

# DIMENZIONIRANJE SHELL AND TUBE IZMJENJIVAČA TOPLINE ZA ZAGRIJAVANJE VODE

---

**Herceg, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Slavonski Brod / Sveučilište u Slavonskom Brodu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:262:816193>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-19**



*Repository / Repozitorij:*

[repository.unisb.hr](https://repository.unisb.hr) - The digital repository is a digital collection of works by the University of Slavonski Brod.



# ZAVRŠNI RAD

sveučilišnog preddiplomskog studija

Ivan Herceg

0152214419

Slavonski Brod 2024.

# ZAVRŠNI RAD

sveučilišnog preddiplomskog studija

Ivan Herceg

0152214419

Mentor završnog rada:

**prof. dr. sc. Marija Živić**

Slavonski Brod 2024.

# I. AUTOR

Ime i prezime: Ivan Herceg

Datum i mjesto rođenja: 01.01.1996. Zagreb

Adresa: Stjepana Matkovića 13, Križ, 10314

STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

## II. ZAVRŠNI RAD

Naslov: Dimenzioniranje shell and tube izmjenjivača topline za zagrijavanje vode

Naslov na engleskom jeziku: Sizing of a shell and tube heat exchanger for the heating of water

Ključne riječi: shell and tube izmjenjivač topline, dimenzioniranje, toplinska analiza, hidraulička analiza

Ključne riječi na engleskom: shell and tube heat exchanger, sizing, thermal analysis, hydraulic analysis

Broj stranica: 27 slika: 11 tablica: 4 priloga: 0 bibliografskih izvora: 3

Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen: STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

Stečen akademski naziv: **Sveučilišni prvostupnik inženjer strojarstva**

Mentor rada: prof. dr. sc. Marija Živić

Komentor rada: dr.sc. Antun Barac

Obranjeno na sastavnica

dana 04.09.2024.

Oznaka i redni broj rada: SFSB-PSS-31/2024

SVEUČILIŠTE U SLAVONSKOM BRODU  
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Slavonski Brod, 3. siječnja 2024.

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 2023-2024

Pristupnik: **Ivan Herceg (0152204419)**  
Studij: Strojarstvo

Zadatak: **DIMENZIONIRANJE SHELL AND TUBE IZMJENJIVAČA TOPLINE ZA ZAGRIJAVANJE VODE**

Opis zadatka:

POTREBNO JE PROJEKTIRATI IZMJENJIVAČ TOPLINE, S JEDNIM PROLAZOM KROZ CIJEVI I JEDNIM PROLAZOM KROZ PLAŠT U KOJEM ĆE 60 KG/S VODE KOJA SE HLADI S 35 °C NA 25 °C ZAGRIJAVATI 150 KG/S HLADNE VODE TEMPERATURE 15 °C.

ZADATKOM JE POTREBNO OBUHVATITI SLJEDEĆE:

1. OPISATI SHELL AND TUBE IZMJENJIVAČE TOPLINE
2. IZRAČUNATI PROMJER PLAŠTA I BROJ CIJEVI
3. IZRAČUNATI UKUPNU POVRŠINU IZMJENJIVAČA TOPLINE
4. IZRAČUNATI KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE
5. IZRAČUNATI PADOVE TLAKA U CIJEVIMA I PLAŠTU
6. IZVESTI ZAKLJUČKE

Zadatak uručen pristupniku: 10. siječnja 2024.

Rok za predaju rada: 10. srpnja 2024.

Mentor:

prof. dr. sc. Marija Živić



Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

prof. dr. sc. Ivica Kladarić

Komentor:

dr. sc. Antun Barac

## IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, koristeći se vlastitim znanjem i literaturom.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Mariji Živić što me je svojim predavanjima zainteresirala za područje termodinamike i na mentorstvu.

Ivan Herceg

## SAŽETAK

Zadatak ovoga rada je dimenzioniranje shell and tube izmjenjivača topline u jednom prolazu. Objasnjeno je princip rada i karakteristike shell and tube izmjenjivača topline, a zatim je, na osnovi zadanih podataka o masenim protocima i temperaturama tople i hladne vode, izvršen preliminarni proračun za određivanje dimenzija shell and tube izmjenjivača topline.

Nakon preliminarnog analize provedena je provjera dobivenih dimenzija izračunom koeficijenta prolaza topline, i padova tlaka na strani plašta i cijevi. Izračunate geometrijske karakteristike izmjenjivača topline omogućuju prijenos zadanog toplinskog toka, ali za dobivanje optimalnih vrijednosti potrebna je dodatna analiza.

## **ABSTRACT**

The assignment of this thesis is the sizing of a shell and tube heat exchanger with a single tube pass. Firstly the work principles and characteristics of the heat exchanger are explained which is followed by a preliminary analysis to determine the dimensions.

Following the preliminary analysis a review is conducted by calculating the heat transfer coefficient, shell and tube side pressure drops. The calculated geometric characteristics of the heat exchanger allow for the transfer of the required heat duty, but for the optimal values a further analysis is required.



