

Efektivna razlika temperatura pri razmeni toplote

Milan Rikalović, dipl. inž., "Grejanje",
Prvog maja bb, 15300 Loznica

Razlika temperatura između fluida koji se hladi (primar) i fluida koji se greje (sekundar) Δt , zavisi od karaktera razmene toplote, tj. od šeme strujanja nosioca toplote, zatim od mesta posmatranja duž površine razmene, a zatim i od vremena za nestacionarne procese. Mi posmatramo stacionarne procese koji ne zavise od vremena u periodu posmatranja, a uticaj temperaturne razlike zavisno od mesta duž površine razmene, zamenjujemo veličinom razlike temperatura koju nazivamo *efektivnom razlikom temperatura* Δt_e [°C].

Razmotrićemo osnovne šeme strujanja nosioca toplote (primarni i sekundarni fluid): istosmerno, suprotnosmerno, unakrsno i kombinovano. Na slici 1 prikazane su šeme strujanja fluida prema ovom opisu.

U radu se razmatra efektivna razlika temperatura pri razmeni toplote u izmenjivačima toplote sa istosmernim, suprotnosmernim, unakrsnim i kombinovanim strujanjem fluida –nosioca toplote. Izložene su jednačine i tabele za određivanje efektivne razlike temperatura za različite temperaturske režime primarnog i sekundarnog fluida. Na bazi vrednosti efektivnih razlika temperatura, analiziraju se najekonomičniji temperaturski uslovi pri razmeni toplote.

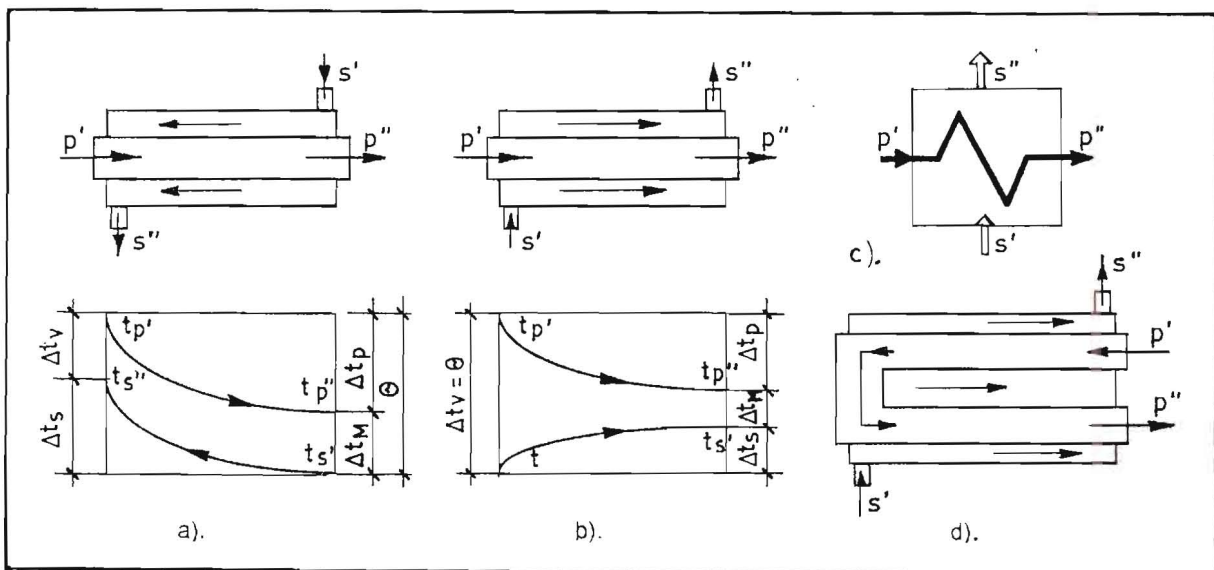
1. Efektivna temperatura u osnovnim šemama strujanja pri razmeni toplote

Za istosmerni i suprotnosmerni strujni tok, opšte je poznata jednačina za određivanje efektivne razlike temperatura kao srednje logaritamske razlike temperatura Δt_{ln} :

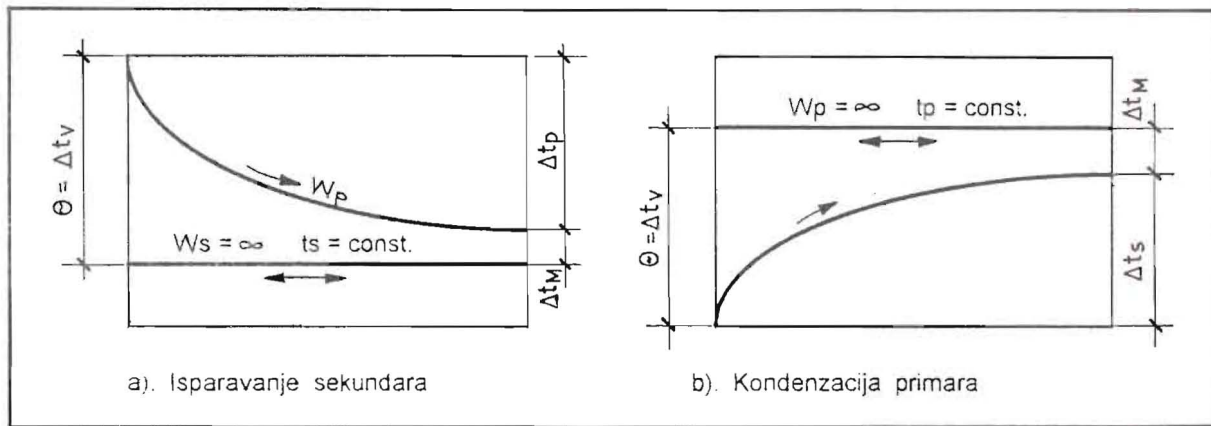
$$\Delta t_e = \Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \Delta t_v / \Delta t_m} \quad (1)$$

Ovde se Δt_v i Δt_m (°C) veća i manja razlika temperatura između primarnog i sekundarnog fluida na početku odnosno na kraju razmene toplote.

Poznata je jednačina toplotnog fluksa $Q = G c \Delta t$, gde je G [kg/s] maseni protok fluida, c [J/kg°C] specifična toplota.



Slika 1. Osnovne šeme temperaturnog toka; a) suprotnosmerno strujanje, b) istosmerno strujanje, c) unakrsno strujanje, d) kombinovano strujanje



Slika 2. Temperaturni tok u izmenjivaču toplote pri promeni agregatnog stanja; a) isparavanje sekundara; b) kondenzacija primara

ta, a Δt [$^{\circ}\text{C}$] promena temperature nosioca toplote. Na osnovu ove jednačine definiše se vodena vrednost W [$\text{W}/^{\circ}\text{C}$]:

$$\text{primara } W_p = Q / \Delta t_p = G_p c_p \text{ [W}/^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

$$\text{sekundara } W_s = Q / \Delta t_s = G_s c_s \text{ [W}/^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

Manju od vrednosti prema jednačinama (2) i (3) označimo sa W_1 , a veću kao W_2 , dakle uvek je $W_1 < W_2$. Vodene vrednosti su obrnuto proporcionalne promeni temperature, pa je stoga kod nosioca toplote sa manjom vodenom vrednošću promena temperature veća i obrnuto.

Izraz za određivanje efektivne razlike temperatura (1) važi pod sledećim uslovima:

- protoci odnosno vodene vrednosti nosioca toplote su konstantni pri prolazu kroz izmenjivač;
- koeficijent prolaza toplote k [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$] je konstantan i ne zavisi od temperature;
- nema razmene toplote sa okolinom u izmenjivaču toplote (nema gubitaka). Ovo je jedan od razloga što se fluid sa višom temperaturom smešta u cevi, odnosno potapa se u fluid koji se greje (niže temperature);
- nema uzdužnog provođenja fluida jednog nosioca toplote (s obzirom na razlike temperatura na ulazu u izmenjivač i izlazu iz njega).

U slučaju promene agregatnog stanja jednog fluida nastaje poseban slučaj, pri čemu je konstantna temperatura jednog od nosilaca toplote. Radi se o isparivačima ako je temperatura hladnijeg fluida pri razmeni konstantna, odnosno o kondenzaciji, ako je konstantna temperatura toplijeg fluida. U opštem slučaju, temperatura jednog nosioca toplote može biti konstantna samo u jednom delu toka razmene toplote (zagrevanje ili pregevanje).

Ovaj slučaj pri isparavanju zagrevanog fluida (sekundara) znači da je $t_s = \text{const}$, odnosno $\Delta t_s = 0$, što prema jednačini (3) ukazuje da mora biti $W_s = \infty$. Potpuno isti slučaj je pri kondenzaciji primarnog fluida kada je $\Delta t_p = 0$, odnosno $W_p = \infty$. Ovi granični slučajevi prenosa toplote prikazani su na slici 2.

Izvršimo upoređenje suprotnosmernog i istosmernog toka strujanja sa stanovišta temperaturskih graničnih uslova, odnosno temperatura ulaza i izlaza.

