

## POSTUPAK PRI PRORAČUNU PLOČASTIH RAZMENJIVAČA TOPLOTE

Prof. dr. Svetozar STANIŠIĆ, Milan MEDOJEVIĆ, dipl. inž.  
Tehnološki fakultet, Novi Sad

### Sažetak

*U ovom radu autor je razradio postupak pri proračunu pločastog razmenjivača toplote za pasterizaciju mleka. Metodika proračuna zasniva se na uzajamnoj zavisnosti između dužine kanala, brzine proticanja i pada pristiska.*

### Uvod

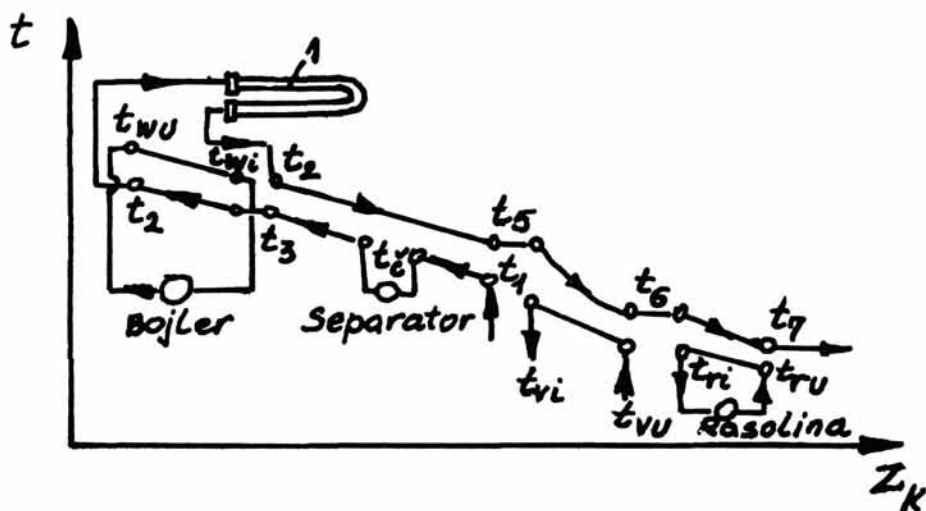
U prehrambenoj industriji pločasti razmenjivači toplote, zahvaljujući nizu svojih prednosti, sve se više primenjuju u praksi istiskujući druge tipove razmenjivača toplote, posebno, u industriji prerade mleka. Valovita površina pločastog razmenjivača toplote sa naizmeničnim naglim proširenjima i suženjima uslovljava vrlo intenzivnu razmenu toplote (Lawry, 1959).

Razmena toplote u pločastim razmenjivačima toplote povezana je sa hidrodinamikom proticanja medijuma između ploča. Pri proticanju medijuma između ploča toplotni i hidrodinamički procesi uzajamno deluju jedan na drugog i uzajamno su uslovljeni jedan drugom (Tarasov, 1970).

Postupak proračuna pločastih razmenjivača toplote, zavisno od metode proračuna, više ili manje se razlikuje od proračuna cevni razmenjivača toplote za pasterizaciju mleka. U praksi se koristi više metoda proračuna pločastih razmenjivača toplote. Sve se te metode u izvesnoj meri međusobno razlikuju. Pri postavljanju proračuna pločastog razmenjivača toplote najvažnije je utvrditi optimalne parametre rada pri kojima su eksploatacioni troškovi najmanji (Sherwin, 1971). Eksploatacioni troškovi pločastog razmenjivača toplote sastoje se od troškova protiskivanja medijuma između ploča, utroška toplotne i rashladne energije na obavljanje razmene toplote i amortizacionih troškova.

### Metoda proračuna pločastog razmenjivača toplote

Proračun pločastih razmenjivača toplote započinje se utvrđivanjem temperaturnih parametara u skladu sa zahtevima tehnološkog procesa. Ekonomičnost rada pločastih razmenjivača toplote u mnogome zavisi od pravilnog izbora temperature medijuma u pojedinim tačkama tokom pasterizacije te o odbačanoj stepenu regeneracije toplote (Hughmark, 1971). Povećanjem stepena regeneracije toplote povećava se ekonomičnost pločastog razmenjivača toplote ali se povećava potrebna površina razmene toplote (broj ploča). Pri proračunu pločastog razmenjivača toplote preporučljivo je nacrtati dijagram promene temperature medijuma za što je potrebno prethodno izračunati temperature medijuma u karakterističnim tačkama. Računske formule za izračunavanje



Slika 1  
Dijagram promene temperature medijuma

temperature medijuma u karakterističnim tačkama date su u tabeli 1. Za određivanje koeficijenta prelaza toplote potrebno je iz odgovarajućih priručnika očitati specifičnu toplotu  $c$ , koeficijent toplotne provodljivosti  $\lambda$ , gustinu  $\rho$  i viskozitet  $\mu$  mleka kod srednje temperature.