# SADRŽAJ

<b>PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA .....</b>	<b>1</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>3</b>
<b>2. SHELL AND TUBE IZMJENJIVAČI TOPLINE .....</b>	<b>4</b>
2.1 OSNOVNI DIJELOVI KONSTRUKCIJE.....	4
2.1.1 VRSTE PLAŠTEVA.....	4
2.1.2 VRSTE CIJEVNIH SNOPOVA .....	6
2.1.3 CIJEVI I PROLAZI CIJEVI .....	8
2.1.4 RASPORED CIJEVI.....	8
2.1.5 VRSTE I GEOMETRIJA PREGRADA .....	9
2.1.6 RASPODJELA TOKOVA.....	10
<b>3. PRORAČUN DIMENZIJA I ZNAČAJKI SHELL AND TUBE IZMJENJIVAČA TOPLINE...</b>	<b>11</b>
3.1 PRELIMINARNA ANALIZA .....	11
3.2 PROVJERA DOBIVENIH PODATAKA PRELIMINARNOM ANALIZOM.....	17
<b>4. DISKUSIJA REZULTATA.....</b>	<b>24</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>25</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>26</b>

## PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA

$A_c$  - površina izmjene topline bez prljanja,  $m^2$

$A_f$  - površina izmjene topline sa prljanjem,  $m^2$

$A_o$  - vanjska površina izmjene topline bazirana na vanjskom promjeru cijevi,  $m^2$

$A_s$  - površina uz koju struji tok u plaštu,  $m^2$

$B$  - razmak između pregrada, m

$C$  - zazor cijevi, m

$CL$  - konstanta rasporeda cijevi

$c_p$  - specifični toplinski kapacitet,  $J/(kgK)$

$CTP$  - konstanta proračuna broja cijevi

$D_e$  - ekvivalentni promjer na strani cijevi, m

$d_i$  - unutarnji promjer cijevi, m

$d_o$  - vanjski promjer cijevi, m

$D_s$  - promjer plašta, m

$F$  - korekcijski LMTD faktor

$f$  - faktor otpora trenja

$G_s$  - maseni fluks kroz plašt,  $kg/(m^2s)$

$h_i$  - koeficijent prijelaza topline na strani cijevi,  $W/(m^2K)$

$h_o$  - koeficijent prijelaza topline na strani plašta,  $W/(m^2K)$

$k$  - toplinska provodnost,  $W/(mK)$

$L$  - duljna izmjenjivača topline, m

$\dot{m}_s$  - maseni protok u plaštu,  $kg/s$

$\dot{m}_t$  - maseni protok u cijevima,  $kg/s$

$N_t$  - broj cijevi

$Nu$  - Nusseltov broj

$Pr$  - Prandtlov broj

$PT$  - razmak između cijevi, m

$Q$  - toplinski tok, W

$Re$  - Reynoldsov broj

$R_{fi}$  - otpor prljanja,  $(m^2K)/W$

$T_{c1}$  - ulazna temperatura hladne vode, °C

$T_{c2}$  - izlazna temperatura hladne vode, °C

$T_{h1}$  - ulazna temperatura tople vode, °C

$T_{h2}$  - izlazna temperatura tople vode, °C

$T_w$  - temperatura stijenke, °C

$U_c$  - koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi za čistu površinu, W/(m<sup>2</sup>K)

$U_f$  - koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi za prljavu površinu, W/(m<sup>2</sup>K)

$u_m$  - brzina struje u cijevima, m/s

$\Delta T_m$  - prava temperaturna razlika, °C

$\rho$  - gustoća fluida, kg/m<sup>3</sup>

$\varphi$  - korekcijski faktor viskoznosti

$\mu$  - dinamička viskoznost fluida, (Ns)/m<sup>2</sup>

$\Delta p_s$  - pad tlaka u plaštu, Pa

$\Delta p_t$  - pad tlaka u cijevima, Pa

# 1. UVOD

Izmjenjivači topline su uređaji kojima se postiže prijelaz topline između dva ili više fluida. Njihov rad se bazira na spoznaji da toplina uvijek prelazi sa sustava više temperature na sustav niže temperature. Time možemo postići ili grijanje ili hlađenje željenog sustava. Zbog njihove široke primjenjivosti su zastupljeni u raznim granama kao što su: prehrambena, procesna i kemijska industrija, elektroničke naprave, klima uređaji, hladnjače i frižideri.

