristupa se izradi zapisa o ipitivanju na probni pritisak. Ako je predviđeno dugo ispitivanje na nepropusnost, ono se nastavlja u prisustvu ovlašćenog lica naručioca u skladu sa ugovornim odredbama, i ne mora biti pod nadzorom kontrolnog tela.

14. Kolaps ispitivanja nastupa usled: mehaničkog popuštanja ili deformacije bilo koje komponente proizvoda, pucanja ili propuštanja zavarenih i kompresionih spojeva i curenja ili vlaženja zaptivnih spojeva. Dotezanje zaptivnih spojeva ili korekcija kompresionih spojeva (cevi u cevnoj ploči), kao i popravka zavarenih nenosivih ili spojeva koji se ne ispituju, u dogovoru sa kontrolnim telom moguća je odmah. Potrebno je ispustiti vodu u meri koja ne ometa popravku i obaviti neophodne radove, posle čega se ispitivanje nastavlja ponovo od prvog koraka. Ako je prekid ispitivanja nastupio usled mehaničkih nedostataka komponenti ili usled grešaka nosećih zavarenih spojeva (koji se snimaju), ispitivanje na pritisak se



proglašava kao neuspešno, što se konstatuje zapisnikom i dogovara primeren rok za sledeće ispitivanje sa procedurom od početka. Popravka grešaka koje su dovele do neuspešnog ispitivanja, zahteva analizu problema uz učešće projektanta opreme, kontrole upotrebljenih materijala i otkrivanje grešaka zavarenih spojeva.

15. Izrada zapisnika o ispitivanju na probni pritisak je obavezan dokument koji se radi i potpisuje posle završetka procedure. Proizvođači uglavnom uz proizvod dostavljaju dokument o ispitivanju na pritisak (često se zove i atest o HVP – hladni vodeni pritisak) koji sadrži sve ispitne parametre i rezultate ispitivanja. Prema EN 13445-5 zapis o probnom ispitivanju na pritisak PED opreme treba da sadrži:

- Naziv proizvođača opreme i identifikacija posude koja se ispituje;
- Naziv inspektora ili odgovornog tela kontrole ispitivanja, ako je predviđena;
- Ispitni pritisak svake nezavisne komore;
- Ispitni medijum, ako nije voda navode se karakteristike fluida;
- Srednja temperatura ispitnog fluida i okoline;
- Vreme zadržavanja ispitnog pritiska prema proceduri ispitivanja;
- Identifikacija ispitnih instrumenata i opreme (manometri, pumpe);
- Zaključci i ocena ispitivanja;
- Dodatni ili neobavezni podaci;
- Potpisi odgovornih lica;
- Navesti ako se koriste posebni ispitni postupci i njihov izvor.

16. Pražnjenje instalacije nastupa odmah posle uspešnog završetka zadnje faze ispitivanja, tako što se instalacija lagano rastereti preko odzračnog voda. Ako se rasterećenje vrši preko voda za punjenje (u donjoj zoni) rizikuje se pojava vakuma u instalaciji. Posle rasterećenja instalacije odzračni vod ostaje otvoren a dalje pražnjenje se obavlja preko priključka za punjenje preusmeravanjem odvoda u unapred određeno mesto. To može biti kanalizacija, bazen ili rezervoar za ponovno korišćenje ispitnog medijuma. Ukoliko posuda ima u donjoj zoni nepovezanih komora, pražnjenje se mora obaviti pomoću ispusta svake komore, a isto se odnosi i za dovod vazduha u gornjoj zoni komora. Ukoliko postoji negativno dejstvo vode zaostale od ispitivanja na upotrebljene materijale (korozija) ili na radne fluide pri ugradnji proizvoda, svu vodu ispustiti i unutrašnjost posude prosušiti vazduhom.

17. Završetak procedure ispitivanja se izvodi demontažom ispitne instalacije i predajom proizvoda na završno farbanje, pakovanje i otpremu.

*Ispitivanje razmenjivača toplote na pritisak u toku radnog veka*, je skup veoma praktičnih preporuka ispitivanja posuda, u celom periodu eksploatacije. Prema API 572 [S9.3], navodi se nekoliko veoma pouzdanih preporuka za dobošaste razmenjivače toplote, koje nemaju obaveznost primene (slično API 660):

1. Ispitivanje čekićem (norma 9.7.1), koristi se kao dodatak vizualnom pregledu, postupkom laganog udaranja ili tapkanja predmeta koji se pregleda i kontrolom zvuka kao posledice udarca se procenjuje kvalitet ispitnog mesta. Jačina i osećaj udarca se može steći samo iskustvom operatera. U prošlosti je ova metoda bila veoma zastupljena, a danas je retka zbog pojave nove opreme za ispitivanje. Dakle, ne preporučuje se za ispitivanje opreme pod pritiskom, ali za posude koje ne

podležu PED propisima ima poseban značaj jer je brza i uvek pristupačna, naročito je pogodna za otkrivanje sledećih nedostataka:

- lociranje tankih delova zida zatvorenih posuda;
- proveru nepropusnosti zakovica, vijaka, nosača itd;
- provera postojanja pukotina u metalnim oblogama;
- provera nedostatka veze oslonaca u betonu;
- provera postojanja naslaga kamenca ili sl. (uz opasnost da se naslaga pokrene).

2. Razna ispitivanja razmenjivača toplote dejstvom pritiska (norma 9.7.3) u toku eksploatacije, bez demontaže iz sistema, pozicije ispitivanja slično Sl. 4.129.

Prethodno ispitivanje razmenjivača pre demontaže iz instalacije radi otkrivanja stanja u kom se nalazi. Moguća su sledeća ispitivanja pritiskom:

- a) Gruba procena propuštanja fluida u cevima blokiranjem instalacije registra, a pod pritiskom instalacije omotača proverava se curenje na ispusnom ventilu glave.
- b) Detaljnija provera curenja cevi snopa i ploče, kao pod a), samo skidanjem glave.
- c) Ispitivanje plivajuće glave razmenjivača pritiskom u cevima skidanjem poklopca omotača plivajuće glave, bez razlike curenja zida cevi ili spoja cevi i cevne ploče.
- d) Ispitivanje omotača razmenjivača s plivajućom glavom skidanjem fiksne glave, može se otkriti bez razlike curenje zida cevi ili spoja cevi i fiksne ploče.
- e) Ugradnjom pomoćne prirubnice plivajuće glave mogu se utvrditi detalji curenja.

Procena stanja pojedinačnih cevi registra na terenu, posle skidanja glava, ali bez demontaže razmenjivača postupkom nerazornog ispitivanja (NDT) kao: vrtložne struje (ET), propuštanja magnetnog fluksa (MT), laserske metode (LM) ili ultrazvučnim testom (UT). Ovim metodama se mogu otkriti: erozija, korozija, jame ili pukotine cevi. Na bazi stanja cevi donosi se odluka o reviziji (tačka 4.2.6) na licu mesta (čepovanje) ili demontaži razmenjivača i daljem postupku u radionici.

Ispitivanje pojedinačnih komponenti pod dejstvom pritiska, najčešće se odnosi na cevni snop. Ako je snop u omotaču, ispitivanje propustljivosti se može isvesti dejstvom pritiska oko cevi (omotač). Ako je cevni snop od U cevi, ali bez omotača, ispitivanje se može isvesti izradom pomoćnog omotača (što je skupo) ili pojedinačnim ispitivanjem svake cevi. Ispitivanje plivajućeg cevnog snopa, bez omotača se može izvesti samo pojedinačnim ispitivanjem cevi.

Pritisaci ispitivanja razmenjivača u eksploataciji se moraju razmotriti u zavisnosti da li je PED oprema i nadležnosti inspekcijskog tela. Za nePED opremu pritiske ispitivanja određuje operater uz saglasnost ovlašćenog lica korisnika. Ako se ispitivanje vrši sa strane druge komponente, neophodna je provera debljine zida na pritisak ispitivanja. Ako se za ispitivanje koristi voda, neophodno je izvršiti detaljno pražnjenje u slučaju štetnog dejstva vode na koroziju ili tehnologiju rada.

Za primenu API preporuka, neophodno je proučiti standard u celini.

*Pneumatsko ispitivanje* na pritisak opreme pod pritiskom, kao i dobošastih razmenjivača toplote treba razmotriti kada nije moguć hidrostatički test, prema EN 13445-5, a to se događa u sledećim slučajevima:

- Proizvod je takve konstrukcije da nije izvodljivo punjenje tečnošću, što kod svih tipova dobošastih razmenjivača nije zabeleženo;



- Namena razmenjivača je takva da nisu dozvoljeni ni najmanji tragovi tečnosti;
- Odobreno pneumatsko ispitivanje u ranoj fazi projekta od strane kontrolnog tela, kao pogodnija procedura, što je za dobošaste razmenjivače veoma retko.

Dakle, ispitivanje pneumatskim ili hidrostatičko-pneumatskim testom je realna mogućnost, samo ako se razmenjivači koriste za opasne radne fluide koji uz prisustvo vode stvaraju eksplozivne mešavine ili pri visokim temperaturama od zaostale vode nastaju parni čepovi. Ispitni pritisak pneumatske metode prema EN 13445 se računa na isti način kao i kod hidrostatičkog pritiska, dok prema ASME VIII div.1 (klauzula UG-100) ispitni pritisak određuje se jednostavno kao proizvod najvišeg radnog pritiska, koeficijenta 1,1 i najnižeg odnosa naprezanja (LSR) materijala koji su u kontaktu s ispitnim pritiskom, pri čemu temperatura ispitnog gasa mora biti min. 17°C iznad minimalne projektne temperature komponente radi izbegavanja opasnosti od krtog loma (videti detalje u standardu).

Posebno, standard ASME PCC-2 [S10.3], (slično i korespondentan standard ISO 24817) daje preporučene procedure ispitivanja na pritisak, koji sadrži i pneumatsko testiranje dobošastih razmenjivača toplote. Prema ovom standardu, pretežno namenjenom za popravke ili promene namene PED opreme, procedura ispitivanja na pneumatski pritisak je jednostavna, ali znatno različita od evropske.

#### 4.3.4. Mere bezbednosti pri ispitivanju na probni pritisak

To su aktivnosti koje se moraju sprovesti u toku procedure u cilju zaštite ljudi, imovine i okoline od negativnih uticaja ispitnih fluida i oslobođene energije usled dejstva najvišeg ispitnog pritiska.

Mere bezbednosti od uticaja ispitnih fluida, se primenjuju kao zaštita od prosipanja fluida i zaštita od korozivno-erozivnog dejstva na komponente tokom ispitivanja na probni pritisak. Ispitni fluid može biti tečnost ili gas, najčešće voda ili vazduh, ali i drugi fluidi u zavisnosti od namene opreme. Kada se koriste drugi fluidi, pogotovo opasni ili skupi fluidi, zaštita od prosipanja u okolinu može biti veoma komplikovana i skupa. U takvim slučajevima je potrebno uraditi detaljne elaborate toka postupka sa merama bezbednosti, koji moraju biti posebno odobreni i povereni specijalističkim organizacijama. Dobošasti razmenjivači toplote za ispitne fluide uglavnom koriste vodu, mnogo ređe vazduh ili neki inertan gas. Iako se koriste voda ili vazduh, koji su široko dostupni i neopasni fluidi, ipak postoje ne tako male opasnosti od njihove upotrebe tokom ispitivanja.

Za vodu pri hidrostatičkom ispitivanju, EN 13445-5 (stavka 10.2.3.2.5) propisuje da se mora sprečiti korozivno dejstvo ispitne vode na opremu, dok za opremu od nerđajućih čelika koja se može isušiti posle ispitivanja, ograničava se prisustvo hlorida u vodi na 20 mg/kg (20 ppm), a ako se ispitna voda ne može sa sigurnošću isušiti EN propisuje još manji sadržaj hlorida svega do 1 ppm. Prema API 660 [S9.1], propisuje se da voda mora biti pitka, što ukazuje da mora biti mehanički čista, hemijski i bakteriološki ispravna (naravno ne koristi se za piće, ali mora odgovarati normama pitke vode), a sadržaj hlorida je dozvoljen do iznosa od

50 mg/kg za nerđajuće čelike. Ispitna voda za posude od ostalih materijala može sadržati znatno veću količinu hlorida. Pitka voda u Srbiji sadrži do 250 mg/l, prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće [N25]. Uticaj mikrobioloških organizama sadržanih u ispitnoj vodi na koroziju materijala opreme, tzv. MIC (eng. microbiologically influenced corrosion) može biti naročito opasan za nerđajuće čelike (granice videti u pomenutom Pravilniku). Temperatura ispitne vode mora biti u ranije navedenim granicama kao zaštita od zamrzavanja ili krtog loma. Pri velikim zapreminama posuda koje se ispituju vodom, imati u vidu porast ukupne težine ispitivane posude, za koju se moraju obezbediti odgovarajući oslonci.

Pri pneumatskom ispitivanju posude vazduhom ili inernim gasom, nema izrazitih negativnih uticaja fluida na opremu, osim u slučaju korišćenja inernih gasova, kada se mora obezbediti dobra ventilacija prostora usled mogućeg gušenja prisutnih, ako dođe do pada koncentracije kiseonika u okolnom vazduhu. Mere bezbednosti od kolapsa proizvoda i oslobođene energije u proceduri ispitivanja na probni pritisak vazduhom, moraju se brižljivo sprovesti, jer posledice kolapsa ispitivanog proizvoda mogu biti izuzetno teške za ljude, imovinu i okolinu.

Ispitivanje razmenjivača vodom manje zapremine i nižeg pritiska, npr. do oko 10 bara i ispitne zapremine do 1m<sup>3</sup>, neće napraviti posebne štete na okolinu u slučaju da dođe do kolapsa posude. Uopšte, može se konstatovati da ispitna voda ne dovodi do velike opasnosti, jer ne sadrži veliku energiju, a zbog nestišljivosti pri manjim zapreminama, već pri malim otvorima usled kolapsa dolazi do brzog pada pritiska. Međutim, pri većim zapreminama i višim ispitnim pritiscima (50 bara) na malim havarijskim otvorima dolazi do mlaza veoma velike brzine isticanja, koji se može ponašati kao sečivo. Npr. pri rasterećenju doboša razmenjivača pod pritiskom od 65 bara i zapremine od 1000 lit., preko odzračnog ispusta od 3/8", na izlazu se javlja veoma velika brzina koja stvara lokalni vakum, usled čega se sva voda ispari i mlaz vode se uopšte ne vidi. Isparena voda kondenzuje tek na visini od oko 10 m, postaje vidljiva kao vlažna para, raspršuje se i pada kao kiša. Osetnim padom pritiska u posudi mlaz vode postaje vidljiv i brzo se sa visine spušta do otvora isticanja. Primer ukazuje na opasnost od nekontrolisanog isticanja kroz male otvore, jer se ne mogu otkriti na visokom pritisku, zbog isparavanja vode. Zbog toga je važno lagano podizanje pritiska vode i detaljni pregled curenja ili vlaženja.

Ispitivanje posuda vazduhom ili drugim gasom, mogu dovesti do havarije, koje zahtevaju najveće mere bezbednosti, jer posledice mogu biti katastrofalne. Zbog visoke opasnosti ispitivanje na probni pritisak gasom je ograničeno samo pod ranije navedenim uslovima, a glavne granične mere koje treba preduzeti su što niži radni pritisak posuda koje se ispituju (do 10 bara), kao i što niži ispitni pritisak u odnosu na radni pritisak. Opasnost od pneumatskog ispitivanja nastaje od visokog nivoa potencijalne energije akumulisane u posudi tokom kompresije gasa. Prema američkim pravilima zaštite na radu, akumulacija energije u posudama pod pritiskom je klasifikovana u tri grupe:

- Posude sa akumulisanom energijom do 1356 kJ (1000 lbf-ft) ima minimalne zahteve bezbednosti i ne zahteva nikakva formalna odobrenja,

- Posude sa akumulisanom energijom 1356-16270 kJ zahteva odgovarajuću recenziju i saglasnosti nadležne institucije,

- Posude sa akumulisanom energijom iznad 16270 kJ (12000 lbf-ft) su pod dejstvom visokih pritisaka i mogu se postaviti i pustiti u rad samo na izričiti zahtev korisnika, njegovim odobrenjem i kontrolom od nadležne institucije.

Razmenjivači toplote, pored toga što se retko ispituju pneumatskim pritiskom, uglavnom su u grupi niske akumulisane energije, pa ne zahtevaju posebna odobrenja, ali je neophodno poznavati osnovne opasnosti pri ispitivanju na pritisak ovom metodom. Pri pneumatskom ispitivanju havarija može nastati usled: pucanja posude kao posledice krtoeg loma, pucanje usled neelastičnih deformacija (krtoost materijala), otkidanja nosača posude ili priključaka i armature, otkidanja privremeno zavarenih priključaka napajanja posude ili usled pucanja zaptivača. Početne pukotine usled pneumatskog pritiska, neće dovesti do rasterećenja posude, već do havarije dela i rasprskavanja na komade koji dobijaju veliku brzinu i mogu izazvati katastrofalne posledice. Ispitivanja pokazuju veliku razornu sposobnost oslobođene energije, npr. pritisak od 6,9 kPa (1 psi) može oboriti čoveka, a talas od 13,8-20,7 kPa (2-3 psi) može razbiti beton debljine od 20 cm. Detalji o dejstvu pneumatskih havarija mogu se naći u raznim propisima o bezbednosti, kao npr. u SAD, SLAC: Ch 51 Control of Hazardous Energy [120].

Mere bezbednosti pri ispitivanju pneumatskim pritiskom su naročito razvijene za cevovode, dok za opremu prema EN 13445-3 osnovne mere su:

- Pre ispitivanja neophodno je razmotriti položaj opreme koja se ispituje u odnosu na susedne objekte, kao što su druge zgrade, postrojenja, saobraćajnice i javne površine i sve druge građevine u blizini ispitivanja;

- Pridržavanje važećih standarda sigurnosti i normi bezbednosti u toku postupka ispitivanja, po kojima je zabranjen pristup zoni ispitivanja svima, osim osoblju koje obavlja ispitivanje. Ako se ispitivanje ne sprovodi u posebnoj bezbednoj prostoriji, područje u neposrednoj blizini ispitne zone se označava trakama, na kojima su jasno istaknuti znakovi upozorenja na opasnost i zabrana pristupa prostoru zone;

- Provera otpornosti materijala posude na krtoost i uslova za nastanak krtoeg loma;

- Temperatura metala posude pri ispitivanju mora biti najmanje 25°C iznad temperature krtoeg loma za posude koje prethodno nisu bile hidrostatički ispitivane pritiskom većim od pneumatskog ispitivanja. Važna činjenica je da temperatura ispitnog gasa pada pri isticanju s višeg na niži pritisak (punjenje posude), što može dovesti temperaturu materijala ispod minimalne temperature krtoeg loma;

- Daljinsko merenje i nadzor procedure tokom pneumatskog ispitivanja;

- Prostorija u kojoj se vrši pneumatsko ispitivanje mora imati izdržljive zidove na udar potencijalne eksplozije ili da ima poseban vodeni bazen u kome se ispitivana posuda može fiksirati radi sprečavanja rasprskavanja usled eksplozije.