Temperaturni parametri ne zavise od konstruktivnih oblika ploča ili oblika kanala. Na osnovu utvrđenih temperaturnih parametara određuje se dužina kanala u svim sekcijama pločastog razmenjivača toplote. Dužina kanala ne zavisi od učinka i broja ploča. Pri proračunu pločastog razmenjivača toplote polazi se od toga da dužina kanala u svim sekcijama treba biti dovoljno velika za ostvarivanje utvrđenih temperaturnih parametara. Pri proračunu potrebne dužine kanala, širina kanala nije bitna jer se sve toplotne karakteristike, uključujući i temperaturu, menjaju samo po dužini kanala  $x_k$ . Ukupna dužina kanala pločastog razmenjivača toplote  $x_k$  se sastoji iz kanala sekcije za regeneraciju toplote  $x_k$ , kanala sekcije za pasterizaciju  $x_{kp}$ , kanala sekcije za hlađenje vodom  $x_{kv}$  i kanala sekcije za hlađenje rasolinom  $x_{ks}$ . Pri proračunu potrebne dužine kanala uputno je pridržavati se temperaturnog grafa (sl. 1). Ukupna dužina kanala bilo koje sekcije određuje se po formuli

$$x_k = \frac{yw\varrho ck_t}{2k}$$

Iz prethodne jednačine sledi da za određivanje dužine kanala bilo koje sekcije pločastog razmenjivača toplote nisu poznate razmak između ploča  $y$ , brzina proticanja  $w$  i koeficijent toplote  $k$ . Ova tri parametra su međusobno povezana jedan s drugim i međusobno uslovljena jedan s drugim. Ako su razmak između ploča  $y$  i brzina proticanja mleka  $w$  odabrani samim tim je predodređena veličina koeficijenta prolaza toplote  $k$ . Pogrešno je odabirati vrednost  $k$  zato što  $k$  zavisi od  $y$  i  $w$  a ne  $y$  i  $w$  od  $k$ .

**Tabela 1 Proračun osnovnih parametara pasterizacije mleka**

Temperatura	Računska formula	Iznos °C
1. mleka na ulazu u PRT	$t_1 = \text{odabrano}$	8
2. pasterizacije mleka	$t_2 = \text{odabrano}$	80
3. razlika u sekciji za regeneraciju	$\Delta t_1 = (1 - e) (t_2 - t_1) = (1 - 0,85) (80 - 8)$	10,8
4. čišćenje mleka	$t_3 = \text{odabrano}$	45
5. pasterizovanog mleka u sekciji za regeneraciju	$t_4 = t_3 + \Delta t_1 = 45 + 10,8$	55,8
6. mleka na izlazu iz sekcije za regeneraciju	$t_5 = t_2 - \Delta t_1 = 80 - 10,8$	69,2
7. pasterizovanog mleka na izlazu iz sekcije za regeneraciju	$t_6 = t_1 + \Delta t_1 = 8 + 10,8$	18,8
8. vruće vode na ulazu u sekciju za pasterizaciju	$t_{wu} = \text{odabrano}$	90
9. vruće vode na izlazu iz sekcije za pasterizaciju	$t_{wi} = t_{wu} - \frac{c_m}{3c_w} (t_2 - t_3) = 90 - \frac{3990}{3.4220} (80 - 69,2)$	86,6
10. mleka na izlazu iz PRT	$t_7 = \text{odabrano}$	5 °C
11. mleka na izlazu iz sekcije za hladnu vodu	$t_8 = t_5 = \frac{t_5 - t_7}{2} = 18,8 - \frac{18,8 - 5}{2}$	11,9
12. hladne vode na ulazu u PRT	$t_{vu} = \text{odabrano}$	1
13. hladne vode na izlazu iz PRT	$t_{vi} = \frac{c_m}{c_v} (t_5 - t_6) + t_{vu} = \frac{3885}{3.4285} (18,8 - 11,9) + 1$	2,1
14. rasoline na ulazu u PRT	$t_{ru} = \text{odabrano}$	-5
15. rasoline na izlazu iz PRT	$t_{ri} = \frac{c_m}{3c_p} (t_6 - t_7) + (-t_{ru}) = \frac{3868}{3.3330} (11,95) + (-5)$	0,7