Izmjenjivači topline se dijele:

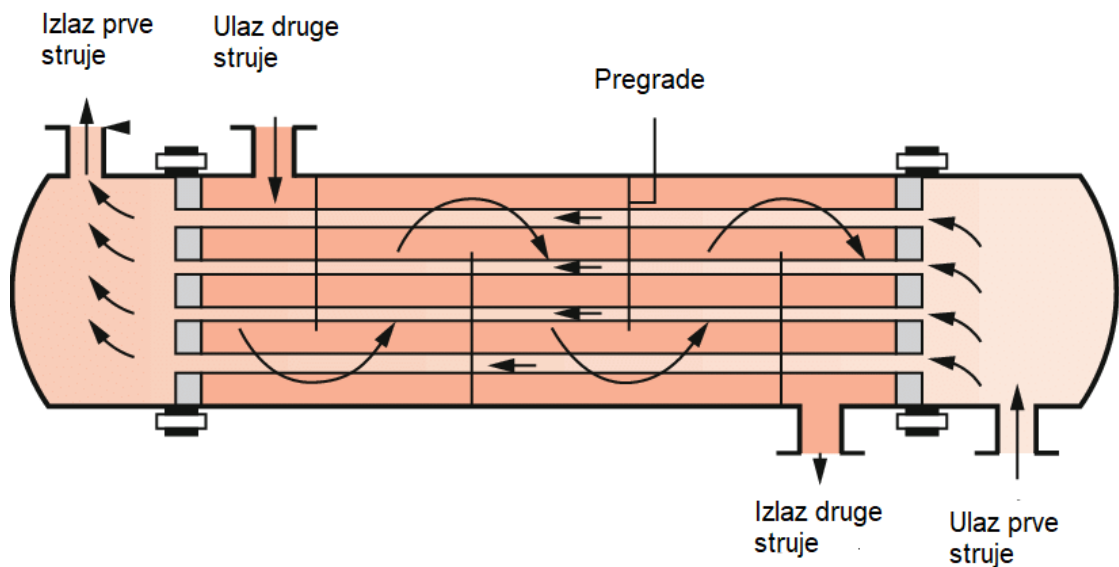
- a) na rekuperatore i regeneratore
- b) prema načinu prijenosa topline: izravan i neizravan kontakt
- c) prema obliku konstrukcije: cijevni pločasti i orebreni
- d) prema mehanizmu prijenosa topline: jednofazni i dvofazni
- e) prema smjeru strujanja fluida: istosmjerni, protusmjerni i križni

Shell and tube izmjenjivači topline su najprilagodljiviji tip izmjenjivača topline. Pružaju relativno velik omjer površine prelaska topline te volumena i mase. Također su povoljni za čišćenje i održavanje.

## 2. SHELL AND TUBE IZMJENJIVAČI TOPLINE

### 2.1 OSNOVNI DIJELOVI KONSTRUKCIJE

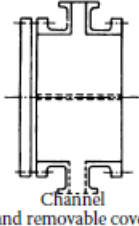
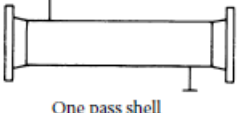
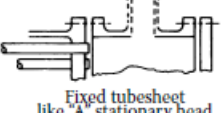
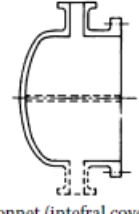
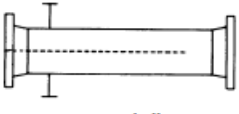
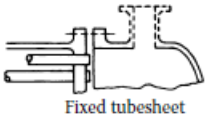
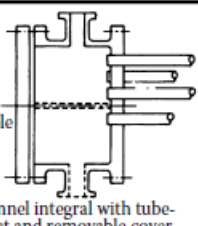
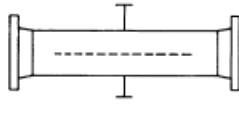
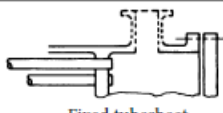
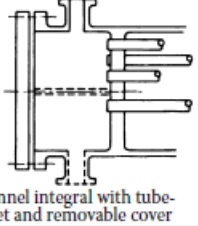
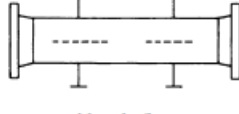
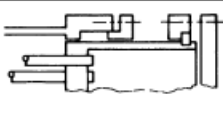
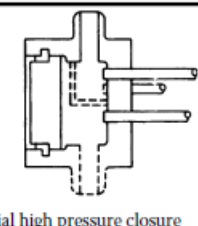
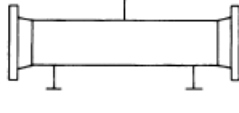
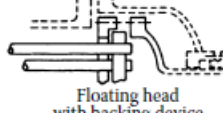
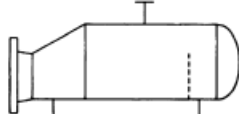
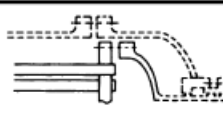
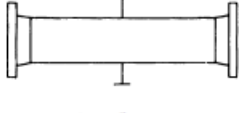
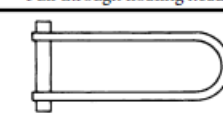
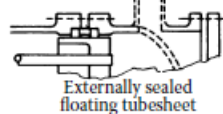
Kao što im ime nalaže sastoje se od cilindričnog plašta i paralelnog snopa cijevi koje prolaze kroz plašt. Kroz cijevi prolazi jedan fluid dok drugi prolazi po osi plašta i okomito na os. Osnovni dijelovi su: plašt, snop cijevi, prednja glava, stražnja glava, pregrade i cijevne stijene.



