

## ITERATIVNI PRORAČUN RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Razmenjivači toplote su aparati u kojima se vrši razmena toplote između fluida različitog toplotnog potencijala. Elementi sistema su: Ulaz, aparat i izlaz (odziv sistema). U ovom radu se razmatra veza elemenata sistema i diskutuju mogućnosti određivanja odziva sistema (poznat aparat) ili aparata (poznat odziv sistema). Veličine stanja fluida nosioca toplote se uzimaju za srednje temperature u procesu razmene, što povezuje ulaz i izlaz sistema i zahteva postupak približavanja (iteracija).

### OSNOVNE VELIČINE I ODNOSI

Geometrija razmenjivača toplote predstavlja konstrukciju sa definisanim presecima strujanja i površinom razmene toplote, kao i raspored fluida u strujnim tokovima.

Konfiguracija strujanja predstavlja međusobni odnos strujanja radnih fluida duž površine razmene. Strujanje može biti: suprotnosmerno, istosmerno, unakrsno ili kombinovano.

Primarni (topliji) fluid je fluid koji ima višu temperaturu na ulazu, koji predaje toplotu (toplotni izvor). Sekundarni (hladniji) fluid je fluid koji ima nižu temperaturu na ulazu, prima toplotu (toplotni ponor). Toplotni fluks razmene je usmeren od primarnog ka sekundarnom fluidu.

$Q$  (kW) toplotna snaga razmene (količina razmenjene toplote po vremenu) u razmenjivaču toplote,  $m_p, m_s$  (kg/s) maseni protok primarnog odnosno sekundarnog fluida,

$c_p, c_s$  (kW/kg°C) srednja specifična toplota primarnog odnosno sekundarnog fluida pri  $t_{sr}$ ,

$t_p', t_s'$  (°C) temperature primarnog odnosno sekundarnog fluida na ulazu u razmenjivač toplote,

$t_p'', t_s''$  (°C) temperature primarnog odnosno sekundarnog fluida na izlazu iz razmenjivača toplote,

$t_{p sr}, t_{s sr}$  (°C)  $t_{sr} = (t' + t'') / 2$  srednje temperature primarnog i sekundarnog fluida,

$\theta = t_p' - t_s'$  (°C) najveća temperaturska razlika u razmenjivaču toplote (na ulazu u razmenjivač),

$\Delta t_p = t_p' - t_p''$  (°C) temperaturska razlika primarnog fluida na ulazu i izlazu,

$\Delta t_s = t_s'' - t_s'$  (°C) temperaturska razlika sekundarnog fluida na izlazu i ulazu,

$\Delta t_v$  (°C) veće od  $\Delta t_p$  i  $\Delta t_s$ , veća temperaturska razlika radnog fluida,

$\Delta t_m$  (°C) manje od  $\Delta t_p$  i  $\Delta t_s$ , manja temperaturska razlika radnog fluida.

$W_p = m_p c_p = Q / \Delta t_p$  (kW/°C) toplotni ekvivalent primarnog fluida,

$W_s = m_s c_s = Q / \Delta t_s$  (kW/°C) toplotni ekvivalent sekundarnog fluida,

$W$  (kW/°C) manja vrednost toplotnog ekvivalenta od  $W_p$  i  $W_s$ .

$W_v$  (kW/°C) veća vrednost toplotnog ekvivalenta od  $W_p$  i  $W_s$ .

$R = W / W_v = \Delta t_m / \Delta t_v$  (-) odnos toplotnih ekvivalenata,  $0 < R \leq 1$ .

$P = \Delta t_v / \theta$  (-) toplotna efikasnost razmenjivača toplote (efektivnost),  $0 < P \leq 1$ .

$k$  (kW/m<sup>2</sup>°C) srednji koeficijent prolaza toplote kroz površinu razmene razmenjivača,

$A$  (m<sup>2</sup>) površina razmene razmenjivača toplote,

$NTU = k A / W$  (-) broj jedinica prenosa toplote.

$\varepsilon$  (-) korekcionni faktor konfiguracije strujanja u razmenjivaču,  $\varepsilon = 1$  za suprotnosmernu struju,

$\Delta t_e = \varepsilon LMTD$  (°C) srednja efektivna temperaturska razlika u razmenjivaču.