Za ovu analizu usvajamo (kao najčešći slučaj) da je $W_p < W_s$, odnosno da je $\Delta t_p > \Delta t_s$, pri čemu je $\Delta t_p = t_p' - t_p''$, odnosno $\Delta t_s = t_s'' - t_s'$, temperaturska razlika primarnog i sekundarnog fluida (' je indeks ulaza, a '' indeks izlaza u izmenjivaču), prema slici 1. Jednačina (1) postaje za slučaj suprotnosmernog strujanja:

$$\Delta t_{es} = \frac{(t_p' - t_s'') - (t_p'' - t_s')}{\ln(t_p' - t_s'') / (t_p'' - t_s')} = \frac{\Delta t_p - \Delta t_s}{\ln(\theta - \Delta t_s) / (\theta - \Delta t_p)} \quad (4)$$

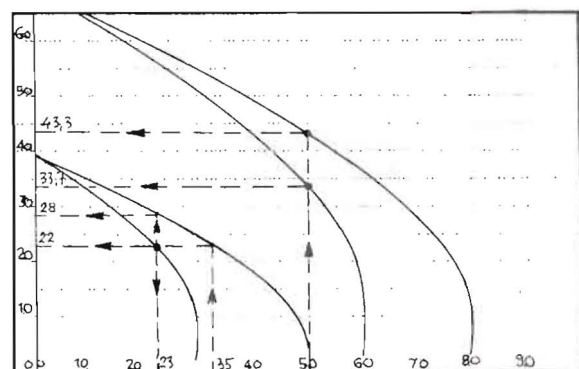
a za slučaj istosmernog strujanja:

$$\Delta t_{ei} = \frac{(t_p' - t_s') - (t_p'' - t_s'')}{\ln(t_p' - t_s') / (t_p'' - t_s'')} = \frac{\Delta t_p + \Delta t_s}{\ln \theta / (\theta - \Delta t_p - \Delta t_s)} \quad (5)$$

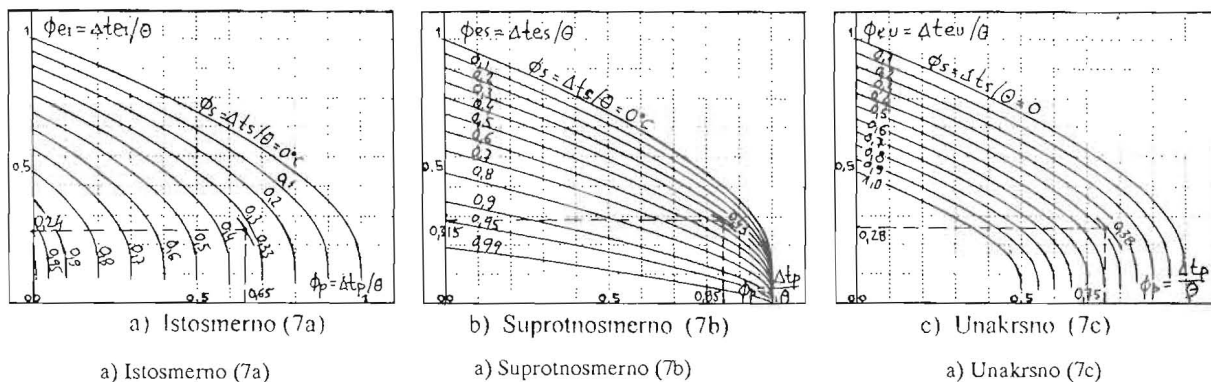
Ovde je uvedena nova temperatura θ ($^{\circ}\text{C}$) koju označavamo kao maksimalnu temperatursku razliku u izmenjivaču toplote između nosilaca toplote.

Na slici 3 prikazane su jednačine (4) i (5) za slučaj $\Delta t_s = 20^{\circ}\text{C}$ i θ kao parametrom.

Na dijagramu se vidi da je za isto Δt_p , uvek Δt_e veće pri suprotnosmernom strujanju nego pri istosmernom. Takođe se vidi da postoji područje u kome je moguće samo suprotnosmerno strujanje. Prema jednačinama (4) i (5), može se zaključiti da pri suprotnosmernom strujanju mo-



Slika 3. Uporedni dijagram efektivne temperature za suprotnosmerno (S) i istosmerno (I) strujanje. Za $\Delta t_p = 50^{\circ}\text{C}$ i $\theta = 80^{\circ}\text{C}$ ($t_p' / t_p'' = 150 / 100^{\circ}\text{C}$) je $\Delta t_{es} = 43,3^{\circ}\text{C}$, a $\Delta t_{ei} = 33,7^{\circ}\text{C}$. Pri $\Delta t_p = 35^{\circ}\text{C}$ i $\theta = 50^{\circ}\text{C}$ ($t_p' / t_p'' = 120 / 85^{\circ}\text{C}$) je $\Delta t_{es} = 22^{\circ}\text{C}$, a istosmerno nije moguće (moguće je pri $\Delta t_p = 23^{\circ}\text{C}$)



Slika 4. Dijagram promene stepena efektivne temperature u zavisnosti od stepena promene temperature primara za istosmerno, suprotnosmerno i unakrsno strujanje.

ra biti $\theta - \Delta t_p > 0$, a pri istosmernom $\theta - \Delta t_p - \Delta t_s > 0$, iz čega sledi da je suprotnosmerno strujanje povoljnije, jer za isto θ možemo imati veće Δt_p , a time i veći kapacitet razmene toplote. Isto tako, pri suprotnosmernom strujanju izlazna temperatura sekundarnog fluida može biti veća od izlazne temperature primarnog fluida, što je pri istosmernom strujanju nemoguće. Dakle, može se zaključiti da je suprotnosmerno strujanje uvek bolje od istosmernog, sa stanovišta graničnih temperaturnih uslova, osim u slučaju kada je $\Delta t_p = 0$ (kondenzacija) i kada je $\Delta t_{es} = \Delta t_{ei}$, što se postiže i pri $\Delta t_s = 0$ (isparavanje). U tom slučaju šema toka fluida nije važna.

Ovu analizu ćemo uopštiti uvođenjem bezdimenzionalnih karakteristika temperature, koje ćemo zvati stepenom promene temperature:

$$\Phi_p = \Delta t_p / \theta, \quad \Phi_s = \Delta t_s / \theta, \quad \Phi_c = \Delta t_c / \theta \quad (6)$$

Dakle, uvedeni su odnosi promena temperatura primarnog i sekundarnog fluida prema maksimalnoj razlici temperatura u izmenjivaču. Jasno je da je taj odnos uvek manji, ili u graničnim uslovima jednak jedinici ili nuli ($0 \leq \Phi \leq 1$).

Za efektivnu temperaturu, s obzirom da ona zavisi od režima strujanja fluida u izmenjivaču, još ćemo uvesti sledeće oznake: $\Phi_{ei} = \Delta t_{ei} / \theta$, $\Phi_{es} = \Delta t_{es} / \theta$, $\Phi_{eU} = \Delta t_{eU} / \theta$, koje se odnose na istosmerno, suprotnosmerno i unakrsno strujanje.

Izraze (4 i 5) podelimo sa θ i uvedemo oznake prema (6) pa ćemo dobiti:

$$\text{ISTOSMIERNO:} \quad \Phi_{ei} = \frac{\Phi_p + \Phi_s}{\ln \frac{1}{1 - \Phi_p - \Phi_s}} \quad (7a)$$

$$\text{SUPROTNOSMERNO:} \quad \Phi_{es} = \frac{\Phi_p - \Phi_s}{\ln \frac{1 - \Phi_s}{1 - \Phi_p}} \quad (7b)$$

$$\text{UNAKRSNO:} \quad \Phi_{eU} = \frac{\Phi_p}{\ln \frac{2 - \Phi_s}{2 - 2\Phi_p - \Phi_s}} \quad (7c)$$

Jednačina (7c) za unakrsno strujanje izvedena je iz poznate jednačine za stepen promene temperature [vidi kasnije jednačine (13), što ovde nećemo dokazivati]. Na slici 4 prikazani su dijagrami za određivanje efektivne temperaturne razlike za istosmerno, suprotnosmerno i unakrsno strujanje prema jednačinama (7a), (7b) i (7c).

Posmatrajući jednačine (7abc) u skladu sa njihovim fizičkim karakterom, može se zaključiti da vrednosti Φ moraju uvek prema jednačini (6) biti: ($0 \leq \Phi \leq 1$). Dakle pri is-

tosmernom strujanju za $1 - \Phi_p - \Phi_s = 0$, odnosno $\Phi_p + \Phi_s = 1$, kada dobijamo $\Phi_{ei} = 1/0 > 1$, što je van uslova moguće vrednosti, govori da ne može pri istosmernom strujanju biti $\Delta t_p + \Delta t_s = \theta$, odnosno izlazne temperature primara i sekundara ne mogu se izjednačiti. Dakle, mora biti $\Delta t_p + \Delta t_s < \theta$.