Slika 2.1 *Shell and tube izmjenjivač topline sa jednim prolazom* [1]

#### 2.1.1 VRSTE PLAŠTEVA

Razne prednje i stražnje glave te plaševi su standardizirani po TEMA kriteriju. Grupirani su po slovima abecede.

	Front end stationary head types		Shell types		Rear end head types
A	 Channel and removable cover	E	 One pass shell	L	 Fixed tubesheet like "A" stationary head
B	 Bonnet (integral cover)	F	 Two pass shell with longitudinal baffle	M	 Fixed tubesheet like "B" stationary head
C	 Removable tube bundle only Channel integral with tube-sheet and removable cover	G	 Split flow	N	 Fixed tubesheet like "N" stationary head
N	 Channel integral with tube-sheet and removable cover	H	 Double split flow	P	 Outside packed floating head
D	 Special high pressure closure	J	 Divided flow	S	 Floating head with backing device
		K	 Kettle type reboiler	T	 Pull through floating head
		X	 Cross flow	U	 U-tube bundle
				W	 Externally sealed floating tubesheet

Slika 2.2 Standardni tipovi prednjih glava, plašteva i stražnjih glava [2]

E – tip je najrasprostranjeniji zbog svoje jednostavnosti i relativno niske cijene. Fluid ulazi u plašt na jednoj strani a izlazi na drugoj. Cijevi mogu imati jedan ili više prolaza a podržane su poprečnim pregradama. Najčešće se primjenjuje za jednofazne primjene strujanja fluida.

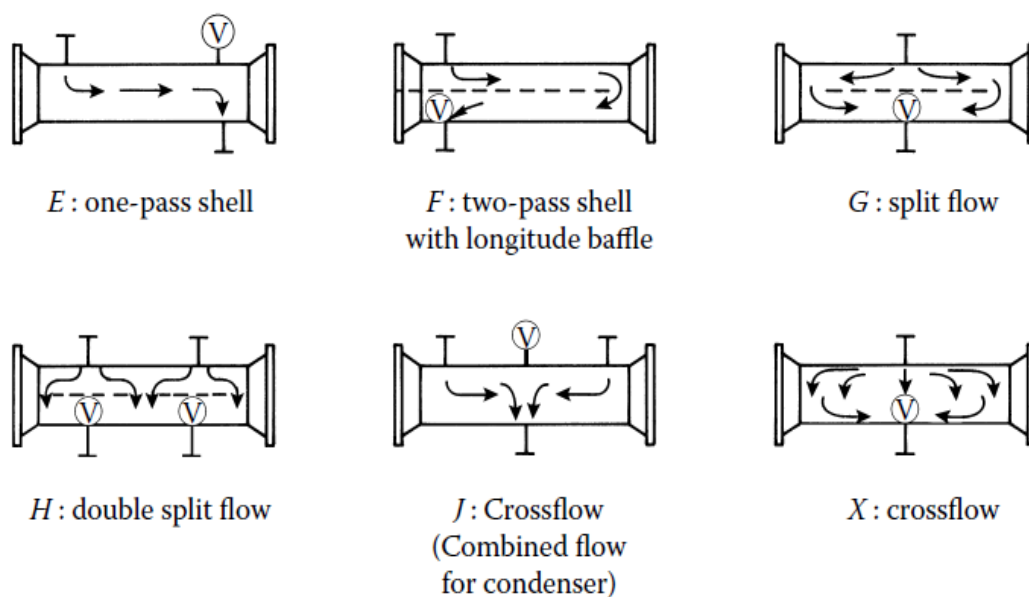
F – tip je vrsta plašta koja ima horizontalnu pregradu koja dijeli plašt na dvije jedinice, odnosno dva prolaza. Da bi se povećala efektivna temperaturna razlika (te stoga i učinkovitost samog izmjenjivača topline) poželjan je čisti protutok u

dvoprolaznom izmjenjivaču topline. Pad tlaka je mnogo veći u usporedbi s padom tlaka E – plaštu.

J – tip se primjenjuje za konstrukcije s malim padom tlaka, npr. kondenzator u vakuumu. Fluid ulazi na sredini plašta i tok se dijeli na dva dijela. Jedna mlaznica se nalazi na sredini cijevi dok druge dvije na krajevima cijevi. Pad tlaka je oko 1/8 pada tlaka usporedivog E plašta.

X – tip ima ulaz i izlaz fluida na sredini plašta. Dva fluida struje po cijeloj duljini cijevi i križno su podijeljeni. Ne koriste se pregrade stoga je pad tlaka vrlo malen. Koriste se za kondenzatore i plinove niskog tlaka.