- Potrebno je imati u vidu i pojavu zvučnih efekata u slučaju curenja ispitnog sredstva na malim otvorima, oni mogu biti i prvi signal pre pucanja ili eksplozije.

Ako navedene mere nije moguće ispuniti, alternativa je ispitivanje posude u celosti nedestruktivnim metodama, kako je navedeno u početku ove tačke.

Bez obzira na vrstu ispitivanja, ako je ispitni pritisak viši od 100 bara, ili temperatura ispitne tečnosti viša od 50°C, EN 13445-5 predviđa probno ispitivanje u bezbednoj prostoriji ili bezbednom delu radionice sa izdržljivim zidovima. U ispitnom prostoru, za vreme ispitivanja dozvoljen je pristup samo osoblju koje je uključeno u testiranje. Ako prostorija ne ispunjava navedene uslove, potrebno je postaviti dodatne prepreke u delu koji ne ispunjava uslove, a direktno dejstvo ispitnog pritiska u tom slučaju je dozvoljeno samo 30 min bez prisustva ljudi, a pregled se obavlja tek posle obaranja pritiska na nivo dozvoljenog radnog pritiska. Američki propisi dodaju još i obaveznost postavljanja na ispitivanu instalaciju, baždarenog ventila sigurnosti na pritisak za 10 psi ili 105% iznad ispitnog pritiska.

#### **4.3.5. Ispitivanje curenja spojeva razmenjivača toplote**

Postupci utvrđivanja propustljivosti spojeva bez obzira na vrstu i visinu pritiska nazivaju se ispitivanje curenja. Curenjem se smatra svako propuštanje kroz čvrsti zid tečnosti ili gasa. Ova pojava je veoma šira tema od potrebe u ovoj tački, za koje postoji obimna literatura, standardi i veoma sofisticirane metode otkrivanja. Nepropusnost kao suprotni termin curenja za zaptivne spojeve je posebno detaljno razmotren u fabrikaciji komponenti spojeva razmenjivača toplote (podtačka 4.2.8). Osnovne evropske norme za curenje su u okviru IBR-Ispitivanje nepropusnosti:

- EN 1518 Karakteristike detektora curenja masenog spektrometra,
- EN 1779 Kriterijum za izbor metode i tehnike otkrivanja curenja,
- EN 1593 Tehnike emisije mehurića,
- EN 13184 Metoda promene pritiska,
- EN 13185 Metoda gasnog tragača,
- EN 13192 Klasifikacija gasnih referentnih curenja,
- EN 13625 Upustva za izbor opreme za ispitivanje nepropusnosti.

Evropski propisi navedeni na početku ovog odeljka pružaju veliki broj informacija o curenju, dok američki ASME BPVC.V:2015, ovoj temi posvećuje celo poglavlje (Art. 10), pored toga detalji o curenju se mogu naći i u ASME BPVC.VIII [S10.1], API-660 [S9.1], kao i u TEMA standardu [S1]. Pored navedenog, prikaz tehničkih informacija osnovnih parametara curenja i metoda njegovog otkrivanja mogu se naći u svetskim brendovima vakumske i opreme detekcije curenja, npr. nemački brend za vakumsku tehniku Pfeiffer Vacuum GmbH ([www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)). Fokus teme su samo praktični problemi curenja dobošastih razmenjivača toplote.

Zavisno od vrste materijala ili spoja razlikuju se sledeće vrste curenja:

- Curenje u razdvojjivim vezama (prirubnice, poklopci i sl.),
- Curenje u fiksnim spojevima (zavarivanje, lemljenje, lepljenje),
- Curenje kroz osnovni materijal (poroznost ili od mehaničko-termičke obrade),
- Termičko curenje (usled dilatacija pri temperaturnim promenama),
- Virtualno curenje (pad pritiska bez curenja, usled gasa ili isparenja),
- Curenja pomoćnih sistema (priključci i armatura).

Curenje je propuštanje kroz čvrsti zid bez obzira na strukturu prolaza, koja može biti geometrijski otvor, poroznost materijala, zaptivna komponenta ili bilo šta što je slično. Nema apsolutne nepropusnosti ili "nula curenja", jer svaki materijal ili spoj ima tehničku nesavršenost. Stopa ili intenzitet curenja se definiše kao gubitak mase u jedinici vremena pod utvrđenim uslovima (npr. pad pritiska). Postoje bar dva mehanizama curenja, intenzivno i vizuelno vidljivo propuštanje i difuzioni prolaz materije kroz zid, tzv. prožimanje ili permeabilnost. Režim izlaznog protoka ispitnog fluida može biti laminarnog, prelaznog ili molekularnog toka, Pri laminarnom toku se uspostavlja uređeno strujanje fluida i ovaj režim se uspostavlja za veće otvore i brzine curenja iznad  $10^{-5}$  Pa·m<sup>3</sup>/s. Druga granica curenja je molekularni tok, bez uređenih strujnica i međusobne interakcije molekila izlazećeg fluida, brzine curenja su ispod  $10^{-8}$  Pa·m<sup>3</sup>/s. Između njih se uspostavlja prelazni laminarno-molekularni tok. Međutim, u određenim uslovima prolaz kroz zid se može odvijati i bez bilo kakvih otvora, difuzijom ispitne materije, pri čemu prožimanje teče u tri koraka: adsorpcijom fluida veće koncentracije u pregradni zid, zatim difuzijom kroz zid, i konačno desorpcijom na drugoj površini zida.

U zavisnosti od potrebe i bezbednosti procesa, tok curenja fluida u sistemu se može utvrditi sledećim postupkom ili procedurom: 1) otkrivanje ili utvrđivanje postoji li curenje fluida u ispitivanom aparatu ili komponenti, da ili ne, 2) merenje stope ili intenziteta curenja i 3) pronalaženje mesta curenja radi intervencije.

Jedinica kojom se kvantifikuje curenje, je količina izašle materije kroz pregradu u jedinici vremena, odnosno protok curenja, koji može biti zapreminski (m<sup>3</sup>/s=1000 l/s) ili maseni (kg/s). S obzirom na to da gasovi kao dominantni fluidi pri otkrivanju isticanja imaju promenu zapremine, kao pogodnija jedinica usvojen je zapreminski protok. Zbog uticaja pritiska na promenu stanja gasova za stopu ili intenzitet isticanja, prema EN 1779:1999 predviđen je tzv. pV protok, jedinica Pa·m<sup>3</sup>/s. Ranije se koristila jedinica za stopu curenja mbar·l/s = bar·cm<sup>3</sup>/s = 10 Pa·m<sup>3</sup>/s, a postoje i brojne anglosaksonske jedinice. Ako se količina vazduha meri brojem mehura (zapremine 30-50 mm<sup>3</sup> = 0,03-0,05 cm<sup>3</sup>, ili 1cm<sup>3</sup> ~ 25 mehurića) koji isteknu pri razlici pritiska od 1 bara, onda se pri stopi isticanja od 1 Pa·m<sup>3</sup>/s može očekivati prolaz oko 2-3 mehura u sekundi. Stopa isticanja od q<sub>L</sub>=1 mbar·l/s nastaje kada posudi zapremine od 1 litre padne pritisak za 1 mbar = 100 Pa.

Pri uobičajenom hidrostatičkom ispitivanju na probni pritisak razmenjivača toplote Yokell [104], opravdano ukazuje da vazećim standardima nije tretirano malo curenje tečnog fluida koje se ne može registrovati padom pritiska u toku minimalnog vremena ispitivanja. On predlaže, da naručilac u slučaju da su mala curenja ili oplakivanja u procesu bitna ili opasna, obavezno ugovori posebno ispitivanje razmenjivača na curenje. To se naročito odnosi na ispitivanje cevnih ploča, kada su pritisci u cevima znatno veći od pritiska u omotaču, pa se ispitivanje iz omotača kada su dostupni spojevi cevi i cevne ploče ne može izvesti ispitnim pritiskom za cevi. Mala curenja u obliku oblivanja površine isticanja, koja se mogu grupisati u povremene kapi, ne mogu se registrovati ispitnim manometrima (osim

pri dugom vremenu ispitivanja, tada kapi mogu i da ispare). Otkrivanje curenja može biti vizuelno ako su spojevi dostupni. Curenja oplakivanjem se kvantifikuju kao ispuštanja od 20 kapi u toku 1 sata, odnosno 10 kapi za pola sata (propisano vreme dejstva ispitnog pritiska), koje mogu biti teško uočljive (kap svaka 3 min. Zbog toga *M. Rikalović* predlaže postavljanje novinskog papira ispod mogućih mesta curenja, radi registracije kapanja, kao i produženo vreme ispitivanja). Yokell kao alternativu za utvrđivanje malih curenja preporučuje ispitivanje pneumatskim pritiskom vazduha 2 – 3,5 bara (30-50 psi), sa strane omotača razmenjivača ili helijumom u slučaju vrlo malih molekula radnih fluida u cevi. Otkrivanje curenja je moguće i pomoću mehura sapunice ili specijalnih detektora. Za visoke radne pritiske, za spojeve cevi i ploče izradene zavarivanjem ili valcovanjem sugestija je ispitivanje svake cevi pojedinačno pneumatskim pritiskom ili vakumom.

Opšti testovi za utvrđivanje curenja uglavnom se izvode s gasom kao pomoćnim fluidom i razlikom pritiska između fluida razdvojenih pregradom. Jedna strana je pod atmosferskim pritiskom, a druga strana je pod pritiskom ili vakumom testiranja, što određuje i smer curenja koji ide od višeg ka nižem pritisku. Postoji još dosta elemenata koji utiču na mogućnost i efikasnost ispitivanja, kao npr.: zahtevana stopa curenja, spojivost ispitnog fluida s materijalom pregrade i radnim fluidom, mogućnost registracije curenja i zahtevana oprema, troškovi postupka, pouzdanost i bezbednost itd. U tabeli TAB.4.24, prema Schröder [109] na bazi EN 1779:1999, a na osnovu toga da li je ispitivani prostor pod nad pritiskom ili vakumom, i u zavisnosti od tehnike ispitivanja, moguće je videti granične stope curenja koje se otkrivaju u toku postupka. Može se uočiti da manje stope curenja se lakše otkrivaju pod dejstvom vakuma nego pod dejstvom nad pritiska. Ispitivanja pokazuju da postoji zavisnost između stope curenja i idealizovanog otvora propuštanja (Pfaeiffer GmbH), tako za curenje vode u otvorima do 0,03 mm, pojavljuje se kao vlaženje (oplakivanje), stope curenja  $10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , koje formiraju kapi posle 15 min. Kapajuća voda nastaje pri otvoru 0,1 mm, stope curenja  $10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , kap se formira posle 10 sec, dok se mlaz cureće vode javlja pri otvoru 1 mm, stope curenja  $1 \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , već za 0,1 sec. Otkrivanje curenja manjih otvora vrši se gasom pri čemu period "čekanja" na prvo uočavanje curenja eksponencijalno raste, npr. za prolaz bakterija iznosi 1 dan, a za viruse više od 100 dana.

*Metoda nad pritiska* je saglasna s postupkom probnog ispitivanja opreme na dejstvo pritiska, pri čemu treba imati u vidu zavisnost stope curenja od iznosa ispitnog pritiska, a može biti i pri većim pritiscima od ispitnog. Ukoliko curenje nastane u ranim fazama ispitivanja, otkrivanje mesta i otklanjanje uzroka treba započeti odmah, a ukoliko curenja nema pri konačnom ispitnom pritisku, dalje traganje za curenjem se prekida. Lokacija curenja se otkriva vizuelno ili proverom mehurića pri ispitivanju gasom. Ova metoda je podložna uticaju temperaturne promene i efekata deformacije zbog promene zapremine ispitivanog prostora. Metoda nad pritiska se može odvijati kao klasična hidrostatička metoda ispitivanja sa produženim trajanjem, ili sa dodatnim ispitivanjem gasom (2 do 3,5 bara prema Yokell) i otkrivanjem mesta curenja pomoću sapunice i mehurića (ili detektorima).

**TAB. 4.24.** *Mogućnosti otkrivanja stope isticanja fluida raznih testova ispitivanja prema Schröder [109] na bazi EN 1779 i pogodnosti metode*

Metoda nadpritiska												Merenje	Područje testa lokalna oblast	Područje testa ukupna oblast	
Stopa isticanja fluida [mbar·ℓ·s <sup>-1</sup> ]															
10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-12</sup>				
Test boje												da	da	da	
Ultrazvučni test													ne	da	ne
Test mehurića				vazduh/voda								da	da	da	
Test mehurića				vazduh/sredstvo za penu								ne	da	ne	
Metoda pada pritiska													da	ne	da
Test curenja tragajućim gasom (NH <sub>3</sub> , itd.)												da <sup>1)</sup>	da	da	
Metoda tragajućim gasom: detekcija helijumom												da <sup>1)</sup>	da	da	

1) Kvantifikacija stope isticanja samo je uslovno moguća u testu detekcije

Metoda vakuma												Merenje	Područje testa lokalna oblast	Područje testa ukupna oblast
Stopa isticanja fluida [mbar·ℓ·s <sup>-1</sup> ]														
10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-12</sup>			
Ultrazvučni test												ne	da	ne
Metoda porasta pritiska												da	ne	da
Tragajući gasovi (halogeni, NH <sub>3</sub> , itd.)												da	da	da
Test curenja helijumom												da	da	da
				Analiza zaostalog gasa				(sa posebnom opremom)				(da)	(da)	(ne)

Metoda vakuma je ispitivanje curenja postupkom vakumiranja prostora posude s ciljem da se ispitni fluid uvuče u posudu i tako otkrije. Nije osjetljiv na promenu temperature i deformacije ako je nosivost proračunata na dejstvo vakuma.

Za otkrivanje curenja pomoću dodatnog ispitnog gasa, koriste se razne vrste gasova, kao gasovi rashladnih instalacija (NH<sub>3</sub> i halogeni), mešavine azota i vodonika, helijum i sl. Helijum je često korišten gas, jer je inertan, bezbedan, hemijski neutralan i lako se detektuje, ali pored visoke cene nedostatak mu je zasićenje okolnog prostora što otežava ponovljivost ispitivanja. Tehnike ispitivanja curenja gasom opisane su u EN 1779, kao i EN 13184 (tehnika tipa D) i EN 13185 (tehnike tipa A i B). Prema osjetljivosti odnosno stopi curenja, tehnike ispitivanja mogu se svrstati prema redosledu datom u tabeli TAB.4.25.



**TAB. 4.25.** Rangiranje ostljivosti tehnike ispitivanja prema stopi curenja.

Tehnika ispitivanja	min. Stopa curenja (mbar·l/s)	Komentar
Merljiva promena pritiska	$10^{-2}$ (vremenski ograničena)	Dobra kvantitativna metoda, bez mesta curenja
Akustične metode	$10^{-3}$	Brzo otkrivanje curenja: da ili ne (može daljinski)
Test mehurićima	$10^{-5}$	Mesto mogućeg curenja treba očistiti
Test halogenima	$10^{-6}$	Gubi osetljivost tokom upotrebe, osetljiv na uticaj halogena iz okoline
Maseni helijum spektrometar	$10^{-9}$	Najtačnija metoda vakumskog ispitivanja putem spektrometrijske analize, ali i skup postupak
Radioaktivni test	$10^{-10}$	Ograničenje upotrebe radioaktivnih tragača

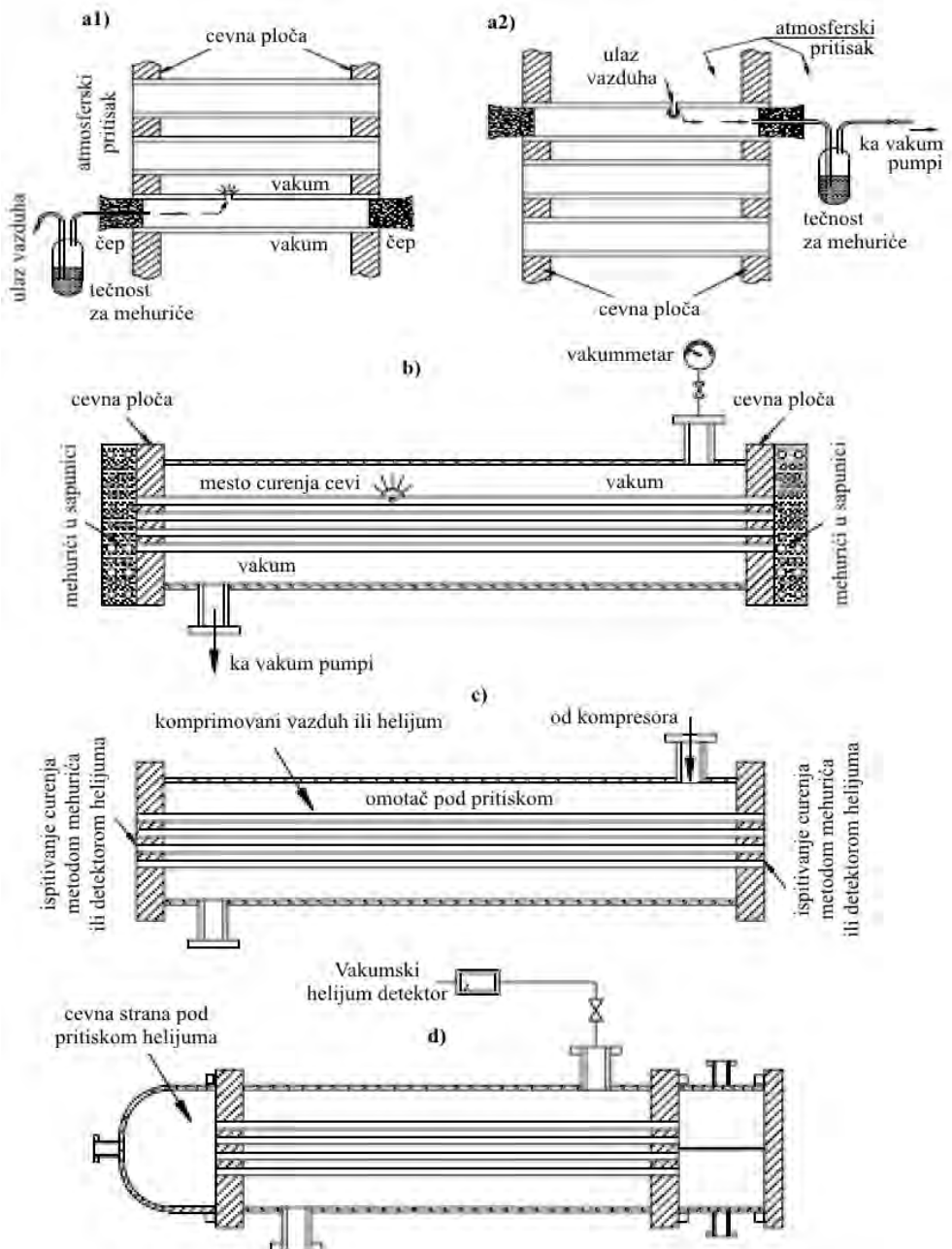
Praksa pokazuje da ispitivanje razmenjivača toplote na test curenja treba predvideti naročito u sledećim slučajevima:

1. Sprečavanje gubitka materijala iz RT iz razloga bezbednosti ili je materijal veoma skup i predstavlja veliki trošak,
2. Sprečavanje zagađenje okoline, ukoliko je materijal koji curi ekološki rizik ili radi otkrivanja nepouzdanе komponente u sistemu.