Pri suprotnosmernom strujanju za $\Phi_p = \Phi_s$, tj. $\Delta t_p = \Delta t_s$, nastaje neodređeni slučaj $0/0$, koji se rešava derivacijom, kao što sledi:

$$\begin{aligned} \Phi_{es} &= \lim_{\Phi_p \rightarrow \Phi_s} \frac{[\Phi_p(1-x)]'}{\left[\ln \frac{1 - \Phi_p x}{1 - \Phi_p} \right]'} = \\ &= \lim_{\Phi_p \rightarrow \Phi_s} \frac{-\Phi_p}{\frac{1 - \Phi_p}{1 - \Phi_p} (-\Phi_p)} = 1 - \Phi_p = 1 - \Phi_s \\ &\quad 1 - \Phi_p x \quad 1 - \Phi_p \end{aligned}$$

Ovde je uvedena smena $x = \Phi_s / \Phi_p$, $\Phi_s \rightarrow \Phi_p$, odnosno $x \rightarrow 1$. Dakle, u ovom specijalnom slučaju je za $\Delta t_p = \Delta t_s$ efektivna temperaturna razlika $\Delta t_{es} = \theta - \Delta t_p = \theta - \Delta t_s$, odnosno strujne krive su paralelne (za dovoljno veliku površinu razmene može se teorijski postići da je $\Delta t_p = \Delta t_s = 0$). Kako je $\Delta t_s < \theta$, $\Delta t_p < \theta$, možemo sabiranjem pisati $\Delta t_p + \Delta t_s < 2\theta$.

Pri unakrsnom strujanju neodređeni slučaj nastaje pri $\Phi_p = 0$, što nema svrhe razmatrati, jer u tom slučaju nema razmene toplote. Međutim, jasno je da mora biti $2 - 2\Phi_p - \Phi_s > 0$, odnosno $\Delta t_p + \Delta t_s < 2\theta - \Delta t_p$.

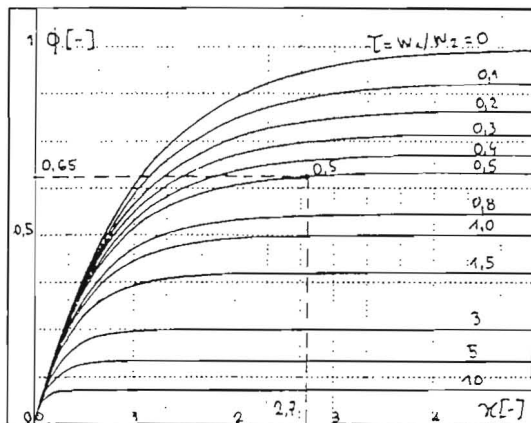
Ako kao kriterijum razmene toplote u izmenjivaču postavimo uslov što većeg zbira razlika temperatura primara i sekundara, onda je najlošije istosmerno strujanje za koji taj zbir ne može preći vrednost maksimalne razlike temperatura u izmenjivaču θ , pri suprotnosmernom strujanju ne može biti veća od 2θ , a unakrsno strujanje se po tom kriterijumu nalazi između prethodna dva strujanja ($2\theta - \Delta t_p$).

2. Bezdimenzionalne karakteristike izmenjivača

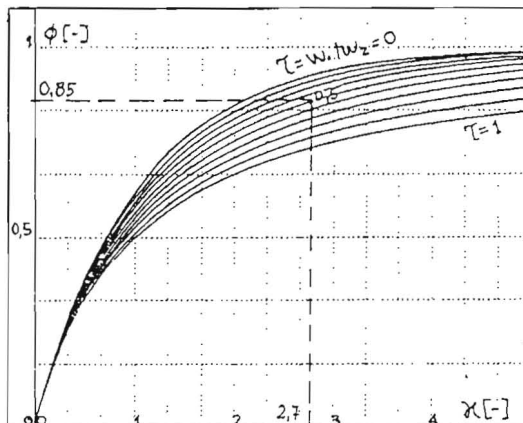
Za dalju analizu uvešćemo poznate bezdimenzionalne karakteristike izmenjivača toplote (prema raznim autorima: Bošnjakoviću, Rietschelu, Slipčeviću, Reknagelu, Sokolovu itd.)

a) Odnos vodenih vrednosti (ili toplotnih kapaciteta)

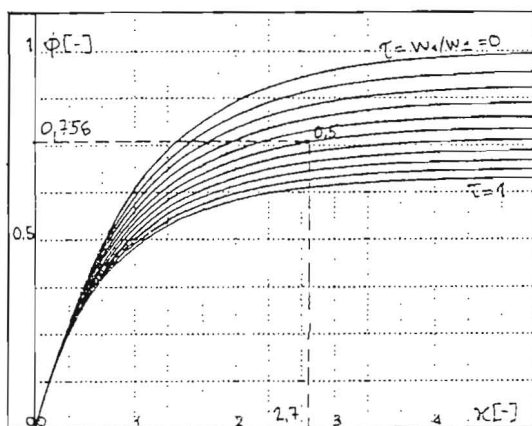
$$\tau = W_1/W_2 = \Delta t_2/\Delta t_1 = W_p/W_s = \Delta t_s/\Delta t_p \quad (8)$$



a) Dijagram Φ, κ, τ za istosmerno strujanje



b) Dijagram Φ, κ, τ za suprotnosmerno strujanje



c) Dijagram Φ, κ, τ unakrsno strujanje

Slika 5. Dijagram veze veličina Φ, κ, τ za istosmerni, suprotnosmerni i unakrsni strujni tok razmene toplote

Osnovna pretpostavka je da je $\tau < 1$, odnosno da je $W_1 \ll W_2$, ili $\Delta t_s < \Delta t_p$ (što je skoro redovan slučaj u daljinskom grejanju). Ukoliko pak ova pretpostavka nije

tačna, ili u delu kombinovanih izmenjivača po (8) bude $\tau > 1$, indekse jednostavno treba zameniti (dakle $\tau = W_s / W_p = \Delta t_p / \Delta t_s$, ili uvesti $\tau = 1/\tau$).

b) Karakteristika prelaza toplote (koeficijent režima)

$$k = kF/W_1 = \Delta t_1/\Delta t_e = kF/W_p = \Delta t_p/\Delta t_e \quad (9)$$

Dobija se iz jednačine za toplotni kapacitet: $Q = W_1 \Delta t_p = kF \Delta t_e$.

c) Stepennost promene temperature (pogonska karakteristika izmenjivača)

$$\Phi = \Delta t_1/\theta = \Delta t_p/\theta, \quad \Phi = \Delta t_2/\theta \quad \tau = \Delta t_s/\theta \quad (10)$$

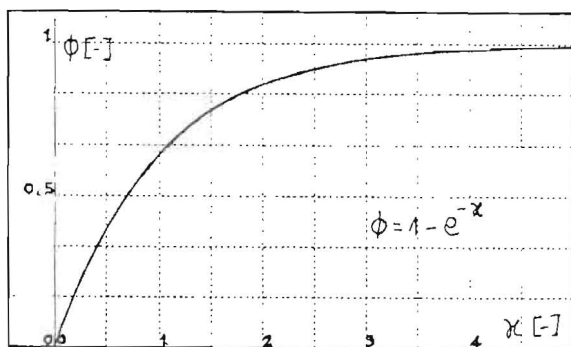
Pri $\tau = W_1/W_2 = W_p/W_s = \Delta t_p/\Delta t_s > 1$ biće $\Phi = \Delta t_2/\theta = \Delta t_s/\theta$, $\Phi = \Delta t_1/\theta \tau = \Delta t_p/\theta \tau$. Veza novouvedenih karakteristika se može izraziti preko sledećih jednačina koje navodimo prema Recknagel/Spriengeru, u kojima treću karakteristiku možemo odrediti ako su poznate ostale dve:

$$\Phi = \frac{1 - e^{-k(1+\tau)}}{1 + \tau} \quad \text{ISTOSMERNO STRUJANJE} \quad (11)$$

$$\Phi = \frac{1 - e^{-k(1-\tau)}}{1 - \tau e^{-k(1-\tau)}} \quad \text{SUPROTNOSMERNO STRUJANJE} \quad (12)$$

Tabelami pregled rezultata proračuna

Naziv proračunske veličine	Oznaka	Jed. mere	Istosm.	Unakr.	Suprot.
Početna temperaturna razlika	θ	$^{\circ}\text{C}$	80	80	80
Stepennost hlađenja (11),(12),(13)	$\Phi = \Phi_p$	-	0,6542	0,7558	0,8507
Pad temperature primara $\Delta t_p = \Phi \theta$	Δt_p	$^{\circ}\text{C}$	52,34	60,46	68,06
Porast temperature sekundara $\Delta t_s = \Phi \theta \tau$	Δt_s	$^{\circ}\text{C}$	26,27	30,35	34,17
Stepennost zagrevanja $\Phi_s = \Delta t_s/\theta$	Φ_s	-	0,3283	0,375	0,4271
$\Phi_e = \Delta t_e/\theta$ (7abc)	Φ_e	-	0,2425	0,2788	0,315
Srednja efektivna temperatura $\Delta t_e = \Phi_e \theta$	Δt_e	$^{\circ}\text{C}$	19,4	22,3	25,2
Izlazna temperatura primara	t_p''	$^{\circ}\text{C}$	97,66	89,54	81,94
Izlazna temperatura sekundara	t_s'	$^{\circ}\text{C}$	96,27	100,35	104,17
Kapacitet prema $Q_e = k F \Delta t_e$	Q_e	kW	582	669	756
Kapacitet prema $Q_p = W_p \Delta t_p$	Q_p	kW	581	671	755
Kapacitet prema $Q_s = W_s \Delta t_s$	Q_s	kW	580,6	670,7	755



Slika 6. Dijagram veze veličina Φ , k i $\tau = 0$ pri isparavanju $\Delta t_s = 0^\circ\text{C}$ i pri kondenzaciji $\Delta t_p = 0^\circ\text{C}$

$$\Phi = \frac{2(1 - e^{-k})}{2 + \tau(1 - e^{-k})} \quad \text{UNAKRSNO STRUJANJE} \quad (13)$$

