

Izbor razmenjivača toplote za grejanje katrana

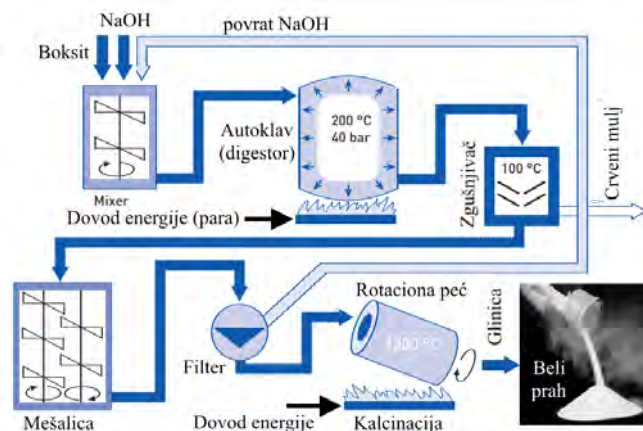
Studija slučaja u industriji aluminijuma

Zanimljiva je činjenica da je aluminijum istorijski gledano prilično mlad metal, otkriven je tek u 19 veku, dok u današnje vreme o njemu postoje veoma raširene informacije, da pomenemo neke internet sajtove (<https://www.wikipedia.org>, <https://www.aluminium-guide.com>, <https://www.aluminium-production.com>, <http://www.aluinfo.de> [1-4], itd), kao i obimne priručnike i literaturu. Aluminijum je po rasprostranjenosti treći element na zemlji (posle kiseonika i silicijuma), a kao metal je prvi, ali se u prirodi ne pojavljuje kao čist metal, već najčešće u obliku aluminosilikata (kao gnajs ili granit), retko u obliku minerala korunda (sadrži oko 53% Al), a mnogo češće u obliku rude pod nazivom boksit.

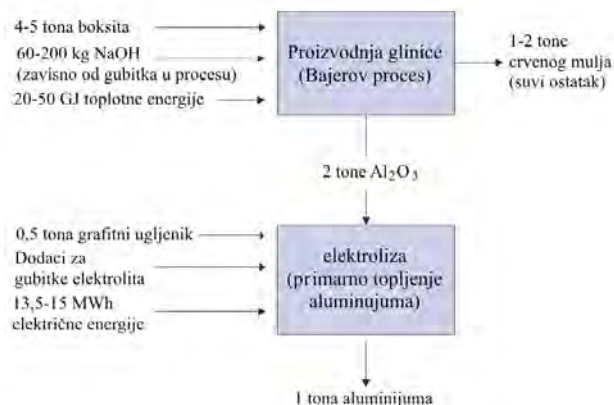
1. Tehnologija dobijanja aluminijuma

Danas se sve više aluminijum dobija iz sekundarnih izvora, npr. limenki i drugog korisnog otpada. Radi potpunijih informacija o aluminijumu navodi se kratak pregled istorijskih činjenica [1]. Prvi koji je izdvojio dovoljno čist aluminijum bio je nemac Wöhler 1827. godine, redukcijom aluminij-hlorida pomoću metalnog kalijuma. Tako dobijena mala količina aluminijuma (manje od kilograma) imala je veoma visoku cenu, skuplji od zlata. Međutim, proces dobijanja aluminijuma je brzo napredovao, preko ekstrakcije glinice pomoću natrijum karbonata, (Deville - Pechiney proces 1846, Francuska), do komercijalno isplativog procesa elektrolize glinice 1886. godine (Hall iz SAD-a i Héroult iz Francuske), što je dovelo da cena aluminijuma padne za 90%, jer nije bila razvijena potrošnja. Proces dobijanja glinice iz rude boksita 1889 nemac Bayer je značajno unapredio, jer je umesto natrijum karbonata upotrebio natrijum hidroksid (tzv. mokri postupak). Bayerov proces dobijanja glinice i Hal-Herultov proces elektrolize (elektrolitički proces) glinice su i danas osnovni procesi dobijanja aluminijuma, naravno uz brojna unapređenja i uštedu energije. Ruda boksit sadrži poželjni aluminijum-oksidi u obliku $Al_2O_3 \cdot xH_2O$ u kome se nalazi oko 60% aluminijum-hidroksida ($Al(OH)_3$ ili $AlO(OH)$). Dejstvom natrijum-hidroksida ($NaOH$) na povišenoj temperaturi (u autoklavima) dolazi do izdvajanja natrijum aluminata $NaAlO_2$, a ostatak je tzv. crveni mulj [6] kao bazni otpad različitog sadržaja, koji je veliki ekološki problem. Natrijum aluminat posle filtriranja ide u proces kalcinacije u rotacionim pećima na visokim temperaturama, gde se odvaja bezvodni beli kristalni prah pod nazivom glinica (alumina), koji je ustvari aluminijum-oksidi Al_2O_3 . Proces dobijanja glinice su lokacijski blizu rudnika boksita, zbog transportnih troškova rude, dok dalja prerada glinice i dobijanje aluminijuma elektrolizom može biti na veoma udaljenim lokacijama

i povezano je sa blizinom jakih izvora struje zbog velike potrošnje. Glinica je bela poput kuhinjske soli, ima visoku tačku topljenja (iznad $2050^\circ C$) i vrlo je stabilno jedinjenje. Zbog toga je za njeno razbijanje i dobijanje aluminijuma elektrolizom potrebna velika količina energije (13,5-15 MWh/toni Al). Na slici 1. prikazan je informativno tipičan tok Bayerovog procesa dobijanja glinice [2], a na slici 3. materijalno-energetski bilans proizvodnje 1 tone aluminijuma, prema [4]. Detaljna analiza toka dobijanja glinice, a takođe i elektrolitičkog procesa dobijanja aluminijuma data je u monografiji N. Dolić sa Metalurškog fakulteta u Zagrebu [5].

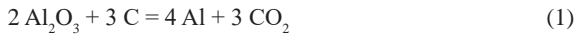


Slika 1: Tipičan tok dobijanja glinice, Bayerov postupak (na bazi [2])

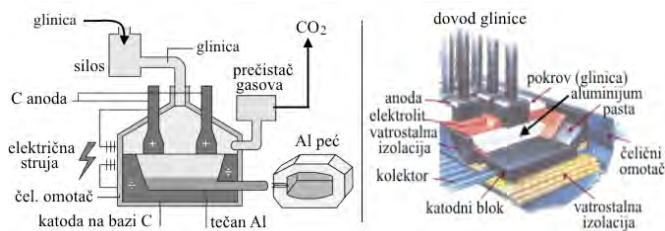


Slika 2: Materijalno-energetski bilans proizvodnje 1 tone aluminijuma (prema [4])

U drugom delu procesa dobijanja aluminijuma prerađuje se glinica postupkom elektrolitičke redukcije aluminijum oksida (koji se često naziva i elektroliza iako nije isto) u tzv. Hal-Herultovim ćelijama. Tipična elektrohemijska reakcija redukcije rastvorene glinice u elektrolitu s čvrstom grafitnom anodom pod dejstvom električne struje prikazuje se jednačinom (1), pri čemu se dobija rastopljeni aluminijum i ugljen-dioksid.



Maseno učešće komponenti u reakciji u praksi iznosi: 1,93 kg glinice reaguje sa 0,4-0,45 kg grafitnog ugljenika pri čemu nastaje 1 kg aluminijuma i oko 1,5 kg ugljen-dioksida, Kvande [8]. Tačka topljenja Al_2O_3 je 2072°C [5] što je previsoka temperatura i neracionalno za elektrolizu, ali je rastvorljiv u kriolitu kao elektrolitu, gde se topi na oko 1000°C što je veoma pogodno za snižavanje temperature procesa. Kriolit je sintetičko jedinjenje $3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$ u koje se dodaju razne soli na bazi fluora (AlF_3 , CaF_2 , LiF) koji poboljšavaju topljivost, disocijaciju itd. a još i snižavaju temperaturu topljivosti aluminiju-oksida (na oko $940\text{-}980^\circ\text{C}$). Aluminijum oksid u elektrolitu disocira na pozitivne jone aluminijuma koji se izdvajaju na katodi i negativne jone kiseonika koji se jedine sa anodom (oksidiraju je) pri čemu nastaje ugljen-dioksid. Obe elektrode u ovom procesu su na bazi ugljenika, stim što se katoda veoma slabo troši, dok se anoda značajno gubi u formi ugljen-dioksida. Na slici 3. prikazana je šema elektrolitičke ćelije i struktura ćelije u preseku, a na slici 4. dat je pogon elektrolitičkih ćelija Egiptalum u Egiptu.



Slika 3: Elektrolitička ćelija na bazi [8],
levo - šematski prikaz, desno - struktura ćelije u preseku

Gustina tečnog aluminijuma je $2,3 \text{ kg/l}$ na temperaturama između 950 i 1000°C , a gustina elektrolita je obično oko $2,1 \text{ kg/l}$, tako da se istopljeni aluminijum odvoji od elektrolita i slegne na dno ćelije iznad katode. Tečni aluminijum se uklanja iz ćelija izvlačenjem pomoću vakum pumpi svakih 1 do 3 dana, kada se može dodati nova glinica ili se doziranje obavlja prema novijim metodama kontinuirano po 1 kg svake minute. Elektrolit se povremeno dopunjava zavisno od gubitaka u procesu, pri čemu se održava odnos 2-3% masenog sadržaja elektrolita prema sadržaju glinice. Veći sadržaj glinice (manjak elektrolita) dovodi do nerastvorene glinice u donjoj zoni, a manji sadržaj glinice dovodi do tzv. anodnog efekta, koji je veoma nepovoljan za potrošnju anode i struje [8]. Sakupljeni aluminijum iz različitih ćelija u fabrici se konačno topi radi ujednačenja kvaliteta i dalje prerađuje zavisno od namene (limovi, profili itd.). Ćelije treba da rade neprekidno, da ne bi došlo do stinjavanja rastopine, a održavanje radne temperature se održava pomoću elektro-otpornih grejača. Polaritet na elektrodama

održava jednosmerna struja niskog napona ($4 - 5 \text{ V}$) jačine $100\text{-}300 \text{ kA}$, a potrošnja električne energije iznosi $13,5\text{-}15 \text{ MWh}$, kao što je navedeno na sl. 1 prema izvoru u literaturi [4]. Gasovi koji nastaju pri elektrolitičkom procesu većinom sadrže ugljen-dioksid, a ali i jedinjenja na bazi fluora, pa se prethodno prečišćava, a preostali CO_2 se ispušta u atmosferu.