Tabela 2

Računske formule za određivanje temperaturnog kompleksa, srednje temperature i fizički parametri medijuma

sekcija za	struja	temperaturni kompleks $K_t$		srednja temperatura		Pr-broj	spec. topl.	toplot. provod.	gustina	viskozitet
		računska formula	iznos	računska formula	iznos					
regeneraciju toplote	mleko hladno	$K_{tr} = \frac{e}{1-e}$	5,67	$\frac{t_3 + t_1}{2}$	38,6	8,5	3956	0,51	1020	1,02
	mleko toplo									
pasterizaciju	mleko	$K_{tp} = \frac{t_2 - t_3}{(t_{wi} - t_3) - (t_{wu} - t_2)}$	0,81	$\frac{t_2 + t_3}{2}$	74,6	4,2	3991	0,51	1005	0,56
	voda	$2,3 \log \frac{t_{wi} - t_3}{t_{wu} - t_2}$								
hlađenje vodom	mleko	$K_{tv} = \frac{t_5 - t_6}{(t_5 - t_{vi}) - (t_6 - t_{vu})}$	0,51	$\frac{t_5 + t_6}{2}$	15,4	15,4	3885	0,49	1030	2,0
	voda									
hlađenje rasolinom	mleko	$K_{tr} = \frac{t_6 - t_7}{(t_6 - t_{ri}) - (t_7 - t_{ru})}$	0,07	$\frac{t_6 + t_7}{2}$	8,5	21,0	3883	0,48	1031	2,60
	rasolina									

Pre svega treba odabrati srednji razmak između ploča  $y$ , jer je on osnovni parametar koji pokazuje uticaj na dimenzije pločastog razmenjivača toplote. U pločastim razmenjivačima toplote razmak između ploča je na različitim mestima različit zbog čega se može govoriti samo o srednjem razmaku između ploča. U već izvedenim pločama razmak između ploča dobrim delom je uslovljen debljinom gumene zaptivke i može se menjati manjim ili većim stepenom stezanja. U zavisnosti od stepena stezanja može se razmak između ploča znatnije menjati. Pri tome treba imati u vidu da pri malom srednjem razmaku između ploča mesna suženja kanala su takva da to dovodi do naglog smanjenja aktivnosti pločastog razmenjivača toplote. Polazeći od toga, najpogodnije je srednji razmak između ploča 3,5 mm (Stanišić, 1978). S povećanjem razmaka između ploča  $y$  povećava se potrebna dužina kanala. Iz tih razloga može se potpuno osnovano uzeti  $y = 3,5$  mm, ili ekvivalentni prečnik 7 mm.

Drugi parametar koji utiče na dimenzije pločastog razmenjivača toplote je brzina strujanja medijuma  $w$  između ploča. Izbor brzine strujanja medijuma ima uticaja na dimenzije pločastog razmenjivača toplote i energetske troškove protiskivanja mleka kroz razmenjivač toplote. Zbog toga brzinu treba odabrati zajedno s padom pritiska. Međutim, brzina proticanja medijuma koji razmenjuje toplote pokazuje veliki uticaj i na koeficijent prelaza toplote i pad pritiska. Treba odrediti koeficijent prelaza toplote  $\alpha$ , dužinu kanala  $x_k$  i pad pritiska  $\Delta p$  u zavisnosti od jedne promenljive — brzine proticanja medijuma  $w$ :

Koeficijent prelaza toplote može se odrediti po formuli (Stanišić, 1978)

$$\alpha = 0,092 \frac{\lambda}{y} \sqrt{\zeta} \text{Re}^{0,845} \text{Pr}^{0,25} \left( 1 + \frac{4 \log \text{Pr}}{\text{Pr}} \right)$$

Koeficijent otpora za  $\text{Re} \leq 10^3$  određuje se po formuli (Stanišić, 1978)

$$\zeta = \frac{167,5}{\text{Re}^{0,85}} \quad \text{i} \quad \sqrt{\zeta} = \frac{12,9}{\text{Re}^{0,425}}$$

za  $\text{Re} \geq 10^3$

$$\zeta = \frac{6,9}{\text{Re}^{0,38}} \quad \text{i} \quad \sqrt{\zeta} = \frac{2,63}{\text{Re}^{0,19}}$$