Pre sprovođenja testa na curenje razmenjivača toplote, potrebno je doneti odluku kojim sredstvom i postupkom će se sprovesti ispitivanje, ono može biti pomoću vode ili pomoću gasa.

Ispitivanje curenja hidrostatičkim pritiskom je vrlo slično kao u već opisanom ispitivanju na probni pritisak i može se odvijati istovremeno ili naknadno. Američki standard ASTM E1003 daje detalje ove metode i procedure, otkrivanje se vrši vizuelnim putem i putem opadanja pritiska. Osetljivost ovog ispitivanja je do  $10^{-2}$  Pa·l/s ( $4,5 \cdot 10^{-7}$  mol/s), za vreme od 10 min stabilizacije i ispitivanja do 2 sata, a osetljivost se može povećati do 10 puta upotrebom aditiva za penetraciju i produženim vremenom ispitivanja. Vodi se mogu dodati posebne boje ili sredstva fluoroscencije, radi lakšeg otkrivanja curevina. Temperatura vode i ispitne mase moraju pre ispitivanja biti izjednačene (oko  $16^{\circ}\text{C}$ ), zbog mogućnosti kondenzacije vlage iz okolnog vazduha. Usled veličine molekula vode i uticaja sila površinskog napona, ispitivanje gasom posle ispitivanja vodom skoro da nije moguće, jer dolazi do zatvaranja malih otvora za curenje, pa ukoliko se predviđa ispitivanje gasom ono se mora prvo obaviti. Pritisak hidrostatičkog ispitivanja na curenje treba da je posebno dogovoren sa korisnikom, on treba da je 50% od radnog pritiska ili veći sve do ispitnog pritiska. Ispitivanje curenja vodenim testom, najčešće zadovoljava veći deo industrijskih aplikacija, rashladne instalacije se najčešće ispituju testom halogena, dok oprema koja sadrži opasne fluide ili ima posebne zahteve ili se ispituje na gas.

Više metoda ispitivanja curenja razmenjivača toplote gasom prikazano je na slici Sl. 4.130, a odnosi se na testiranje cevi snopa ili na spoj cevi i cevne ploče. Pojedinačno ispitivanje svake cevi vakumom u omotaču (slučaj a1), se sprovodi



**Sl. 4.130.** Ispitivanje curenja cevnog registra pomoću gasa: a1) mehurićima, vakum oko cevi, a2) mehurićima, vakum u cevi, b) zbirno cevna ploča, vakum u omotaču-sapunica na cevnoj ploči, c) omotač pod pritiskom vazduha ili helijuma a test cevne ploče mehurićima ili detektorom, d)cevi pod pritiskom helijuma

tako što se začepi ispitivana cev, čiji se jedan kraj poveže sa posudom sa tečnošću, kroz koju se može povući spoljašnji vazduh, koji će izazvati pojavu mehurića usled dejstva vakuma ako cev ima šupljina. Postupkom se ne mogu otkriti curenja spoja cevi i ploče, a pored toga vakum može da se gubi, ako ima curenja na strani drugih cevi koje se trenutno ne ispituju. Nešto je bolji postupak vakumiranja cevi (slučaj pod b), kada neme uticaja propuštanja drugih cevi, ali se i dalje metodom ne može otkriti curenje spoja cevi i cevne ploče. Zbirno tretiranje celog cevnog registra prikazano je na ostalim slučajevima:

- slučaj b) – omotač je pod vakumom, a spoj cevi i ploče se tretiraju sapunicom;
- slučaj c) – omotač je pod pritiskom komprimovanog vazduha ili helijuma. Test se vrši sapunicom na dejstvo vazduha ili detektorom helijuma;
- slučaj d) – cevi su pod pritiskom helijuma, a testiranje se vrši spektrometrijom prisustva helijuma u omotaču razmenjivača toplote.

Milan R. Rikalović

# DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

**Knjiga I: KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**



**Naredne stranice su u prekidu !**



Dispoziciju nastavka teksta na sledećoj strani videti u sadržaju.

**Ako želite kompletan tekst - NARUČITE KNJIGU**

---

# **DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE**

## **Knjiga I: Klasifikacija i konstrukcija**

---

### **PRILOZI uz knjigu I**

Segmenti knjige koji nisu u sastavu bilo kojeg poglavlja, niti su posebni konstituenti bilo kojeg razmatranja, ali pokazuju neophodnost za brzo pronalaženje specifične informacije, podatka ili obrazloženja su aneksi u formi priloga.

## PAI. SI SISITEM JEDINICA

### PAI-1. Jedinice mera

#### Istorija Međunarodnog sistema jedinica mera (SI) [133]

Oduvek je postojala praktična i naučna potreba da se neka veličina izmeri i uporedi sa drugom veličinom. U običnom životu stvarane su jedinice na bazi svakodnevne prirodne dostupnosti lokalnih mera, što je stvaralo bezbroj nesporazuma. Naučnici, posebno u Francuskoj, su diskutovali o problemima merenja i predložili su decimalni sistem merenja baziran na prirodnim jedinicama, zabeležen 1640. godine, kao metrički sistem, ali prvo zvanično usvajanje takvog sistema je bilo posle Francuske revolucije 1789. Metrički sistem je pokušao da izabere jedinice koje su bile neproizvoljne, a praktične, što se dobro uklapalo sa revolucionarnom zvaničnom ideologijom "čistog razuma".

Najznačajnija jedinica za dužinu je jedan metar, koji je prvobitno definisan da bude desetomilioniti deo razdaljine od pola do ekvatora duž meridijana koji je prolazio kroz Pariz. Ovo je približno 10% duže od jedne jarde (koja iznosi 3 stope, ili 36 inča, ili 91,44 cm). Kasnije je napravljena šipka od platine sa poprečnim presekom u obliku slova H, kako bi poslužila kao standard za dužinu jednog metra koji može lako da se proverí. Zbog teškoća da se stvarno izmeri dužina meridijana u 18. veku je utvrđeno da je prvi prototip od platine bio kraći za 0,2 milimetra. Pokušaji da se celobrojni umnožak metra poveže sa bilo kojim meridijanom su napušteni. Kasnije je dužina metra redefinisana kao umnožak talasne dužine specifičnog zračenja kripton-86, a trenutno je definisan kao rastojanje koje svetlost pređe u vakuumu za specifični period vremena.

Prvobitna osnovna jedinica za masu u metričkom sistemu je bio gram, ali je ovo ubrzo promenjeno na kilogram, koji je definisan kao masa 0,001 m<sup>3</sup> čiste destilovane vode kada je najgušća (na +3,98 stepena Celzijusa). Jedan kilogram iznosi oko 2,2 funte, odnosno jedna međunarodna funta je 0,45359237 kg, a jedna funta ima 16 unci. (To je tzv. avoirdupoisna funta, prema Konvenciji SAD i zemalja Komonvelta iz 1959 god. Oznaka funte je libra (lb), pozajmljeno iz Rimskog carstva, iako je ona sadržala svega 0,327 kg). Hiljaditi deo zapremine jednog m<sup>3</sup> je definisan kao jedan litar, tako da su zapremine mogle lako da se upoređuju koristeći daleko zgodniju jedinicu nego veoma veliki kubni metar. Do 1799, proizveden je cilindar od platine da služi kao standard za kilogram, tako da se za primarni standard nije koristio nijedan standard baziran na vodi. Posle 90 godina, 1890. godine, ovaj cilindar je zamenjen novim cilindrom od legure (90%) platine i (10%) iridijuma, koji od tada služi kao standard i čuva se u pariskom trezoru. Kilogram je jedina osnovna jedinica koja nije redefinisana u vezi sa nemanjajućim prirodnim fenomenom. Međutim, na sastanku Kraljevskog udruženja u Londonu, 15. februara 2005, naučnici su pozvali da masa *standardnog kilograma* (čuvana u Parizu) bude zamenjena kao zvanična definicija iznoseći da "nepromenljiva osobina prirode" treba da se koristi (pre nego materijalni predmet čija masa može blago da se promeni), ali odluke o redefiniciji nisu donete, već je sve odloženo. Konačna redefinicija svih jedinica je usvojena 2019. godine.

Jedinica za temperaturu je postala centigrad ili obrnuti Celzijusov grad, što znači da je živina skala podeljena na 100 jednakih delova, između mešavine vode i leda i tačke ključanja čiste, destilovane vode. Ključajuća voda tako ima sto stepeni Celzijusovih, a zaleđivanje je na nula stepeni. Ovo je metrička jedinica temperature u svakodnevnoj upotrebi. Posle otkrića apsolutne nule, došlo je uspostavljanja nove temperaturne skale, apsolutne skale koja pomera nultu tačku na apsolutnu nulu. To je nazvano Kelvinovom skalom i koncipirana je da se održi 100 kelvina između tačke zaleđivanja i ključanja vode. Definicija termodinamičke temperature usvojena je 1954. god. kao trostruka tačka vode koja je određena kao osnovna fiksna tačka kojoj je dodeljena temperatura 273,16 K, čime je definisan kelvin. Rezolucijom o Metrologiji 1968. god. usvojio je naziv kelvin, simbol K, umesto "stepen kelvina", (°K), za ovako definisanu jedinicu. Međutim, praktične poteškoće u realizaciji ove

definicije, koje zahtevaju uzorak čiste vode dobro definisanog izotopskog sastava i razvoj novih metoda termometrije, dovele su do usvajanja nove definicije kelvina zasnovane na fiksnoj numeričkoj vrednosti Boltzmanove konstante  $k$ , što je doneto redefinicijom SI jedinica 2019. god.

Metrička jedinica za vreme je postala sekund, prvobitno definisan kao  $1/86400$  prosečnog sunčevog dana. Zvanična definicija sekunde se menjala nekoliko puta zbog povećanih naučnih potreba (astronomska posmatranja, kvarcni časovnici, cezijumski atomski časovnik), pri čemu u praksi korisnici ručnog sata nisu osetili skoro nikakvu promenu dužine trajanja sekunde.

Brzo usvajanje metričkog sistema širom sveta kao alat za ekonomiju i svakodnevnu trgovinu je baziran uglavnom na nedostatku proizvoljnih sistema mnogih država na standardizaciji mernih jedinica. Veliki doprinos usvajanju metričkog sistema, doneo je enormni rast međunarodne trgovine. U naučnom smislu, ovaj sistem pruža lakoću u primeni, jer bilo da se radi o velikim ili malim veličinama dobro se uklapa sa decimalnim brojnim sistemom. Kulturne razlike mogu da se novim sistemom predstave prilagođeno lokalnim potrebama stanovništva. Na primer, hleb se prodaje u veličinama od pola, jednog ili dva kilograma u mnogim zemljama, ali može da se prodaje i po 100, 250 grama, 500 grama i sl., ako to zahtevaju lokalne navike. Nekada nepremostive razlike između, hemičara, fizičara i inženjera, upotrebom metričkog sistema, dovele su do mogućnosti različite upotrebe pogodnih veličina. Obični ljudi ne treba da budu obeshrabreni podešavanjima koja su se dešavaju na metričkim osnovnim jedinicama tokom poslednjih dvesta godina, pošto eksperti stalno redefinišu metrički sistem, kako bi odgovarao različitim naučnim istraživanjima (npr. promene iz CGS u MKS, pa u SI sistem ili stvaranje Kelvinove skale). Iako ove promene ne utiču na svakodnevnu upotrebu metričkih jedinica, prisustvo stalnih podešavanja je jedan od razloga zbog kojih su zagovornici američkih proizvoljnih jedinica protiv metrifikacije. Tekuće proizvoljne jedinice su ipak u neizbežnoj vezi sa SI jedinicama i svaka promena SI jedinica prouzrokuje njihovu promenu.

Metrički sistem u Srbiji ima dug kontinuitet, Kneževina Srbija je pristupila Metarskoj konvenciji 1879. godine. Posle Prvog svetskog rata, 1918. godine, sva prava i obaveze u okviru konvencije preuzela je Kraljevina SHS, potom Jugoslavija. Posle osamostaljenja Republika Srbija je kao pravni sledbenik nasledila članstvo u Međunarodnom komitetu za utege i mere.

**Međunarodni sistem jedinica** (*Système International d'Unités* odnosno *International System of Units*), skraćeno **SI**, je odobren 1960. godine, kao specifičan podskup postojećeg *metar-kilogram-sekund* sistema jedinica (MKS), ili nešto starijeg *centimetar-gram-sekund* sistema (CGS). Kasnije su u sistem SI dodavane razne nove jedinice. Ovaj sistem se ponekad posmatra kao *metrički sistem*, posebno u SAD, koje ga nisu široko usvojile, iako se sve češće koristi u novije vreme, takođe i u Velikoj Britaniji, gde je usvojena delimična konverzija jedinica. *Internacionalni sistem* (SI) jedinica može se smatrati kao specifični skup mera izveden i proširen iz *metričkog sistema*; međutim, nisu sve metričke jedinice za merenje prihvaćene kao SI jedinice.

Od 1970. godine, *Bureau international des poids et mesures* ili BIPM (poznat na engleskom kao *International Bureau of Weights and Measures – Međunarodni biro za utege i mere*), objavio je sedam izdanja Internacionalnog sistema jedinica (SI) dokumenta. Osmo izdanje ovog dokumenta od strane BIPM objavljeno je 2006. godine je značajno sistematizovalo i unapredilo sistem jedinica, dok je deveto izdanje iz 2019. god. definitivno promenilo definicije jedinica. Brojne prilagođene SI jedinice i oznake termina (nomenklatura) preuzete su iz knjige *VDI Wärmeatlas-2013* [3], koriste se i oznake standarda grupacije *DIN 28xxx-Rohrbundel* [S7], zatim za mehaničke proračune razmenjivača iz evropskog standarda *EN 13445 Unifired pressure vessels* [S2] i alternativno iz *AD 2000 Technical Rules for Pressure Vessels* [S8], a zadržan je i dobar deo oznaka iz knjige *Dobošasti razmenjivači toplote* ovog autora [10]. Posebno se naglašavaju oznake i nomenklature iz *TEMA standarda* [S1], američkih standarda *ASME* [S10] i *API* [S9], kao drugih citiranih standarda ili referentnih autora.

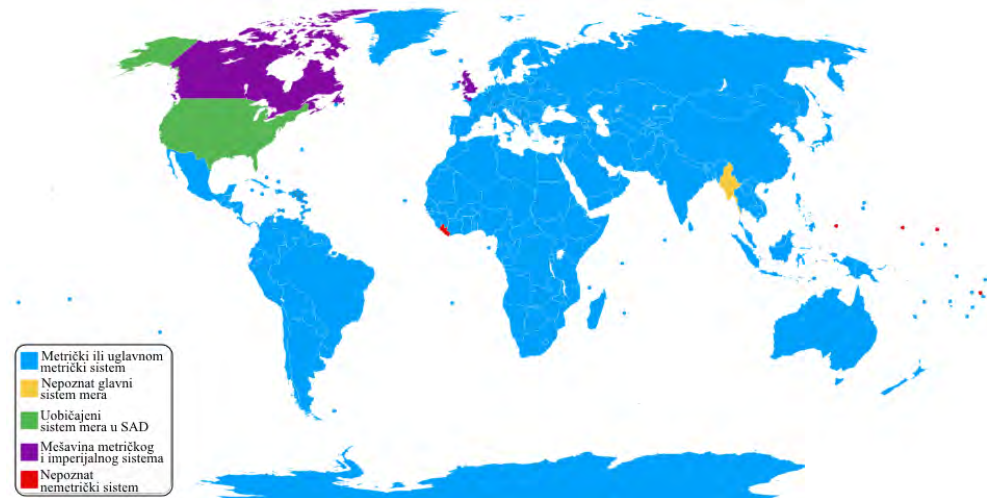
## Prezentacija novog SI sistema jedinica iz 2019 god. [132]

Iako se praktično ništa ne menja u korištenju SI jedinica koji se koristi u knjizi (izdanje 8), u 9. izdanju SI brošure iz 2019. godine promenjene su mnoge definicije i principi utvrđivanja jedinica (redefinicije), koje se pre svega odnose na sedam osnovnih jedinica i sedam "definiirajućih" konstanti.



Među njima su fundamentalne konstante prirode kao što su Plankova konstanta i brzina svetlosti, tako da su definicije zasnovane i predstavljaju današnje razumevanje zakona fizike. Po prvi put, dostupan je kompletan set definicija koje se ne pozivaju ni na kakve standarde za artefakte, svojstva materijala ili opise merenja. Ove promene omogućavaju realizaciju svih jedinica s tačnošću koja je u konačnici ograničena samo kvantnom strukturom prirode i našim tehničkim mogućnostima.