Slika 4: Egiptalum Nag Hamadi, Egipt; gore - Ulaz u fabriku aluminijuma, dole - Pogon elektrolitičkih ćelija

Za temu ovog rada je najbitnija tehnologija izrade anodnih elektroda, jer se one kao što je navedeno stalno troše i treba ugrađivati nove. Elektrode u ćelijama su uglavnom na bazi koksa, koje kao vezivno sredstvo koriste smole ugljenog katrana (Coal Tar Pitch – CTP). Mešavina se peče na visokim temperaturama da dobije monolitnost i potrebnu čvrstoću. Izrada anoda se odvija uglavnom prema Soderbergovoj ili prema tehnologiji predpečenja. Soderbergova tehnologija samopečenja koristi samo jednu anodu po elektrolitičkoj ćeliji koja se nalazi u sopstvenom okviru i troši se sa donje strane i polako propada ka dole ostavljajući u gornjoj zoni prazan prostor koji se popunjava briketima od koksa i CTP. Deo toplote iz procesa se koristi za kontinuirano pečenje anode, pri čemu dolazi do isparenja više kancerogenih materija, što ovaj postupak sve više ograničava u praksi. Druga metoda predpečenja anoda se odvija u velikim gasnim pećima. Smesa za pečenje sadrži koks (najčešće iz uglja ili najteža frakcija u rafinerijama nafte) i ostataka upotrebljenih anoda u koju se dodaje CTP kao vezivno sredstvo u iznosu 13-16 % mase. Potrošnja CTP prema uobičajenom bilansu potrošnje uglje-

nika od 0,4-0,5 tona, iznosi 50-80 kg smole ugljenog katrana po toni proizvedenog aluminijuma. Mešavina se posle pripreme istiskuje u blokove sa umetnutim anodnim štapom i peče na temperaturi 1150-1200°C [8]. Broj prepečenih anoda je 24 u dva reda po jednoj ćeliji elektrolitičkog procesa, koje se menjaju prema uslovima istrošenosti. Iako je zbirno Sodenbergov postupak jeftiniji, sve se više koriste predpečene anode, jer su boljeg kvaliteta, smanjuju potrošnju elektroda po toni aluminijuma, smanjuju anodni napon i imaju manju potrošnju struje. Trajanje prepečene anode pre zamene je oko 28-30 dana, dok katoda traje mnogo duže (do 6 godina), ali se pri njenoj zameni mora isključiti cela ćelija [5]. Proizvodnja ugljenih elektroda je poseban pogon, koji može biti prostorno veliki, sa kalupima različitih mera i oblika za eksterno tržište ili manji pogoni za sopstvene potrebe. Kako god da je organizovana proizvodnja blokova elektroda mora se obezbediti dovoljna količina ove osnovne ugljene mase i vezivnog sredstva smole ugljenog katrana. Na slici 5. prikazan je eksterni pogon za pečenje blokova sa podzemnim pećima na otvorenom prostoru.



Slika 5: Velika jamska peć za pečenje ugljenih elektroda za potrebe elektrolitičkog procesa dobijanja aluminijuma

Uobičajeni postupak dobijanja elektroda započinje mlevenjem osnovne sirovine – koks, prema zahtevanoj finoći zrna, a zatim se meša sa smolom ugljenog katrana na povišenoj temperaturi, da bi se održavala plastičnost smese za oblikovanje. Smesa se zatim istiskuje (ekstruzija) u unapred pripremljene kalupe koji se na kraju hlade radi stvrdnjavanja i pripreme za pečenje. Sledeći korak je slaganje blokova u tipiziranim jamskim pećima sa pomoćnim peskovitim materijalom radi poroznosti za upijanje isparljivih materijala pri pečenju. Dinamika pečenja je veoma spora 2-10°C/h sve do 1000°C, što traje i po nekoliko sedmica, pri čemu se stapa koks i vezivni materijal. Nakon hlađenja, pečeni proizvod se kontroliše i dorađuje prema nameni ugljene elektrode. Za podizanje kvaliteta proizvoda, može se pečeni proizvod podvrgnuti naknadnoj toplotnoj obradi, tzv. grafitizaciji, koja se odvija u posebnim pećima, elektrotopnim postupkom, brzinom zagrevanja 30-70°C/h sve do 2500°C, što zajedno sa hlađenjem može trajati više od 10 dana. Tokom ove operacije ugljenik dramatično menja svojstva, a najvažnije je prelazak iz amorfne strukture ugljenika u kristalnu strukturu grafita, koji ima nizak koeficijent toplotnog širenja, visoku toplotnu provodljivost i visoku električnu provodljivost, što su veoma važne prednosti pri elektrolitičkom postupku dobijanja aluminijuma.

2. Osobine i parametri grejanja procesnog fluida - coal tar pich

Coal Tar Pich je neminovno vezivno sredstvo za izradu elektroda elektrolitičkog procesa bilo kojim postupkom. Zavisno od broja ćelija potrošnja ovog materijala može varirati u ukupnom iznosu, jer je proizvodnja blokova veoma duga i diskontinualna. Zbog toga je potrebna prethodna analiza za utvrđivanje potrebne količine CTP u pripremnim rezervoarima ili u cirkulacionom sistemu potrošnje. Temperatura sredstva se mora održavati iznad tačke topljenja (koja je do 150°C) da bi se omogućila dobra protočnost, a takođe i podesivost tačke omekšavanja pri mešanju sa mlevenim koksom. U zavisnosti od načina isporuke i lagera CTP, neophodno je istu dovesti i održavati u tečnom stanju u temperaturskom režimu cirkulacije do mesta potrošnje. Za održavanje CTP u tečnom stanju potreban je energent, uobičajeno termalno ulje, koje ne menja fazu i lako se proizvodi u energetskom bloku na gasovito ili tečno gorivo.

Projektom pripreme CTP za pripremu mase za ekstruziju u kalupe elektroda u fabrici aluminijuma Egipitalum predviđen je sledeći postupak: U kazan sa mešalicom ubacuje se CTP u čvrstom stanju, gde se vrši početno topljenje i rastopina dolazi do zupčaste pumpe protoka 80 m³/h (Johnson HTML Jacketed pump 45 kW) gde se transportuje duplim cevovodom (spolja termo-ulje, unutra CTP) do razmenjivača toplote radi dodatnog zagrevanja, a zatim se ponovo vraća u kazan gde se podiže temperatura. Potom se u vruć kazan dalje dodaje nova količina čvrstog CTP koja se meša sa tečnim CTP, pri čemu se čvrst CTP topi, a tečni hladi. Iz kazana se povremeno izuzima pripremljen CTP za mešanje s mlevenim koksom za izradu elektroda, dok masa neprekidno cirkuliše preko razmenjivača toplote i podiže temperaturu CTP u kazanu.



Slika 6: Smola katrana uglja u čvrstom stanju u obliku štapića (gore); Masa CTP u tečnom stanju (dole)

Smola ugljenog katrana je nus proizvod procesa karbonizacije uglja (900-1100°C), ali ima primenu kao jedna o glavnih sirovina za proizvodnju elektroda u metalurgiji aluminijuma. To je, smesa policikličnih aromatičnih ugljovodonika, polimetalnih derivata i heterocikličnih kiselina, koja u svom sastavu sadrži veliki broj supstanci. Na sobnoj temperaturi je u čvrstom stanju, a pre temperature topljenja ima široko područje omekšavanja uz poseban afinitet vezivanja za koks. Isporučuje se u čvrstom stanju u obliku kraćih ili dužih štapića, a u tečnom stanju isporučuje se u citernama (auto, željeznica ili brod), videti sliku 6. Zbog različitog sastava, osobine ove mase nisu konstatne, već se utvrđuju prema specifikaciji proizvođača. Neke opšte vrednosti osobina su u granicama: temperatura omekšavanja 94-107°C, topljenja 65-150°C, tačka ključanja je iznad 360°C, gustina 1,15-1,4 g/cm³ (na 20°C), dinamička viskoznost je 30-50 cP (na 250°C), slabo je rastvorljiv u vodi, a u benzinu nije rastvorljiv, tačka paljenja je iznad 250°C, a samopaljenja iznad 450°C. Najveća potrošnja CTP je upravo u proizvodnji elektroda, a pored toga ima primenu i u medicini (lečenje psorijaze) u građevinarstvu (asfalt i hidroizolacije), kao i u industriji boja, itd. Prema evropskom izveštaju o proceni rizika, treba navesti da je za CTP utvrđeno postojanje kancerogenosti, ali vrednosti variraju u zavisnosti od njegovog sastava. Najčešće dejstvo ove mase ispoljava se direktnim dejstvom na rukovaoce i to putem inhalacije para CTP ili dermalnim dejstvom na kožu putem dodira.

OSOBINE COAL TAR PITCH

Prema podacima dostavljenim od naručioca						
Temperatura °C	Gustina kg/m ³	Dinamički viskozitet cP	Pa s	Kin. viskozitet m ² /s	Spec. toplotni kapacitet kcal/kg°C	Toplotna provodljivost kcal/h m °C
110	1290	<	15000	15	0,01282051	
140	1170	<	3000	3	0,0026087	
160	-	<	450	0,45	0,00039823	
180	1130	<	280	0,28	0,00024805	
185	1128,8	<	200	0,2	0,00017737	
190	1127,6	<	135	0,135	0,00011986	
195	1126,3	<	100	0,1	8,8889E-05	0,4
200	1125	<	75	0,075	6,6785E-05	0,4
205	1123	<	50	0,05	4,4643E-05	1,67472
210	1120	<	32	0,032	2,67E-05	1,67472
220	1115	<	18	0,018	1,6216E-05	0,1
230	1110	<	13	0,013		1,163 10 ⁻⁴
235	-	<	6	0,006		
240	-	<	3	0,003		
250	-	<				
260	-	<				

Gustina CTR u čvrstom stanju: Štapići manji 732 kg/m³, štapići veći 730 kg/m³.