$LMTD$  (°C) srednja logaritamska temperaturska razlika suprotnosmernog strujanja,

$$LMTD = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\theta - \Delta t_m}{\theta - \Delta t_v}} = \theta \frac{P(1-R)}{\ln \frac{1-RP}{1-P}} \quad (1)$$

Iz definicije korekcionnog faktora konfiguracije  $\varepsilon$  može se izvesti sledeća relacija:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_e}{LMTD} = \frac{\frac{Q}{kA}}{LMTD} = \frac{\frac{W \Delta t_v}{kA}}{\theta \frac{P(1-R)}{\ln \frac{1-RP}{1-P}}} = \frac{\Delta t_v}{\theta} \frac{1}{P(1-R)} \frac{\ln \frac{1-RP}{1-P}}{\ln \frac{1-RP}{1-P}} = \frac{1}{NTU(1-R)} \ln \frac{1-RP}{1-P} \quad (2)$$

Osnovnim režimom rada razmenjivača toplote zadaju se: Maseni protoci, temperature i specifične toplote radnih fluida na ulazu u razmenjivač toplote. Jednačine toplotnog bilansa i razmene toplote glase:

$$Q = m_p c_p (t_p' - t_p'') = W_p \Delta t_p = m_s c_s (t_s'' - t_s') = W_s \Delta t_s = k A \varepsilon LMTD = NTU W \Delta t_e. \quad (3)$$

Poznato je da postoji još jedna veza između termičkih veličina i geometrije i konfiguracije aparata, koja se može napisati u implicitnom obliku  $f(NTU, P, R) = 0$ . Ista se može odrediti u jednom broju slučajeva eksplicitno, a za složenije konfiguracije strujanja određuje se empirijski [2] u obliku sledeće jednačine:

$$\varepsilon = \frac{1}{(1 + a_o R^{db} NTU^b)^c}, \text{ odnosno } NTU = \frac{(1 + a_o R^{db} NTU^b)^c}{1-R} \ln \frac{1-RP}{1-P}, \text{ odavde je:}$$

$$E = e^{\frac{NTU(1-R)}{(1+a_o R^{db} NTU^b)^c}} = \frac{1-RP}{1-P}, \text{ odnosno } P = \frac{E-1}{E-R} \quad (4)$$

gde se parametri  $a_o$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  empirijski utvrđuju. Za osnovna strujanja i neke kombinacije osnovnih strujanja jednačinu (4) možemo dobiti analitički u obliku  $NTU=f(P,R)$ ., Prema [1] možemo pisati:

Istosmerno strujanje:

$$NTU_i = \frac{1}{1+R} \ln \frac{1}{1-P(1+R)}, \quad E = e^{NTU(1+R)} = \frac{1}{1-P(1+R)}, \quad P = \frac{1-E^{-1}}{1+R} ., \quad (5)$$

Suprotnosmerno strujanje:

$$NTU_s = \frac{1}{1-R} \ln \frac{1-RP}{1-P}, \quad E = e^{NTU(1-R)} = \frac{1-RP}{1-P}, \quad P = \frac{E-1}{E-R} . \quad (6)$$

Unakrsno strujanje:

$$NTU_u = \ln \frac{1 - \frac{RP}{2}}{1 - P(1 + \frac{R}{2})}, \quad E = e^{NTU} = \frac{2 - RP}{2 - P(2 + R)}, \quad P = \frac{2(E - 1)}{E(2 + R) - R} . \quad (7)$$

Kombinovano strujanje, tipa 2n1:

$$NTU_{21} = \frac{\ln \frac{2 - P(1+R) + P\sqrt{1+R^2}}{2 - P(1+R) - P\sqrt{1+R^2}}}{\sqrt{1+R^2}}, \quad E = e^{NTU \sqrt{1+R^2}} = \frac{2 - P(1+R) + P\sqrt{1+R^2}}{2 - P(1+R) - P\sqrt{1+R^2}},$$

$$P = \frac{2(E - 1)}{(1+R)(E - 1) + (E + 1)\sqrt{1+R^2}} \quad (8)$$

Multiplikacija kombinovanog strujanja, tipa a(2n1)