Sistem SI jedinica je veoma rasprostranjen u svetu, veoma mali broj zemalja ga ne prihvata ili ograničeno primenjuje. Na slici SI. PAI-1, prikazan je globalni raspored mernih jedinica u svetu.



SI. PAI-1. Globalni raspored primene sistema jedinica, posle 9. izdanja brošure SI, Wikipedia 2021. god.

Prema izmenama, SI se sastoji od koherentnog sistema mernih jedinica počevši od sedam osnovnih jedinica, a to su *sekunda* (simbol  $s$ , jedinica vremena), *metar* ( $m$ , dužina), *kilogram* ( $kg$ , masa), *amper* ( $A$ , električna struja), *kelvin* ( $K$ , termodinamička temperatura), *mol* ( $mol$ , količina supstance) i *kandela* ( $cd$ , intenzitet svetlosti). Sistem sadrži neograničen broj dodatnih koherentnih jedinica, koje se tako nazivaju, jer se uvek mogu predstaviti kao proizvod osnovnih jedinica. Dvadeset dve koherentne izvedene jedinice dobile su posebna imena i simbole. Sedam osnovnih jedinica i 22 koherentne izvedene jedinice sa posebnim imenima i simbolima mogu se koristiti u kombinaciji za izražavanje drugih koherentnih izvedenih jedinica. Pošto su veličine koherentnih jedinica pogodno samo za neke aplikacije, ali ne i za sve, SI uvodi dvadeset četiri prefiksa koji, kada se dodaju imenu i simbolu koherentne jedinice daju dvadeset četiri dodatne (nekoherentne) SI jedinice za istu količinu. Ove nekoherentne jedinice su uvek decimalni (tj. stepen osnove deset) činioci koherentne jedinice.

Od 2019. godine, veličine svih SI jedinica su definisane na način da sedam *SI definirajućih konstanti* imaju određene tačne numeričke vrednosti kada su izražene u SI jedinicama. Definirajuće konstante su: *brzina svetlosti u vakuumu* -  $c$ , *hiperfina prelazna frekvencija cezijuma* -  $\Delta\nu_{Cs}$ , *Plankova konstanta* -  $h$ , *elementarno naelektrisanje* -  $e$ , *Boltzmanova konstanta* -  $k$ , *Avogadrova konstanta* -  $N_A$  i *svetlosna efikasnost*  $K_{cd}$ . Navedene konstante su osnovne konstante prirode kao što je  $c$ , ili tehničke konstante kao što je  $K_{cd}$ . Do 2019. godine,  $h$ ,  $e$ ,  $k$  i  $N_A$  nisu bile definisane a priori već su bile vrlo precizno merene veličine. Posle 2019. godine njihova vrednosti su po definiciji fiksirane na njihove najbolje procene u tom trenutku, tako da čine kontinuitet s prethodnim definicijama osnovnih jedinica. Način definisanja SI prema brošuri SI iz 2019. god. rezultat je višedecenijskog trenda ka sve apstraktnijim formulacijama kojima se realizacija jedinica konceptijski odjava od definicije. To ima za posledicu da se razvoj nauke i tehnologije može razviti dalje do superiorne realizacije, koje ne zahtevaju redefinisane jedinice. Raniji problem s artefaktima, kao što je da se mogu izgubiti, oštetiti

ili promeniti, ili da unose nesigurnost u dalji napreak nauke i tehnologije, je rešen izbacivanjem artefakata iz upotrebe. Posljednji artefakt koji je SI koristio bio je međunarodni prototip kilograma.

### Redefinicija osnovnih jedinica SI sistema iz 2019. god.

Prema brošuri 9. o SI jedinicama iz 2019. god. broj i vrsta osnovnih jedinica nije izmenjen, niti su značajno promenjene numeričke vrednosti jedinica, što znači da njihova upotreba u stvarnom životu nije promenjena. Promena se odnosi pre svega na definiciju osnovnih jedinica. Komparacija pozicije osnovnih jedinica pre i posle 2019. god., data je u tabeli Tab PAI-101. Prikazane su osnovne jedinice, uticajne veličine na njihovu definiciju i tok uticaja veličina jednih na druge.

**Tab. PAI-101. Komparacija osnovnih SI jedinice mera pre i posle 2019. god.**

Prethodni SI sistem (pre 2019. god.)	Novi SI sistem (posle 2019. god.)
<p>Osnovne jedinice: <i>s</i> – sekunda; <i>kg</i> – kilogram; <i>m</i> – metar; <i>mol</i> – mol; <i>A</i> – amper; <i>cd</i> – kandela; <i>K</i> – kelvin .</p> <p>Uticajne veličine: <math>\Delta\nu_{Cs}</math> (za <i>s</i>) – osnovno stanje hiperfine strukture tranzicione frekvencije elementa cezijum-133; <math>M_{IPK}</math> (za <i>kg</i>) – masa internacionalnog etalona kilograma, koji se čuva u Parizu; <i>c</i> (za <i>m</i>) – brzina svetlosti u vakumu; <math>m(^{12}C)</math> (za <i>mol</i>) – količina materije izotopa ugljenika C12; <math>\mu_0</math> (za <i>A</i>) – magnetna permeabilnost (intenzitet magnetizacije); <math>K_{cd}</math> (za <i>cd</i>) – jačina svetlosti monohromatskog elektromagnetnog zračenja; <math>T_{TPW}</math> (za <i>K</i>) – termodinamička temperatura trojne tačke vode.</p>	<p>Osnovne jedinice: <i>s</i> – sekunda, <i>kg</i> – kilogram, <i>m</i> – metar, <i>mol</i> – mol, <i>A</i> – amper, <i>cd</i> – kandela, <i>K</i> – kelvin</p> <p>Numeričke vrednosti konstanti za definiciju jedinica: <math>\Delta\nu_{Cs}</math> (za <i>s</i>) – osnovno stanje hiperfine strukture tranzicione frekvencije elementa cezijum-133, iznosi <math>\Delta\nu_{Cs}=9\ 192\ 631\ 770\ \text{Hz}</math>; <i>h</i> (za <i>kg</i>) – Plankova konstanta, <math>h=6,62907015\cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}</math>; <i>c</i> (za <i>m</i>) – brzina svetlosti u vakumu, <math>c=299\ 792\ 458\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>; <math>N_A</math> (za <i>mol</i>) – Avogadrov broj, <math>N_A=6,02214076\cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}</math>; <i>e</i> (za <i>A</i>) – elementarno naelektrisanje elektrona, <math>e=1,602176634\cdot 10^{-19}\ \text{A}\cdot\text{s}</math>; <math>K_{cd}</math> (za <i>cd</i>) – jačina svetlosti monohromatskog elektromagnetnog zračenja frekvencije <math>540\cdot 10^{12}\ \text{Hz}</math> je <math>K_{cd}=683\ \text{lm}\cdot\text{W}^{-1}</math>; <math>k_B</math> (za <i>K</i>) – Bolzmanova konstanta koja iznosi <math>k_B=1,308649\cdot 10^{-23}\ \text{J}\cdot\text{K}^{-1}</math>.</p>
<p>Napomena: strelica <i>a</i> → <i>b</i> označava zavisnost ili uticaj veličine <i>a</i> na veličinu <i>b</i>.</p>	

Dakle, 2019. godine je došlo do redefinisavanja osnovnih jedinica SI sistema, tako da su uvedene fundamentalne fizičke konstante za definisanje svake osnovne jedinice. Redefinisane su četiri od ukupno sedam osnovnih jedinica: kilogram, amper, kelvin i mol na osnovu utvrđenih brojnih vrednosti konstanti: Plankove konstante (*h*), elementarnog naelektrisanja elektrona (*e*), Bolzmanove konstante ( $k_B$ ) i Avogadrovog broja ( $N_A$ ). Sekunda, metar i kandela bile su ranije već definisane na osnovu fundamentalnih fizičkih konstanti pa su njihove nove definicije izvedene na osnovu starih definicija uz manje korekcije. Nove definicije osmišljene su tako da poboljšaju SI sistem bez promene samih numeričkih vrednosti bilo koje od jedinica čime se očuvala kvantitativna verodostojnost. Redefinicija SI sistema rezultirala je definisanjem svih sedam osnovnih mijernih jedinica na osnovu sedam utvrđenih brojnih vrednosti fizičkih konstanti, prikazano u tabeli Tab PAI-102.

**Tab. PAI-102. Definicija osnovnih SI jedinice mera pre i posle 2019. god.**

Prethodni SI sistem (pre 2019. god.)	Novi SI sistem (posle 2019. god.)
<b>Sekunda [s]</b> Nova definicija sekunde suštinski je ista kao i prethodna definicija. Razlike se ogledaju u strožije definisanim uslovima pod kojima nova definicija vredi.	
<u>Prethodna definicija:</u> Sekunda je trajanje od 9 192 631 770 perioda zračenja koje odgovara prelazu između dva hiperfina atomska nivoa baznog stanja atoma cezijum-133	<u>Novi definicija:</u> Sekunda, simbol s, merna je jedinica za vreme u SI sistemu. Definisana je na osnovu konstante $\Delta\nu_{Cs}$ , stabilno bazno stanje hiperfine tranzicione frekvencije atoma cezijum-133, brojnom konstantom 9 192 631 770, kada je frekvencija izražena u [Hz] odnosno $[s^{-1}]$ . Sekunda se može direktno izraziti koristeći prethodno definisane fizičke konstante na sledeći način: $1[s] = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu_{Cs}$
<b>Metar [m]</b> Nova definicija metra suštinski je ista kao i prethodna definicija. Jedina razlika ogleda se u postojanju dodatnih detalja u definiciji koji potiču od nove rigoroznije definicije sekunde.	
<u>Prethodna definicija:</u> Metar je rastojanje koje zrak svetlosti pređe u vakuumu u toku vremenskog perioda $(1/299\,792\,458)$ [s].	<u>Novi definicija:</u> Metar, simbol m, merna je jedinica za dužinu u SI sistemu. Definisana je na osnovu utvrđene brojne vrednosti brzine svetlosti u vakuumu c koja iznosi 299 792 458 izražena u mernoj jedinici $[m \cdot s^{-1}]$ , gde je sekunda definisana na osnovu fizičke konstante $\Delta\nu_{Cs}$ . Metar se može direktno izraziti koristeći prethodno definisane fizičke konstante na sledeći način: $1[m] = (9\,192\,631\,770 \cdot c) / (299\,792\,458 \cdot \Delta\nu_{Cs})$
<b>Kilogram [kg]</b> Definicija kilograma fundamentalno se promenila. Nova definicija kilograma sada je u potpunosti nezavisna od internacionalnog etalona kilograma i svodi se na vrednost fizičke konstante h.	
<u>Prethodna definicija:</u> Kilogram je merna jedinica za masu. Masa od jednog kilograma jednaka je masi internacionalnog etalona kilograma.	<u>Novi definicija:</u> Kilogram, simbol kg, merna je jedinica za masu u SI sistemu. Definisana je na osnovu utvrđene brojne vrednosti Plankove konstante $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ izražene u mernoj jedinici $[J \cdot s]$ , koja je ekvivalentna mernoj jedinici $[kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}]$ . Kilogram se može direktno izraziti koristeći prethodno definisane fizičke konstante na sledeći način: $1[kg] = [(299\,792\,458)^2 \cdot h \cdot \Delta\nu_{Cs}] / [(6,62607015 \cdot 10^{-34}) \cdot (9\,192\,631\,770) \cdot c^2]$
<b>Amper [A]</b> Definicija ampera fundamentalno se promenila.	
<u>Prethodna definicija:</u> Amper je jačina električne struje koja, ako se održava u dva bekonačno duga provodnika zanemarljivih poprečnih preseka i postavljenih na razdaljinu od jednog metra u vakuumu, stvara međusobno delovanje sile intenziteta $2 \cdot 10^{-7}$ njutna po metru dužine provodnika.	<u>Novi definicija:</u> Amper, simbol A, merna je jedinica za jačinu električne struje u SI sistemu. Definisana je na osnovu utvrđene brojne vrednosti elementarnog naelektrisanja elektrona iznosi $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19}$ izražene u mernoj jedinici kulon [C], ekvivalentno mernoj jedinici $[A \cdot s]$ , gde je sekunda definisana na osnovu konstante $\Delta\nu_{Cs}$ . Amper se može direktno izraziti koristeći prethodno definisane fizičke konstante kao: $1[A] = e \cdot \Delta\nu_{Cs} / [(1,602176634 \cdot 10^{-19}) \cdot (9\,192\,631\,770)]$

nastavak tabele na sledećoj strani

nastavak tabele sa prethodne strane

<b>Kelvin [K]</b> Definicija kelvina fundamentalno se promenila. Umesto korištenja termodinamičke temperature trojne tačke vode, nova definicija bazira se na Bolzmanovoj konstanti.	
<u>Prethodna definicija:</u> Kelvin je termodinamička temperatura koja je jednaka 1/273,15 dela termodinamičke temperature trojne tačke vode.	<u>Nova definicija:</u> Kelvin, simbol K, merna je jedinica za termodinamičku temperaturu u SI sistemu. Definisana je na osnovu utvrđene brojne vrednosti Bolzmanove konstante koja iznosi $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23} [J \cdot K^{-1}]$ , koja je ekvivalentna mernoj jedinici $[kg \cdot m^2 \cdot K^{-1} \cdot s^{-2}]$ , gde su metar i sekunda definisani u odnosu na konstante $h$ i $\Delta\nu_{Cs}$ . Kelvin se može direktno izraziti koristeći prethodno definisane fundamentalne konstante na način: $1[A] = [1,380649 \cdot 10^{-23} \cdot h \cdot \Delta\nu_{Cs}] / [(6,62607015 \cdot 10^{-34}) \cdot (9\ 192\ 631\ 770) \cdot k_B]$
<b>Mol [mol]</b> Prethodna definicija mola bila je povezana sa definicijom kilograma. Nova definicija uklanja tu zavisnost.	
<u>Prethodna definicija:</u> Mol je količina supstance sistema koji sadrži onoliko elementarnih entiteta koliko ima atoma u 0,012 kilograma ugljenikovog izotopa C-12. Pri korištenju mola potrebno je specificovati šta su elementarni entiteti, odnosno kazati da li se radi o atomima, molekulama, jonima, elektronima, nekim drugim česticama ili specifičnoj grupi čestica.	<u>Nova definicija:</u> Mol, oznaka mol, merna je jedinica za količinu supstance u SI sistemu. Jedan mol sadrži tačno $6,02214076 \cdot 10^{23}$ elementarnih entiteta. Ovo je utvrđena brojna vrednost Avogadrove konstante $N_A$ izražene u mernoj jedinici $[mol^{-1}]$ i koja se naziva Avogadrov broj. Količina supstance, simbol $n$ , sistema je mera broja specifičnih elementarnih entiteta. Elementarni entitet može biti: atom, molekul, jon, elektron, neka druga čestica ili grupa specifičnih čestica. Mol se može direktno izraziti koristeći prethodno definisane fizičke konstante na sledeći način: $1[mol] = 6,02214076 \cdot 10^{23} N_A$
<b>Kandela [cd]</b> Nova definicija kandelesuštinski je ista kao i prethodna definicija. Razlika je postojanje dodatnih detalja u novoj definiciji koji potiču od precizne definicije sekunde, metra i kilograma.	
<u>Prethodna definicija:</u> Kandela je jačina svetlosti, u datom pravcu, izvora koji emituje monohromatsko zračenje frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ [Hz] i čija je jačina zračenja u tom pravcu 1/683 wati po steradianu. Steradian (sr) je prostorni ugao iz centra kugle poluprečnika $r$ , zatvoren površinom kugle od $r^2$ . Površina kugle je $4\pi r^2$ , što implicira da kugla ima $4\pi$ steradiana. Steradian se naziva i kvadratnim radijanom.	<u>Nova definicija:</u> Kandela, simbol [K], merna je jedinica u SI sistemu za jačinu svetlosti u određenom pravcu. Definisana je na osnovu fiksne brojne vrednosti jačine svetlosti monohromatskog zračenja frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ [Hz], i iznosi $K_{cd} = 683$ izražene u mernoj jedinici $[lm \cdot W^{-1}]$ , koja je ekvivalentna mernoj jedinici $[cd \cdot sr \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3]$ , gde su kilogram, metar i sekunda definisani u odnosu na konstante $h$ , $c$ i $\Delta\nu_{Cs}$ . Kandela se može direktno izraziti koristeći prethodno definisane fundamentalne konstante na sledeći način: $1[cd] = K_{cd} \cdot h \cdot \Delta\nu_{Cs} / [683 \cdot 6,62607015 \cdot 10^{-34} \cdot (9\ 192\ 631\ 770)^2 \cdot sr]$

**Tab. PAI-103. SI osnovne veličine i jedinice mera**

Veličina	Oznaka veličine	Jedinica	Oznaka jedinice	Simbol dimezije
vreme	$t$	sekunda	s	T
dužina	$l, x, r, itd.$	metar	m	L
masa	$m$	kilogram	kg	M
električna struja (jačina-intezitet)	$I, i$	amper	A	I
termodinamička temperatura	$T$	kelvin	K	$\Theta$
količina materije (supstance)	$n$	mol	mol	N
jačina svetlosti	$I_v$	kandela	cd	J

Sve ostale jedinice (osim brojanja) su izvedene jedinice i mogu se napisati pomoću osnovnih jedinica i računskog faktora. Dimenzije izvedenih veličina zapisuju se kao proizvodi oznaka dimenzije pomoću jednačina koje povezuju izvedene veličine s osnovnim količinama. Npr., dimenzija bilo koje veličine  $Q$  piše se u obliku dimenzionalnog proizvoda,  $\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$  gde su  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta$  celi brojevi (pozitivni, negativni ili nula) - nazivani dimenzionim eksponentima. Odnosi istih veličina imaju dimenzioni eksponent nula i predstavljaju brojeve, jedinica brojeva je simbol "1" ( $n^0=1$ ). Ravni i prostorni uglovi (izraženi u radijanima i steradijanima) se tretiraju kao brojevi jedinice "1". Simboli rad i sr se pišu radi prikladnosti (da se uoči veličina), a njihova jedinica je neutralna "1", pa se jedinica za uglove tretira kao izvedena jedinica.