OSOBINE TERMAL-OIL (Mobiltherm 605)

Temperature °C	Density kg/m ³	True Specific Heat Capacity kJ/(kg.K)	Thermal Conductivity kW/(m.K) 10 ⁻³	Kinematic Viscosity m ² /s 10 ⁻⁶
20	859	1,89	0,135	50,5
40	847	1,96	0,133	20,5
60	834	2,03	0,132	10,5
80	823	2,11	0,130	6,24
100	811	2,18	0,129	4,12
120	798	2,25	0,127	2,9
140	786	2,32	0,126	2,2
160	774	2,4	0,124	1,7
180	762	2,47	0,123	1,3
200	750	2,54	0,122	0,95
220	738	2,62	0,120	0,82
240	726	2,69	0,118	0,72
260	714	2,76	0,117	0,64
280	702	2,84	0,116	0,58
300	690	2,91	0,114	0,52
320	677	2,98	0,113	0,48

Website: <http://www.exxon.com>, <http://www.mobil.com>

Tabela T-1: Raspoloživi i dostavljeni podaci osobina Coal Tar Pitch i termo-ulja (Mobiltherm 605)

Energetski fluid u razmeni toplote je uobičajeno termo-ulje, koje je veoma dostupno i čije osobine su detaljno utvrđene i mogu se dostaviti od strane proizvođača, zato se posebno ne razmatraju već samo navode. Raspoloživi i dostavljeni parametri tehnološkog i radnog fluida su navedeni u tabeli T-1, pri čemu su jedinice starog sistema konvertovane u jedinice SI sistema, pogodne za dalje proračune.

Temperaturni režim fluida u razmenjivaču toplote (index 1 na ulazu, index 2 na izlazu) i maseni protok:

- Hladniji fluid: Tehnološki fluid (CTP-Coal Tar Pitch)
 $t_{c1}=200^{\circ}\text{C}, t_{c2}=208^{\circ}\text{C}$ (2a)

- Topliji fluid: Radni fluid (termo-ulje, Mobiltherm 605)
 $t_{h1}=250^{\circ}\text{C}, t_{h2}=230^{\circ}\text{C}$ (2b)

- Projektni maseni protok CTP: $V_c=80 \text{ m}^3/\text{h}$,
 $m_c=80 \cdot 1123/3600 = 25 \text{ kg/s}$ (3c)

Projektna toplotna snaga razmene, preko CTP:

$$Q = m_c C_c (t_{c2} - t_{c1}) = 25 \cdot 1,675 (208 - 200) = 335 \text{ kW} \quad (3)$$

Projektni maseni protok termo-ulja:

$$m_h = Q / C_h (t_{h1} - t_{h2}) = 335 / 2,69 (250 - 230) = 6,227 \text{ kg/s} \quad (V_h = 30,88 \text{ m}^3/\text{h}) \quad (4)$$

Kategorizacija opreme pod pritiskom (OPP ili PED):

Naručilac nije odredio precizne radne uslove dejstva pritiska u razmenjivaču toplote, osim odredbe da oba fluida rade u uslovima otvorenih sistema, što znači da imaju direktnu vezu sa spoljašnjom sredinom i uslova da oprema mora biti masivna, što znači da treba da ima povećanu nosivost i otpornost na teške uslove rada. S obzirom da nisu specificirani standardi, usvajaju se dva osnovna evropska propisa za izradu opreme pod pritiskom: direktiva PED 2014/68/EU (2014) i standard EN 13445 Unfired pressure vessels (2009).

Za kategorizaciju OPP potrebno je prethodno odrediti grupu fluida prema opasnosti i fizičke uslove fluida (temperatura, pritisak, zapremina, proizvod pritiska i zapremine). Termo-ulje, pripada grupi 1 – opasni fluidi, jer je zapaljivo (tačka paljenja 225°C), a najveća dozvoljena temperatura termo ulja u posudi (TS=250°C) je viša od tačke paljenja. Fluid CTP se takođe svrstava u grupu 1 – opasni fluidi, iako mu je tačka paljenja (250°C) iznad najveće dozvoljene temperature u posudi, poseduje kancerogena svojstva i agresivno dejstvo na rukovaoce. Oba fluida pri radnim uslovima imaju sniženu viskoznost što proizvodi niže padove pritiska, pa naručilac navodi radni pritisak 4 bara za termo-ulje i 10 bara za CTP, koji će biti osnov za kategorizaciju posude. Za mehaničke proračune moraju se usvojiti znatno viši pritisci, s obzirom na značajno visoke viskoznosti fluida na nižim temperaturama u fazi uspostavljanja režima rada. Za dovoljnu masivnost i kompaktnost opreme, naručilac zahteva proračunske pritiske: 16 bara za termo-ulje i 20 bara za CTP.

Na ovaj način su definisani protoci hladnijeg i toplijeg fluida, temperaturni režim i snaga razmene, kao i proračunski pritisci, dok će se konačna kategorizacija opreme izvesti, posle dimenzionisanja izabranog razmenjivača toplote, na bazi merodavnih dijagrama direktive PED.

3. Izbor tipa i dizajn RT termo-ulje - coal tar pitch

Pri analizi i izboru tipa razmenjivača toplote uvek treba poštovati pravilo [9]: Prvo proučiti tehnološki proces, a zatim birati razmenjivač toplote. Zbog toga je u uvodnom delu dat detaljniji opis procesa, jer u praksi on mora biti jasan, ni jedno pitanje ne sme biti otvoreno. To nije jednostavno, jer je uticaj potencijalnih ustupaka uvek prisutan, a oni često ne moraju biti objektivni. Poznato je da postoji veliki broj konstrukcija razmenjivača toplote, pri čemu su tipične konstrukcije one koje imaju jasno definisanu površinu razmene i mehanizam razmene toplote, po čemu su prepoznatljivi u komunikaciji. Npr. cevni razmenjivači imaju površinu razmene toplote cev, specifično: dobošasti razmenjivači su cevi smeštene u omotač, razmenjivači cev-u-cev (CuC) imaju cevi smeštene jedna u drugu, a cevne zmijske su zavojnice smeštene u veliku zapreminu, itd. Druga velika skupina su pločasti razmenjivači koji kao površinu razmene imaju ploču u velikom broju varijacija, ploča može biti ravna, valovita ili spiralna, kućište u koje su ploče smeštene može biti rastavljivo ili fiksno (zavareno). Postoji i veliki broj kombinovanih i specijalnih razmenjivača (kompaktni) prilagođenih toku strujanja, promeni faze fluida, izabranim materijalima ili velikim serijama, itd. Za izbegavanje analize velikog broja tipova razmenjivača toplote potrebna je intuitivnost projektanta za suženi broj konstrukcija za predmetni proces, kao i utvrđivanje pravih pitanja, koja mogu eliminisati nepodobne tipove razmenjivača. Neka od opštih najvažnijih pitanja na koja treba odgovoriti su:

- Da li predmetni proces može tolerisati propuštanje i mešanje fluida?
- Da li su fluidi u procesu smrtonosni, toksični ili korozivni ako cure u atmosferu?
- Da li fluidi u procesu sadrže čvrste materije i koje veličine?
- Koje su maksimalne temperature i pritisci u procesu u toku rada?
- Da li postoje temperaturne promene, koje mogu dovesti do termičkih dilatacija?
- Da li visoka zaprljanost bilo kog fluida, zahteva često čišćenje razmenjivača?
- Da li postoji ograničenje prostora ugradnje, i da li je dogradnja prostora skupa?

Postoje parametri procesa koji ne trpe kompromise (ili jesu ili nisu) i oni predodređuju tip razmenjivača, to su parametri bezbednosti, zaprljanosti i prisustva čvrstih čestica u fluidima, dakle nijedan nije termički. Ostali uticaji, kao što su pristupačnost za čišćenje, oslonci, temperaturno približenje i cena kapitala diktiraju konačnu odluku. Optimizacijom konstruktivnih nijansi, moguće je u postupku projektovanja razmenjivača toplote, postići dodatno približenje zahtevanim parametrima procesa u utvrđenim tehnološkim granicama, a da se pri tome ne ugroze osnovne prednosti izabranog tipa i njegova cena. U svakom slučaju pojam "opravdan izbor" se odnosi na proceduru održavanja ravnoteže između optimalnog rešenja u procesu rada, troškova investicije i održavanja, kao i analize primera dobre i loše prakse. Pored tehnološko-tehničkih uticaja, postoje i subjektivni uticaji, kao: iskustvo inženjera projektanta i njegova lična sklonost, okruženje i dejstvo proizvođačkog lobija. Pri izboru razmenjivača toplote, mora se od nečega početi, a to su zahtevi koje možemo naz-

vati kriterijumima izbora. Formiranje i analiza kriterijuma izbora i kompromisa optimizacije tipova razmenjivača toplote se utvrđuje na osnovu "specifične težine uticaja", odnosno značaja kriterijuma u eliminaciji tipa razmenjivača, ako ga njegova konstrukcija ne može ostvariti. U konkretnom slučaju za grejanje smole ugljenog katrana pomoću termo-ulja usvojeni su sledeći kriterijumi [9]:

1. Radni pritisci i temperature

Ovo je tipično mehanički kriterijum, koji se svodi na naponsku izdržljivost upotrebljenih materijala, koja zavisi od pritiska i temperature radnih fluida. Krajnje temperature su definisane, dok tekući pritisci su različiti u toku procesa. Iako su sistemi otvoreni prema atmosferi, trenutni pritisak zavisi od otpora strujanja fluida, koji može biti značajno povećan pri nižim temperaturama zbog drastičnog povećanja viskoziteta oba fluida. Ovaj kriterijum favorizuje cevne razmenjivače, a diskredituje pločaste razmenjivače (oni su pogodni za fluide tečnost-tečnost do 25 bara i 150oC za nespecijalne materijale). Dobošasti razmenjivači, po ovom kriterijumu, su svrsishodni za srednja i visoka toplotna opterećenja (srednja $UA=25-80$ kW/K, visoka iznad 80 kW/K) a razmenjivači cev-u-cev (CuC) za niska toplotna opterećenja (ispod 25 kW/K). Pogodni materijali su razne vrste čelika, a izdržljivost na temperaturnu razliku fluida na ulazu ograničena je, što zavisi od zaptivanja spoja cevnog snopa i omotača. Orebrenja cevi su dozvoljena, ako zadovoljavaju druge kriterijume.