Iz izraza (10) dobija se $\Delta t_p = \Phi \theta$, odnosno $\Delta t_s = \tau \Phi \theta$ (pri $\tau = W_p/W_s < 1$) za slučaj $\tau = W_p/W_s > 1$ dobija se $\Delta t_s = \Phi \theta$ i $\Delta t_p = \Phi \theta/\tau$. Sada je količina razmenjene toplote prema (2) i (3):

$$Q_p = Q_s = W_p \Phi \theta \quad (Q_p = Q_s = W_p \Phi \theta/\tau, \text{ pri } \tau > 1) \quad (14)$$

Iz poslednje jednačine može se zaključiti da je stepen promene temperature kao neki faktor efikasnosti izmenjivača toplote (uvek je manji od 1) kojim se umanjuje veličina θ . Bezdimenzionalne vrednosti Φ_p , Φ_s i Φ_e koje smo naveli (jednačine 6), prema jednačinama (8), (9) i (10) možemo pisati (pri čemu vrednost Φ može postati i Φ_p i Φ_s):

$$\begin{aligned} \Phi_p &= \Phi, \text{ a } \Phi_s = \tau \Phi \\ (\Phi_s &= \Phi, \Phi = \Phi_p/\tau \text{ pri } \tau > 1). \\ \tau &= \Phi_s/\Phi_p \quad (\tau = \Phi_p/\Phi_s, \tau > 1) \\ k &= \Delta t_p/\Delta t_e = \Phi_p/\Phi_e \quad (k = \Delta t_s/\Delta t_e = \Phi_s/\Phi_e, \text{ za } \tau > 1) \end{aligned} \quad (15)$$

Na sl. 5 prikazani su dijagrami stepeni promene temperature prema jednačinama (11), (12), (13) za istosmerno, suprotnosmerno i unakrsno strujanje.

Za $\tau = 0$, sve tri jednačine za određivanje stepena promene temperature postaju iste:

$$\Phi = 1 - e^{-k}$$

a to se odnosi na slučaj $\Delta t_s = 0$, odnosno kada sekundarni fluid nema promene temperature isparavanje, odnosno kondenzacije $\Delta t_p = 0$ pri $\tau = W_p/W_s > 1$. Na slici 6 je prikazan tok funkcije graničnog slučaja pri $\tau = 0$ (isparavanje i kondenzacija).

Primer

U nekom izmenjivaču je $kF = 30 \text{ kW}/^\circ\text{C}$, a primarni fluid je voda ulazne temperature 150°C i protoka $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Sekundarni fluid je voda ulazne temperature 70°C protoka $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

Određiti izlazne temperature fluida i kapacitet razmene toplote.

$$W_1 = W_p = G_p c_p = 10 \cdot 4,25 \cdot 0,94/3,6 = 11,1 \text{ kW}/^\circ\text{C}$$

$$W_2 = W_s = G_s c_p = 20 \cdot 4,19 \cdot 0,98/3,6 = 22,1 \text{ kW}/^\circ\text{C}$$

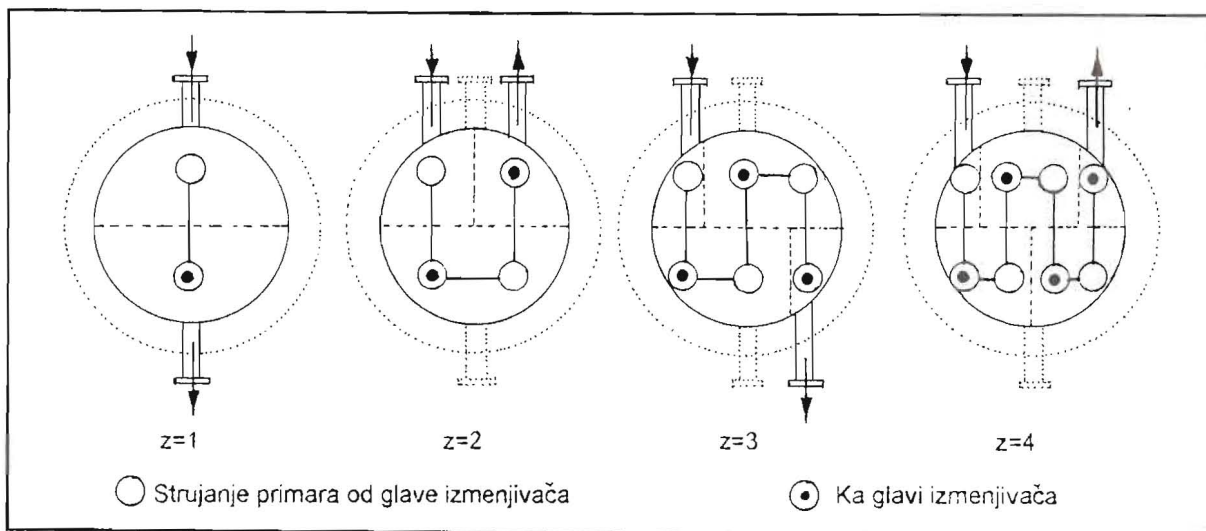
$$\tau = W_p/W_s = 11,1/22,1 = 0,502$$

$$k = kF/W_p = 30/11,1 = 2,7$$

3. Efektivna razlika temperatura pri kombinovanom strujanju

Ovaj deo proračuna je praktično najvažniji s obzirom da se osnovni režimi strujanja u izmenjivačima toplote ređe pojavljuju u tom obliku, ili se samo pojavljuju u delu izmenjivača. Kod višeprolaznih izmenjivača zastupljeni su tzv. kombinovani režimi strujanja. Jedan prolaz definišemo kao put u kome su nosioci toplote u međusobnom kontaktu preko površine razmene na efektivnoj dužini izmenjivača.

Povećanje broja prolaza pri razmeni toplote uslovljeno je zahtevom za povećanjem efikasnosti razmene toplote odnosno povećanjem koeficijenta prolaza toplote, odnosno brzine strujanja. To se tehnološki postiže ugradnjom određenog broja pregrada u glavi cevnog registra. Pomenu tim pregradama podelili smo izmenjivač na više manjih izmenjivača (dalje ćemo ih zvati *sekcijama*). U suštini sekcije su više manjih izmenjivača vezanih serijski. U ovom razmatranju ograničićemo se na model sa najviše osam



Slika 7. Model izmenjivača sa kombinovanim strujanjem

prolaza primarnog fluida i dva prolaza sekundarnog fluida, odnosno na četiri stepena prolaza:

$$\begin{aligned} z_p &= \max 8 \\ z_s &= \max 2 \\ z &= z_p/z_s = 8/2 = \max 4 \end{aligned} \quad (16)$$

Na slici 7 prikazan je navedeni model izmenjivača sa stepenom prolaza $z = 1, 2, 3$ i 4 .

U jednoj sekciji ostvaruje se suprotnosmerno ili istosmerno strujanje. Isto tako s obzirom na mesta priključaka karakter strujanja se ne menja duž dva prolaza, tako da se broj sekcija određuje kao stepen prolaza $z = z_p/z_s$. Sekcije ćemo označavati rimskim brojevima I, II, III, IV.

Za dalje razmatranje kombinovanog režima strujanja pri razmeni toplote uvešćemo prema slici 7 nekoliko pretpostavki:

- Koeficijent prolaza toplote k je konstantan u svim delovima izmenjivača. Ova pretpostavka teorijski nije tačna, jer k zavisi od srednje temperature nosioca toplote, a jasno je da sekcije imaju različite srednje temperature. Međutim, uticaj srednje temperature nije veliki, a pored toga u sekcijama postoji lokalno mešanje sekundarnog fluida, pa se za praktične inženjerske proračune može smatrati da je k konstantno.
- Površine razmene u sekcijama su iste, tj. površina razmene toplote u sekciji je $F_z = F/z$, gde je z broj sekcija u izmenjivaču. Protoci nosioca toplote se menjaju na različite načine. Primarni fluid (koji struji kroz cevi) ima isti protok u svim sekcijama koji je jednak protoku ze ceo izmenjivač. Protok sekundarnog fluida koji struji u plaštu oko cevi se deli po sekcijama, tako da je $W_{sI} = W_{sII} = W_{sIII} = W_{sIV} = W_s/z$, odnosno protok se deli podjednako na broj sekcija izmenjivača.
- Uticaj tzv. lekažnog strujanja je zanemarljiv. Lekažno strujanje je obilazno strujanje u plaštu izmenjivača zbog nesavršenog zaptivanja uzdužne pregrade.
- Nosioci toplote ne menjaju fazu. Ovo smo pitanje već razmotrili u odeljku 1, na mestu gde su analizirani osnovni režimi strujanja, pri čemu je zaključeno da su pri promeni faze jednog nosioca toplote svi režimi strujanja ravnopravni, pa nema potrebe za kombinovanim režimom. Međutim, ova pretpostavka se odnosi na slučaj pojave nekontrolisane promene faze sekundarnog (grejanog) fluida, što se može desiti u pojedinim sekcijama izmenjivača ako su radni pritisci ispod pritiska ključanja.

Bezdimenzionalne veličine za ceo izmenjivač (oznaka bez indeksa) definišu se prema jednačinama (8), (9) i (10):

$$\tau = W_p/W_s = \Delta t_s/\Delta t_p, \quad \kappa = k F/W_p, \quad \Phi = \Delta t_p/\theta.$$

Podrazumeva se da je $W_p/W_s < 1$, odnosno $\Delta t_s < \Delta t_p$.