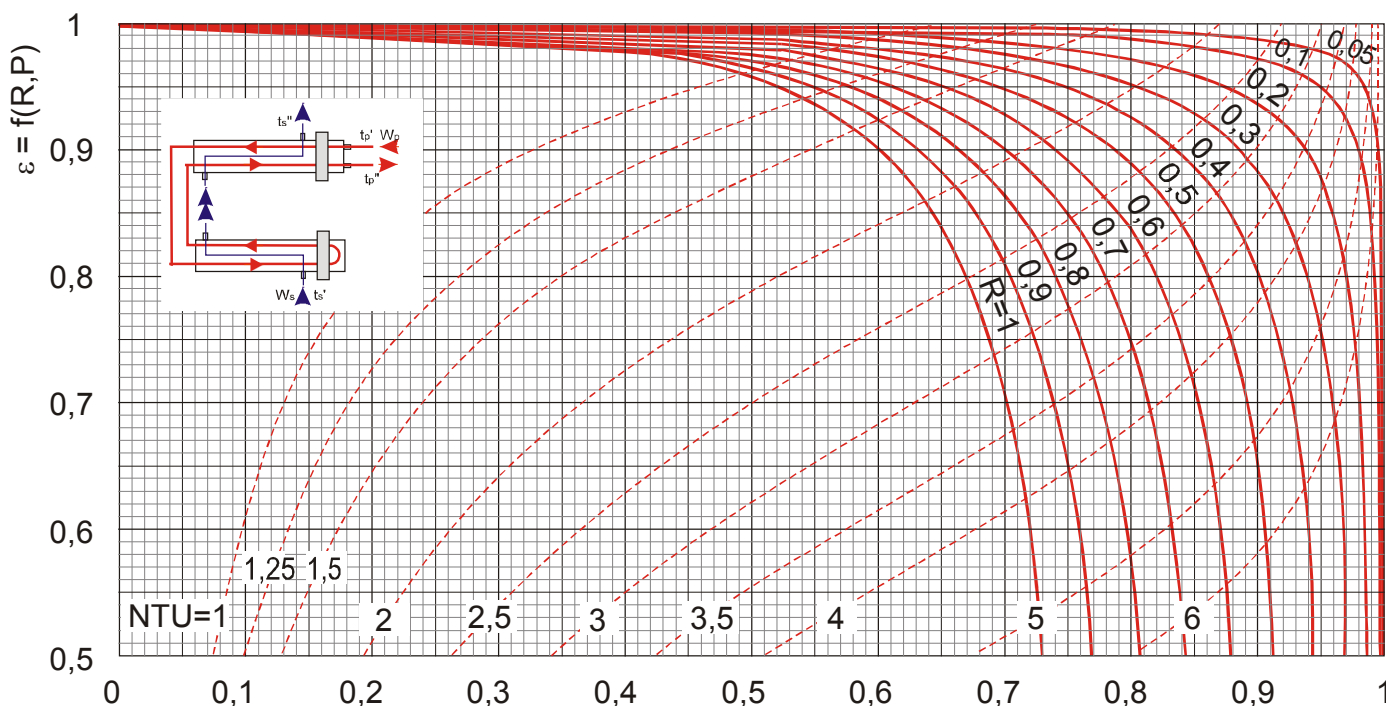
$$NTU_a = \frac{a \ln \frac{2 - P_a(1+R) + P_a\sqrt{1+R^2}}{2 - P_a(1+R) - P_a\sqrt{1+R^2}}}{\sqrt{1+R^2}}, \quad E = e^{\frac{\sqrt{1+R^2} NTU}{a}} = \frac{2 - P_a(1+R) + P_a\sqrt{1+R^2}}{2 - P_a(1+R) - P_a\sqrt{1+R^2}}$$

$$P_a = \frac{2(E-1)}{(E-1)(1+R) + (E+1)\sqrt{1+R^2}}, \quad P_a = \frac{\sqrt{\frac{1-RP}{1-P}} - 1}{\sqrt{\frac{1-RP}{1-P}} - R}, \quad P = \frac{\left(\frac{1-RP_a}{1-P_a}\right)^a - 1}{\left(\frac{1-RP_a}{1-P_a}\right)^a - R} \quad (9)$$

U izrazima (4) do (9) uvedena je smena  $E = e^{f(R,NTU,a)}$ , radi linearizacije eksponencijalnog dela jednačina i data zavisnost toplotne efikasnosti u eksplicitnom obliku.

Pri kombinovanom strujanju uvedena je pomoćna vrednost  $P_a$ , uslovna efikasnost strujanja tipa 2n1. Pri  $a=1$  izraz (9), postaje izraz (8). Kombinovano strujanje nastaje različitim brojem prolaza u registru i omotaču razmenjivača toplote, pri čemu se javlja suprotno i istosmerno strujanje. Kombinovano strujanje tipa RT 2n1 nastaje kada u registru imamo parni broj prolaza, a u omotaču jedan prolaz (npr. RT 21, RT 41, RT 61 itd.) Multiplikacija strujanja tipa RT 2n1 nastaje kada se konfiguracija 2n1 ponovi (multiplicira) "a" puta. Na primer, konfiguracija tipa RT 82=RT 2(41) ima osam prolaza u registru a dva prolaza u omotaču i predstavlja multiplikaciju strujanja strujanja 41 sa  $a=2$ , RT 63=RT 3(21),  $a=3$ .