2. Zaprljanje i mogućnost čišćenja

Zaprljanost, mogućnost čišćenja i uticaj prekida rada na tok procesa su među najvažnijim faktorima izbora za razmenjivače tipa tečnost-tečnost. Uticaj zaprljanja treba vrednovati sa obe strane površine razmene, pri čemu se uzima u obzir periodičnost čišćenja ili zamene površina razmene ili celog aparata. Termo-ulje nije previše sklono zaprljanju, prema stranici www.engineeringpage.com, preporučuje se toplotni otpor zaprljanja od 0,18 m²K/kW, usvojeno za proračune $R_{th}=0,25$ m²K/kW. Za CTP nema egzaktnih podataka, ali teški derivati pri kreovanju nafte imaju otpor zaprljanju 0,35-0,53 m²K/kW, pa se usvaja proračunski otpor zaprljanja $R_{fc}=0,5$ m²K/kW. Zaprljanje nije visoko [9] i ne isključuje upotrebu cevnih razmenjivača bilo kog rasporeda fluida, pri čemu se zaprljanje lakše čisti ako je u cevi (po tome CTP ide u cev). Rastavljivi pločasti razmenjivači su veoma poželjni za često čišćenje pri niskim temperaturama, što ovde nije slučaj, eventualno se može razmotriti upotreba spiralnih razmenjivača. Orebrenje, kod zaprljanja nikako ne doprinosi čišćenju, pa ga po ovom kriterijumu treba isključiti. Kod ove tehnologije rada, neplanirani prekid u radu stvara posebne probleme zbog porasta viskoznosti fluida pri hlađenju. Zbog toga je veći broj jediničnih razmenjivača povoljnije rešenje, jer je moguća brza zamena neispravne ili zaprljanje jedinice rezervnom, a čišćenje ili popravka se obavlja na posebnom mestu, izvan tehnološkog procesa.

3. Curenje fluida i kontaminacija

Zavisno od vrste procesa rada, curenje jednog fluida na stranu drugog može biti dozvoljeno ili neprihvatljivo. U predmetnom slučaju curenje fluida nije dozvoljeno, naročito prodor CTP u termo-ulje jer izaziva njegovu kontaminaciju i može stvariti nesagledive posledice u daljem toku tog fluida. Cevni razmenjivači imaju mnogo manji broj

zaptivnih mesta od rastavljivih pločastih i spiralnih razmenjivača, pa su u zavidnoj prednosti (ekstremno mogu biti konstrukcije sa duplim zidom ili duplom cevnom pločom). Lemljeni (zavareni) pločasti razmenjivači nisu opcija zbog zaprljanja.

4. Kompatibilnost fluida i materijala izrade aparata

Izbor materijala i kompatibilnost između materijala i radnih fluida, posebno u pogledu zaštite od korozije ili rada na visokim temperaturama je izrazito na strani cevnih razmenjivača, dozvoljen je veliki broj materijala – naročito veoma dostupnih čelika. Kompaktni razmenjivači (gde spadaju i pločasti aparati) glavnu prednost imaju u upotrebi posebnih metala i tipiziranih konstrukcija, jer tada imaju visok prolaz toplote, malu težinu i nisku cenu, što za predmetne fluide nisu primarni zahtevi.

5. Cena

Cena je veoma važan faktor za konkurentnost tipa razmenjivača toplote. Cena pojedinačne izrade, izražena po jedinici površine razmene toplote je veća za rastavljive pločaste razmenjivače nego za dobošaste razmenjivače, dok je za veće serije obrnuto. Međutim, u predmetnom slučaju cena ima značaj samo u slučaju kada su ispunjeni prethodni kriterijumi.

Pored navedenih može se formirati još kriterijuma [9], po specifičnim zahtevima, npr.: prema uticaju posledica nepravilnog izbora, prema bezbednosti okoline, procesa i opreme, prema efikasnosti razmene toplote, prema iskustvu dobre prakse, itd. Njihovo detaljnije razmatranje je izostavljeno, jer previše opterećuje obim ovog rada, međutim uticaj postojećih rešenja i dobre prakse ima posebnu važnost, o tome nešto kasnije.

Sprovedena analiza u prvi plan ističe cevne razmenjivače toplote, dok pločasti i ostali kompaktni razmenjivači se isključuju iz daljeg razmatranja, jer ne zadovoljavaju najvažnije kriterijume. U grupi cevnih razmenjivača posebno se ističu dobošasti razmenjivači i razmenjivači CuC, kao opcije koje ispunjavaju većinu kriterijuma i za dalju analizu je potrebno dovesti ih "lice u lice". To mogu biti neki novi kriterijumi kao npr.: Efikasnost razmene toplote, uticaj brzine strujanja fluida, temperaturne dilatacije, pogodnost ugradnje i eksploatacije opreme, kompaktnost konstrukcije, nivo troškova itd. Umesto detaljne analize navodi se skraćeni prikaz razmotrenih konstruktivnih parametara.

Prema TEMA standardu [16] definisane su tri glavne grupe dobošastih razmenjivača: fiksne cevi u cevnom snopu, U cevi i razmenjivač s plivajućom glavom. Prva grupa otpada jer je nerastavljiva, a od druge dve grupe prednost se daje U cevima kao jednostavnijem i jeftinijem rešenju (iako se može osporiti). S druge strane CuC razmenjivači mogu biti dvocevni trocevni i multicevni [17], od kojih otpadaju trocevni kao nepraktični za ugradnju i višecevni, jer su bliski dobošastim, pa je relativna alternativa samo duple cevi.

Efikasnost razmene u razmenjivaču toplote (odnos stvarne i maksimalne toplotne snage koju može konstrukcija ostvariti), ne može se realno utvrditi pre dizajna aparata, ali se mogu uporediti iskustveni ukupni koeficijenti prolaza toplote [10] ("U" W/m²K). Prema Retcelu i Špangu za dobošaste razmenjivače i fluide tečnost-tečnost je U = 150-1200 W/m²K, dok Koulson i Ričardson za definisane fluide ter-

mo-ulje teška ulja navodi U = 50-300 W/m²K. Retcel i Špang za CuC razmenjivače i fluide tečnost-tečnost navodi U=300-1400 W/m²K. Niže vrednosti se odnose za male brzine, laminarno strujanje, višu viskoznost i veću sklonost zaprljanju. Prema navedenim podacima, ukupni prolaz toplote ne daje prednost ni jednom rešenju.

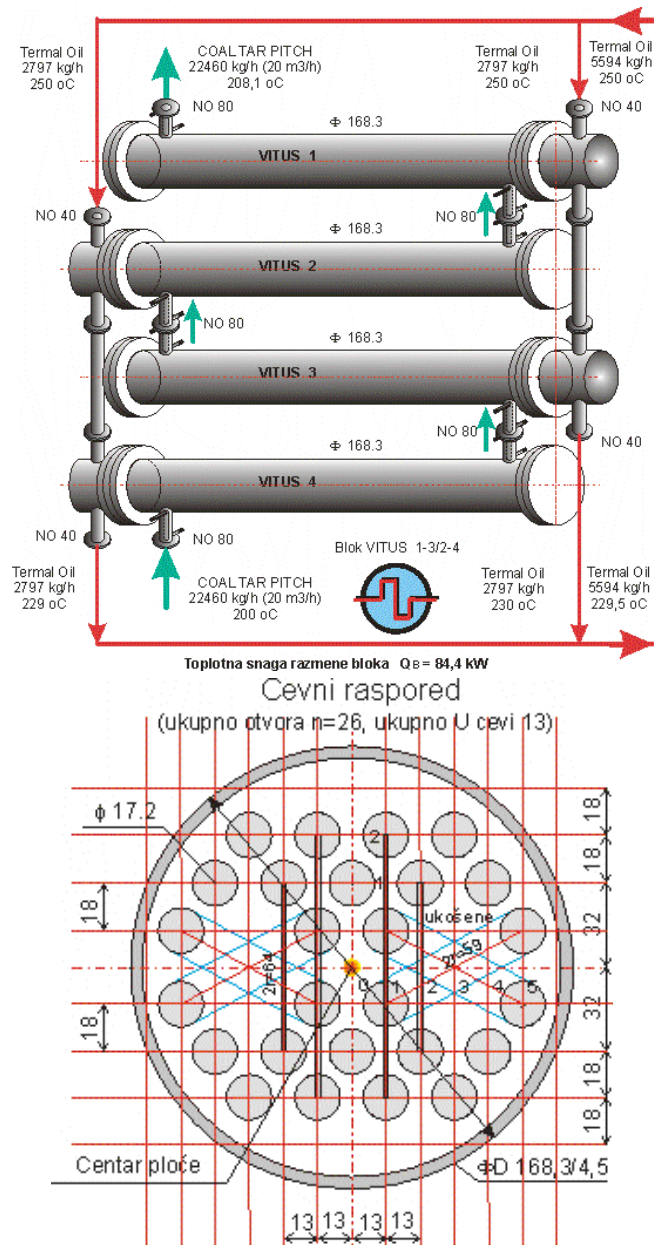
Veoma važno pitanje predmetne razmene toplote je broj jedinica ugradnje, odnosno broj istih ali nezavisnih aparata koji su povezani u lanac (serijska, paralelna ili kombinovana mreža). Dupli CuC manjih prečnika cevi inače moraju biti povezani u lanac, dok dobošasti razmenjivači toplotne snage 335 kW, nemaju nikakav problem da to ostvare u jednoj jedinici. Međutim, činjenice koje upućuju na veći broj jedinica dobošastih razmenjivača su sledeće: veća kompaktnost manjih jedinica, lakša manipulacija, zamena i čišćenje i lakše postizanje dizajna u oblasti preporučenih parametara (npr. brzine strujanja i pad pritiska). Brzina strujanja fluida nije projektni parametar, ali je veoma važan kontrolni parametar. Veća brzina podiže prolaz toplote na površini razmene, smanjuje zaprljanje, ali takođe podiže pad pritiska i snagu strujanja, eroziju zidova cevi, kao i porast mogućih vibracija. Zato je brzina čest parametar optimizacije troškova. Prema VDI Heat Atlas [18] preporučene brzine za razmenjivače od čelika za vodu su max. 1,5-2,5 m/s u cevi, a oko cevi 1-1,5 m/s, pri čemu treba izbegavati suviše male brzine. Za druge fluide brzine treba da su saglasne prema gustini u radnim uslovima fluida. Za CTP ($\rho_c = 1125$ kg/h) brzine ne bi trebale preći 1,3 m/s u cevi, a oko cevi 0,9 m/s, dok za termo-ulje ($\rho_h = 720$ kg/h) granične brzine bi mogle biti 2 m/s u cevi i 1,4 m/s oko cevi. Prema navedenim brzinama i utvrđenim protocima, najmanji preseki strujanja mogu biti za termo-ulje u cevi $F_{hmin} = V_h / \omega_{hmax} = 30,88 / (2 \cdot 3600) = 0,0043$ m², odnosno unutrašnji prečnik cevi $D_{imin} = 0,074$ m, dok presek strujanja oko cevi bi bio $F_{hmin} = 0,0066$ m². Slično za CTP bi bilo u cevi $F_{cmin} = V_c / \omega_{cmax} = 80 / (1,3 \cdot 3600) = 0,0171$ m², odnosno unutrašnji prečnik cevi $D_{imin} = 0,148$ m, dok presek strujanja oko cevi bi bio $F_{cmin} = 0,0247$ m². D_{imin} se odnosi na unutrašnju cev CuC razmenjivača, dok za dobošaste razmenjivače treba imati u vidu da za U cevi minimalni broj prolaza može biti $z \cdot z_0 = 21$ [9], odnosno 2 prolaza u cevi i 1 prolaz oko cevi, što znači da će za termo-ulje u cevi biti $F_{hmin} = z_r \cdot V_h / \omega_{hmax} = 2 \cdot 30,88 / (2 \cdot 3600) = 0,0086$ m², a za CTR u cevi $F_{hmin} = z_r \cdot V_h / \omega_{hmax} = 2 \cdot 80 / (2 \cdot 3600) = 0,0172$ m², a površina preseka u cevi se odnosi na sve cevi kroz koje struji fluid.