Saglasno dosadašnjem razmatranju, uvešćemo još nekoliko oznaka:

Sekcijski odnos vodenih vrednosti prema (8):

$$\begin{aligned} \tau_z &= \tau I = \tau II = \tau III = \tau IV = \\ &= z \cdot W_p/W_s = z \cdot \Delta t_s/\Delta t_p = z \cdot \tau < 1 \end{aligned} \quad (17)$$

Sekcijski koeficijent režima prema (9):

$$\begin{aligned} \kappa_z &= \kappa I = \kappa II = \kappa III = \kappa IV = \\ &= k \cdot F_z/W_p = k \cdot F/W_p \cdot z = \kappa/z \end{aligned} \quad (18)$$

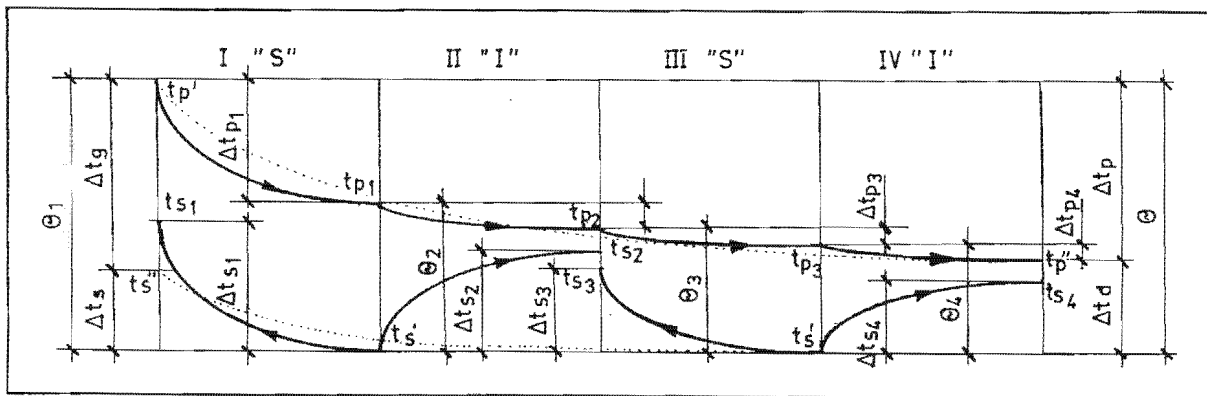
Sekcijski stepen promene temperature prema (10):

$$\begin{aligned} \Phi_I &= \Delta t_{p1}/\theta_1, \quad \Phi_{II} = \Delta t_{p2}/\theta_2, \\ \Phi_{III} &= \Delta t_{p3}/\theta_3, \quad \Phi_{IV} = \Delta t_{p4}/\theta_4, \end{aligned} \quad (19)$$

Iz navedenih jednačina se vidi da je samo sekcijski stepen promene temperature različit po sekcijama, dok su sekcijski odnos vodenih vrednosti i koeficijent režima isti za sve sekcije i u zbiru čine veličinu za ceo izmenjivač. Jasno je da ako je $\tau < 1$, ne mora biti i $\tau_z < 1$. Očigledno je da pri $z \cdot \tau < 1$ važe jednačine (17), (18) i (19). Međutim ako je $\tau_z = z \cdot \tau > 1$, pomenute jednačine se moraju napisati u skladu sa definicijom bezdimenzionalnih karakteristika. Kako je za ceo izmenjivač $\tau < 1$ odnosno $\Delta t_s < \Delta t_p$, sekcijski odnos vodenih vrednosti može biti i veći i manji i jednak jedinici, zavisno od stepena prolaza z . Npr. kada je $\Delta t_s = 20^\circ\text{C}$, da bi važila jednačina (17), mora biti $\Delta t_p \geq 40^\circ\text{C}$ za $z = 2$, $\Delta t_p \geq 60^\circ\text{C}$ za $z = 3$ i $\Delta t_p \geq 80^\circ\text{C}$ za $z = 4$.

Sekcijske promene temperature su međusobno povezane prema jednačini (19), jer su izlazne temperature iz prethodne sekcije istovremeno i ulazne temperature naredne sekcije. Međutim, to važi samo za primarni fluid (odnosno fluid koji ide kroz cevi), dok za sekundarni fluid po ovom modelu važi da je u svim sekcijama isti režim strujanja, a da se konačna temperatura na izlazu iz izmenjivača dobija kao srednja vrednost sekcijskih izlaznih temperatura.

Pošto u kombinovanom režimu strujanja imamo razne kombinacije suprotnosmernog i istosmernog strujanja, postavlja se pitanje sa kojim režimom započeti strujanja: naravno, sa suprotnosmernim strujanjem, koje obezbeđuje veću sekcijsku efektivnu razliku temperatura. Naredni režim tehnološki mora biti istosmerni, pa redom suprotnosmerni itd. Tako dobijamo da izmenjivači za $z = z_p/z_s = 2$ imaju jednu suprotnosmernu i jednu istosmernu sekciju, pri $z = 3$



Slika 8. Temperaturski tok četvorosekcijskog izmenjivača toplote.

dve suprotnosmerne i jednu istosmernu sekciju, a pri $z = 4$ po dve suprotnosmerne i istosmerne sekcije. S obzirom na ranije rečeno o suprotnosmernom i istosmernom strujanju, izmenjivači sa tri sekcije imaju najveće učešće u suprotnosmernom strujanju, pa i najveću efikasnost (u odnosu $z = 2$ i 4 pri istom k).

Razmotirićemo režim strujanja za $z = 4$, s obzirom da ostali slučajevi nastaju iz ovoga, smanjenjem sekcijskog stepena z . Na sl. 8 je prikazan temperaturni režim četvorosekcijskog izmenjivača toplote.

Na slici su:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta & \theta_2 + \Delta t_{p1} &= \theta \\ \theta_3 + \Delta t_{p1} + \Delta t_{p2} &= \theta & \theta_4 + \Delta t_{p1} + \Delta t_{p2} + \Delta t_{p3} &= \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{p1} &= t_p' - t_{p1} & \Delta t_{p2} &= t_{p1} - t_{p2} \\ \Delta t_{p3} &= t_{p2} - t_{p3} & \Delta t_{p4} &= t_{p3} - t_p'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{s1} &= t_{s1} - t_s' & \Delta t_{s2} &= t_{s2} - t_s' \\ \Delta t_{s3} &= t_{s3} - t_s' & \Delta t_{s4} &= t_{s4} - t_s' \end{aligned}$$

Na slici je takođe (ili sabiranjem jednačina po Δt_p):

$$\Delta t_{p1} + \Delta t_{p2} + \Delta t_{p3} + \Delta t_{p4} = \Delta t_p \quad (20)$$

Na njoj se vidi da se maksimalna temperaturska razlika u svakoj sekciji izmenjivača može izraziti preko maksimalne razlike za ceo izmenjivač i pada temperature fluida kroz cevi. Ako jednačinu (20) podelimo sa θ i uvedemo oznake odnosa promene temperature primarnog fluida po sekcijama prema maksimalnoj temperaturskoj razlici za ceo izmenjivač, jednačina (20) postaje:

$$\Phi_p = \Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III} + \Phi_{IV} \quad (21)$$

Pošto smo utvrdili da u kombinovanom režimu postoje samo dva tipa osnovnog strujanja – *suprotnosmerno* i *istosmerno*, kako su sekcijske karakteristike τ_z i κ_z prema jednačinama (17) i (18) međusobno jednake, to će biti dve jednačine za određivanje sekcijskog stepena promene temperature prema jednačinama (11) i (12):

$$\Phi_I = \Phi_{III} = \Phi_{zs} = \frac{1 - e^{-\kappa_z(1-\tau_z)}}{1 - \tau_z e^{-\kappa_z(1-\tau_z)}} \quad (22)$$

SUPROTNOSMerno

$$\Phi_{II} = \Phi_{IV} = \Phi_{zi} = \frac{1 - e^{-\kappa_z(1+\tau_z)}}{1 + \tau_z} \quad (23)$$

ISTOSMerno

Ako se uvede smena:

$$a = e^{-\kappa_z(1-\tau_z)} \quad b = e^{-\kappa_z(1+\tau_z)}$$

u jednačine (21) i (22), dobija se:

$$\begin{aligned} a &= e^{-\kappa_z(1-\tau_z)} = \frac{1 - \Phi_{zs}}{1 - \tau_z \Phi_{zs}}, \\ b &= e^{-\kappa_z(1+\tau_z)} = 1 - \Phi_{zi} (1 + \tau_z) \end{aligned} \quad (24)$$

Određićemo nekoliko slučajeva na bazi definicije bezdimenzionalnih karakteristika izmenjivača toplote.