**Tab. PAI-104. SI prefiksi (faktori većih ili manjih jedinica)**

Prefiksi većih jedinica (pozitivni)			Prefiksi manjih jedinica (negativni)		
Faktor	Naziv	Simbol	Faktor	Naziv	Simbol
$10^1$	<i>deka</i>	da	$10^{-1}$	<i>deci</i>	d
$10^2$	<i>hekto</i>	h	$10^{-2}$	<i>centi</i>	c
$10^3$	<i>kilo</i>	k	$10^{-3}$	<i>mili</i>	m
$10^6$	<i>mega</i>	M	$10^{-6}$	<i>mikro</i>	$\mu$
$10^9$	<i>giga</i>	G	$10^{-9}$	<i>nano</i>	n
$10^{12}$	<i>tera</i>	T	$10^{-12}$	<i>piko</i>	p
$10^{15}$	<i>peta</i>	P	$10^{-15}$	<i>femto</i>	f
$10^{18}$	<i>eksa</i>	E	$10^{-18}$	<i>ato</i>	a
$10^{21}$	<i>zeta</i>	Z	$10^{-21}$	<i>zepto</i>	z
$10^{24}$	<i>jota</i>	Y	$10^{-24}$	<i>jokto</i>	y
$10^{27}$	<i>rona</i>	R	$10^{-27}$	<i>ronto</i>	r
$10^{30}$	<i>keta</i>	Q	$10^{-30}$	<i>kecto</i>	q

Simboli prefiksa kao i simboli jedinica, uvek se štampaju uspravno bez obzira na font. Svi simboli pozitivnih faktora su velika slova (osim da, h i k) dok su svi simboli negativnih faktora mala slova.

**Tab. PAI-105. Koherentne SI izvedene jedinice sa posebnim imenom**

No	Veličina	Koherentna izvedena jedinica		Izraz preko osnovnih jedinica
		Posebno ime jedinice	Oznaka	
1.	<i>površinski ugao</i>	radijan	rad	rad=m/m
2.	<i>prostorni ugao</i>	steradian	sr	sr=m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
3.	<i>frekvencija</i>	herz	Hz	Hz=s <sup>-1</sup>
4.	<i>sila</i>	njutn	N	N=kg m s <sup>-2</sup>
5.	<i>pritisak, napon</i>	paskal	Pa=N/m <sup>2</sup>	Pa=kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>
6.	<i>energija, rad, količina toplote</i>	džul	J=N m	J=kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
7.	<i>snaga, radijantni fluks</i>	wat	W=J/s	W=kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
8.	<i>naelektrisanje (naboj)</i>	kulon	C=A s	V=kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
9.	<i>razlika električnog potencijala</i>	volt	V=W/A	V=kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
10.	<i>kapacitivnost</i>	farad	F=C/V	F=kg <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
11.	<i>električni otpor</i>	om	Ω=V/A	Ω=kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
12.	<i>električna provodljivost</i>	simens	S=A/V	S=kg <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
13.	<i>magnetni fluks</i>	weber	W <sub>b</sub> =V s	W <sub>b</sub> =kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
14.	<i>gustina magnetnog fluksa</i>	tesla	T=W <sub>b</sub> /m <sup>2</sup>	T= kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
15.	<i>induktivnost</i>	henri	H=W <sub>b</sub> /A	H=kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
16.	<i>temperatura Celzijusa</i>	stepen Celzijusa	°C=K	
17.	<i>svetlosni tok</i>	lumen	lm=cd sr	
18.	<i>osvetljenost</i>	luks	lx=lm/m <sup>2</sup>	lx= cd sr m <sup>-2</sup>
19.	<i>radio nukleidna aktivnost</i>	bekerelel	Bq=s <sup>-1</sup>	
20.	<i>apsorgovana doza, kerma</i>	grej	Gy=J/kg <sup>2</sup>	Gy= kg <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
21.	<i>ekvivalentna doza</i>	sivert	Sv= J/kg <sup>2</sup>	Gy= kg <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
22.	<i>katalitička aktivnost</i>	katal	kat=mol s <sup>-1</sup>	

**Dodatna objašnjenja za koherentne jedinice:**

- Radijan je koherentna jedinica za ravan ugao. Jedan radijan je ugao koji je u središtu kruga sveden lukom koji je po dužini jednak poluprečniku. To je takođe jedinica za fazni ugao. Za periodične pojave, fazni ugao se povećava za  $2\pi$  rad u jednom periodu. Radijan je ranije bio dopunska jedinica SI, ali je ova kategorija ukinuta 1995.
- Steradian je koherentna jedinica za prostorni (čvrsti) ugao. Jedan steradian je prostorni ugao koji je u središtu sfere savijen površinom koja je jednaka kvadratu radijusa. Kao i radijan, steradian je ranije bio dopunska jedinica SI.
- Jedinice herz i bekerelel su iste izvedene jedinice (s<sup>-1</sup>), međutim u aplikacijama here se koriste samo za periodične pojave, a bekerelel se koristi samo za stohastičke procese u aktivnosti koji se odnose na radionuklide.
- Za definiciju "volt" koristi se termin razlika električnog potencijala, koji se u mnogim zemljama naziva i "napon", takođe i "električna napetost" ili jednostavno samo "napetost" u nekim drugim zemljama. Uvek se odnosi na istu pojavu.
- Stepen Celzijusa se koristi za izražavanje Celzijusovih temperatura. Numerička vrednost temperaturne razlike ili temperaturnog intervala je ista kada je izražena u stepenima Celzijusa ili u kelvinima.
- Aktivnost koja se odnosi na radionuklid se ponekad pogrešno naziva radioaktivnošću.
- Doza od jednog greja je ekvivalentna jedinici energije (džulu) deponovanoj u kilogramu supstance. Jedan sivert je velika količina apsorbirane doze, osoba koja je apsorbirala dozu od 1 greja apsorbirala je jedan džul energije po svakom kilogramu telesnog tkiva. Kerma je mera kinetičke energije koja se prenosi zračenjem na materiju. To je akronim za kinetičku energiju koja se oslobađa po jedinici mase.

**Tab. PAI-106. Primeri koherentnih jedinica posebnog imena i simbola**

No	Veličina	Koherentna izvedena jedinica		Izraz preko osnovnih jedinica
		Naziv jedinice	Oznaka	
1.	<i>dinamička viskoznost</i>	paskal sekund	Pa s	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
2.	<i>moment sile</i>	njutn metar	N m	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
3.	<i>površinski napon</i>	njutn po metru	N/m	$\text{kg s}^{-2}$
4.	<i>ugaona brzina (ugaona frekvencija)</i>	radijana u sekundi	rad/s	$\text{s}^{-1}$
5.	<i>gustina toplotnog toka</i>	radijana po sekundi na kvadrat	rad/s	$\text{s}^{-2}$
6.	<i>gustina toplotnog fluksa zračenja</i>	wat po kvadratnom metru	W/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{-3}$
7.	<i>toplotni kapacitet, entropijski</i>	džul po kelvinu	J/K	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
8.	<i>specifični toplotni kapacitet, specifična entropija</i>	džul po kilogramu i kelvinu	J/(kg K)	$\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
9.	<i>specifična energija</i>	džul po kilogramu	J/kg	$\text{kg m s}^{-2} \text{K}^{-1}$
10.	<i>toplotna provodljivost</i>	wat po metru i kelvinu	W/(m K)	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
11.	<i>gustina energije</i>	džul po metru kubnom	W/m <sup>3</sup>	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
...				
<b>Primeri elementarnih fizičkih veličina izraženih u SI jedinicama</b>				
1.	<i>površina</i>	kvadratni metar	<i>A</i>	$\text{m}^2$
2.	<i>zapremina (volumen)</i>	kubni metar	<i>V</i>	$\text{m}^3$
3.	<i>brzina</i>	metar po sekundi	<i>v</i>	$\text{m s}^{-1}$
4.	<i>ubrzanje</i>	metar po sekundi na kvadrat	<i>a</i>	$\text{m s}^{-2}$
5.	<i>gustina (specifična masa)</i>	kilogram po kubnom metru	$\rho$	$\text{kg m}^{-3}$
6.	<i>površinska gustina</i>	kilogram po kvadratnom metru	$\rho_A$	$\text{kg m}^{-2}$
7.	<i>specifična zapremina</i>	kubni metar po kilogramu	<i>v</i>	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
8.	<i>koncentracija supstance</i>	mola po kubnom metru	<i>c</i>	$\text{mol m}^{-3}$
9.	<i>masena koncentracija</i>	kilogram po kubnom metru	$\rho (\gamma)$	$\text{kg m}^{-3}$
...				

**Napomena:**

- Svaka fizička jedinica ima samo jednu koherentnu jedinicu, dok obrnuto ne važi jer više različitih fizičkih veličina može imati istu SI jedinicu. Na primer toplotni kapacitet i količina entropije imaju istu SI jedinicu J/K. Zbog toga je važno da uz određenu veličinu navesti i jedinicu koja je izražava.
- U praksi kod određenih veličina koje imaju istu SI jedinicu prednost se daje uobičajenim jedinicama na bazi definicije veličine, npr. moment je vektorski proizvod sile i radijus vektora i izražava se SI jedinicom N m, što je ista jedinica kao energija koja ima SI jedinicu J, ipak se moment nikada ne izražava u džulima veća samo u N m.
- Posebnu pažnju treba posvetiti izražavanju temperatura, kada se izražava temperaturna razlika, onda je  $1 \text{ K} = 1^\circ\text{C}$ , međutim kada se temperatura izražava u apsolutnom iznosu onda je  $T (\text{K}) = t (^\circ\text{C}) + 273,16$ , odnosno da je temperatura u kelvinima uvek nenegativna vrednost.



**Tab. PAI-107. Ne SI jedinice prihvaćene za upotrebu s SI jedinicama**

Veličina	Naziv jedinice	Oznaka	Vrednost u SI jedinicama
vreme	minut	min	1 min = 60 s
	čas	h	1 h = 60 min = 3600 s
	dan	d	1 d = 24 h = 1440 min = 86400 s
dužina	astronomska jedinica	au	1 au = 149 597 870 700 m
ugao u ravni i njegovi delovi	stepen	°	1° = (π/180) rad
	minut	'	1' = (π/60)° = (π/10800) rad
	sekund	"	1" = (π/60)' = (π/648000) rad
zapremina	litar	l, L	1 l = 1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
masa	tona	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
atomska masa	dalton	Da	1 Da = 1,660539066 60(50) · 10 <sup>-27</sup> kg
energija	elektronvolt	eV	1 eV = 1,602176634 · 10 <sup>-19</sup> J

*Napomena:*

- Astronomska jedinica (au) je rastojanje prosečne udaljenosti Zemlje od Sunca. Prema aktuelnim podacima, prihvaćena mera je približno 150 miliona kilometara. Mera služi u astronomiji izražavanje međuplanetarnih rastojanja, za međuzvezdane sisteme veća jedinica je svetlosna godina. To je rastojanje koje svetlost pređe za astronomsku godinu dana (31 556 925 s) i iznosi tačno 9 460 528 112 671 650 m, ili približno 63 239 astronomskih jedinica.
- Dalton (Da) i jedinstvena jedinica atomske mase, jednaka 1/12 mase slobodnog atoma ugljenika 12, u mirovanju.
- Elektronvolt je kinetička energija koju je stekao elektron prolazeći kroz potencijalnu razliku od jednog volta u vakuumu.

**Tab. PAI-108. Odnosi SI jedinica i nekih ostalih jedinica**

Iako SI sistem više ne prihvata upotrebu ostalih jedinica, još uvek su u upotrebi u literaturi (staroj i novoj) i u stvarnom životu tzv. Anglosaksonke mere, imperijalni sistem jedinica ili Američki sistem mera (za dalje se koristi uslovni termin – ostale neSI jedinice), pa je neophodno zbog uspostavljanja analogije koristiti odgovarajuće odnose mera i korespondenciju naziva, naročito za referentne izvore podataka u tabelama ili dijagramima. Radi jasnoće u tekstu knjige, ukoliko je neophodno upotrebiti jedinice iz neSI sistema, daje se korespondencija na odgovarajući SI sistem, a ako to nije moguće (jer je referenca u obliku dijagrama ili tabele), onda se korespondencija izvodi na kraju posle proračunske procedure.

Temperatura	$T(K) = T - 273,15 \text{ } ^\circ\text{C} = (4/5)(T - 273,15) \text{ } ^\circ\text{Re} = (9/5)(T - 273,15) \text{ } ^\circ\text{F}$
Dužina	1 m = 1,094 yd (yard) = 3,28 ft = 39,37 in, 1 yd = 3 ft = 36 in, 1 mi = 5280 ft
Masa	1 kg = 2,205 lb (funta) = 35,27 oz (unca), 1 lb = 16 oz
Zapremina	1 m <sup>3</sup> = 1000 l = 1750 pt (pinta) = 35,32 ft <sup>3</sup> = 264,17 gal US = 219,97 gal UK 1 gal (galon) = 8 pt, 1 barel nafte = 42 gal = 158,987 l
Brzina	1 m/s = 3,6 km/h = 3,28 ft/s = 196,85 ft/min = 2,237 mi/h
Gustina	1 kg/m <sup>3</sup> = 0,06243 lb/ft <sup>3</sup> = 0,00194 oz/ft <sup>3</sup>
Sila	1 N = 10 <sup>5</sup> Dyn = 0,102 kgf = 0,102 kp = 0,2248 lbf (funta sile)
Pritisak	1 kPa = 1000 N/m <sup>2</sup> = 0,145 (psi = lbf/in <sup>2</sup> ) = 20,8854 lbf/ft <sup>2</sup> = 0,009869 atm = = 0,01 bar = 7,5 (Torr = 1 mmHg) = 101,972 mm H <sub>2</sub> O; 1 MPa = 10 bar; 1 bar = 100 kPa = 0,1 MPa 1 funta sile po kvadratnom palcu (pound per sqin) 1 psi = lbf/in <sup>2</sup> = 0,0689476 bar = = 0,0703071 at (kp/cm <sup>2</sup> ) = 0,7031 mv.st. = 6894,76 Pa = 51,713 Torr

Energija ili rad	1 kJ = 0,9478 BTU (u žargonu bjuti) = 0,23888 kcal = 0,000278 kW h = 1 kN m 1 British Thermal Unit (BTU) je količina toplote potrebna za porast temperature 1 kilograma vode za jedan stepen Farenhajta, kilokalorija (kcal) za porast 1 °C 1 BTU = 0,2520 kcal = 1,055056 kJ = 107,6 kp m = 778,2 lbf×ft 1 kcal = 3,96832 BTU = 4,1868 kJ = 1,163×10 <sup>-3</sup> kW h = 427 kp m
Snaga	1 kW = 3412,14 BTU/h = 0,948 BTU/s = 859,845 kcal/h = 1,34 HP (horse power) 1 BTU/s = 0,252 kcal/s = 1,055 kW = 778,2 lbf×ft/s = 1,415 HP 1 kcal/s = 3,968 BTU/s = 3088 lbf×ft/s = 4,186 kW = 427 kp m/s
Entalpija	1 kJ/kg = 0,42 BTU/lb = 0,23888 kcal/kg
Specifični toplotni kapacitet	1 kJ/kg K = 0,239 BTU/(lb °F) = 0,239 kcal/(kg °C)
Kinematska viskoznost	1 m <sup>2</sup> /s = 10000 (stoks = cm <sup>2</sup> /s) = 10,764 ft <sup>2</sup> /s = 1550 in <sup>2</sup> /s
Dinamička viskoznost	1 Pa s = 1 N s/m <sup>2</sup> = 10 p (poaz = g/(cm s)) = 0,0209 lbf s/ft <sup>2</sup>
Toplotna provodljivost	1 kW/(m K) = 577,79 BTU/(ft h °F) = 859,85 kcal/(m h °C)
Toplotni fluks	1 kW/m <sup>2</sup> = 317 BTU/(ft <sup>2</sup> h) = 859,845 kcal/(m <sup>2</sup> h)
Koeficijent prolaza (prelaza) toplote	1 kW/(m <sup>2</sup> K) = 176,23 BTU/(ft <sup>2</sup> h °F) = 859,845 kcal/(m <sup>2</sup> h °C)

---

## PAII. NOMENKLATURE

### PAII-1. Osnovna nomenklatura

Osnovne nezavisne veličine koje se koriste u SI (Internacionalni sistem jedinica – 2019) su navedene u tabelama PAI. U narednom popisu dat je popis najčešće korišćenih veličina prema oznaci i imenu po abecednom redosledu (nomenklatura), ostale veličine navode se u tekstu. Razlike tekuće nomenklature u tekstu knjige i osnovne nomenklature su posledica oznaka u referentnoj literaturi, koje se nisu mogle izbeći ili su nastale zbog neusaglašenosti standarda.