Uticaj temperaturnih dilatacija je izražen kod CuC razmenjivača, zbog različitog izduženja u cevi i oko cevi, pa su neophodni kompenzatori za svaku jedinicu, što je značajna nepovoljnost u odnosu na U cevi, koje imaju mogućnost samokompensacije. Konačno, dobošasti razmenjivači sa U cevima imaju manji broj jedinica, lakšu manipulaciju u eksploataciji, značajno manji gabarit i težinu (pa zbog toga i cenu), što im takođe daje prednost u odnosu na razmenjivače tipa cev-u-cev.

4. Dobošasti razmenjivač toplote kao projektno rešenje

Iz prethodne analize proizilazi zaključak, da je dobošasti razmenjivač poželjni tip razmenjivača u odnosu na CuC rešenje, jer ima manji broj jedinica, manji pad pritiska, ne zahteva kompenzatore i ima prednosti pri ugradnji i održavanju, a takođe i nižu cenu investicije. Ono što CuC ne isključuje iz izbora su mnogo veći prečnici

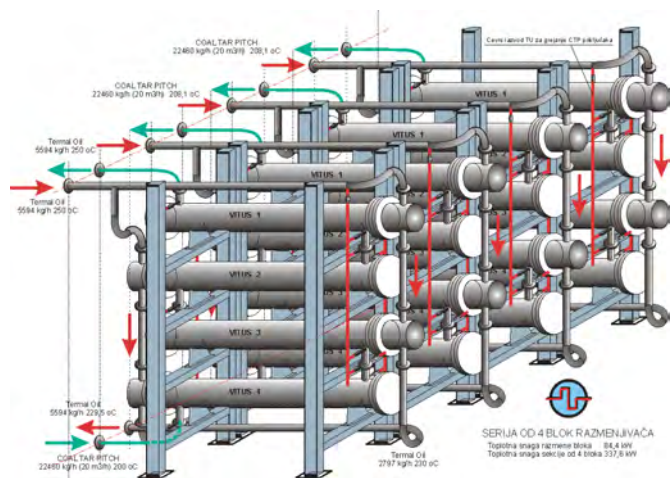
cevi, što može biti značajna prednost pri čišćenju od zaprljanja. Izabran je dobošasti tip razmenjivača, na kome treba sprovesti projektni postupak dizajna, videti slike br. 7 i 8.



Slika 7: Gore: Izgled, priključci i tok fluida bloka dobošastih razmenjivača "Vitus" za grejanje CTP pomoću termo-ulja, Dole: Cevni raspored jediničnog razmenjivača od čeličnih U cevi φ17,2 x 2,3 mm

Tehnički iterativni proračun konstrukcije dobošastih razmenjivača u bloku serijske veze i paralelne veze blokova u sekciji urađen je prema proceduri "Vitus" razmenjivača u excel aplikaciji [10]. Varijacijom toplotne snage razmene, prečnika cevi doboša, broja jedinica i izborom toka strujanja fluida, dobijeno je optimalno rešenje od 4 razmenjivača u serijskom bloku, paralelno povezanih u sekciju od po 4 bloka. U ovom pregledu daje se skraćeni opis konstrukcije, a

izvodi rezultata proračuna su u "Teit listi", veze razmenjivača za Vitus 1-3 i Vitus 2-4. Svaki blok je na posebnom nosaču, koji se redaju jedan pored drugog, što čini veoma kompaktnu konstrukciju, iz koje se nezavisno može izvući svaki blok zajedno s nosačem, radi zamene.



Slika 8: Izgled, priključci i tok fluida sekcije od 4 bloka dobošastih razmenjivača "Vitus" za grejanje CTP pomoću termo-ulja, ukupno 16 DRT. Konstrukciju bloka od 4 DRT videti na slici br. 7.

Parametri dobošastog razmenjivača toplote i bitni parcijalni rezultati proračuna												
Mobiltherm 605	tsr (oC) 240			Temperaturni režim			Coal Tar Pitch			tsr (oC) 204		
Geometrija cevnog registra	tr (oC) tr (oC)			Geometrija omotača			φDs (m) φDu (m) F0 (m²)					
ds (m) du (m) n (-) Fr (m²)	250 230			φDs (m) φDu (m) F0 (m²)			0,1683 0,1593 0,013889					
0,0172 0,0126 26 0,003242	tsu (oC) tci (oC)			Oscibine fluida na srednjoj temperaturi			ρ (kg/m³) k (kW/m K) c (kJ/kg K) v (m³/s)			Toplotna snaga		
	200 208			Q (kW) = 334,3485			1123 0,000116 1,67472 6,58E-05			Qe (kW) = 83,58714		
	ρ (kg/m³) k (kW/m K) c (kJ/kg K) v (m³/s)			Protoci fluida			Zr (-) Zs (-)			V (m³/h) mc (kg/h) mc (kg/s)		
	720 0,000118 2,69 7,2E-07			Zr (-) Zs (-)			2 1			31,07328 22372,77 6,214657		
	3,884161 2796,696 0,776832			ie (kom)			4			20 22460 6,238889		
	Brzine strujanja			Rezultati po bloku i ukupno			PRVI			DRUGI		
	u cevi i oko cevi			TU Temperatura na ulazu tu (°C)			250			250		
	ωi (m/s) 0,6956108			TU Temperatura na izlazu th (°C)			238,9			238,36		
	ωe (m/s) 0,3999826			CTP Temperatura na ulazu tcu (°C)			205,89			203,5		
				CTP Temperatura na izlazu tci (°C)			208,08			205,89		
	Jedinična površina RT			QBost (kW) Qost (kW)			22,85			23,95		
	A (m²) 2,81			Δplost (kPa) Δph (kPa)			4,35			4,35		
	Površina sekcije RT			Δpcost (kPa) Δpc (kPa)			27,36			30,11		
	A (m²) 44,96						26			26,91		

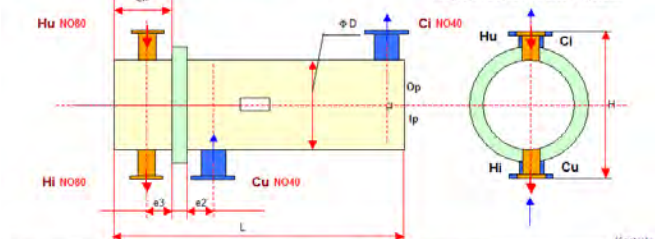
Tabela T-2: Pregled proračunskih parametara dobošastog razmenjivača toplote i neki bitni parcijalni rezultati proračuna

U tabeli br. 2 za lakše razumevanje dati su polazni parametri i parcijalni rezultati proračuna. Svi jedinični razmenjivači imaju istu konstrukciju, oznake tipa i veličine, kao RT21p-168,3-Fe17/2,2, A=2,81 m², ukupno dakle 16 jedinica, zbirne površine razmene As=44,96 m². Jedan blok od 4 razmenjivača potrebno je da bude u rezervi, koji se po potrebi može brzo ubaciti u sekciju, bez zastoja, jer ostali blokovi nesmetano rade. Varijacija rezultata matematički je pokazala da je povoljnije da kroz U cevi struji topliji fluid (termo-ulje), iako je opšta preporuka da prljaviji fluid ide u cev, ali s obzirom da je protok CTP značajno veći od protoka termo-ulja, brzina strujanja CTP sa jednim prolazom u omotaču i poprečnim strujanjem dostiže vrednost ω_o = 0,4 m/s, dok brzina termo-ulja sa dva prolaza u cevima dostiže vrednost ω_r=0,66 m/s, što daje prihvatljive ukupne padove pritiska u omotaču (strana CTP) od 110,38 kPa, a u cevima (termo-ulje) od

TEIT lista br. VIT-35a/08 - 16/20	Oznaka: VITUS	RT21p-168,3vx-Fe17,2 / 2 , A = 2,81 m ²
TEHNIČKI PODACI:		
Referentna spoljna temperatura:	t_a [°C]	-15
Nosioći toplote	$\eta = Q_{m}/Q_a$	0.9964
NAZIV radnih fluida	TERMO ULJE	KATRAN
ZADATAK / OSTVARENA TOPLLOTNA SNAGA RT	Q_a [kW]	22,882 22,8
Raspored fluida u razmenjivaču toplote	Registar (r)	Plast (o)
Ulazna temperatura radnih fluida u RT	t_1 [°C]	250 205,89
Izlazna temperatura radnih fluida (pri zaprijanju)	t_2 [°C]	238,9 208,08
Pad pritiska pojedinačnog razmenjivača toplote	Δp [kPa]	4,36 27,36
Koeficijent prolaza toplote (pri zaprijanju)	U	0,219 [kW/m ² K]
Efektivna razlika temperature (pri zaprijanju)	Δt_{eff}	37,2 [K]
Maseni protok fluida	m [kg/h]	2797 22460
Broj prolaza radnih fluida u razmenjivaču toplote	z [-]	2 1
Računski dozvoljeni nivo zaprijanja RT	R_a [m ² K/kW]	0,25 0,5
Proračunski / ispitni pritisak	[bar]	16 / 24 20 / 30
Zapremina radnog prostora u RT	[m ³]	0,01 0,036

PRIKLUČCI RAZMENJIVAČA TOPLOTE									
Priključak na ULAZU u RT	NP 25	Hu	Hi	NO	40	80	NO	40	80
Priključak na IZLAZU iz RT	NP 25	Cu	Ci	NO	40	80	NO	40	80

MERNA SKICA RAZMENJIVAČA TOPLOTE: Dva ili više redno vezanih razmenjivača toplote ugrađuju se jedan iznad ili pored drugog. Priključci su: **PRIRUBNICE**. Moguć je i drugačiji raspored priključaka.