A) $W_{pz}/W_{sz} < 1$ prema jednačinama (17), (18) i (19) je:

$$\begin{aligned} \tau_z &= W_{pz}/W_{sz} = z \cdot \tau < 1, \text{ tj. } \Delta t_s < \Delta t_{p/z} \\ \kappa_z &= k F_z/W_{pz} = k F/z W_p = \kappa/z, \\ \Phi_z &= \Delta t_{pz}/\theta_z, \end{aligned} \quad (25)$$

B) $W_{pz}/W_{sz} > 1$ je slično:

$$\begin{aligned} \tau_z &= W_{sz}/W_{pz} = W_s/z W_p = 1/z \cdot \tau < 1 \\ \text{tj. } z \cdot \tau &> 1, \text{ tj. } \Delta t_s > \Delta t_{p/z}, \\ \kappa_z &= k F_z/W_{sz} = k F/z (W_s/z) = \\ &= k F/W_s = k F/(W_p/\tau) = \tau \kappa \\ \Phi_z &= \Delta t_{sz}/\theta_z = \Delta t_{pz}/\tau_z \theta_z = \Delta t_{pz}(t \cdot z)/\theta_z. \end{aligned} \quad (26)$$

C) $W_{pz}/W_{sz} = 1$, prelazni slučaj između A i B.

$$\begin{aligned} \tau_z &= z \cdot \tau = 1, \text{ tj. } \Delta t_s = \Delta t_{p/z}, \\ \kappa_z &= k F_z/W_{sz} = k F_z/W_{pz} = \\ &= k F/z (W_s/z) = k F/z W_p = \tau \kappa = \kappa/z \\ \Phi_z &= \Delta t_{sz}/\theta_z = \Delta t_{pz}/\tau_z \theta_z = \Delta t_{pz}/\theta_z. \end{aligned} \quad (27)$$

U gornjim jednačinama u skladu sa ranijim oznakama za ceo izmenjivač i sekcije uzeto je: $\tau = W_p/W_s = \Delta t_s/\Delta t_p$, $k = k F/W_p = \Delta t_p/\theta$, $F_z = F/z$, $F_{pz} = F_p$, $W_{sz} = W_s/z$, $W_{pz} = W_p$. Napominjemo da su sekcijske promene temperature označene sa Φ_I do Φ_{IV} , a oznake koje smo obeležili sa Φ_1 do Φ_4 su uvedene kao matematička smena, zato što nisu poznate maksimalne temperaturske razlike po sekcijama θ_z .

Jednačine (25), (26) i (27) možemo pisati u obliku:

A) $z \cdot \tau < 1$

$$\begin{aligned} \tau_z &= \tau \cdot z = z \cdot \Delta t_s/\Delta t_p = z \cdot \Phi_s/\Phi_p \\ \kappa_z &= \kappa/z = k F/z W_p = (Q/\Delta t_c) / z(Q/\Delta t_p) = \\ &= \Delta t_p/z \Delta t_e = \Phi_p / z \Phi_e \end{aligned} \quad (28)$$

B) $z \cdot \tau > 1$

$$\begin{aligned} \tau_z &= 1/\tau \cdot z = 1/z \cdot (\Delta t_s/\Delta t_p) = \Phi_p/z \Phi_s \\ \kappa_z &= \tau \cdot \kappa = (\Delta t_s/\Delta t_p) (k F/W_p) = \\ &= (\Phi_s/\Phi_p) (\Phi_p/\Phi_e) = \Phi_s/\Phi_e \end{aligned} \quad (29)$$

C) $z \cdot \tau = 1$

$$\begin{aligned} \tau_z &= z \cdot \Delta t_s/\Delta t_p = 1, \quad z \Phi_s = \Phi_p \\ \kappa_z &= \kappa/z = \tau \kappa = \kappa/z = \Phi_p/z \Phi_e = \\ &= z \Phi_s/z \Phi_e = \Phi_s/\Phi_e \end{aligned} \quad (30)$$

Φ_e je definisano ranije, jednačinom (6).

Vrednosti τ_z , κ_z iz ovih jednačina treba uneti u jednačinu (24) za vrednosti a i b. Vrednosti sekcijskih promena temperature Φ_z po jednačini (19) uzimajući u obzir jednačine (22) i (23), tj. u neparnim sekcijama je suprotnosmerno strujanje, a u parnim sekcijama istosmerno strujanje, tj. $\Phi_I = \Phi_{III} = \Phi_{zs}$, $\Phi_{II} = \Phi_{IV} = \Phi_{zi}$, dakle:

$$\Delta t_{p1}/\theta_1 = \Delta t_{p3}/\theta_3 \quad \Delta t_{p2}/\theta_2 = \Delta t_{p4}/\theta_4$$

$$\text{za } \tau_z = \tau \cdot z < 1$$

$$\Delta t_{s1}/\theta_1 = \Delta t_{s3}/\theta_3 \quad \Delta t_{s2}/\theta_2 = \Delta t_{s4}/\theta_4$$

$$\text{za } \tau_z = 1/\tau \cdot z < 1$$

kako je u drugoj jednačini $\tau_z = \Delta t_{sz}/\Delta t_{pz}$, tj. $\tau_z \Delta t_{pz} = \Delta t_{sz}$, zamenom se vidi da je druga jednačina ista što i prva. Isto važi i ako je $\tau \cdot z = 1$, samo je tada $\Delta t_{sz} = \Delta t_{pz}$.

Iz relacije koje se vide na slici 8, dobija se:

$$\theta_1 = \theta$$

$$\theta_2 = \theta - \Delta t_{p1}$$

$$\theta_3 = \theta - \Delta t_{p1} - \Delta t_{p2}$$

$$\theta_4 = \theta - \Delta t_{p1} - \Delta t_{p2} - \Delta t_{p3}$$

Tabela 1. Efektivna razlika temperature Δt_e za izmenjivače tipa VODA-VODA

		z = 1		z = 2		z = 3		z = 4		
$\Delta t_s = 70/90 = 20^\circ\text{C}$	$t_p'' = 75^\circ\text{C}$	t_p' $^\circ\text{C}$	Δt_p $^\circ\text{C}$	Δt_{e1} $^\circ\text{C}$	Δt_{e2} $^\circ\text{C}$	η_2	Δt_{e3} $^\circ\text{C}$	η_3	Δt_{e4} $^\circ\text{C}$	η_4
		110	35	10,8	4	0,37	—	—	—	—
		115	40	12,4	5,9	0,48	—	—	—	—
		120	45	14	7,4	0,53	8,7	0,62	5,4	0,39
		130	55	16,8	10	0,60	11	0,65	9,1	0,54
		135	60	18,2	11,4	0,63	12,7	0,69	11	0,60
		140	65	19,5	12,5	0,64	14,1	0,72	12,2	0,63
		145	70	20,9	13,7	0,66	15,4	0,74	13,7	0,66
		150	75	22,1	14,8	0,67	16,7	0,76	14,9	0,67
		160	85	24,6	17,3	0,70	19,2	0,78	17,6	0,72
		170	95	27,1	19,5	0,72	21,6	0,80	20,1	0,74
		180	105	29,4	21,6	0,73	23,9	0,81	22,5	0,77

		z = 1		z = 2		z = 3		z = 4		
$\Delta t_s = 70/90 = 20^\circ\text{C}$	$t_p'' = 80^\circ\text{C}$	t_p' $^\circ\text{C}$	Δt_p $^\circ\text{C}$	Δt_{e1} $^\circ\text{C}$	Δt_{e2} $^\circ\text{C}$	η_2	Δt_{e3} $^\circ\text{C}$	η_3	Δt_{e4} $^\circ\text{C}$	η_4
		110	30	14,4	8,6	0,60	9,2	0,64	8,2	0,57
		120	40	18,2	12,5	0,69	13,6	0,75	12,3	0,68
		130	50	21,6	16	0,74	17	0,79	15,8	0,73
		135	55	23,3	17,4	0,75	18,7	0,8	17,5	0,75
		140	60	24,9	18,7	0,75	20,1	0,81	19	0,76
		145	65	26,4	20,2	0,77	22	0,83	20,7	0,78
		150	70	27,9	21,8	0,78	22,3	0,84	22	0,79
		160	80	30,8	24,6	0,80	26,0	0,85	25	0,81
		170	90	33,7	27,3	0,81	28,8	0,85	27,6	0,82
		180	100	36,4	29,7	0,82	31,7	0,87	30,6	0,84

		z = 1		z = 2		z = 3		z = 4		
$\Delta t_s = 70/90 = 20^\circ\text{C}$	$t_p'' = 90^\circ\text{C}$	t_p' $^\circ\text{C}$	Δt_p $^\circ\text{C}$	Δt_{e1} $^\circ\text{C}$	Δt_{e2} $^\circ\text{C}$	η_2	Δt_{e3} $^\circ\text{C}$	η_3	Δt_{e4} $^\circ\text{C}$	η_4
		115	25	22,4	19	0,85	19,7	0,88	19	0,85
		120	30	24,7	21,4	0,86	22	0,89	21,5	0,87
		125	35	26,8	23	0,86	23,6	0,88	23,3	0,87
		130	40	28,9	25	0,87	25,7	0,89	25,2	0,87
		135	45	30,8	27	0,88	27,5	0,89	27,5	0,89
		140	50	32,7	28,7	0,88	29,5	0,89	29	0,89
		145	55	34,6	30,3	0,88	31,2	0,90	30,6	0,88
		150	60	36,4	32,1	0,88	32,9	0,90	32	0,88
		160	70	36,9	35,5	0,89	36	0,90	35,6	0,89
		170	80	43,3	38,6	0,89	39,5	0,91	38,9	0,90
		180	90	46,5	41,7	0,90	42,6	0,92	42	0,90

		z = 1		z = 2		z = 3		z = 4		
$\Delta t_s = 70/110 = 40^\circ\text{C}$	$t_p'' = 80^\circ\text{C}$	t_p' $^\circ\text{C}$	Δt_p $^\circ\text{C}$	Δt_{e1} $^\circ\text{C}$	Δt_{e2} $^\circ\text{C}$	η_2	Δt_{e3} $^\circ\text{C}$	η_3	Δt_{e4} $^\circ\text{C}$	η_4
		130	50	14,4	0	0	0	0	0	0
		135	55	16,4	0	0	0	0	0	0
		140	60	18,2	2,8	0,20	0	0	0	0
		145	65	19,6	6,1	0,31	2,3	0,12	0	0
		150	70	21,6	7,8	0,36	7,7	0,36	0	0
		160	80	24,9	11,6	0,47	12,3	0,49	3,9	0,16
		170	90	27,9	14,5	0,52	15,8	0,57	10,8	0,39
		180	100	30,8	17,3	0,56	19,1	0,62	14,9	0,48