Zavisnost (2), R) korespondira sa jednačinama (4) do (9), odnosno ubacivanjem vrednosti  $NTU=f(P,R,a)$ , može se dobiti zavisnost  $\varepsilon=f(P,R,a)$ . Dijagramski prikaz jednačina (4) do (9) dat je za konfiguraciju RT 2(2n1), u obliku  $\varepsilon=f(P)$ , gde parametar može biti R ili NTU. Ovakav oblik prikazivanja gubi na značaju, upotrebom odgovarajućeg softvera za brzo računanje i za veliki broj ponavljanja.



D.RT42 Koeficijent efikasnosti strujne šeme:

Fluid u omotaču ima dva prolaza ( $z_o=2$ ) - Fluid u registru ima  $z_r = 4, 8, 12, 16, \dots$  prolaza. Fluidi mogu da menjaju mesto.

$$P = \Delta t_p / \theta \quad (\text{pri } W_p < W_s)$$

$$P = \Delta t_s / \theta \quad (\text{pri } W_s < W_p)$$

U jednačini (3) nepoznate veličine su: Toplotna snaga, izlazne temperature radnih fluida, površina razmene, koeficijent prolaza toplote i korekcionni faktor konfiguracije, dakle nepoznatih je šest veličina, a na raspolaganju su tri jednačine (dve bilansne i jedna razmene toplote). Dodamo li navedenom sistemu od tri jednačine vezu,  $NTU=f(P,R,a)$ , neka od jednačina (4) do (9), još uvek je sistem neodređen.

Specifična toplota radnih fluida ( $c_p$ ,  $c_s$ ) je poznata ako je konstantna veličina u temperaturnom području, inače je u funkciji srednje temperature radnih fluida. Koeficijent prolaza toplote ( $k$ ) se može odrediti samo za poznatu geometriju, konfiguraciju razmenjivača toplote i poznate veličine stanja na srednjim temperaturama. Zbog toga je neophodno prethodno pretpostaviti izlazne temperature radnih fluida, da bi veličine stanja radnih fluida birali za srednje temperature. Posle upoređivanja izračunatih izlaznih temperatura sa pretpostavljenim, ukoliko je dobijena razlika veća od zadate potreban je novi proračun sa drugim pretpostavljenim izlaznim temperaturama. Ukoliko razlika pretpostavljene i izračunate temperature konvergira, konačnim brojem operacija (iteracija), može se dobiti izlazna temperatura jednaka pretpostavljenoj.

Za rešenje problema treba još jedna veza ili parametrizacija neke od nepoznatih veličina. Mogu se postaviti dve opcije: **Rejting problem**, kada je poznata geometrija razmenjivača toplote iskazana preko proizvoda koeficijenta prolaza toplote i površine razmene  $kA$  i **dizajn problem**, kada je poznata jedna od izlaznih temperatura radnih fluida.

## REJTING PROBLEM (PRORAČUN RT POZNATE GEOMETRIJE)

Poznate veličine:

- maseni protoci radnih fluida:  $m_p$  i  $m_s$ ,
- temperature radnih fluida na ulazu:  $t'_p$ ,  $t'_s$ ,
- specifična toplota radnih fluida na ulazu  $c_p$  i  $c_s$ ,
- konfiguracija strujanja, neka od jednačina (4) do (9),
- proizvod koeficijenta prolaza toplote i površine  $kA$  (dobijen iz geometrije aparata).

U prvoj iteraciji veličine stanja uzimamo za temperature fluida na ulazu u razmenjivač toplote.