G i H – tipovi imaju podijeljene tokove i koriste se za specifične primjene. G plašt ima horizontalne pregrade s uklonjenim krajevima. Mlaznice plašta su 180° razmaknute na sredini cijevi. Ima isti pad tlaka kao E plašt ali učinkovitost izmjenjivača topline je veća za istu površinu i iste parametre strujanja. H plašt je sličan G plaštu ali sa dvije izlazne mlaznice i dvije horizontalne pregrade.



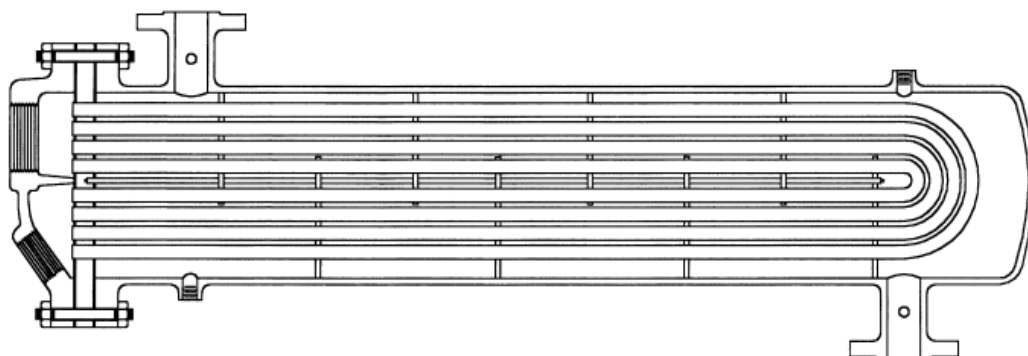
Slika 2.3 Najčešći tipovi plašteva (za primjenu kondenzatora) [2]

## 2.1.2 VRSTE CIJEVNIH SNOPOVA

Glavna funkcija im je omogućiti toplinsku ekspanziju, osigurati jednostavnost čišćenja ili ostvariti najjeftiniju konstrukciju ako ostale značajke nisu bitne.

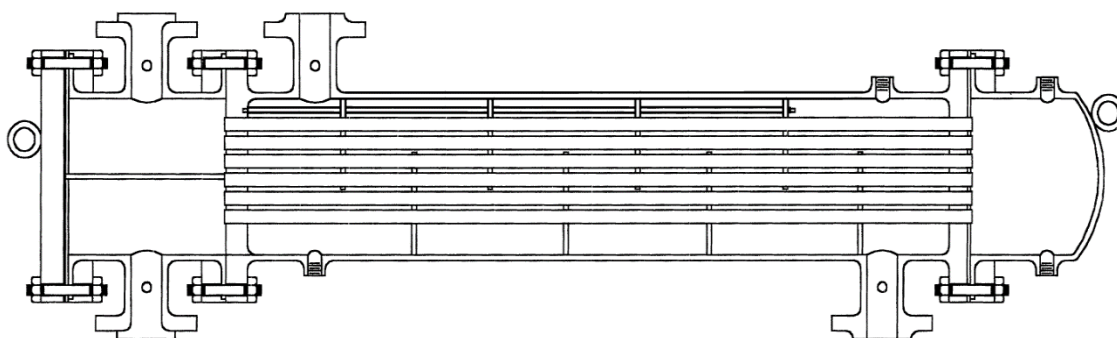
U – cijevna konfiguracija omogućava neovisnu ekspanziju cijevi i plašta. Iz tog razloga je toplinska ekspanzija neograničena. Također je i najjeftinija izvedba zbog

potrebe za samo jednom cijevnom stijenom. Pojedinačne cijevi nije moguće zamijeniti osim s vanjske strane. Cijevi se ne mogu mehanički čistiti iznutra.



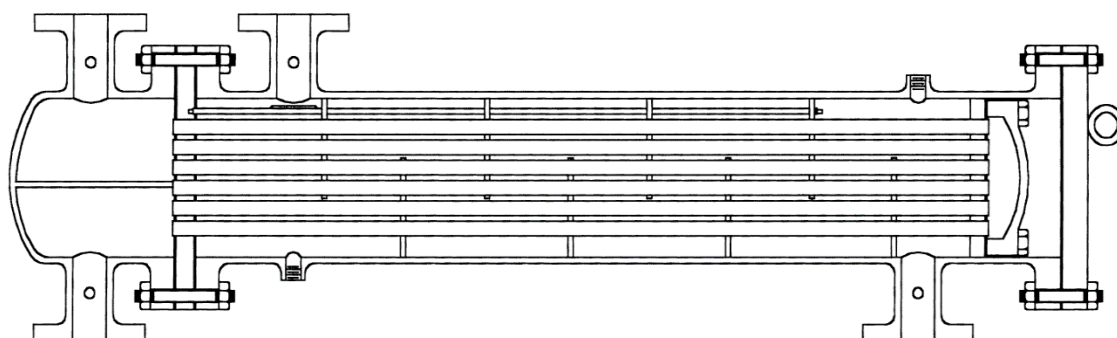
Slika 2.4 U – cijevna konfiguracija u jednoproložnom plaštu [2]

Druga značajna konfiguracija ima zavarene cijevne stijene za plašt što onemogućava pristup vanjskom prostoru snopa cijevi. Prednosti ove izvedbe su zamjenjivost pojedinih cijevi, lagano čišćenje cijevi na mehanički način i niska cijena. Omogućava ograničenu toplinsku ekspanziju.