Zamenom u prethodnu jednačinu i podelom sa θ uz uvođenje oznaka prema (21) biće:

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_3}{1 - \Phi_3} \quad (31)$$

$$\frac{\Phi_2}{1 - \Phi_1} = \frac{\Phi_4}{1 - \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3} \quad (32)$$

Ovo, za praćenje možda teško, razmatranje završićemo formiranjem sistema od 5 jednačina (21), (22), (23), (31) i (32), gde su nepoznate veličine $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ i Φ_e a z, τ i κ (tj. Φ_p i Φ_s) su parametri.

S obzirom na uslove u jednačinama (25), (26) i (27) i zamenom veličine iz (28), (29) i (30) u (24), dobijaju se TRI sistema po PET jednačina:

Sistem A: $\tau z = \tau \cdot z < 1$ tj. $\Delta t_s < \Delta t_p/z$

$$a = e^{-\frac{\Phi_p}{\Phi_e} \left(\frac{1 - \Phi_s}{z - \Phi_p} \right)} = \frac{1 - \Phi_1}{1 - z \frac{\Phi_s}{\Phi_p} \Phi_1} \quad (A1)$$

$$b = e^{-\frac{\Phi_p}{\Phi_e} \left(\frac{\Phi_s + 1}{\Phi_p + z} \right)} = 1 - \Phi_2 \frac{1 + z \frac{\Phi_s}{\Phi_p}}{1 - \Phi_1} \quad (A2)$$

Tabela 2.

t_p'	Δt_p	Δt_{es}	Δt_e	η	Δt_{p1}	Δt_{s1}	Δt_{p2}	Δt_{s2}	Δt_{p3}	Δt_{s3}
110	30	14,4	9,2	0,64	15,8	31,6	7,7	11,6	6,5	16,8
120	40	18,2	13,6	0,75	21,8	32,7	10,5	15,8	7,7	11,5
130	50	21,6	17	0,79	28,3	34,4	12,8	15,4	8,9	10,2
135	55	23,3	18,7	0,8	31,5	34,4	14,1	15,4	9,4	10,2
140	60	24,9	20,1	0,81	35	35	15	15	10	10
145	65	26,4	22	0,83	38,1	35,2	16,6	15,3	10,3	9,5
150	70	27,9	23,3	0,84	41,5	35,6	17,7	15,2	10,8	9,2
160	80	30,8	26	0,85	48,5	36,4	19,8	14,9	11,7	8,7
170	90	33,7	28,8	0,85	55,5	37	22	14,7	12,5	8,3
180	100	36,4	31,7	0,87	62,7	37,6	24	14,4	13,3	8

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_3}{1 - \Phi_1 - \Phi_2} \quad (A3)$$

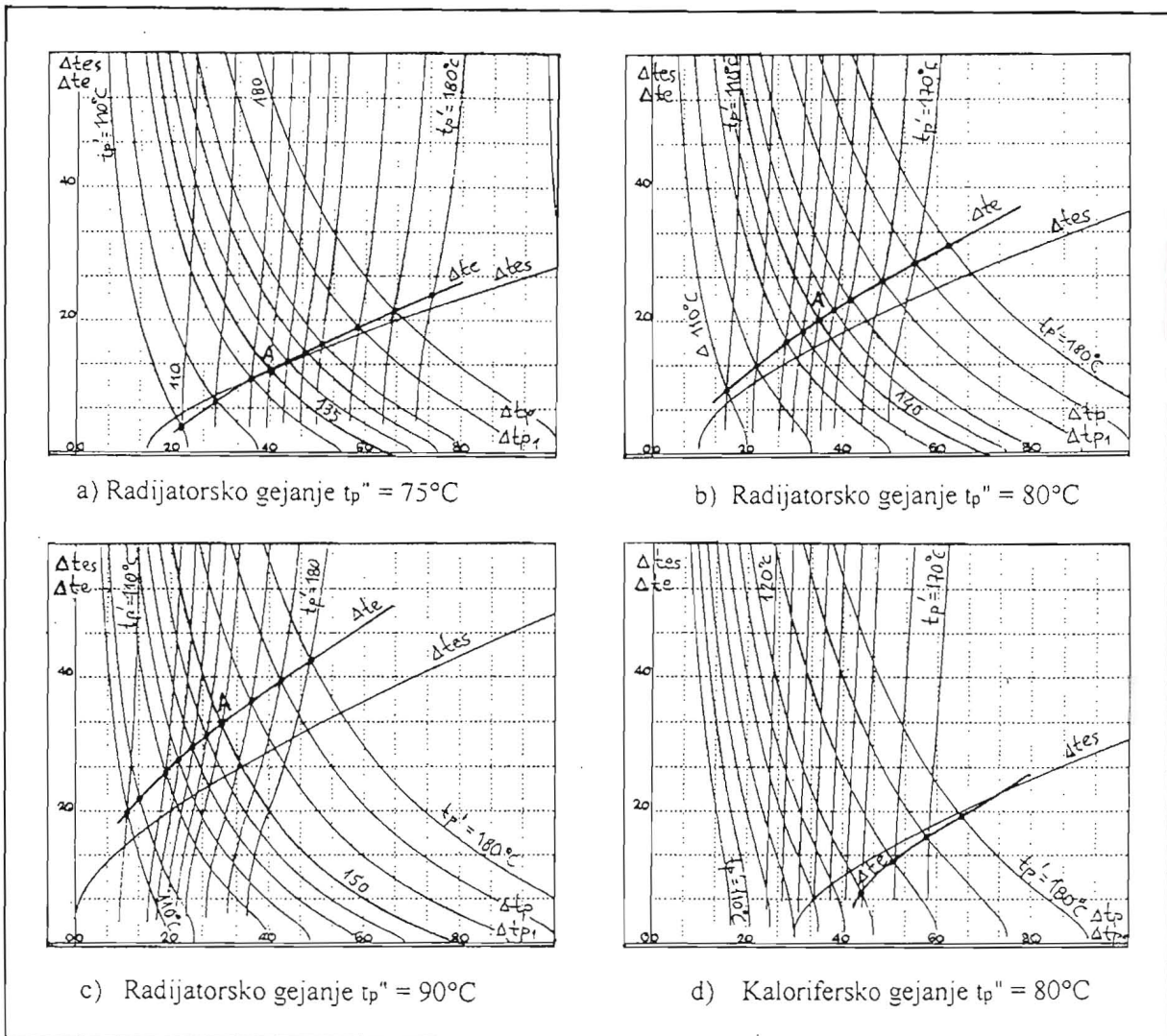
$$\frac{\Phi_2}{1 - \Phi_1} = \frac{\Phi_4}{1 - \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3} \quad (A4)$$

$$\Phi_p = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 \quad (A5)$$

Sistem B: $\tau_z = 1/z \cdot \tau < 1$ tj. $z \cdot \tau > 1$, tj. $\Delta t_s > \Delta t_p/z$

$$a = e^{-\frac{\Phi_p}{\Phi_c} \left(\frac{\Phi_s}{\Phi_p} - \frac{1}{z} \right)} = \frac{1 - z \cdot \Phi_1 \frac{\Phi_s}{\Phi_p}}{1 - \Phi_1} \quad (B1)$$

Ostale četiri jednačine u sistemu (A) ostaju iste:



Slika 9. Dijagram stvarne efektivne razlike temperatura pri kombinovanom strujanju za broj sekcija $z = 3$; a) $\Delta t_s = 90 - 70 = 20^\circ\text{C}$, $t_p'' = 75^\circ\text{C}$; b) $\Delta t_s = 90 - 70 = 20^\circ\text{C}$, $t_p'' = 80^\circ\text{C}$; c) $\Delta t_s = 90 - 70 = 20^\circ\text{C}$, $t_p'' = 90^\circ\text{C}$; d) $\Delta t_s = 110 - 70 = 40^\circ\text{C}$, $t_p'' = 80^\circ\text{C}$ (kalorifersko); tačka A - uslovi pri kojima je $\tau_z = 1$ (odnosno $\tau \cdot z = 1$) sistem C

Sistem C: $\tau_z = 1/z \cdot \tau = 1$ tj. $z \cdot \tau = 1$, tj. $\Delta t_s = \Delta t_p/z$

Ovaj sistem nastaje u slučaju da je jednačina $A1 = B1$.