Iz poznatih veličina se mogu odrediti toplotni ekvivalenti  $W_p$  i  $W_s$ ,  $W$  i  $W_v$ , odnos toplotnih ekvivalenata  $R$ , broj jedinica prenosa NTU i maksimalna temperaturna razlika  $\theta$ :

$$W_p = m_p c_p, \quad W_s = m_s c_s, \quad R = W / W_v, \quad NTU = \frac{kA}{W}, \quad \theta = t'_p - t'_s \quad (10)$$

Iz jednačine zadate konfiguracije sistema (neka od jednačina 4 do 9) se određuje  $P=f(NTU,R,a)$ , a zatim i LMTD iz jednačine (1). Pošto je određena efikasnost razmenjivača, dalji proračun je jednostavan.

$$\Delta t_v = P \theta, \quad \Delta t_m = R \Delta t_v = R P \theta, \quad \Delta t_e = \frac{\Delta t_v}{NTU} = \frac{P \theta}{NTU}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta t_e}{LMTD} = \frac{P}{NTU} \frac{\theta}{LMTD} \quad (11)$$

Temperature radnih fluida na izlazu iz razmenjivača toplote su:

$$t''_p = t'_p - \Delta t_v \text{ ako je } W_p = W, \quad t''_p = t'_p - \Delta t_m \text{ ako je } W_s = W \quad (12)$$

$$t''_s = t'_s + \Delta t_m \text{ ako je } W_p = W, \quad t''_s = t'_s + \Delta t_v \text{ ako je } W_s = W \quad (13)$$

Toplotna snaga razmene može se računati preko bilansnih jednačina ili preko jednačine razmene toplote (bilo koji od izraza):

$$Q = W \Delta t_v = W_v \Delta t_m = kA \Delta t_e = kA \frac{P \theta}{NTU} = W P \theta = kA \varepsilon LMTD \quad (14)$$

Za drugu iteraciju proračuna, veličine stanja radnih fluida uzimamo za srednje temperature:  $t_{p, sr} = (t'_p + t''_p) / 2$ ,  $t_{s, sr} = (t'_s + t''_s) / 2$  i postupak se ponavlja po istom redosledu kao za prvu iteraciju.

Broj iteracija je određen tolerancijom razlike izlaznih temperatura dve uzastopne iteracije. Za temperature je dovoljno da rezultat proračuna bude tačan na dve decimale. Excel aplikacija iterativnog proračuna automatski daje završnu iteraciju.

**PRIMER 1:** Dobošasti razmenjivač toplote ima  $kA=40$  kW/°C. Primarni fluid, voda protoka  $m_p=2,5$  kg/s temperature na ulazu  $t'_p=130$  °C. Sekundarni fluid, voda protoka  $m_s=5$  kg/s temperature na ulazu  $t'_s=70$  °C. Utvrditi odziv sistema za osnovne i kombinovane konfiguracije strujanja

**REŠENJE:** Radi se o rejting problemu. Proračun se daje iterativno tabelarno

**a) Prva iteracija.** Veličine stanja se uzimaju za ulazne parametre radnih fluida.

No	Veličina:	Izraz	Istosm.	Suprot.	Unakr.	RT2n1	RT4n2	RT6n3	RT 8n4
1	$c_p$ (kJ/kg K)	$t'_p=130$ °C	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
2	$c_s$ (kJ/kg K)	$t'_s=70$ °C	4,197	4,197	4,197	4,197	4,197	4,197	4,197
3	$W_p$ (kW/ K)	$W_p=m_p c_p$	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63
4	$W_s$ (kW/ K)	$W_s=m_s c_s$	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
5	$W$ (kW/ K)	$W_p$	10,47	10,47	10,47	10,47	10,47	10,47	10,47
6	$W_v$ (kW/ K)	$W_s$	21,25	21,25	21,25	21,25	21,25	21,25	21,25
7	$R$	$R=W/W_v$	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506
8	NTU	$NTU=k A /W$	3,765	3,821	3,821	3,821	3,821	3,821	3,821
9	$a$	multipl. konfigur.	-	-	-	1	2	3	4
10	$\theta$ (°C)	$\theta=t'_p-t'_s$	60	60	60	60	60	60	60
11	$E =f(NTU,a,R)$	Pomoćna vredn.	290,3	6,415	43,15	68,01	8,247	4,082	2,872
12	$P_a=f(E,R)$	Pomoćna vredn.	-	-	-	0,752	0,681	0,596	0,523
13	$P =f(P_a,E,R)$	Efikasnost RT (jednačina br.)	0,661 (5)	0,916 (6)	0,783 (7)	0,752 (8)	0,867 (9)	0,894 (9)	0,904 (9)
14	$\Delta t_v$ (°C)	$\Delta t_v=P \theta$	39,70	54,99	46,99	45,10	52,02	53,65	54,23
15	$\Delta t_m$ (°C)	$\Delta t_v=R \Delta t_v$	20,10	27,84	23,79	22,84	26,34	27,16	27,46
16	LMTD (°C)	Jednačina (1)	29,01	14,61	22,66	24,36	17,84	16,12	15,48
17	$\varepsilon$	$\varepsilon=P\theta/NTU LMTD$	0,363	1	0,551	0,492	0,775	0,884	0,931
18	$\Delta t_e$ (°C)	$\Delta t_e=LMTD \varepsilon$	10,55	14,47	12,38	11,90	13,71	14,12	14,27
19	$Q_p$ (kW)	$Q_p=W_p \Delta t_v$	421,8	584,2	499,26	479,2	552,8	570,0	576,2
20	$Q_s$ (kW)	$Q_s=W_s \Delta t_m$	421,8	584,2	499,26	479,2	552,8	570,0	576,2
21	$Q$ (kW)	$Q=k A \Delta t_e$	421,8	584,2	499,26	479,2	552,8	570,0	576,2
22	$t_p''$ (°C)	$t_p''=t_p'-\Delta t_p$	90,30	75,01	83,01	84,90	77,98	76,35	75,77
23	$t_s''$ (°C)	$t_s''=t_s'+\Delta t_s$	90,05	97,84	93,79	92,84	96,34	97,16	97,46