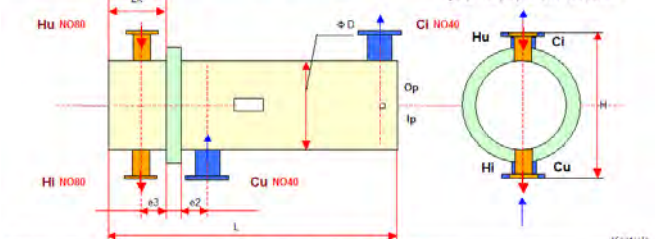
RAZMENJIVAČ TOPLOTE	phi D [mm]	DANCE	Lk [mm]	L [mm]	H [mm]	a1 [mm]	a2 [mm]	a3 [mm]	PED
RT21p-168,3vx-Fe17,2 / 2 , A = 2,81 m ²	168,3	RAVNO	160	2295	300	0	120	90	SEP

Razmenjivači 1 i 3 su u kombinaciji sa razmenjivačima 2 i 4. Zajedno čine razmenjivački blok. Kategorizacija prema PED je SEP za oba fluida (oba cirkulaciona sistema su otvorena prema atmosferi).

TEIT lista br. VIT-35b/08 - 16/20	Oznaka: VITUS	RT21p-168,3vx-Fe17,2 / 2 , A = 2,81 m ²
TEHNIČKI PODACI:		
Referentna spoljna temperatura:	t_a [°C]	-15
Nosioći toplote	$\eta = Q_{m}/Q_a$	1.0031
NAZIV radnih fluida	TERMO ULJE	KATRAN
ZADATAK / OSTVARENA TOPLLOTNA SNAGA RT	Q_a [kW]	23,927 24
Raspored fluida u razmenjivaču toplote	Registar (r)	Plast (o)
Ulazna temperatura radnih fluida u RT	t_1 [°C]	250 203,6
Izlazna temperatura radnih fluida (pri zaprijanju)	t_2 [°C]	238,36 201,83
Pad pritiska pojedinačnog razmenjivača toplote	Δp [kPa]	4,36 30,11
Koeficijent prolaza toplote (pri zaprijanju)	U	0,218 [kW/m ² K]
Efektivna razlika temperature (pri zaprijanju)	Δt_{eff}	39,1 [K]
Maseni protok fluida	m [kg/h]	2797 22460
Broj prolaza radnih fluida u razmenjivaču toplote	z [-]	2 1
Računski dozvoljeni nivo zaprijanja RT	R_a [m ² K/kW]	0,25 0,5
Proračunski / ispitni pritisak	[bar]	16 / 24 20 / 30
Zapremina radnog prostora u RT	[m ³]	0,01 0,036

PRIKLUČCI RAZMENJIVAČA TOPLOTE									
Priključak na ULAZU u RT	NP 25	Hu	Hi	NO	40	80	NO	40	80
Priključak na IZLAZU iz RT	NP 25	Cu	Ci	NO	40	80	NO	40	80

MERNA SKICA RAZMENJIVAČA TOPLOTE: Dva ili više redno vezanih razmenjivača toplote ugrađuju se jedan iznad ili pored drugog. Priključci su: **PRIRUBNICE**. Moguć je i drugačiji raspored priključaka.

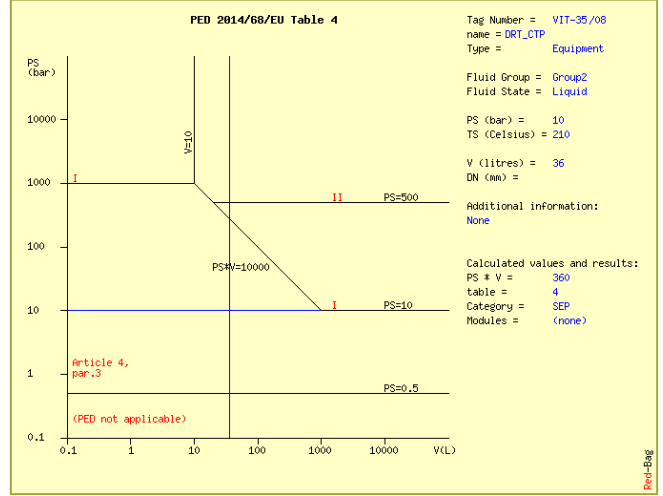
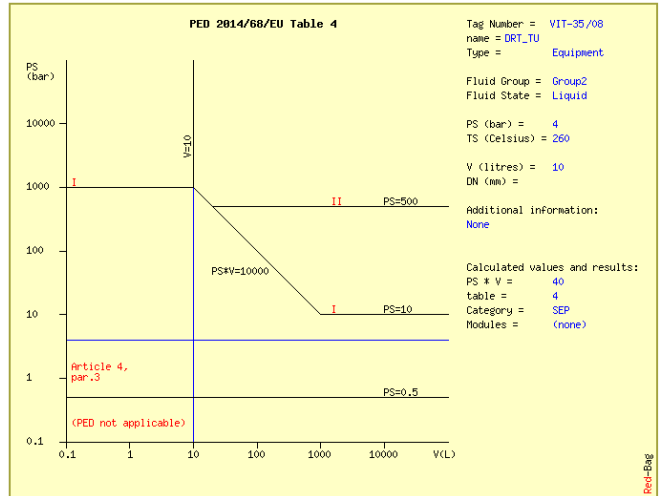


RAZMENJIVAČ TOPLOTE	phi D [mm]	DANCE	Lk [mm]	L [mm]	H [mm]	a1 [mm]	a2 [mm]	a3 [mm]	PED
RT21p-168,3vx-Fe17,2 / 2 , A = 2,81 m ²	168,3	RAVNO	160	2295	300	0	120	90	SEP

Razmenjivači 2 i 4 su u kombinaciji sa razmenjivačima 1 i 3. Zajedno čine razmenjivački blok. Kategorizacija prema PED je SEP za oba fluida (oba cirkulaciona sistema su otvorena prema atmosferi).

Slika 8: TEIT lista VIT 35a/08 (gore) za RT br. 1 i br. 3 i VIT 35b/08 (dole) za RT br. 2 i br. 4. Razmenjivači su geometrijski potpuno isti, ali ne i termički, jer cirkulacija toplijeg fluida ima rednu vezu 1-3 i 2-4 (a grupe su u paralelnoj vezi), dok je cirkulacija hladnijeg fluida kompletno u rednoj vezi 4-3-2-1, videti sliku br. 7

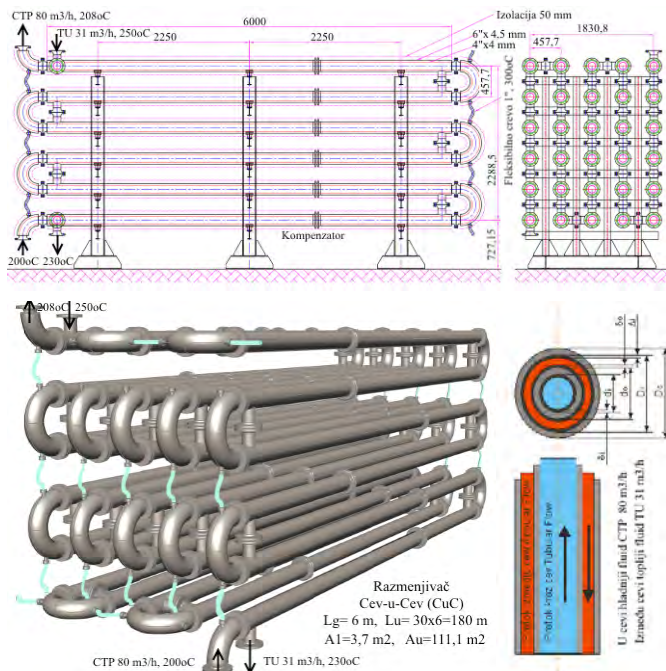
17,42 kPa. Naravno, navedene vrednosti se odnose na radno stanje postignuto posle zagrevanja sistema. Pored navedenog, pogodnost rasporeda toplijeg fluida u cevima je i ta, što taj fluid ima znatno manju viskoznost i što se zagreva u posebnom generatoru, dok bi CTP ako se smesti u male preseke cevi, pri nižim temperaturama veoma brzo blokirao cirkulaciju. Blokiranje cirkulacije CTP u omotaču se rešava cirkulacijom samo termo-ulja uz postepeno podizanje temperature CTP sve do početka cirkulacije.



Slika 9: Kategorizacija dobošastoih razmenjivača prema evropskim propisima (PED 2014/68/EU) na bazi tabela Red Bag [15], Levo: Kategorija SEP za TU (termo-ulje), Desno: Kategorija SEP za CTP (Coul Tar Pitch).

Prema detaljima proračuna utvrđeno je da je strujanje termo-ulja u cevima turbulentno ($Re=8105$ do 8626), a strujanje CTP oko cevi laminarno ($Re=138$ do 218) pa je izračunat ukupni koeficijent prolaza toplote za zaprljane aparate prema Hauzenu i Gnielinskom $U=209-219$ W/m²K [18], zavisno od broja razmenjivača u vezi. Izračunate vrednosti su dobro uporedive prema Koulson i Ričardson za empirijski utvrđene granice (tok termo-ulje teška ulja $U = 50-300$ W/m²K). Posebno je pogodno, što prema kategorizaciji PED opreme [12], za oba fluida su području SEP, što znači da se razmenjivači rade prema

preporukama inženjerske prakse [13], odnosno da je procedura izrade opreme pod kontrolom ovlašćenog proizvođača, a ne imenovanog tela, videti sliku br. 9. Projektna masa jednog razmenjivača je 149 kg, a ukupna masa cele sekcije od 16 razmenjivača bez nosača je 2384 kg, što zauzima mali prostor i omogućava jednostavnu mobilnost.