$a$	[-]	Koeficijent multiplikacije kombinovanog strujanja
$A, S$	[m <sup>2</sup> ]	Površina preseka
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Površina razmene toplote
$\alpha$	[rad]	Ugao profila navoja
$a, b$	[-]	Broj, konstanta, koeficijent
$a, b$	[-]	Poprečni i podužni odnos koraka i prečnika cevi
$b$	[mm]	širina zaptivača
$Bi$	[-]	Bioov broj orebrene površine
$\beta$	[1/K]	Koeficijent toplotnog širenja
$C$	[-]	Koeficijent pri proračunu čvrstoće
$C_f$	[-]	Faktor čistoće aparata
$c$	[m/s]	Brzina zvuka
$c_p, c_v$	[J/(kg K)]	Specifični toplotni kapacitet pri konst. pritisku ili zapremini
$c_1$	[mm]	Dodatak dozvoljenog odstupanja debljine materijala
$c_2$	[mm]	Dodatak na koroziju
$D_s D_e D_a$	[m]	Spoljni prečnik doboša (srpski-engleski-nemački)
$D_u D_i D_i$	[m]	Unutrašnji prečnik doboša (srpski-engleski-nemački)
$d_s d_u$	[m]	Spoljašnji i unutrašnji prečnik cevi
$d_{ekv} d_h$	[m]	Ekvivalentni prečnik cevi, hidraulički prečnik
$d$	[m]	Rastojanje, distancija
$\Delta t$	[°C]	Temperaturna razlika u stepenima celzijusa
$\Delta T$	[K]	Temperaturna razlika u kelvinima
$\Delta p$	[Pa]	Promena, pad pritiska
$\delta$	[m]	Debljina zida, malo rastojanje, klirens
$\delta$	[mm]	Debljina zaptivača
$\delta_h$	[m]	Horizontalno rastojanje između cevi registra
$\delta_v$	[m]	Vertikalno rastojanje između cevi registra
$\delta_d$	[m]	Dijagonalno rastojanje između cevi registra

$e$	[-]	Faktori mrežnog rasporeda poprečne struje (po Belu)
$e$	[m]	Debljina konstrukcionih pozicija razmenjivača
$E$	[J]	Energija
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Modul (Jangov) elastičnosti
$\eta, \mu$	[Pa s]	Dinamička viskoznost fluida
$\eta_r$	[-]	Efikasnost orebrene površine
$f$	[m <sup>2</sup> ]	Površina lukova cevnog snopa razmenjivača
$f_A f_B f_{CF} f_L$	[-]	Razni korekcionni faktor poprečnog strujanja
$f$	[Pa]	Naponsko stanje
$\varphi$	[-]	Efikasnost rebra
$\varphi$	[rad]	Ugao nagiba navoja, ugao zavojnice
$F$	[N]	Sila pri proračunu čvrstoće
$F$	[m <sup>2</sup> ]	Površina poprečnog preseka
$F_r, F_o$	[m <sup>2</sup> ]	Površina poprečnog preseka registra, omotača
$g$	[m <sup>2</sup> /s]	Ubrzanje sile zamljine teže $g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$
$g$	[mm]	Debljina šava zavarivanja
$\gamma$	[°]	Ugao okna
$H_o$	[m]	Visina okna
$h_r$	[m]	Visina rebra
$h_F$	[mm]	Visina oboda prirubnice
$h$	[J/kg]	Specifična entalpija
$i_r$	[kom/m]	Broj rebara po dužnom metru
$INT$	[-]	Oznaka celobrojne vrednosti izraza (excel)
$j$	[-]	Broj zaptivnih traka
$J$	[mm <sup>4</sup> ]	Moment inercije
$K$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Proračunska čvrstoća materijala
$K_{20}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Proračunska čvrstoća materijala na 20°C
$k$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Koeficijent prolaza toplote
$k_c$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Koeficijent prolaza toplote čistog aparata
$k_{op}$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Koeficijent prolaza toplote u radu (operation)
$k_h, k_v$	[m]	Horizontalni i vertikalni korak mrežnog rasporeda
$k_r$	[m]	Korak orebrenja
$l$	[m]	Dužina frontalnog kontakta fluidne struje
$l_w$	[mm]	Dužina valcovanja
$L, l$	[m]	Dužina, rastojanje
$\lambda$	[W/(m K)]	Koeficijent toplotne provodljivosti
$LMTD$	[K]	Srednja logaritamska temperaturska razlika
$M$	[Nmm]	Moment pritezanja vijaka

$m$	[-]	Bezdimenzioni koeficijent (poprečno strujanje)
$m$	[m]	Dvostruki zazor obilaznih struja (poprečno strujanje)
$M, m$	[kg]	Masa
$\dot{M}$	[kg/s]	Maseni protok
$m$	[-]	Termička karakteristika
$\dot{m}$	[kg/(m <sup>2</sup> s)]	Gustina masenog protoka
$m_a$	[m]	Dvostruki zazor između otvora i cevi segmentne pregrade
$m_c$	[m]	Dvostruki zazor između cevnog snopa i omotača
$m_e$	[m]	Dvostruki zazor između segmentne pregrade i omotača
$m_f$	[m]	Dvostruki zazor između dijafragme i najbliže cevi
$n$	[-]	Eksponent
$n$	[-]	Broj otvora u cevnoj ploči
$n$	[-]	Broj vijaka prirubničkog spoja
$n_k, n_r$	[-]	Broj otvora u koloni $k$ , odnosno redu $r$
$N$	[mol]	Količina materije
$\dot{N}$	[mol/s]	Molarni protok (protok količine materije)
$\dot{n}$	[mol/(m <sup>2</sup> s)]	Gustina molarnog protoka
$N_r, N_k$	[-]	Broj reda ili kolone mrežnog rasporeda
$NTU$	[-]	Broj jedinica prenosa
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematska viskoznost
$\pi$	[-]	Ludolfov broj, $\pi = 3,14159..$
$p_{oj}$	[Pa] [bar]	Pritisak pare komponente $j$
$P$	[Pa] [bar]	Proračunski pritisak
$p_j$	[Pa] [bar]	Parcijalni pritisak komponente $j$
$p_o$	[-]	Pritisak fluida oko cevi (u omotaču)
$p_r$	[-]	Pritisak fluida u cevi (u registru)
$P$	[mm]	Korak navoja
$P$	[W]	Snaga
$P_a$	[-]	Efikasnost razmenjivača toplote multiplicirane konfiguracije
$Q$	[J]	Količina toplote, toplota
$\dot{Q}$	[W]	Toplotna snaga, toplotni protok
$q$	[W/m <sup>2</sup> ]	Toplotni fluks
$r$	[m]	Poluprečnik cevi, cilindra, sfere
$R$	[m]	Poluprečnik savijanja cevi,
$r$	[J/kg]	Toplota promene tečne u gasnu fazu fluida
$R$	[J/(kg K)]	Gasna konstanta
$R$	[m <sup>2</sup> K/W]	Toplotni otpor prolazu toplote

$R_z$	[m <sup>2</sup> K/W]	Toplotni otpor zida
$R_u, R_s$	[m <sup>2</sup> K/W]	Toplotni otpor unutrašnjeg i spoljašnjeg zaprljanja
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gustina
$\rho$	[rad]	Ugao trenja navoja
$S$	[-]	Stepen sigurnosti
$S$	[J/K]	Entropija
$s$	[J/(kg K)]	Specifična entropija
$s$	[m]	Debljine komponenti
$\sigma$	[N/m]	Površinski napon
$\theta$	[K]	Temperatura Celzijusa ili temperaturna razlika
$t$	[°C]	Temperatura tela ili fluida
$t_k$	[°C]	Temperatura kondenzacije fluida
$t_z$	[°C]	Temperatura zida
$T$	[K]	Apsolutna temperatura
$\tau$	[K]	Temperatursko približenje
$\tau$	[s]	Vreme
$U$	[J]	Unutrašnja energija
$u$	[J/kg]	Specifična unutrašnja energija
$\theta$	[K]	Maksimalna temperaturska razlika u razmenjivaču
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Zapremina
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Zapreminski protok
$v$	[m <sup>3</sup> /kg]	Specifična zapremina
$v$	[-]	Koeficijent valjanosti zavarenog spoja
$W$	[J]	Rad
$W$	[mm <sup>3</sup> ]	Otporni moment
$\omega$	[m/s]	Brzina strujanja medijuma
$\xi$	[-]	Koeficijent trenja
$\zeta$	[-]	Koeficijent lokalnog otpora trenja
$\psi$	[-]	Faktor poroznosti
$\psi$	[-]	Temperaturski faktor
$\dot{x}$	[kg/kg]	Sadržaj pare u protoku fluida
$x, y$	[m]	Tekuće koordinate dužinske mere
$x_j, y_j$	[kg/kg]	Maseni udeo komponente u tečnoj odnosno gasnoj fazi fluida
$z_o$	[-]	Broj prolaza fluida u omotaču
$z_p$	[-]	Broj poprečnih pregrada na dužini fluidne struje
$z_r$	[-]	Broj prolaza fluida u registru

Milan R. Rikalović

# DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE

**Knjiga I: KLASIFIKACIJA I KONSTRUKCIJA**



**Naredne stranice su u prekidu !**



Dispoziciju nastavka teksta na sledećoj strani videti u sadržaju.

**Ako želite kompletan tekst - NARUČITE KNJIGU**



---

**DOBOŠASTI RAZMENJIVAČI TOPLOTE**  
**Knjiga I: Klasifikacija i konstrukcija**

---

**REFERENCE I LITERATURA, knjiga I**

## Reference

- [1] Shah, R. K., D. P. Sekulić: *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Schlünder, E. U., editor in Chief: **HEDH, Heat Exchanger Design Handbook**, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London, © 1983; 1999;
- [2.3.1] Bell, J. K.: *Ch. 3.1 Introduction to heat exchangers design*,
- [2.3.2] Guy, A. R.: *Ch. 3.2 Double-pipe heat exchangers*,
- [2.3.3] Taborek J.: *Ch. 3.3 Shell and tube heat exchangers: single phase*,
- [2.3.5] Taborek J.: *Ch. 3.3.5 Input data and recommended practices*,
- [2.3.6] Palen, J. W.: *Ch. 3.6 Shell and tube reboilers*,
- [2.4.2] Saunders, E. A. D.: *Ch. 4.2 Shell and tube heat exchangers: Elements of construction*,
- [2.4.6] Chenoweth, J. M.: *Ch. 4.6 Flow-induced vibration*,  
 NAPOMENA: HEDH novijih izdanja se koristi sa oznakom autora i godine izdanja.
- [2.3.17] Knudsen, J. G., Hays, G. F., T. R. Bott: *Ch. 3.17 Fouling in heat exchangers*, 1999.
- [3] VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: *VDI Heat Atlas*, Second English Edition, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, © 2010;
- [3.C3] Wilfried Roetzel, Bernhard Spang: *Ch. C3 Typical Values of Overall Heat Transfer Coefficients*,
- [3.C4] Hans Müller-Steinhagen: *Ch. C4 Fouling of Heat Exchanger Surfaces*,
- [3.L2.3] Schmidt Jürgen: *Ch L2.3 Sizing of Safety Devices for Heat Exchangers*,
- [3.O1] Günther Kirchner: *Ch. O1 Hints on the Construction of Heat Exchangers*,
- [3.O2] Horst Gelbe, Samir Ziada: *Ch. O2Vibration of tube bundle in Heat Exchangers*.
- [4] Kreith, F., D. Y. Goswami: *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy* ed., CRC Press © 2007.
- [5] Incropera, F. P., D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Ed., © 2011, Publisher John Wiley & Son, New York.
- [6] Bejan, A., A. D. Kraus: *Heat Transfer Handbook* ed., John Wiley & Sons © 2003;
- [6.11] Kraus, A. D.: *Ch.11 Heat Exchangers*.
- [7] Saunders, E. A. D: *Heat Exchanger, Selection, Design and Construction*, Longman Scientific & Technical, Copublished in the USA with John Wiley & Sons, Inc., © 1986.
- [8] Rohsenow, W. M., J. E. Hartnett, Y. I. Cho: *Handbook of Heat Transfer*, 3rd ed. Copyright © 1998 by The McGraw-Hill Companies, Inc, USA. All rights reserved.;
- [9] Mitrović, J.: **Heat Exchangers – Basic Design Applications**, ed. Jovan Mitrović Copyright © 2012 Intech Rijeka, Croatia;
- [9.19] Kazi, S. N.: *Ch. 19 Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces*
- [10] Rikalović, M. R.: *Dobošasti razmenjivači toplote*, © 2002, SMEITS, Beograd.
- [11] Kern, D. Q.: *Process Heat Transfer*, International Edition © 1965, McGraw-Hill Book Company.
- [12] Holman, J. P.: *Heat Transfer*, Copyright © 1986 by The McGraw-Hill Book Co Singapore.
- [13] Cengel, Y.A.: *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, 2003.

- [14] Kakaç, S., H. Liu, A. Pramuanjaroenkij: *Heat Exchangers, Selection, Rating and Thermal Design*, 3rd. ed., Copyright © 2012 CRC Press.
- [15] Kakaç, S.: *Boilers, Evaporators and Condensers*, edited by Sadik Kakaç, ISBN 0-471-62170-6 © 1991 John Wiley & Sons, Inc.
- [16] Thome, J. R.: *Engineering Data Book III* Copyright © 2004-2009 by Wolverine Tube, Inc. All rights reserved.
- [17] Peters, M. S., K. D. Timmerhaus: *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Fourth Edition, Copyright © 1991 1980, 1968, 1958 by McGraw-Hill, Inc, International edition. All rights reserved.
- [18] HTRI Design Manual: *Heat Transfer Research, Inc.* 150 Venture Drive College Station, Texas 77845 USA. All rights reserved. 2009. soft: HTRI Xchanger Suite-5 *Heat Transfer Research, Inc.*, 2006, Texas, USA, [www.htri.net](http://www.htri.net)
- [19] Kuppian, T.: *Heat Exchanger Design Handbook*, second edition, Copyright © 2013, by Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton London New York.
- [20] Nitsche, M., R. O. Gbadamosi: *Heat exchanger design guide A practical guide for planning, selecting and designing of shell and tube exchangers*, Copyright © 2016 Elsevier Inc. All rights reserved. Butterworth Heinemann is an imprint of Elsevier.
- [21] Miller E.: *Heat Exchanger Design Handbook*, Edited by Edgar Miller © 2018, University Publications New York, NY 10001, USA.
- [22] Webb, R. L., N. H. Kim: *Principles of enhanced heat transfer*, Copyright © 2005 by Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, Singapore.
- [23] Stewart, M., O. T. Lewis: *Heat Exchanger Equipment Field Manual Common Operating Problems and Practical Solutions*, Copyright © 2013 Elsevier Inc. All rights reserved.
- [24] Perry, R. H, D. W. Green: *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 8th Edition, The McGraw-Hill Companies, © 2008;
- [24.11] Shilling, R. L., Bernhagen, P. M., Goldschmidt, V. M., Hrnjak, P. S., Johnson, D., Timmerhaus, K. D.: *Heat Transfer Equipment, Section 11*,
- [24.25] Siebert, O. W., and all: *Perry's Hemical Engineers` Handbook, Sec. 25 Materials of Construction*, 8th edition, Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.
- [25] Mukherjee, R.: *Practical Thermal Design of Shell-and-Tube Heat Exchangers*, H Begell House, Inc., 145 Madison Avenue, New York, NY 10016. © 2004 by Begell House, Inc.
- [26] Hesselgreaves, J. E.: Consulting engineer Richard Law and David Reay: *Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation*, second edition, Copyright © 2017, published by Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [27] Gupta, J. P.: *Working With Heat Exchangers: Questions and Answers*, Copyright © 1990 by Taylor & Francis Group, New York, Washington, Philadelphia, London.
- [28] Prof. Aziz Belmiloudi, edited: *Experimental Investigations and Industrial Systems*, (Ed. ISBN: 978-953-307-226-5, InTech Europa, 2011;
- [28.20] Mostafa M. Awad: *Fouling of Heat Transfer Surfaces, Heat Transfer–Theoretical Analysis*,
- [29] Hans-Jörg Bart and Stephan Scholl: *Innovative Heat Exchangers*, Copyright © Springer International Publishing AG 2018, Braunschweig, Germany.

- [30] Best Practice Programme,.: *Compact Heat Exchangers – Guidance for Engineers*, Crown Copyright © 2000, First published Septembar 2000.
- [31] Bürgel, R., H. J. Maier, T. Niendorf: *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*, Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und beschichtungen 4., überarbeitete Auflage © 2011, Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011.
- [32] Bandopadhyay M.: *Design optimization of heat exchangers in topside systems for offshore oil and gas processing*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering 2014.
- [33] Ranganayakulu, C., K.N. Seetharamu: *Compact Heat Exchangers – Analysis, Design and Optimization using FEM and CFD*, This Work is a co-publication between ASME Press and John Wiley & Sons Ltd. Published 2018 © 2018 John Wiley & Sons Ltd. All rights reserved.
- [34] Zohuri B.: *Compact Heat Exchangers Selection, Application, Design and Evaluation*, Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2017.
- [35] Klemeš, J. J., O. P. Arsenyeva, P. O. Kapustenko, L. L. Tovazhnyanskyy: *Compact heat exchangers for energy transfer intensification in eers*, Copyright © 2016 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press, Boca Raton London New York.
- [36] Reay, D., C. Ramshaw, A. Harvey: *Process Intensification, Engineering for Efficiency, Sustainability and Flexibility*, First edition 2008, second edition 2013, Copyright © 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [37] Albright, L. F.: *Albright's Chemical Engineers Handbook Perry ed.*, CRC Press, © 2009 by Taylor & Francis Group, LLC;
- [37.6] Bell, K. J.: *Ch. 6 Heat Transfer*.
- [38] Ludwig, E. E.: *Applied process design for chemical and petrochemical*, vol. 3, 3rd ed Copyright © 1999 by Butterworth-Heinemann.
- [38a] A. Kayode Coker: *Ludwig's Applied process design for chemical and petrochemical Plants*, vol. 3, 4rd ed Copyright © 2015 Elsevier Inc. All rights reserved.
- [39] Towler, G.P., Sinnott, R.K.: *CHEMICAL ENGINEERING DESIGN (Coulson & Richardson's)*, principles, practice, and economics of plant and process design – 2nd ed.. Butterworth-Heinemann, © 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [40] Walas, S. M.: *Chemical Process Equipment Selection and Design*, Copyright © 1990 by Butterworth-Heinemann, a division of Reed Publishing (USA) Inc. All rights reserved.
- [41] Lieberman, N. P., E. T. Lieberman: *Working Guide to Process Equipment*, 3rd Ed, Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.
- [42] Smith, R.: *Chemical Process Design and Integration*, Copyright © 2005 John Wiley & Sons Ltd, West Sussex PO19 8SQ, England. All rights reserved.
- [43] Francis A. Kulacki and al, editor and chief: *Handbook of Thermal Science and Engineering* © Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018;
- [43.40] Lestina, T.: *Ch. 40 Heat Exchangers Fouling, Cleaning, and Maintenance*.
- [44] Moran, J. M., H. N. Shapiro: *Fundamentals of engineering thermodynamics: SI version*, Copyright © 2006 John Wiley & Sons Ltd, West Sussex PO19 8SQ, England.