(Kako je  $W_p < W_s$ , to je  $W_p=W$ ,  $\Delta t_p=\Delta t_v$ ,  $\Delta t_s=\Delta t_m$ )

U Excelovoj aplikaciji iterativnog rejting problema sa 1000 iteracija i tolerancijom od 0,00001 dobija se sledeći odziv sistema.

**b) Excelova iteracija.** Veličine stanja se uzimaju za srednju temperaturu radnih fluida.

No	Veličina:	Izraz	Istosm.	Suprot.	Unakr.	RT2n1	RT4n2	RT6n3	RT 8n4
21	$Q$ (kW)	$Q=k A \Delta t_e$	420,0	580,7	496,6	476,9	549,7	566,7	572,8
22	$t_p''$ (°C)	$t_p''=t_p'-\Delta t_p$	90,23	74,88	82,92	84,80	77,85	76,22	75,64
23	$t_s''$ (°C)	$t_s''=t_s'+\Delta t_s$	90,03	97,67	93,67	92,74	96,20	97,00	97,30

## DIZAJN PROBLEM (DIMENZIONISANJE RT)

Poznate veličine:

- maseni protoci radnih fluida:  $m_p$  i  $m_s$ ,
- temperature radnih fluida na ulazu:  $t_p'$ ,  $t_s'$ ,
- specifična toplota radnih fluida na ulazu  $c_p'$  i  $c_s'$ ,
- izlazna temperatura jednog radnog fluida, npr.  $t_p''$ ,  $\Delta t_p=t_p'-t_p''$ .

U prvoj iteraciji veličine stanja uzimamo za fluid poznate temperature na izlazu za srednju temperaturu, a za drugi fluid za temperaturu fluida na ulazu u razmenjivač toplote. Iz poznatih veličina se mogu odrediti toplotni ekvivalenti  $W_p$  i  $W_s$ ,  $W$  i  $W_v$ , odnos toplotnih ekvivalenata  $R$ , temperaturska razlika fluida nepoznate temperature na izlazu i maksimalna temperaturska razlika  $\theta$ :

$$W_p = m_p c_p , \quad W_s = m_s c_s , \quad R = W / W_v , \quad \Delta t_s = \frac{W_p}{W_s} \Delta t_p , \quad \theta = t_p' - t_s' \quad (15)$$

Određivanjem temperaturskih razlika radnih fluida utvrđuje se koja je razlika veća, prema jednačinami (13) računa se izlazna temperatura drugog fluida, logaritamska temperaturska razlika LMTD prema jednačini (1) i određuje efikasnost razmenjivača toplote  $P$ :

$$P = \frac{\Delta t_v}{\theta} \quad (16)$$

Dalji proračun je uslovljen izborom konfiguracije strujanja, odnosno mora biti poznata neka od

relacija (4) do (9) za određivanje broja jedinica prenosa  $NTU=f(a,P,R)$ , bilo analitički, grafički ili empirijski. Dalje je iz definicije broja jedinica prenosa  $NTU$ :

$$k A = NTU W \quad (17)$$

Dakle prema (17) bez geometrije aparata određeno je  $kA$ . Iz poznatih relacija dalje dobijamo:

$$\Delta t_e = \frac{Q}{k A} = \frac{W \Delta t_v}{k A} = \frac{\Delta t_v}{NTU} = \frac{P \theta}{NTU}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta t_e}{LMTD} = \frac{P \theta}{NTU LMTD}, \quad Q = W \Delta t_v = W_v \Delta t_m = k A \Delta t_e \quad (18)$$

Geometrija aparata nije nam potrebna. Svaki razmenjivač sa izračunatim  $kA$  će zadovoljiti sistem.