Slika 10: Geometrija razmenjivača Cev-u-Cev (CuC) Gore: Prednji i bočni izgled CuC razmenjivača sa rasporedom strujanja fluida Dole levo: Izometrijski izgled razmenjivača, Dole desno: Presek kroz duple cevi.

5. CuC razmenjivač toplote kao rešenje iz prakse

Naručilac analize je proveravao postojeća tehnička rešenja za zagrevanje CTP i zaključio da su u praksi veoma često primenjena rešenja sa CuC razmenjivačima toplote, pa je zahtevao da se alternativno proveriti postojeća slična konstrukcija koja je prikazana na slici br. 10. Razmenjivač je monolitna celina, ali je svaka cev prirubnički demontažna, tako da je pri prekidu rada moguće zameniti proizvoljan broj cevi. Spoljna cev originalne konstrukcije je $\phi 168,3 \times 4,5$, a unutrašnja $\phi 114,3 \times 4,5$ prema EN 10216-2 (čelične bešavne cevi za rad na povišenim temperaturama) ili prema ASTM A 106 Gr.B. Pošto je zadata geometrija razmenjivača, onda za zadate ulazne parametre fluida, određivanje izlaznih parametara predstavlja klasičan rejting problem, koji je takođe iterativan, jer da bi se odredila svojstva fluida na srednjim temperaturama moraju se prethodno pretpostaviti izlazne temperature fluida. Proračun je urađen u excel programu na bazi aplikacije autora [10], a delimičan prikaz rezultata dat je u tabeli T-4, kao zbirni rezultati proračuna i procedura toka rešenja rejting problema. Postupak je urađen paralelno za geometrije cevi: $\phi 168,3/4,5 - \phi 114,3/4$, $\phi 168,3/4,5 - \phi 133/4$, zbog toga jer se pokazalo da za prvu geometriju dobija se brzina CTP u cevi 2,5 m/s, a brzina TU između cevi 0,89 m/s, što u projektnim uslovima daje visok pad pritiska u cevi od 4,58 bara. Promenom unutrašnje cevi na

$\phi 133/4$, za ostale nepromenjene uslove, dobija se prihvatljiva brzina CTP u cevi 1,83 m/s, a TU između cevi 1,43 m/s i pad pritiska u cevi od 2,17 bar. Ova promena je obrazložena i dostavljena naručiocu. U obe varijante CuC razmenjivača dobijeni rezultati pokazuju da je moguće ostvariti zahtevani proces, da su izlazne temperature fluida bliske zahtevanim, kao i toplotna snaga razmene. Kategorizacija razmenjivača CuC druge varijante je data na slici br. 11, gde se vidi da su oba fluida u području SEP, odnosno procedura pri izradi PED opreme je u skladu sa preporukama inženjerske prakse [13], što je takođe povoljno.

Zbirni rezultati proračuna

	Cev $\phi 168,3 \times 4,5$	$\phi 168,3 \times 4,5$	Cev $\phi 114,3 \times 4$	$\phi 133 \times 4,5$
1. Raspoređeno mesto strujanja fluida	Plast (a) TOPLJII		Registar (b) HLAĐNIJII	
2. Naziv radnih fluida	Hot fluid: Thermal Oil – Mobiltherm 606		Cold fluid: Coal Tar Pitch	
3. Merodavni proračunski pritisak fluida	pn [bar]	16	16	20
4. Ispitni pritisak CuC razmenjivača	P _{test} [bar]	30,6	30,6	36
5. Temperatura fluida na ulazu iz razmenjivača	t _{in} [°C]	250	250	200
6. Temperatura fluida na izlazu iz razmenjivača	t _{out} [°C]	208	208	208
7. ITERATIVNA temperatura na izlazu iz RT	t _{out} [°C]	208,63	208,63	208,63
8. Logaritamska temperaturna razlika	LMTD [K]	35,18	34,8	34,8
9. Zadata toplotna snaga-USLOVNO	Q _u [kW]	338 kW	338 kW	338 kW
10. Protokna snaga	Q _{post} [kW]	334,29	334,29	334,29
11. Ostavrena toplotna snaga razmene za zaprjan RT	Q _r [kW]	345,07	353,34	353,34
12. Ostavrena zadate toplotne snage	η [%]	103,21%	105,74%	105,74%
13. Merodavni maseni protok	m [kg/s]	6,21	6,21	24,58
14. Spoljni prečnik cevi	D _o [m]	0,1683	0,1683	0,1143
15. Debljina zida cevi	s _o [m]	0,0045	0,0045	0,004
16. Dužina pravog dela registra	L _g [m]	6	6	6
17. Broj redova cevi CuC	n [-]	30	30	30
18. Površina razmena toplote sa spoljne strane unutrašnje cevi	A _o [m ²]	111,1	129,57	129,57
19. Priključni razmenjivači toplote	DN 90	PN 25	DN 100	PN 25
20. Ostavrena brzina cirkulacije radnih fluida	w [m/s]	0,89	1,43	2,5
21. Reynoldsov broj	Re _n [-]	34578	51737	376
22. Nuslovni broj	Nu _n [-]	35976	29358	14158
23. Koeficijent prilaza toplote	h _o [W/m ² K]	0,385	0,093	0,184
24. Koeficijent prilaza toplote korogovan za grešku	h _{o,gr} [W/m ² K]	0,388	0,094	0,184
25. USVOJEH otpor zaprjanja	R _{h,ot} [K/W]	0,25	0,25	0,5
26. Koeficijent prilaza za čist CuC	U [W/m ² K]	0,095	0,084	0,084
27. Koeficijent prilaza za zaprjan CuC	U _z [W/m ² K]	0,098	0,078	0,078
28. Odnos zaprjanog i čistog koeficijenta prilaza toplote	$\kappa = U/U_z$	0,93	0,93	0,93
29. Pad pritiska razmenjivača CuC u banima	$\Delta p_{p,0}$ [bar]	0,375478	1,273636	3,6665713
30. Uvojeni ukupni pad pritiska u razmenjivaču	$\Delta p_{p,u}$ [bar]	0,47	2,16	4,58
31. Proračunska debljina zida cevi unutrašnji pritisak	s _n [mm]	2,38	2,33	2,15
32. Proračunska debljina zida cevi spoljni pritisak	s _e [mm]	3,85	3,93	3,85
33. Proračunska debljina zida cevi na ispitnom pritisku	s _n [mm]	2,30	2,30	2,15
34. Uvojena debljina zida CEVI	s _u [mm]	4,60	4,60	4,60
35. Zapremina prostora fluida za 1 CuC	V _u [l]	58	38	53

III RATING PROBLEM. Postavka i rešenje

Spoljna cev $\phi 168,3 \times 4,5$ i $\phi 133 \times 4,5$
Unutrašnja cev $\phi 114,3 \times 4$ i $\phi 133 \times 4,5$

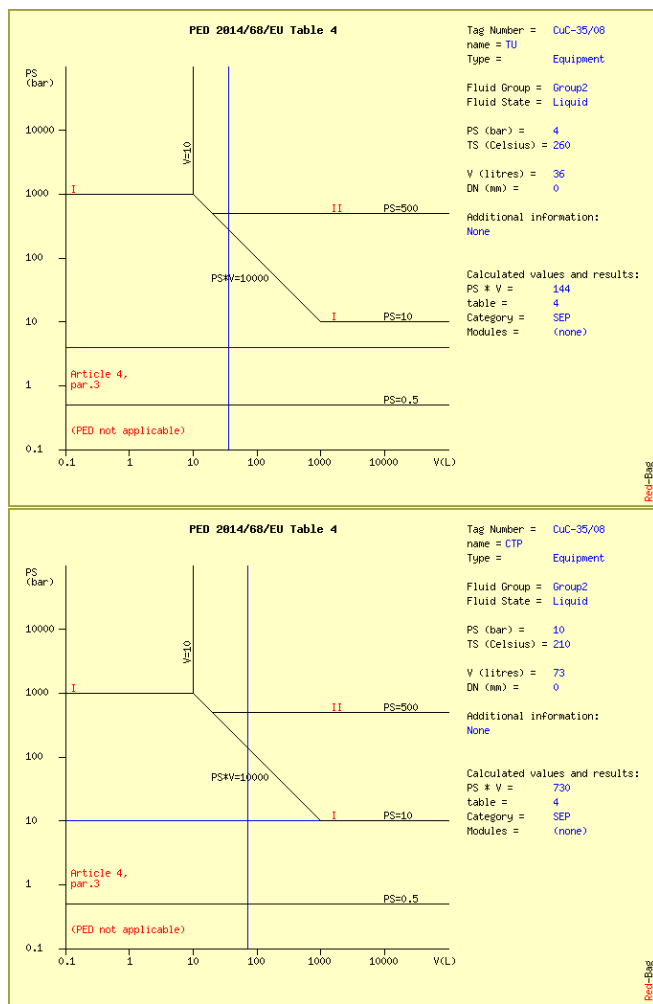
A. RATING PRORAČUN za dozvoljeno zaprjan razmenjivač toplote

A1. ZADATE VELIČINE	A _o [m ²]	111,10478	129,573637
1. Površina razmena toplote sa spoljne strane unutrašnje cevi	A _o [m ²]	111,10478	129,573637
2. Koeficijent prilaza - zaprjan CuC	U _z [W/m ² K]	0,0882736	0,07839748
3. Proizvod površine razmene i koeficijenta prilaza toplote	UA [kW/K]	9,8071317	10,1582464
4. Temperatura toplijeg fluida na ulazu	t _{in} [°C]	250	250
5. Temperatura hladnijeg fluida na ulazu	t _{in} [°C]	200	200
6. Maseni protok toplijeg fluida	m _h [kg/s]	6,2147222	6,2147222
7. Maseni protok hladnijeg fluida	m _c [kg/s]	24,9555556	24,9555556
8. Specifična toplota toplijeg fluida pri srednjem temp. ITERIRANO	C _p [kJ/kg°C]	2,688851	2,687797
9. Specifična toplota hladnijeg fluida pri srednjem temp. ITERIRANO	C _p [kJ/kg°C]	1,67472	1,67472