Slika 2.5 Dvoproložni cijevni snop u jednoproložnom plaštu konstruirani za mehaničko čišćenje cijevi [2]

Razvijeno je nekoliko varijacija koje omogućuju cijevnoj stijeni da pluta, odnosno pomiče sa toplinskom ekspanzijom. Snop cijevi može biti izvađen sa malo rastavljanja što je vrlo korisno kod jedinica koje se jako prljaju.



Slika 2.6 Izmjenjivač topline sličan onome na slici 5. osim plutajuće glave [2]



### 2.1.3 CIJEVI I PROLAZI CIJEVI

Općenito velik broj prolaza cijevi se koristi za povećanje brzine unutar cijevi i koeficijenta prolaza topline te za smanjenje nakupljanja nečistoća. U slučaju da je potrebno da fluid u cijevima ulazi i izlazi na istoj strani, obavezan je paran broj prolaza kroz cijevi.

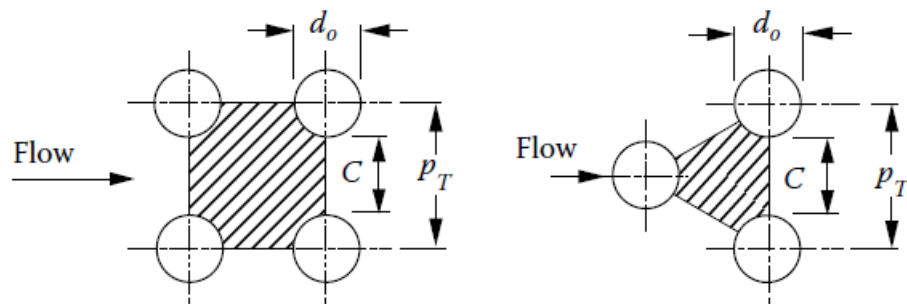
Materijal cijevi je uobičajeno niskouglični čelik, niskolegirani čelik, korozijski postojani čelik, bakar, mesing, kupronikl, aluminij (u obliku legure) ili titan. Ostali materijali su prihvatljivi u specijalnim primjenama.

Debljina stjenki cijevi je standardizirana po pravilima Birmingham Wire Gage (BWG). Manji promjeri cijevi se (8-15 mm) preferiraju zbog veće površinske (volumenske) gustoće ali su ograničeni na 20 mm u svrhu čišćenja cijevi. Veći promjeri cijevi su često potrebni za kondenzatore i bojlere.

Duljina cijevi utječe na cijenu i rad izmjenjivača topline. Što su cijevi dulje manje ih je potrebno, manje je rupa bušeno te je promjer plašta manji te je konačna cijena niža. Opće pravilo je limitirano najboljim omjerom promjer plašta – duljina cijevi koji bi trebao biti u granicama od 1/5 do 1/15. Najveća duljina cijevi je konačno limitirana transportom do otprilike 30 m.

### 2.1.4 RASPORED CIJEVI

Raspored je definiran kutem između cijevi. Raspored s kutem od 30° rezultira najvećom gustoćom cijevi i koristi se osim ako zahtjevi drugačije određuju. Razmak cijevi  $P_T$  se odabire tako da je omjer razmaka i promjera cijevi  $P_T/d_o$  između 1,25 i 1,5. Kada su cijevi preblizu, cijevna stijena postaje strukturno slaba. Broj cijevi koji može biti postavljen ovisi o rasporedu cijevi, vanjskom promjeru cijevi, veličini razmaka, broju prolaza i promjeru plašta.

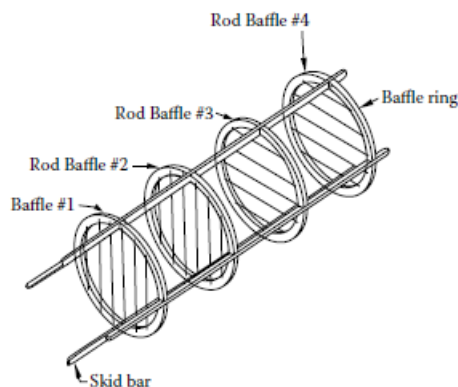


Slika 2.7 Kvadratni i trokutasti raspored cijevi [1]