**PRIMER 2:** Proračunati dobošasti razmenjivač toplote za zagrevanje mazuta od 50 do 100 °C, protoka  $m_p=1$  kg/s vodom protoka  $m_s=1$  kg/s temperature na ulazu  $t'_p=130$  °C.

**REŠENJE:** Radi se o dizajn problemu. Specifična toplota mazuta na srednjoj temperaturi  $t_{s sr}=(50+100)/2=75$  °C iznosi  $c_s=1,982$  kJ/kg K. Potrebna toplotna snaga iznosi:  $Q_s=m_s c_s \Delta t_s=1 \cdot 1,982 (100-50)=99,1$  kW. Iz  $Q_p=Q_s=m_p c_p \Delta t_p$  je: (u prvoj iteraciji uzimamo specifičnu toplotu na temperaturi ulaza  $t'_p=130$  °C). Izlazna temperatura primarnog fluida je  $t_p''=t'_p-\Delta t_p=130-23,23=105,77$  °C. U drugoj iteraciji uzimamo specifičnu toplotu za srednju temperaturu primara  $t_{p sr}=(130+105,77)/2=117,885$  °C iznosi  $c_p=4,230$  kJ/kg K,  $\Delta t_p=Q_s/m_p c_p=99,1/1 \cdot 4,230 =23,43$  °C. U konačnoj iteraciji se dobija  $\Delta t_p=23,42$  °C,  $c_p=4,231$  kJ/kg K. Toplotni ekvivalenti su:  $W_s=m_s c_s=1 \cdot 1,982=1,982$  kW/°C,  $W_p=m_p c_p=1 \cdot 4,231=4,231$  kW/°C, a odnosi toplotnih ekvivalenata  $R=W/W_v=W_s/W_p=1,982/4,231=0,468$ . Najveća temperaturska razlika u razmenjivaču iznosi:  $\theta=t'_p-t_s=130-50=80$  °C. Toplotna efikasnost razmenjivača iznosi  $P=\Delta t_v/\theta=\Delta t_s/\theta=50/80=0,625$ . Sledeći korak proračuna je određivanje konfiguracije strujanja u razmenjivaču. Radi upoređenja proračun ćemo izvesti za konfiguracije iz primera 1.

No	Veličina:	Izraz	Istosm.	Suprot.	Unakr.	RT2n1	RT4n2	RT6n3	RT 8n4
1	$P = \Delta t_v/\theta$	Efikasnost RT	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625
2	a	multipl. konfigur.	-	-	-	1	2	3	4
3	$P_a=f(a,P,R)$	Pomoćna vredn.				0,625	0,413	0,307	0,244
4	NTU	$NTU=k A /W$	1,702	1,194	1,317	1,366	1,229	1,209	1,202
5	k A	$k A = NTU W$	3,372	2,366	2,611	2,708	2,435	2,400	2,382
6	LMTD (°C)	Jednačina (1)	41,89	41,89	41,89	41,89	41,89	41,89	41,89
7	$\varepsilon$	$\varepsilon=P\theta/NTU LMTD$	0,701	1	0,906	0,874	0,971	0,987	0,993
8	$\Delta t_e$ (°C)	$\Delta t_e=LMTD \varepsilon$	29,39	41,89	37,95	36,60	40,69	41,37	41,60
9	$Q_p$ (kW)	$Q_p=W_p \Delta t_v$	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1
10	$Q_s$ (kW)	$Q_s=W_s \Delta t_m$	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1
11.	Q (kW)	$Q=k A \Delta t_e$	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1

Pod pretpostavkom da su koeficijenti prolaza toplote isti u svim konfiguracijama strujanja, onda najmanju površinu razmene ima onaj razmenjivač sa najmanjom vrednošću  $kA$ , tj. suprotnosmerno strujanje, a najveću istosmerno strujanje.

Međutim ostaju nam nepoznate dve veličine  $k$  i  $A$ . Koeficijent prolaza toplote je u funkciji brzine strujanja, koja zavisi od baznog (poprečnog) preseka razmenjivača i konfiguracije strujanja. Usvajanjem strujne geometrije (koja određuje brzine strujanja radnih fluida) prema kriterijalnim jednačinama može se odrediti koeficijent prolaza toplote  $k$ , a zatim i površina razmene,  $A=kA/k$ , (odnosno dužina aparata, jer je poprečnim presekom definisana površina po jedinici dužine).