Uvrštenjem izraza za koeficijente otpora u formulu za koeficijent prelaza toplote dobija se za  $\text{Re} \leq 10^3$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{0,092 \cdot 12,9 \lambda \text{Re}^{0,42}}{0,007} \text{Pr}^{0,25} \left( 1 + \frac{4 \log \text{Pr}}{\text{Pr}} \right) \\ &= 170 \text{Re}^{0,42} \lambda \text{Pr}^{0,25} \left( 1 + \frac{4 \log \text{Pr}}{\text{Pr}} \right) \end{aligned}$$

Za  $\text{Re} \geq 10^3$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{0,092 \cdot 2,63 \lambda \text{Re}^{0,655}}{0,007} \text{Pr}^{0,25} \left( 1 + \frac{4 \log \text{Pr}}{\text{Pr}} \right) \\ &= 34,6 \lambda \text{Re}^{0,655} \text{Pr}^{0,25} \left( 1 + \frac{4 \log \text{Pr}}{\text{Pr}} \right) \end{aligned}$$

Toplotni otpor zida ploče od CrNi

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,001}{15} = 0,0000665$$

Koeficijent prolaza toplote za  $Re \leq 10^3$

$$1 = \frac{1}{\frac{1}{170 Re^{0,42} \lambda Pr^{0,25}} \left(1 + \frac{4 \log Pr}{Pr}\right) + \frac{1}{170 Re^{0,42} \lambda Pr^{0,25}} \left(1 + \frac{4 \log Pr}{Pr}\right) + 0,0000665}$$

za  $Re \geq 10^3$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{34,6 \lambda Re^{0,655} Pr^{0,25}} \left(1 + \frac{4 \log Pr}{Pr}\right) + \frac{1}{34,6 \lambda Re^{0,655} Pr^{0,25}} \left(1 + \frac{4 \log Pr}{Pr}\right) + 0,0000665}$$

Dužina kanala

$$x_k = \frac{0,0035 w_{QC} K_t}{2 k}$$

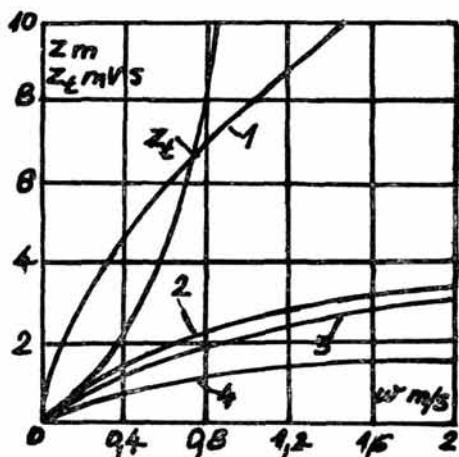
Uvrštenjem brojčanih vrednosti u tim formulama, dobija se dužina kanala za sve sekcije. Rezultati tog računa dati su u tabeli 3.

**Tabela 3**

**Toplotni i hidraulički parametri**

Sekcija	Struja	Re	$\alpha$	$x_k$
Regeneracija	Hladno mleko	6611w	$15029w^{0,655}$	$5,9w^{0,345} + 5,33w$
	Vruće mleko	8174w	$15767w^{0,655}$	
Pasterizacije	Mleko	12562w	$20250w^{0,655}$	$0,57w^{0,345} + 0,58w$
	Voda	21151w	$26148w^{0,655}$	
Hlađenja vodom	Mleko	3605w	$15517w^{0,655}$	$0,76w^{0,345} + 0,47w$
	Voda	4023w	$11172w^{0,655}$	
Hlađenja rasolinom	Mleko	2776w	$8140w^{0,655}$	$0,15w^{0,345} + 0,07w$
	Rasolina	2360w	$7999w^{0,655}$	

Ovdje je proračun izvršen samo za  $Re = 1000$ , pri čemu je brzina vode i rasoline uzeta jednako sa brzinom mleka. Kao rezultat računa dobije dužina kanala kao funkcija od jedne promenljive-brzine strujanja mleka. Zadavanjem vrednosti brzine dobija se određena dužina kanala za sve sekcije. Za skraćivanje određena zavisnosti  $x_k$  od  $w$  dana je u grafičkom obliku sl. 2.



Slika 2

Zavisnost dužine kanala  $x_k$  i pada pritiska  $z_t$  od brzine strujanja mleka

1. u sekciji za regeneraciju 2. u sekciji za pasterizaciju 3. u sekciji za vodeno hlađenje 4. u sekciji za hlađenje rasolinom.