Rešenje sistema jednačina (A) i (B) je najjednostavnije grafičkim putem, što ćemo izvesti zavisno od usvojenih parametara. Sistem A i B nisu posebni, već, kako će se videti na dijagramu, rešenje je isto, s tim što posle rešenja sistema A, dolazi sistem B, pri čemu je granični slučaj $A = B$.

Veoma je važno uporediti kombinovane šeme strujanja prema suprotnosmernom, kao najpovoljnijem, što može grafički prikazati jednačinu (4) za iste parametre sistema.

4. Temperaturski tok kombinovanog strujanja za najčešće praktične uslove parametara sistema

Najčešći parametri sistema su: sekundar radijatorski sistem $\Delta t_s = t'' - t' = 90 - 70 = 20^\circ\text{C}$ i kaloriferski sistem $\Delta t_s = t'' - t' = 110 - 70 = 40^\circ\text{C}$ (eventualno sistem $110/90^\circ\text{C}$).

Primer: vrelvodni sistem polazne temperature do 180°C , a izlazne temperature najčešće 75 do 90°C . Broj sekcije, kako smo utvrdili, može biti 2, 3 i 4.

Zbog složenosti sistema jednačina pokazaćemo kako se dolazi do potpune "temperaturske slike" izmenjivača sa tri sekcije kod koga (kako smo utvrdili, zbog najboljeg odnosa suprotnosmernog i istosmernog strujanja) očekujemo efektivne temperaturske razlike najbliže suprotnosmernom strujanju. Za ostale brojeve sekcija daćemo samo tabelarne rezultate proračuna.

$z = 3$

U ovom slučaju jednačina (21) je $\Phi_p = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$, tj. $\Phi_4 = 0$ pa se poslednje tri jednačine u sistemu (A) i (B), rešavanjem po Φ_2 dobija:

$$\Phi_2 = (1 - \Phi_1) - \frac{1 - \Phi_p}{1 - \Phi_1} \quad (33)$$

Ako sada vratimo odnos $\Phi_i = \Delta t_{pi}/\theta$ za vrednost dobijaju se dve jednačine a.

Za $\tau \cdot z < 1$ tj. $\Delta t_s < \Delta t_p/3$ (ili za $\Delta t_s = 20^\circ\text{C}$, $\Delta t_p > 60^\circ\text{C}$)

$$a = e^{-\frac{\Delta t_p}{\Delta t_e} \left(\frac{1}{3} - \frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \right)} = \frac{1 - \Delta t_{p1} / \theta}{1 - 3 \frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \cdot \frac{\Delta t_{p1}}{\theta}}$$

Za $\tau \cdot z > 1$ tj. $\Delta t_s > \Delta t_p/3$ (ili za $\Delta t_s = 20^\circ\text{C}$, $\Delta t_p < 60^\circ\text{C}$)

$$a = e^{-\frac{\Delta t_p}{\Delta t_e} \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} - \frac{1}{3} \right)} = \frac{1 - 3 \frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \cdot \frac{\Delta t_{p1}}{\theta}}{1 - \Delta t_{p1} / \theta}$$

Veličina "b" važi za oba slučaja

$$b = e^{-\frac{\Delta t_p}{\Delta t_e} \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} + \frac{1}{3} \right)} = \frac{1 + 3 \frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \cdot \frac{\Delta t_{p1}}{\theta}}{(1 - \Delta t_{p1} / \theta)^2} = 3 \frac{\Delta t_s}{\Delta t_p}$$

Na slici 9 prikazan je tok funkcije $\Delta t_e = f(\Delta t_{p1})$ kao grafičko rešenje gornjih jednačina, na kome je prikazana tačka

A kao granični slučaj kada je $z \cdot \tau = 1$. Na istom dijagramu je radi upoređenja prikazana i funkcija $\Delta t_{es} = f(\Delta t_p)$ prema jednačini (4) za suprotnosmerno strujanje, radi poređenja efektivnih razlika temperatura.

Kompletna temperaturska slika se dobija kada se odrede i ostale temperature prema:

$$\Delta t_{p2} = \left(\theta - \Delta t_{p1} \right) - \frac{\theta - \Delta t_p}{\theta - \Delta t_{p1}} \theta,$$

$$\Delta t_{p3} = \theta - \Delta t_{p1} - \Delta t_{p2}$$

$$\Delta t_{s1} = \tau_z \Delta t_{p1} = \tau \cdot z$$

$$\Delta t_{p1} = 3 \Delta t_{p1} (\Delta t_s / \Delta t_p),$$

$$\Delta t_{s2} = 3 \Delta t_{p2} (\Delta t_s / \Delta t_p)$$

Parametar uporedivosti efektivne razlike temperature pri kombinovanom strujanju u odnosu na suprotnosmerno strujanje je tzv. stepen korisnosti kombinovane šeme strujanja

$$\eta = \Delta t_e / \Delta t_{es} \quad (34)$$

U tabeli 1 su navedene efektivne razlike temperatura za razmenu toplote za stepene prolaza $z = 1, 2, 3$ i 4 , pri čemu je $z = 1$ suprotnosmerno strujanje a ostalo $z = 2$ kombinovano strujanje. Tabela može služiti pri proračunima višesekcijskih izmenjivača toplote.

5. Zaključno razmatranje

Osnovna dva zaključka koji se mogu izvesti iz ove analize su:

1) Pri kombinovanom strujanju, pri razmeni toplote ne može se kao efektivna razlika uzimati logaritamska razlika temperatura pri suprotnosmernom strujanju. Stepenn korisnosti kombinovane šeme strujanja uvek je manji od 1.

2) Kombinovana šema strujanja je neekonomična pri malim maksimalnim razlikama temperatura θ u razmeni toplote, a katkada toliko mala da postoje slučajevi u kojima uopšte ne može biti dostignuta zahtevana temperatura sekundara na izlazu iz izmenjivača toplote, jer je $\Delta t_e = 0$.

U tabeli 1 se vidi da za usvojeni režim sekundarnog fluida stepen korisnosti kombinovane šeme raste sa porastom temperaturske razlike primara, a isto tako je uvek za iste uslove veća efektivna razlika temperatura pri trostepenom prolazu od dvostepenih ili četvorostepenih kombinovanih šema. Glavni gubitak u efektivnoj temperaturi nastaje usled istosmernog strujanja i on je veći što je veći broj istosmernih "struja" u ukupnom broju "struja" kombinovane strujne šeme.

Ovaj gubitak znatno raste pri povećanju Δt_s , jer u prvom prolazu pri suprotnosmernom strujanju dolazi do značajnog pada temperature primara. Ukoliko su niže razlike temperatura primara moguća je i kontrarazmena toplote.

Kompletna temperaturska slika razmene toplote po sekcijama može se izračunati iz datih jednačina, a u tabeli 2 je primer za uslove: $z = 3$, $\Delta t_s = 70/90 = 20^\circ\text{C}$, $t_p'' = 80^\circ\text{C}$.

U tabeli je, kako smo utvrdili, $\Delta t_p = \Delta t_{p1} + \Delta t_{p2} + \Delta t_{p3}$, $\Delta t_s = (\Delta t_{s1} + \Delta t_{s2} + \Delta t_{s3})/3$.

Za $t_p' = 150^\circ\text{C}$ u prvoj sekciji se ostvari 60%, u drugoj sekciji 25%, a u trećoj sekciji 15%. Učešće prve sekcije u razmeni toplote neprekidno raste sa porastom temperature primara na ulazu u izmenjivač toplote.

Praktični rezultat je da za radijatorsko grejanje, tj. $\Delta t_s = 70/90^\circ\text{C}$, kombinovano strujanje opravdano primenjivati pri $\eta > 0,65$, dok za kalorifersko grejanje, tj. pri $\Delta t_s = 70/110^\circ\text{C}$, nema opravdanja primena kombinovane šeme, već samo suprotnosmerno strujanje.

Na kraju, navedimo i jedan zaključak koji se može izvesti iz ove analize, a koji nije bio direktan cilj razmatranja: odnosi se na deklarisanu izlaznu temperaturu primarnog fluida.

- 3) Izlazna temperatura primara treba da bude bliska izlaznoj temperaturi sekundarnog fluida. Za radijatorsko grejanje $t_p'' = 90^\circ\text{C}$, za kalorifersko grejanje $t_p'' = 110^\circ\text{C}$.

Upoređujući podatke iz tabele efektivnih temperatura, vidi se da za iste ostale uslove za radijatorsko grejanje, ako je $t_p'/t_p'' = 150/90^\circ\text{C}$ $\Delta t_{es} = 36,4^\circ\text{C}$, a za $t_p'/t_p'' = 150/75^\circ\text{C}$, a $\Delta t_{es} = 22,1^\circ\text{C}$, dakle bolje je za 65%, što

značajno smanjuje površine razmene toplote, a time i cenu instalacije. Međutim, režim temperatura primarnog fluida povezan je i sa drugim pitanjima (izvora energije, protoka itd.), tako da se zaključak pod brojem tri može smatrati uslovnim.

Literatura

- [1] Slipčević, B.: *Razmenjivači toplote*, SMEITS, Beograd, 1989.
- [2] Recknagel-Sprenger: *Priručnik za grejanje i klimatizaciju*, Građevinska knjiga, Beograd, 1982.
- [3] Rietschel-Raiss: *Heiz und Klimatechnik*, New York, 1970.
- [4] Rikalović, M.: *Analiza kvalitativne regulacije zagrejača vazduha*, KGH, 1/1981, Beograd.

kgh