A2. RATING PRORAČUN

10. Maksimalna temperaturna razlika	$\theta = t_{in} - t_{out}$	50	50
11. Toplotni ekvivalent toplijeg fluida	W _h = m _h C _p	16,710637	16,7049869
12. Toplotni ekvivalent hladnijeg fluida	W _c = m _c C _p	41,793560	41,793560
13. Manji toplotni ekvivalent	Manje od W _h i W _c	16,710637	16,7049869
14. Veći toplotni ekvivalent	Veće od W _h i W _c	41,793560	41,793560
15. Odnos manjeg i većeg toplotnog ekvivalenta	R = W _h / W _c	0,3999251	0,39970234
16. Broj jedinica prenosa	NTU = UA / W	0,586912	0,6089664
17. Pomoćna računski veličina	E = exp(NTU(1-R))	1,422554	1,44057018
18. Efikasnost razmenjivača	P = (E-1)/(1-R)	0,4129959	0,42327197
19. Veća temperaturna razlika fluida	Δt_{max}	20,649797	21,163584
20. Manja temperaturna razlika fluida	Δt_{min}	8,45913978	8,45913978
21. Temperaturna razlika toplijeg fluida fluida	Δt_h [K]	20,649797	21,163584
22. Temperaturna razlika hladnijeg fluida	Δt_c [K]	8,45913978	8,45913978
23. Logaritamska temperaturna razlika	LMTD [K]	35,183006	34,8030179
24. Svaki korekcijski faktor	$\epsilon = P \cdot E / NTU \cdot LMTD$	1	1
25. Efektivna temperaturna razlika	$\Delta t_e = LMTD \cdot \epsilon$	35,183006	34,8030179
26. Toplotna snaga, preko većeg toplotnog ekvivalenta, W _h	Q = W _h Δt_e	345,06918	353,37633
27. Toplotna snaga, preko manjeg toplotnog ekvivalenta W _c	Q = W _c Δt_e	345,06918	353,37633
28. Toplotna snaga, preko koeficijenta prilaza toplote	Q = U _z A _o Δt_e	345,06918	353,37633
29. Izlazna temperatura toplijeg fluida	t _{out} = t _{in} - Δt_h	229,35022	228,836402
30. Izlazna temperatura hladnijeg fluida	t _{out} = t _{in} + Δt_c	208,45914	208,45914
31. Maksimalna efikasnost konfiguracije	P _{max} (RS)=1	1	1
32. Maksimalna veća temperaturna razlika fluida	$\Delta t_{max} = R \cdot \Delta t_{max}$	50	50
33. Maksimalna manja temperaturna razlika fluida	$\Delta t_{min} = R \cdot \Delta t_{min}$	19,991755	19,991755
34. Maksimalna toplotna snaga, preko manjeg toplotnog ekvivalenta W _c	Q _{max} [kW]	835,62583	835,249346
35. Stepen rezerve konfiguracije	$\epsilon = Q_{max} / Q$	142,13%	136,25%

Tabela T-4: Izvod tabelarnih proračuna za dve geometrije cevi razmenjivača toplote CuC: Gore – Zbirni rezultati proračuna, Dole – Postavka i tok rešenja rejting problema za zadatu geometriju razmenjivača



Slika 11: Kategorizacija CuC razmenjivača (druga varijanta), prema evropskim propisima (PED 2014/68/EU) na bazi tabela Red Bag [15], Levo: Kategorija SEP za TU (termo-ulje), Desno: Kategorija SEP za CTP (Coul Tar Pitch).

6. Zaključak

Na raspolaganju je izborni projektni proračun dobošastih razmenjivača toplote (DRT) i rejting proračun razmenjivača cev-ucev (CuC) iz dobre izvedene prakse za zagrevanje Coal Tar Pitch (CTP) pomoću termo-ulja (TU) u tehnologiji pripreme ugljene mase za proizvodnju anoda pri elektrolitičkom dobijanju aluminijuma. Oba rešenja zadovoljavaju zadate uslove, ali se mora izvršiti definitivni izbor. Kao pomoć naručiocu elaborata nudi se dodatna uporedna analiza prema sledećim kriterijumima:

1. Tehnički izlazni parametri fluida u procesu i konstruktivno-operativne performanse razmenjivača,
2. Komercijalni parametri izrade,
3. Pouzdanost rešenja i opasnost od neuspeha.

Iz tehničkih lista podataka DRT i CuC razmenjivača, mogu se videti da su izlazne temperature fluida i toplotna snage razmene u potpunosti u propisanim granicama. Glavne razlike su: smeštaj flu-

ida, strujni tok, brzine strujanja, površina razmene, koeficijent prolaza toplote i generisanje zaprljanja. Problematicniji fluid je CTP, jer ima veću gustinu i znatno veću viskoznost, što se otežava strujanje kroz male preseke. U DRT je zato smešten u omotač a u CuC u unutrašnju cev velikog preseka. U principu, teže je čišćenje omotača nego cevi velikog preseka, ali za čišćenje ima dovoljno vremena, ako se ubacuje rezervni blok. Strujni tok u bloku DRT u paralelnoj vezi omogućava zamenu bloka bez prekida njegovim isključivanjem iz cirkulacije, dok kod CuC sve je u serijskoj vezi, cirkulacioni put je dugačak ($30 \times 6 = 180$ m) i mora postojati prekid pri zameni jedinice, što je otežavajuća okolnost. Ukupna površina razmene toplote kod DRT je značajno manja u odnosu na CuC razmenjivač ($44,96$ m² naspram $129,57$ m²), što je posledica većeg koeficijenta prolaza toplote (cirka 215 W/m²K naspram 78 W/m²K), što su značajne prednosti DRT.

Komercijalno gledajući DRT je u značajnoj prednosti, ima manji broj jedinica, manju masu (cca 2384 kg naspram 6500 kg), nema kompenzatore niti problema sa duplim cevnim lukovima koji se moraju povezati fleksibilnim crevima za strujanje TU. Zbog toga je cena DRT znatno niža od cene CuC razmenjivača.

Pouzdanost rešenja i opasnost od neuspeha je glavna prednost CuC razmenjivača. Ova rešenja su primenjena u praksi na mnogo mesta. Imaju uhodano iskustvo upotrebe i čišćenja, što ih čini poželjnim rešenjem, bez neizvesnosti potencijalnog neuspeha i naknadnih troškova. Međutim, DRT rešenje ima brojne prednosti kod kojih se ne može utvrditi potencijal neuspeha ili skrivenih grešaka, bez provere u praksi.

Na naručiocu i investitoru je donošenje odluke (a odluka je CuC razmenjivači).

Literatura

- [1] ***, Aluminijum, <https://sh.wikipedia.org/wiki/Aluminijum>
- [2] ***, Aluminijum upustva, <https://www.aluminium-guide.com>
- [3] ***, Aluminijum i svet, <https://www.world-aluminium.org>
- [4] ***, Aluminijum proizvodnja, <https://www.aluminium-production.com>
- [5] Dolić, N., *Metalurgija aluminijuma*, Metalurški fakultet, Zagreb 2015
- [6] Smiljanic i dr., *Uticao hemijskog i mineraloškog sastava crvenog mulja na parametre alkaliteta*, Zaštita materijala 58/4, Beograd 2017, <http://idk.org.rs/>
- [7] ***, Alumina, <https://www.aluminazv.ba/>
- [8] Lumley, R., *Fundamentals of aluminium metallurgy, Production, processing and applications*, Woodhead Publishing Limited, 2011, Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi
- [9] Rikalović, R. M., *Dobošasti razmenjivači toplote Knjiga I – Klasifikacija i konstrukcija*, Novo izdanje, u pripremi
- [10] Rikalović, R. M., *Dobošasti razmenjivači toplote Knjiga II – Rejting i dizajn*, Novo izdanje, u pripremi.
- [11] ***, EN 13445-5:2009: *Unfired pressure vessels*, © 2009 CEN, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels
- [12] ***, *Pressure Equipment Directive: PED Directive 2014/68/EU (consolidated text)*, © EU, 2014.
- [13] ***, *PED Guidelines EN v3 docs.*, Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU(PED), European Union, 2016.

[14] ***, Engineering page, https://www.engineeringpage.com/technology/thermal/fouling_factors.html

[15] ***, RED BAG: specializes software development for mechanical engineering, www.red-bag.com.

[16] ***, Tubular exchanger manufacturers association, Inc: Standards of the Tubular exchanger manufacturers association - TEMA, IX ed., 2007, New York, www.tema.org

[17] Guy, A. R. Ch. 3.2 Duple pipe heat exchangers Handbook: 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

[18] VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: VDI Heat Atlas, Second English Edition, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, 2010

[19] Nitsche, M., R. O. Gbadamosi: Heat Exchanger design guide (A practical guide for planning, selecting and designing of shell and tube exchangers), 2016 Elsevier Inc.

[20] Serth, R. W., T. G. Lestina: Process Heat Transfer: Principles, applications and rules of thumb, second ed. Copyright © 2014, Elsevier Inc.

sevier Inc.

[21] Shah, R. K., D. P. Sekulić: *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, 2003, John Wiley & Sons, Inc.

[22] Totten, G. E., D. S. MacKenzie: *Handbook of Aluminium*, vol. 7 Physical Metallurgy and Processes, 2003 by Marcel Dekker, Inc.

Autori

Milan RIKALOVIĆ,
rikalovic.milan@gmail.com

HVAC:

POTPUNO NOVI NIVO RADA I UPRAVLJANJA SISTEMOM

GRUNDFOS iSOLUTIONS



PAMETNE PUMPE ZA PAMETNA REŠENJA

Grundfos iSolutions pametne pumpe povezuje na Cloud i omogućava usluge kao što su daljinsko upravljanje pumpom, nadzor u stvarnom vremenu i analizu rada sistema. Rezultat su brža servisna reakcija i veća efikasnost sistema (pumpe). **Saznajte više na www.grundfos.rs**

be
think
innovate

GRUNDFOS Srbija d.o.o.
Omladinskih brigada 90v
11070 Novi Beograd
Tel: +381 (11) 2258 740

GRUNDFOS 