## 2.1.5 VRSTE I GEOMETRIJA PREGRADA

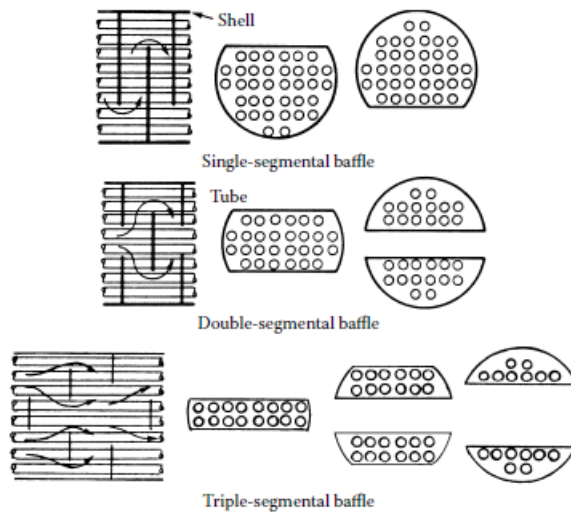
Pregrade osnovno služe za potporu cijevnog snopa i daju strukturi krutost te zaustavljaju vibracije a sekundarno za preusmjerenje toka preko snopa u svrhu postizanja većeg koeficijenta prolaza topline.

Pregrade mogu biti uzdužne i poprečne dok se poprečne još dijele na pločaste i šipkaste.



Slika 2.8 Šipkasta pregrada [2]

U najvećoj uporabi su pločaste pregrade a od pločastih su najčešće jednostruke i dvostruke segmentalne pregrade. One najuspješnije preusmjeravaju tok preko cijevi. Veliki naglasak mora biti dan pažljivom odabiru razmaka pregrada. Optimalni razmak je između 0,4 do 0,6 promjera plašta i preporuča se odrez 25% do 35% pregrade. Trostruke segmentalne pregrade se koriste za primjenu s niskim padom tlaka.



Slika 2.9 Pločaste pregrade [2]

## 2.1.6 RASPODJELA TOKOVA

U odlučivanju koji će fluid teći kroz cijevi a koji kroz plašt treba uzeti u obzir sljedeće:

- Prljaviji fluid teče kroz cijevi jer su jednostavnije za čistiti, posebno ako je mehaničko čišćenje potrebno.
- Fluid pod većim tlakom teče kroz cijevi. Zbog njihovog malog promjera, cijevi normalne debljine mogu podnijeti visoke tlakove.
- Korozivni fluid mora teći kroz cijevi jer u protivnom će korodirati i plašt i cijevi.
- Tok sa manjim koeficijentom prijelaza topline teče kroz plašt jer je lakše dizajnirati vanjska rebra cijevi.
- Tok sa manjim masenim protokom bi trebao teći kroz plašt jer se turbulentno strujanje ostvari pri manjem Reynoldsovom broju u plaštu.

### 3. PRORAČUN DIMENZIJA I ZNAČAJKI SHELL AND TUBE IZMJENJIVAČA TOPLINE

Na osnovu zadanih podataka potrebno je izračunati promjer plašta, broj cijevi, brzine fluida, koeficijent prijelaza na strani plašta, koeficijent prijelaza topline, srednju temperaturnu razliku, ukupnu površinu izmjenjivača topline i padove tlaka u cijevima u plaštu.

Tablica 3.1 *Zadani podaci za proračun*

Maseni protok u plaštu, $\dot{m}_s$	60 kg/s
Maseni protok u cijevima, $\dot{m}_t$	150 kg/s
Ulazna temperatura hladne vode, $T_{c1}$	15°C
Ulazna temperatura tople vode, $T_{h1}$	35°C
Izlazna temperatura tople vode, $T_{h2}$	25°C
Vanjski promjer cijevi, $d_o$	0,019 m
Unutarnji promjer cijevi, $d_i$	0,016 m
Razmak između cijevi, $P_T$	0,0254 m
Maksimalna duljina izmjenjivača topline, $L$	8 m
Otpor prljanja, $R_{ft}$	0,000176 (m <sup>2</sup> K)/W

#### 3.1 PRELIMINARNA ANALIZA

**Toplinski tok:**

$$Q = \dot{m}_s c_p (T_{h1} - T_{h2}) \quad (3.1)$$

Gdje je:

$\dot{m}_s$  - maseni protok u plaštu, kg/s

$c_p$  - specifični toplinski kapacitet, J/(kgK)

$T_{h1}$  - ulazna temperature toplije struje, °C

$T_{h2}$  - izlazna temperature toplije struje, °C

**Srednja temperatura toplije struje:**

$$T_{mh} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{2} = \frac{35 + 25}{2} = 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