- [45] Jaluria, Y.: *Design and Optimization of Thermal Systems*, second edition, Copyright © 2008 by Taylor & Francis Group, LLC, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.
- [46] Rao, S. S.: *Engineering Optimization – Theory and Practice*, Copyright © 2009 by John Wiley & Sons, Inc. Fourth edition. All rights reserved.
- [47] Kutz, M.: *Mechanical Engineers' Handbook, Vol.4 Energy and Power*, Third Edition, Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved;
- [47.8] Palen, J. W.: *Ch. 8 Heat exchangers, vaporizers, condensers*.
- [48] Bringas, J. E.: *Handbook of comparative world steel standards*, 2nd ed., Copyright © 2004 ASTM International, West Conshohocken, PA. All rights reserved.
- [49] Black, J. T., R. A. Kohser: *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*, Tenth edition. Copyright © 2008 by John Wiley & Sons, USA, All rights reserved.
- [50] Zandin K. B.: *Maynard's Industrial Engineering Handbook*, Copyright © 2004, The McGraw-Hill Companies. Fifth edition;
- [50.1.5] Hicks, P. E.: *Fundamentals of industrial engineering*, Engineering Handbook Copyright © 2004, The McGraw-Hill Companies. Fifth edition.
- [51] Bogaerts, W.: *Materials Engineering for the Chemical Process Industries, A Concise Handbook of CPI Materials – with an Introduction to Materials Selection, Materials Protection and Corrosion Control* Copyright © 2009-2010, K.U.Leuven cursus: "Materialen in de Chemische Industrie" (H0612).
- [52] Ashby, M. F.: *Materials Selection in Mechanical Design*, Copyright © 2005 Third edition by Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803.
- [53] Roland Gomeringer und anderen: *Tabellenbuch Metall*, © 2014 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten, Deutschland.
- [54] Wittel, H., D., Muhs, D. Jannasch, J. Voßiek: *Roloff/Matek Maschinenelemente, Normung, Berechnung, Gestaltung*, 22., überarbeitete und erweiterte Auflage. Copyright © 2017 Springer Fachmedien Wiesbaden. Printed in Germany.
- [55] Groover, M. P.: *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, Copyright © 2010, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., USA. All rights reserved.
- [56] Karl-Heinz Decker: *Elementi strojeva*, drugo popravljeno izdanje 1975, Tehnička knjiga Zagreb.
- [57] Niemann, G. R., H. B. Winter, R. Höhn: *Maschinenelemente, Band 1, Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*, Copyright © 2005 4., bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Printed in Germany.
- [58] Brumbaugh, J. E., R. Miller: *Audel<sup>T</sup> Welding Pocket Reference*, Copyright © 2007 by Wiley Publishing, Inc. All rights reserved.
- [59] Miltenović, V.: *Mašinski elementi, oblici, proračun, primena - VII prerađeno i dopunjeno izdanje, 2009 Mašinski fakultet Niš*.
- [60] Bickford, J. H.: *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints Non-Gasketed Joints*, Fourth Edition, Copyright © 2008 by Taylor & Francis Group, LLC, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.

- [61] Flitney, R.: *Seals and Sealing Handbook*, Copyright © 2014, 2007, 1995, 1990 Elsevier Ltd. USA. All rights reserved. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, Oxford, UK.
- [62] Henzold, G.: *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection*, Copyright © 2006, published by Elsevier Ltd. Second edition. All rights reserved.
- [63] Krink, V., and all: *Laser or Plasma Cutting – Is there a choice?*, Lasers in Manufacturing Conference 2015, Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH, Germany.
- [64] Singh, P. K., A. I. Soler: *Mechanical design of heat exchangers and pressure vessel components*, first ed. Copyright © 1984 by Springer-Verlag Berlin, New York, Tokyo.
- [65] Podhorsky, M., H. Krips: *Heat Exchangers: A Practical Approach to Mechanical Construction, Design, and Calculations* Copyright © 1998 by Begell House, Inc. All rights reserved.
- [66] Matthews C.: *A Quick Guide to API 510 Certified Pressure Vessel Inspector*, First published 2010, Woodhead Publishing Limited and Matthews Engineering Training Limited. Copyright © 2010, C. Matthews The author has asserted his moral rights.
- [67] Bednar, H. H.: *Pressure Vessel Design Handbook*, Second Edition, Copyright © 1986, Reprinted 1991 by Van Nostrand Reinhold Company, Inc.
- [68] Megyesy, E. F.: *Pressure Vessel Handbook*, Twelfth Edition, Copyright © 2001 by Pressure Vessel Handbook Publishing, Inc. All Rights Reserved.
- [69] Moss, D. R., M. Basic: *Pressure Vessel Design Manual*, Fourth Edition, Copyright © 2013, Elsevier, Inc. All rights reserved.
- [70] Pullarcot, S.: *Practical Guide to Pressure Vessel Manufacturing*, Copyright © 2002 by Marcel Dekker, Inc. All rights reserved.
- [70a] Pullarcot, S.: *Above Ground Storage Tanks - Practical Guide to Construction, Inspection and Testing*, Copyright © 2015 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [71] Zeman L.J, in cooperation with F. Rauscher, S. Schindler: *Pressure Vessel Design The direct route oces Equipment Design*, Copyright © 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [72] Buthod, P.: *Pressure vessel Handbook*, Copyright © 2007 by Professor of Chemical Engineering University of Tulsa Tulsa, Oklahoma, USA.
- [73] Bausbacher, E., R. Hunt: *Process plant layout and piping design*, © 1993 by PTR, Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- [74] Ogneova, M.: *EN 13445 Unifired pressure vessel*, Copyright © 2015 by TÜV NORD Sweden AB.
- [75] Farr, J. R., M. H. Jawad: *Guidebook for the design of ASME section VIII Pressure Vessel*, Copyright © 2010, ASME, 3 Park Avenue, New York, NY 10016, USA ([www.asme.org](http://www.asme.org))
- [76] Kalpakjian, S., S. R. Schmid: *Manufacturing Engineering and Technology*, Copyright © 2009, sixth edition SI units, by Prentice Hall. All rights reserved.
- [77] Pierre, R. R.: *Corrosion Engineering Principles and Practice*, Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.
- [78] Roberts, P. M.: *Industrial Brazing Practice*, Copyright © 2004 by CRC Press LLC.
- [79] Timings, R.: *Fabrication and Welding Engineering*, Copyright © 2008, Publisher by Elsevier Ltd. All rights reserved.

- [80] Jeffus, L.: *Welding: Principles and Applications*, eighth edition 2017, by Cengage Learning.
- [81] Bott, T. R.: *Fouling of Heat Exchangers*, Copyright © 1995, Publisher: Elsevier Science & Technology Books.
- [82] Baboian, R.: *Corrosion tests and standards: application and interpretation*, section editors, Copyright© 2005 ASTM International, West Conshohocken, PA. All rights reserved.
- [83] Helemans, Marc: *The Safety Relief Valve Handbook; Design and Use of Process Safety Valves to ASME and International Codes and Standards*, First edition, Copyright © 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [84] Bern Glück: *Sicherheitsventile, Berechnung-Software*, 1 Auflage, Copyright © 1990, VEB Verlag für Baumesen, Berlin Germany.
- [85] Leser GmbH: *ENGINEERING, Help understand the "World of Safety Valves"*, Hamburg, Germany, edition 2021. [www.leser.com/engineering](http://www.leser.com/engineering)
- [86] Bogner, M., M. Isailović, M. Balać: *Propisi i oprema pod pritiskom, Tom 1. Tehničko zakonodavstvo, Tom 2. Tehnički propisi i primeri proračuna PED*, izdavač ETA Beograd 2013, [www.eta-beograd.rs](http://www.eta-beograd.rs)
- [87] Heaslip, B.: *Heat Exchangers*, Prepared by Bob Heaslip KESCO For Queens University CHEE 470 – Fall 2008.
- [88] Ljubičić, B.: *Twisted Tube Heat Exchangers: Technology and Application*, Brown Fintube Company, Koch industries, Houston.
- [89] Blandford, E. D. and all: *Experimental Validation of a Compact Double-Walled Twisted Tube Heat Exchanger Concept*, 2019, University of New Mexico.
- [90] Shilling, R. L., M. P. Rudy, T. M. Rudy: *Risk-based design margin selection for heat exchangers*, Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII-2009. Schladming, Austria, published [www.heatexchanger-fouling.com](http://www.heatexchanger-fouling.com)
- [91] Czernik, D. E.: *Gaskets Design, Selection, and Testin*, Copyright © 1996 by The McGraw-Hill Companies, Inc., USA. All rights reserved.
- [92] Mohammadi Koorosh, dissertation: *Investigation of the Effects of Baffle Orientation, Baffle Cut and Fluid Viscosity on Shell Side Pressure Drop and Heat Transfer Coefficient in an E-Type Shell and Tube Heat Exchanger*, 2011, University of Stuttgart, Germany.
- [93] Boehm, P. prof UN Trier Germany: *"EN 13445 – Unfired Pressure Vessels - A Useful Standard for Europe?"* ATINER Conference Paper Series, No: IND2014-1039.
- [94] Taborek, J.: *Selected Problems in Heat Exchanger Design*, Consultantl, Virginia Beach, VA 23451, Proceedings of the EURO THERM Seminar No. 18, 1991, Hamburg, Germany.
- [95] Rikalović, M.: *Izbor razmenjivača toplote za grejanje katrana – Studija slučaja u industriji aluminijuma*, Procesna tehnika, 1/2021, SMEITS, Beograd, 2021.
- [96] Baylac, G., D. Koplewicz: *EN 13445 Unfired Pressure vessel, background to the rules in Part 3 Design*, Copyright ©UNM 2004 – All rights reserved.
- [97] Hall, S. M.: *Rules of Thumb for Chemical Engineers*, Copyright © 2018, published by Elsevier Inc. Sixth edition. All rights reserved.



- [98] Katigari, M. P.: *Analytical and Finite Element Study of Residual Stresses in the Transition Zone of Hydraulically Expanded Tube-to-Tubesheet Joints*, Montreal 2018, © Copyright 2018 reserved by POURREZA KATIGARI Mohammadhossein.
- [99] Yokell, S.: *Appropriate correlations for assessing expanded tube-to-tubesheet joint strength*, MGT Inc. 2004 Boulder, Colorado 80303-3607.
- [100] Yokell, S.: *Expanded, and Welded-and-Expanded Tube-to-Tubesheet Joints*, Journal of Pressure Vessel Technology Vol. 114, May 1992.
- [101] Rikalović, M.: *Procedura i tok generalnog servisa razmenjivača toplote*, Procesna tehnika, 2/2014, SMEITS, Beograd, 2014.
- [102] Petronić, S., B. Grujić, M. Balač: *Ispitni pritisci i naponi za posude pod pritiskom, prema novom Pravilniku 87/II*, Integritet i vek konstrukcija, Vol. 12, br. 3 (2012), str. 209–213.
- [103] Yokell, S., C. Andreone: *Effect of Sleeving Closed Feedwater Heaters*, Internet present 2020
- [104] Yokell, S.: *On hydrostatic testing heat exchangers*, Fellow of the ASME, blog 2009.
- [105] Anderson, T. L.: *A Predictive Model for Optimizing Hydrostatic Test Pressures in Seam-Welded Pipelines*, Presented at the PPIM Conference, Houston, February 10-11, 2016. Team Industrial Services Inc. 1965 57th Court North, Suite 100 Boulder, CO 80301 USA.
- [106] Chesterton, Global Solutions, Local service USA: *Flange Sealing Guide-gaskets and bolted connections*, © A.W. Chesterton Company, 2012. All rights reserved. [www.chesterton.com](http://www.chesterton.com)
- [107] Schroers, H.: *Gasket selection using the gasket design factors as per EN 13555*, W.L. GORE & Associates GmbH, Putzbrunn PROCESS TECHNOLOGY & COMPONENTS, 2016.
- [108] Manfred Schaaf, dissertation: *Strategie zur Verminderung von Emissionen aus Flanschverbindungen*, 2015, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, Germany.
- [109] Schröder, G.: *New European standard for the selection of a suitable method for leak detection and leak tightness testing*, Up to 2008 Gerald Schröder was head of the specialized group "NDT-Testing and Qualification Techniques" Jülich GmbH.
- [110] Faes, W. at al.: *Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers*, Corrosion Reviews Journal, De Gruyter Berlin Germany, ed. 2019.
- [111] Goyder, H. G. D.: *Flow-induced vibration in heat exchangers*, © Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE, Vol 80, Part A, april 2002, UK.
- [112] Shoberg R. S.: *Engineering Fundamentals of Threaded Fastener Design and Analysis*, Division of PCB Load & Torque, Inc. Circle Farmington Hills, MI 48335 Toll-Free in the USA: 888-684-2894.
- [113] Reza Afsharian, Antonios Theodoropoulos: *MODULAR FRICTION TEST RIG FOR MEASURING TORQUE AND TENSION IN THREADED FASTENERS*, Master of Science Thesis TRITA-ITM-EX 2018:620 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design SE-100 44 STOCKHOLM.
- [114] Rockwell Automation: *Functional Safety in the Process Industry Principles, standards and implementation*, Proces safebook 1, © 2013 Rockwell Automation, Inc. All Rights Reserved.
- [115] Aleksandar V.Šotić: *Metodologija analize rizika pri upravljanju infrastrukturnim sredstvima vodovodnih sistema*, doktorska disertacija, 2016 Beograd, Univerzitet Beograd, Građevinski fakultet, Beograd.



- [116] AIChE / DIERS: *Guidelines for pressure relief and effluent handling systems*, CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY of the AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS, Copyright © 2017 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA Boston, USA. All rights reserved. [www.cengage.com](http://www.cengage.com)
- [117] Smith, D. J., K. G. L. Simpson: *The Safety Critical Systems Handbook A Straightforward Guide To Functional Safety: IEC 61508 (2010 Edition), IEC 61511 (2016 Edition) & Related Guidance Including Machinery and other industrial sectors Process Intensification*, fourth edition, Copyright 2016, Dr David J Smith and Kenneth G L Simpson. Published by Elsevier Ltd. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier. All rights reserved.
- [118] Müller-Steinhagen, H. M.: *Fouling: The Ultimate Challenge for Heat Exchanger Design*, The sixth International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Seoul Korea 1993.
- [119] Panchal, C. B., B. Ljubičić: *Designing two-phase flow heat exchangers for mitigating fouling*, ECI Symposium Series, Volume RP5: Proceedings of 7th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities, Editors Hans Müller-Steinhagen, M. Reza Malayeri, and A. Paul Watkinson, Engineering Conferences International, Tomar, Portugal, July 1 - 6, 2007.
- [120] SLAC - National Accelerator Laboratory: *Environment, Safety & Health Division Chapter 51: Control of Hazardous Energy*, Copyright © SLAC 2018, USA.
- [121] Caputo, S. A.: *Joint economic optimization of heat exchanger design and maintenance policy*, HAL Id: hal-00730289 <https://hal.science/hal-00730289> Submitted on 9 Sep 2012.
- [122] Hennigan, S. A.: *Bridging the reliability gap from heat exchanger design to operation*, 17th UK Heat Transfer Conference (UKHTC2021) 4-6 April 2022, Manchester, UK.
- [123] Bennett, C. A., R. S. Kistler, T. G. Lestina, D. C. King: *Improving heat exchanger designs*, Chemical Engineering Progress, April 2007.
- [124] Genić, S. B., B. M. Jaćimović: *Optimizacija prečnika cevovoda*, Predavanje održano 16.10.2017 u SMEITS, Beograd, SMEITS Beograd; Genić, S. B., B. M. Jaćimović, N. B. Jaćimović: *Faktori sigurnosti – Princip konzervativizma pri projektovanju procesnih postrojenja i dimenzionisanju procesne opreme*, Predavanje održano 13.12.2013 u Inženjerskoj komori Srbije, Beograd, IKS Beograd.
- [125] Nesta, J., C. A. Bennett: *Fouling mitigation by design*, ECI Symposium Series, Volume RP2: Proceedings of 6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities, Engineering Conferences International, Kloster Irsee, Germany, June 5 - 10, 2005.
- [126] Taylor Forge: *Modern Flange Design, Bulletin 502 (Part A) - 7ed 1978, 1ed 1938*; G+W Taylor-Bonney Division P.O. Box 999 Southfield, Michigan 48037.
- [127] Osweiler, F.: *New common design rules for U-tube heat-exchangers*, - Presentation of a paper 2002 PVP CONFERENCE, session "Codes & Standards", VANCOUVER, 2002.
- [128] Guérout, Y.: *Calculation Bases of EN 1591-1*, - ASE - Advanced Solution Engineering Ltd, [www.sealeng.com](http://www.sealeng.com) Copyright © 2002 ASE Ltd.
- [129] Medeiros, M. S., A. J. K. Leiroz: *A procedure for tube count determination in single and multiple pass tubular heat exchangers*, - Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 4 No.2 October 2005 p. 97-105, Universidade do Rio de Janeiro, RJ. Brasil.

- [130] Yiannopoulos, A. C.: *Analytical calculation of tube counts and geometric characteristics of tube layouts of heat exchangers*, - International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) ISSN: 2394-3661, Volume-6, Issue-2, February 2019.
- [131] Jørgen, A.: *Application of FE-analysis in Design and Verification of Bolted Joints According to VDI 2230 at CERN*, Master of science in Mechanical Engineering, NTNU Norwegian University of Science and Technology 2018 Geneva.
- [132] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM): *The International System of Units (SI)*, 9th edition 2019, V2.01 dec. 2022, ISBN 978-92-822-2272-0.
- [133] Wikipedia - *History of the metric system*, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

## Normativi i standardi

Navedene refernce su su podložne promenama. Za uvid u trenutno stanje ili za izradu dokumentacije, preporučuje ažuriranje ovih referenci. Moguće je da su neki naslovi promjenjeni ili nevažeci.

- [N1] ESA - European Sealing Association - Handbook Successful sealing with elastomers - An interactive guide to diagnose and prevent seal failure, ESA - 2019 copyright © 2019. All rights reserved [www.europeansealing.com](http://www.europeansealing.com)
- [N2] Plava knjiga o provođenju pravila EU o proizvodima, Službeni list Evropske unije C 272, 26.7.2016 (hrvatsko izdanje).
- [N3] Directive 2014/68/EU of the European Parliament and of the Council, 15 may 2014. Harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment.
- [N4] SEP Guidelines 2020, PED 2014-68-EU Guidelines EN v6.0 Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED).
- [N5] Direktiva 2010/75/EU Evropskog parlamenta i saveta od 24.11.2010. godine o industrijskim emisijama (integrisana prevencija i kontrola zagađenja), Službeni list Evropske unije L 334, od 17.12.2010 (srpski prevod).
- [N6] Uredba (EZ) br. 765/2008 Evropskog parlamenta i veća od 9.7.2008. o razvrstavanju o razvrstavanju, označivanju i pakovanju supstanci i smesa, Službeni list Evropske unije L 353/1, 31.12.2008 (hrvatsko izdanje).
- [N7] Uredba (EZ) br. 1272/2008 Evropskog parlamenta i veća od 16.12.2008. o utvrđivanju zahteva za akreditaciju i nadzor tržišta u odnosu na stavljanje proizvoda na tržište, Službeni list Evropske unije L 218/30, 9.7.2008 (hrvatsko izdanje).
- [N8] Document ESA, member authors. Copyright © European Sealing Association (ESA). All rights reserved. [www.europeansealing.com](http://www.europeansealing.com)
- [N9] Gasket-Handbook 1ed, FLUID SEALING ASSOCIATION (FSA) EUROPEAN SEALING ASSOCIATION (ESA) © Copyright 2017. All rights reserved.
- [N10] Tehnologija zaptivanja – BAT smjernice Smjernice za najbolje dostupne tehnike za tehnologiju zaptivanja koja se koristi u opremi na industrijskim instalacijama obuhvaćenim EU IPPC direktivom ESA publikacija br. 014/09 (revizija 1 od 014/05).
- [N11] An introduction to gasket selection and installation, by Alex Lattimer, ESA Jan./Feb. 2012.