Inžinjeri pristup problemu dimenzionisanja se svodi na definisanje široke serije geometrija razmenjivača koji će moći ostvariti  $kA$  u okviru granica kapaciteta razmene toplote ili graničnih dimenzija aparata. Optimizacijom ili uz pomoć dodatnih uslova i ograničenja može se izabrati najpovoljniji razmenjivač iz serije prema dizajn proračunu.

## ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

I rejting i dizajn problem polaze od činjenice da je poznata konfiguracija razmenjivača (zadata ili izabrana). Rejting problem za razmenjivač toplote poznate vrednosti  $kA$  (čija je geometrija poznata, ali nebitna) utvrđuje odziv sistema pri promeni ulaza, a dizajn problem utvrđuje potrebnu vrednost  $kA$  da bi se ostvario zahtevani odziv sistema.

Rejting problem je jednoznačan i odnosi se na problem primene izabranog aparata u različitim režimima. Dizajn problem nije jednoznačan i ovde se mogu postaviti dva pitanja: Pitanje optimuma proizvoda  $kA$  i pitanje da li svaka konfiguracija može ostvariti zadati izlaz iz sistema. Ostvarenje optimalnog  $kA$  povezano je sa dodatnim uslovima i ograničenjima, tehnologijom izrade aparata i cenom proizvoda. U svakom slučaju treba težiti većem koeficijentu prolaza toplote a manjoj površini razmene.

Odgovor na drugo pitanje je u analizi funkcije $NTU=f(a,R,P)$ , jednačine (5) do (9). Mora biti:		
za istosmerno strujanje	$P < 1 / (1+R)$	U primeru 2: $P_{max} = 0,6810$
za suprotnosmerno strujanje	nema ograničenja	
za unakrsno strujanje	$P < 1 / (1+R/2)$	U primeru 2: $P_{max} = 0,8102$
za kombinovano strujanje tipa 2n1	$P < 2 / (1+R+(1+R^2)^{0.5})$	U primeru 2: $P_{max} = 0,7774$
za kombinovano strujanje tipa a(2n1)	$P_a < 2 / (1+R+(1+R^2)^{0.5})$	U primeru 2: $P_{a max} = 0,7774$

U primeru sve konfiguracije zadovoljavaju, efektivnost je manja od maksimalne.

Može se desiti da nije ispunjen neki od gornjih uslova, što je pokazatelj da se tom konfiguracijom ne može ostvariti zadata izlazna temperatura jednog od radnih fluida. Međutim rešenje uvek postoji, jer za suprotnosmerno strujanje nema ograničenja. Ukoliko se izabere konfiguracija razmenjivača koja ne zadovoljava uslove maksimalne efektivnosti ne znači da isti neće imati odziv, odziv uvek postoji, već se dizajn problem prevodi u rejting problem, odnosno obe izlazne temperature će biti određene proračunom, tj. nije moguće održati zadatom ni jednu izlaznu temperaturu.

## LITERATURA

- [1] Rikalović, M.: **Dobošasti razmenjivači toplote** (u pripremi)
- [2] Spang, B. and Roetzel, W.: Neue Näherungsgleichung zur einheitlichen Berechnung von Wärmeübertragern. **Heat and Mass Transfer** 30 (1995), pp. 417-422
- [3] Mc Adams W.H.; **Heat Transmission**, third Edition, McGraw-Hill Book Company inc. New York Toronto London 1954, prevod Grajevinska knjiga, Beograd 1969.
- [4] Mills A.F.; **Heat Transfer**, 2/e University of California, Berkeley, Prentice Hall 1999, ISBN 0-13-947624-5

Rikalović Milan, dipl.maš.inž.

Završeno dana, 20 juna 2001 godine

## Apstrakt

U radu se definiše sistem ulaza, aparata i izlaza (odziva) i navode raspoložive jednačine koje povezuju termodinamičke i geometrijske veličine pri razmeni toplote, za razne konfiguracije strujanja. S obzirom na postavku problema, odnosno da li su izlaz ili aparat nepoznati, izložena su dva postupka proračuna (rejting i dizajn problem). Iterativnost postupka je posledica zavisnosti veličina stanja fluida od srednje temperature. U zaključnom razmatranju analizira se pitanje može li izabrani aparat proizvoljne konfiguracije u dizajn problema obezbediti zahtevani odziv.