Za izbor najpogodnije brzine treba prethodno odrediti pad pritiska. Zbog preglednosti pad pritiska je računat u metrima vodenog stupca.

$$z_t = \frac{\zeta r^{sk}}{de} + \Sigma \zeta_z + 1 \frac{w^2}{2g}$$

Izneti metod proračuna pločastog razmenjivača toplote je veoma pogodan za uzajamnu vezu između dužine kanala  $x_k$ , brzine proticanja medijuma  $w$  i pada pritiska  $z_t$ . Ako je na taj način utvrđena brzina proticanja medijuma, samim tim je predodređena dužina kanala i pad pritiska u svim sekcijama pločastog razmenjivača toplote. Broj paralelnih hodova i broj ploča u svakoj sekciji je jednostavno odrediti. Nakon utvrđivanja broja bodova preporučljivo je korigovati brzine strujanja medijuma.

Broj paralelnih hodova u svakoj sekciji pločastog razmenjivača toplote određuje se po formuli:

$$i = \frac{m}{by_0w}$$

gde je  $m$  — učinak razmenjivača toplote u kg/s a  $b$  — širina ploče. Razume se da broj hodova treba biti ceo broj, a poželjno je da je  $i$  paran. U tu svrhu mogu se dopustiti razne brzine proticanja mleka po sekcijama no svaku promenu brzine treba uskladiti sa grafom sl. 2. Broj slogova u sekciji određuje se po formuli:

$$n_s = \frac{x_k}{x_p}$$

gde je  $x_p$  — dužina jedne ploče. Broj ploča u sekciji određuje se po formuli:

$$n_{sc} = 2 i n_s$$

Ukupni broj ploča pločastog razmenjivača toplote jednak je zbiru broja ploča u svim sekcijama pločastog razmenjivača toplote.

## Zaključak

Razmene toplote u pločastim razmenjivačima toplote povezana je sa hidrodinamikom proticanja medijuma između ploča. Pri proticanju medijuma između ploča toplotni i hidraulički procesi uzajamno deluju jedan na drugog i uzajamno su uslovljeni jedan drugim. Pri proračunu pločastog razmenjivača toplote najvažnije je utvrditi optimalne parametre rada pri kojima su eksploatacioni troškovi najmanji. Povećanjem stepena regeneracije toplote do izvesne mere povećava se ekonomičnost pločastog razmenjivača toplote, iako se povećava potrebna površina razmene toplote. Pri proračunu pločastog razmenjivača toplote polazi se od toga da dužina kanala u svim sekcijama bude dovoljno velika za ostvarivanje temperaturnih parametara, kod čega širina kanala nije bitna, jer se svi toplotni parametri, uključujući i temperaturu menjaju samo po dužini kanala. Za određivanje dužine kanala po ovoj metodi nisu poznate razmak između ploča, brzina proticanja, koeficijent prelaza toplote. Ova tri parametra su međusobno povezana. Ako su razmak između ploča i brzina proticanja odabrani samim tim je predodređena veličina  $k$ . Pogrešno je odabrati  $k$  zato što  $k$  zavisi od razmaka između ploča i brzine proticanja a ne obratno. Izbor brzine strujanja medijuma ima uticaja na potrebni broj ploča i energetske troškove. Izneti metod proračuna pločastog razmenjivača toplote je veoma pogodan za uzajamnu vezu između dužine kanala, brzine proticanja i pada pritiska.

## Summary

*The author worked out in detail the method of calculation of plate heat exchanger for milk pasteurization. With proposed method it is possible to select optimal parameters of work of plate heat exchanger, because the calculation method is based on reciprocal interdependence of length of canals, speed of flow and drop of pressure.*

## Literatura

1. HUGHMARK, G. A.: Heat end mass transfer in the wall region of turbulent pipe flow. *AICHE. Journal*, 1971, **17**, No. 1, 51—56.
2. LAWIRY, F. I.: Plate-type heat exchanger, *Chemistry Engineering*, 1959, v. 66 No. 13, 89—94.
3. STANIŠIĆ, S.: Mehaničke operacije, Novi Sad, 1978. god.
4. STANIŠIĆ, S.: Toplotne i difuzione operacije, Novi Sad, 1978. god.
5. SHERWIN, K.: Forced convection heat transfer »*Brit. Chem. Eng.*«, 1971, **49** No. 1, 147—153.
6. TARASOV, F. M.: Hidrodinamika i toploobmen v aparatah moločnoj promišlenosti. Piščevoja promišlenosti, Moskva 1970, 132.