- [N12] COMMISSION DIRECTIVE 1999/77/EC of 26. July 1999. adapting to technical progress for the sixth time Annex I to Council Directive 76/769/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to restrictions on the marketing and use of certain dangerous substances and preparations (asbestos).
- [N13] Directive 2014/34/EU of 26. february 2014. European Parliament on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres, ATEX Guidelines 3 ed. Brussels may 2020.
- [N14] EU Directive 1999/92/EC Potentially explosive atmosphere, IGC Dokument 134/05/E, ATEX 137A, Copyright © EIGA 2005, Brussels.
- [N15] POTENTIALLY EXPLOSIVE ATMOSPHERE – EU DIRECTIVE 1999/92/EC IGC Document 134/05/E.
- [N16] Guideline for International Welding Engineers, Technologists, Specialists and Practitioners, PERSONNEL WITH QUALIFICATION FOR WELDING COORDINATION © Copyright 2013 by European Federation for Welding, Joining and Cutting (EWF).
- [N17] VDI 2440, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft, Joint Ministerial Gazette [Gemeinsames Ministerialblatt] from 30 July 2002 (GMBL. p. 511).
- [N18] VDI 2290 Emission control – Sealing constants for flange connections 2012-06. Publischer VDI/DIN kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss.
- [N19] VCI German Chemical Industry Association (Verband der Chemischen Industrie - VCI) - GUIDELINE for Bolted Flanged Joint Assembly in Process Plants, March 2016. [www.vci.de](http://www.vci.de)
- [N20] VDI 2230, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubverbindungen, VDI-Handbuch Konstruktion. All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2003.
- [N21] Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom, Sl. list SFRJ, br. 16/83.
- [N22] Pravilnik o Spisku klasifikovanih supstanci, Sl. glasnik RS, br. 22/2020.
- [N23] Usaglašeni predlog usklađen s Direktivom 2014/68/EU - Pravilnik o opremi pod pritiskom sa priložima 1-5, po zahtevu Ministra rudarstva i energetike RS 2021 god.
- [N24] Zakon o zaštiti vazduha, Sl. glasnik RS, br. 36/2009, 10/2013.
- [N25] Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, Sl. glasnik RS, br. 28/2019.
- [N26] Pravilnik o ograničenjima i zabranama proizvodnje, stavljanja u promet i korišćenja hemikalija, Sl. glasnik RS, br. 90/2013.
- [N27] Pravilnik o tehničkim zahtevima za projektovanje, izradu i ocenjivanje usaglašenosti opreme pod pritiskom, Sl. glasnik RS, br. 87/2011, sa primenom od 01.07.2012.
- [N28] Pravilnik o pregledima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe, Sl. glasnik RS, br. 87/2011, sa primenom od 01.07.2012.
- [N29] Zakon o tehničkim zahtevima i ocenjivanju usaglašenosti, Sl. glasnik RS, br. 36/2009, promenjen Sl. glasnik RS, br. 49/21.
- [N30] Zakon o metrologiji, Sl. glasnik RS, br. 15/2016,

- [S1] Tubular exchanger manufacturers association, Inc: *Standards of the Tubular exchanger manufacturers association – TEMA IX* ed., © 2007, New York; novije izdanje *TEMA X* ed., © 2019, New York, [www.tema.org](http://www.tema.org)
- [S2] EN 13445:2009 *Unfired pressure vessels*, Part 1-9, BSI © 2009 CEN All rights of exploitation in any form and by any means reserved worldwide for CEN national Members.
- [S3] EN 12953:2002 *Shell boilers*, Part 1-11, BSI 1-11, © 2002 CEN All rights of exploitation in any form and by any means reserved worldwide for CEN national Members.
- [S4] EN Standards – European Standards, *EN standard*: [www.cen.eu](http://www.cen.eu) (posebna arhiva citiranih standarda).
- [S5] ISO – International Organization for Standardization, *ISO standard*: [www.iso.org](http://www.iso.org) (posebna arhiva citiranih standarda).
- [S6] EN ISO – International Organization for Standardization, [www.iso.org](http://www.iso.org) International usvojen i European Standards, *EN standard*: [www.cen.eu](http://www.cen.eu), (posebna arhiva citiranih standarda).
- [S7] DIN – Deutsches Institut für Normung *DIN standard*: [www.din.de](http://www.din.de) (posebna arhiva citiranih standarda).
- [S8] AD 2000 Code: *Technical Rules for Pressure Vessels*, Copyright © 2016, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. © 2016 Beuth Verlag GmbH Berlin · Wien · Zürich 10. Auflage Stand der aufgeführten AD 2000-Merkblätter: September 2016.
- [S9] API - American Petroleum Institute, *API Standard*; [www.api.org](http://www.api.org)
- [S9.1] API STANDARD 660, 8 edition, 2007: *Shell-and-tube Heat Exchangers*, ISO 16812:2007 (Identical), Petroleum, petrochemical and natural gas industries, Copyright © 2007, NAPOMENA: 9 ed API 660 objavljen 2015, bez ISO 16812. ISO je 2019 objavio izmene izdanja iz 2007 koje su usklađene i dodate na API 660 ed.9.
- [S9.2] API STANDARD 577, 2 edition, 2013 *Welding Processes, Inspection and Metalurgy*, Copyright © 2013 API – American Petroleum Institute,
- [S9.3] API STANDARD 572, 3 edition, 2009 *Inspection Practices for Pressure Vessels*, Copyright © 2009 API – American Petroleum Institute,
- [S9.4] API STANDARD 520, 10 edition, 2020 *Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices, Part I—Sizing and Selection*, Copyright © 2020 API – American Petroleum Institute,
- [S9.5] API STANDARD 521, 7 edition, 2020 *Pressure-relieving and Depressuring Systems*, Copyright © 2009 API – American Petroleum Institute,
- [S9.6] API STANDARD 580, 3 edition, 2016 *Risk-based Inspection*, Copyright © 2016 API – American Petroleum Institute.
- [S9.7] API STANDARD 663, 1 edition, 2014 *Hairpin-type Heat Exchangers*, Copyright © 2014 API – American Petroleum Institute.
- [S10] ASME - American Society of Mechanical Engineers, *ASME Standard*: – [www.asme.org](http://www.asme.org) (posebna arhiva citiranih standarda);
- [S10.1] ASME VIII div 1-2013 *Boiler & Pressure Vessel Code Rules for Construction of Pressure Vessels*, Copyright © 2013 by THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. All rights reserved,
- [S10.2] ASME PCC-1-2019 *Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly* Copyright © 2019 by THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. All rights reserved,
- [S10.3] ASME PCC-2-2015 *Repair of Pressure Equipment and Piping* Copyright © 2015 by THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. All rights reserved,

- [S10.4] ASME PTC 25 - 2001 *Pressure relief devices* Copyright © 2002 by THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. All rights reserved.
- [S11] ASME B16.5 – 2009 : *Pipe Flanges and Flanged Fittings*, Copyright © 2009 by THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. All rights reserved.
- [S12] ASTM - American Society for Testing and Materials, *ASTM Standard*, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [S13] AWS - American Welding Society, *AWS Standard*, [www.aws.org](http://www.aws.org) (posebna arhiva citiranih standarda).
- [S14] IEC 61511-3 - 2016: *Safety instrumented systems for the process industry sector* – Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, © IEC 2016, [www.iec.ch](http://www.iec.ch)
- [S15] Institut za standardizaciju Srbije: *Srpski standardi-SRPS*, važi od 01.jula 2009. [www.iss.rs](http://www.iss.rs) (posebna arhiva citiranih standarda)

## Web literatura (web site i web page)

### Opšte

- [www.thermopedia.com](http://www.thermopedia.com) Enciklopedija toplote i fluida (Begell House, Inc 2008).
- [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) Slobodna enciklopedija (osnovano 2001).
- [www.periodni.com](http://www.periodni.com) – Periodni sistem elemenata, Hemijsko-tehnološki fakultet Split.
- [www.engineeringpage.com](http://www.engineeringpage.com) Inženjerske strane, široka baza podataka.
- [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com) Inženjerski alatni okvir.
- [www.roymech.co.uk](http://www.roymech.co.uk) Engineering enciklopedia UK.
- [www.totalmateria.com](http://www.totalmateria.com) - Sveobuhvatna baza podataka o materijalima.
- [www.tehnis.privreda.gov.rs](http://www.tehnis.privreda.gov.rs) - kvalitet i bezbednost proizvoda Srbije, ministarstvo privrede.
- [www.cheresources.com](http://www.cheresources.com) Hemijski i procesni inženjering.
- [www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com) Jedan od vodećih svetskih proizvođača i dobavljača vakuumske tehnike.
- [www.vitus.co.rs](http://www.vitus.co.rs) - vitus razmenjivači, Srbija.
- [www.conco.net](http://www.conco.net) - usluga čišćenja razmenjivača toplote.

### Materijali, čelik, bakar, cevi

- [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org) Nefitna svetska asocijacija proizvođača i korisnika čelika.
- [www.outokumpu.com](http://www.outokumpu.com) Globalni lider za nerđajuće čelike, Finska.
- [www.metalprices.com](http://www.metalprices.com) Cene metala na otvorenom tržištu, od 2015 preuzeo [www.argusmedia.com](http://www.argusmedia.com)
- [www.keytometals.com](http://www.keytometals.com) Ključ za metale, Swiss company,
- [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de) Institut za bakar (DKI), od 2022 preuzao [www.kupfer.de](http://www.kupfer.de)
- [www.copper.org](http://www.copper.org) USA Copper Development Association Inc. (CDA)- Arhiva tehničkih podataka.
- [www.metalalloyscorporation.com](http://www.metalalloyscorporation.com) Indijska korporacija cevi od legura bakra.
- [www.aluminiumleader.com](http://www.aluminiumleader.com) Sve o aluminijumu.
- [www.profans.com](http://www.profans.com) Orebrene cevi za razmenjivače toplote, UK.
- [www.wlv.com](http://www.wlv.com) Wolverine orebrene cevi, USA.
- [www.bssa.org.uk](http://www.bssa.org.uk) British stainless steel association – Nerđajući čelici UK.

### Inženjering, Zavarivanje, vijci

- [www.twi-global.com](http://www.twi-global.com) - Institut za zavarivanje, Cambridge, UK
- [www.amtec.eu](http://www.amtec.eu) Merna tehnika, ispitivanje zaptivanja GmbH Nemačka
- [www.gasketdata.org](http://www.gasketdata.org) Baze podataka i atestiranje zaptivnih spojeva GmbH Nemačka
- [www.lucasmilhaupt.com](http://www.lucasmilhaupt.com) - Tehnička podrška i procedure lemljenja, kompanija Lukas Milhaupt, USA

[www.brazetec.co.uk](http://www.brazetec.co.uk) BrazeTec, globalna korporacija za tehnologiju lemljenja, UK  
[www.hextechnology.com](http://www.hextechnology.com) Obuka za Bolt Crew kompanije Hex Technology  
[www.boltscience.com](http://www.boltscience.com) biblioteka inženjerskih resursa, članaka, studija i standarda o vijcima

### Web software, PED i HEX

[www.red-bag.com](http://www.red-bag.com) pressure calculations for pipe line components, PED and heat exchangers.  
[www.thinkcei.com](http://www.thinkcei.com) Computer Engineering, Inc. (CEI) USA.  
[www.lv-soft.net](http://www.lv-soft.net) Lauterbach Verfahrenstechnik (LV) Karlsruhe Nemačka.  
[www.codeware.com](http://www.codeware.com) Codeware, Inc. Kanada.  
[www.htri.net](http://www.htri.net) HTRI preko programa Xchanger Suite, USA.  
[www.aspentech.com](http://www.aspentech.com) Aspen, USA, Aspen Shell & Tube Mechanical.  
[www.hexagonppm.com](http://www.hexagonppm.com) PV Elite, (Intergraph), corp. Hexagon, USA.  
[www.p3engineering.com](http://www.p3engineering.com) P3 Engineering, Holandija, ranije Software VES.

## Preporučena literatura

- Ranganayakulu, C., K. N. Seetharamu: *Compact heat exchangers – analysis, design and optimization using FEM and CFD approach*, This edition first published 2018 © 2018 John Wiley & Sons Ltd.
- Saari J.: *Heat exchanger dimensioning* LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Faculty of Technology LUT Energy.
- Taler, D.: *Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers* © Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019, Faculty of Environmental Engineering Cracow University of Technology Cracow Poland.
- Lieberman, N. P.: *Troubleshooting Process Operations*, Copyright © 1991 by PennWell Publishing Company 1421 South Sheridan Road/P.O. Box 1260 Tulsa, Oklahoma 74101.
- Bejan, A.: *Convection Heat Transfer*, fourth edition Copyright and published © 2013 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Mills, A. F.: *Heat Transfer*, 2/e University of California, Copyright © 1999, Berkeley, Prentice Hall 1999, ISBN 0-13-947624-5
- Bejan, A., G. Tsatsaronis, M. Moran: *Thermal design and optimization*, Copyright © 1996 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Dobson, M. K., J. C. Chato, and all.: *Heat Transfer and Flow Regimes During Condensation in Horizontal Tubes*, 1994 by Air Conditioning and Refrigeration Center, University of Illinois, Mechanical & Industrial Engineering Dept.
- Çengel, Y. A., M. A. Boles: *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed. Copyright © 2006 The McGraw-Hill Companies. All rights reserved.
- Çengel, Y. A., J. M. Cimbala: *Fluid Mechanics: Fundamentals and Application SOLUTION*, 3th ed. Copyright © 2013 The McGraw-Hill Companies. All rights reserved.
- White, F. M.: *Fluid Mechanics*, 5th ed. UN Rhode Island, Copyright © 2002 The McGraw-Hill Companies. All rights reserved.
- Asli, K. H., S. A. O. Aliyev: *Applied Research in Hydraulics and Heat Flow*, AMEA Baku Azerbaijan, Copyright © 2014 by Apple Academic Press, Inc. Canada, CRC Press LLC, Florida, Taylor & Francis Group, NewYork.

- Prof. Dr. Peter von Böckh: *Fluidmechanik*, 2th neu bearbeitete Auflage, Copyright © 2004 Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Printed in Germany.
- Moran, M. J., H. N. Shapiro, B. R. Munson, D. P. DeWitt: *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*, Copyright © 2003 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.
- Patankar, S. V.: *Numerical heat transfer and fluid flow*, Copyright © 1980 The McGraw-Hill Companies. All rights reserved.
- Raju, K. S. N.: *Fluid Mechanics, Heat Transfer, and Mass Transfer*, Chemical Engineering Practice, Copyright © 2011 by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. All rights reserved.
- Bergman, T. L., A. S. Lavine: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, eighth edition, Copyright © 2017 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.
- Smith, J. M., H. C. Van Ness, M. M. Abbott: *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, Sixth edition in SI Units, Copyright © 2001 Published by The McGraw-Hill Companies, Inc. New York. All rights reserved.
- Kasatkin, A. G.: *Osnovni procesi i aparati himičeskoj tehnologii*, izdanje devjatoe, ispravlennoe, Himija, Moskva, 1973.
- Kogan, V. B.: *Teoretičeskie osnovi tipovih processov himičeskoj tehnologii*, Himija, Leningrad, 1977.
- Varzaks, T., C. Tzia: *Food Engineering Fundamentals*, Copyright © 2015 by Taylor & Francis Group, LLC. CRC Press, Boca Raton. All rights reserved.
- Bakshi, B. R., T. G. Gutowski, D. P. Sekulić: *Thermodynamics and the Destruction of Resources*, Copyright © 2011 Cambridge University Press, 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA.
- Bathe, K. J.: *Finite Element Procedures*, Copyright © 2014 by Klaus-Jürgens Bathe, 2nd edition. Printed and distributed by: K.J. Bathe, Watertown, MA.
- Recknagel–Sprenger–Schramek: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. 75 Auflage 2011, R. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München
- Rietschel–Reis: *Heiz und Klimatechnik*, Zweiter Band, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1970.
- Reynolds, J.: *The 101 Essential Elements, in a Pressure Equipment Integrity Management Program*, Copyright © 2014 by Inspectioneering, LLC. All rights reserved. The Woodlands, TX 77380 United States.
- Vullo, V.: *Circular Cylinders and Pressure Vessel, Stress Analysis and design*, University of Rome Italy, Copyright © 2014 by Springer International Publishing Switzerland.
- Schweitzer, P. A.: *Fundamentals of Corrosion, Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*, Copyright © 2010 by Taylor & Francis Group, LLC. CRC Press, Boca Raton. All rights reserved.
- Satchell, S.: *Optimizing Optimization, The next Generation of Optimization Applications and Theory*, Copyright © 2010 by Elsevier Limited. All rights reserved. London WC1X 8RR, UK.
- Dubbel – *Taschenbuch für den Maschinenbau*, Herausgegeben von Karl-Heinrich Grote, Beate Bender und Dietmar Göhlich, 25., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Copyright © 2018 Springer-Verlag GmbH Deutschland.



Iz recenzije ...

Monografija predstavlja izuzetan transfer naučnih saznanja u inženjersku praksu i sublimiše tri glavna aspekta tematskog razmatranja: razmenu toplote kao termodinamički proces, dizajn opreme kao konstrukciju, mehaničku nosivost i fabrikaciju i normativni aspekt koji obuhvata klasifikaciju opreme, propise i standarde i bezbednost u proizvodnji i eksploataciji.

ISBN 978-86-906798-0-5



9 788690 679805