Tablica 3.2 Svojstva vode pri temperaturi  $T_{mh}$

Specifični toplinski kapacitet, $c_p$	4179 J/(kgK)
Gustoća, $\rho$	995,7 kg/m <sup>3</sup>
Dinamička viskoznost fluida u plaštu, $\mu_s$	$8,15 \times 10^{-4}$ (Ns)/m <sup>2</sup>
Toplinska provodnost fluida u plaštu, $k$	0,612 W/(mK)
Prandtlov broj, $Pr$	5,57

iz (3.1)  $Q = 60 \times 4179 \times (35 - 25) = 2507,4 \text{ kW}$

**Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi:**

$$U_f = \left[ \frac{1}{h_o} + \frac{r_o}{r_i} \times \frac{1}{h_i} + R_{ft} + r_o \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

$$U_f = \left[ \frac{1}{5000} + \frac{19}{16} \times \frac{1}{4000} + 0,000174 + \frac{0,019 \ln\left(\frac{19}{16}\right)}{2 \times 45} \right]^{-1} = 1410,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$U_c = \left[ \frac{1}{h_o} + \frac{r_o}{r_i} \times \frac{1}{h_i} + r_o \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} \right]^{-1} \quad (3.4)$$

$$U_c = \left[ \frac{1}{5000} + \frac{19}{16} \times \frac{1}{4000} + \frac{0,019 \ln\left(\frac{19}{16}\right)}{2 \times 45} \right]^{-1} = 1875,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Gdje je:

$U_f$  - koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi za prljavu površinu,  $W/(m^2K)$

$U_c$  - koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi za čistu površinu,  $W/(m^2K)$

$h_o$  - koeficijent prijelaza topline na strani plašta,  $W/(m^2K)$  - pretpostavljeno 5000  $W/(m^2K)$

$h_i$  - koeficijent prijelaza topline na strani cijevi,  $W/(m^2K)$  - pretpostavljeno 4000  $W/(m^2K)$

$r_o$  - vanjski promjer cijevi, mm

$r_i$  - unutarnji promjer cijevi, mm

$R_{fi}$  - ukupni otpor prljanja,  $(m^2K)/W$

$k$  - toplinska provodnost čelika cijevi, 45  $W/(mK)$

### Prava temperaturna razlika:

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \times F \quad (3.5)$$

Gdje je:

$\Delta T_{lm}$  - srednja logaritamska razlika temperatura, °C

$F$  - korekcijski LMTD faktor

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 - \Delta T_2)} \quad (3.6)$$

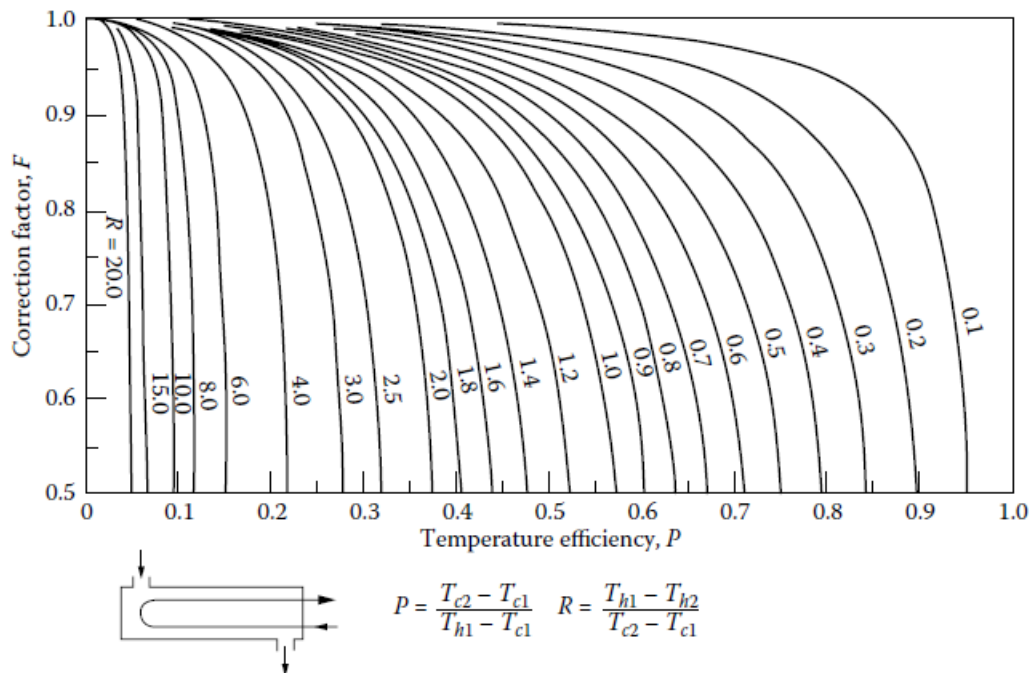
Gdje je:

$\Delta T_1 - T_{h1} - T_{c2}$

$\Delta T_2 - T_{h2} - T_{c1}$

iz (3.1) 
$$T_{c2} = T_{c1} + \frac{Q}{\dot{m}_t c_p} = 15 + \frac{2507,4 \times 10^3}{150 \times 4179} = 19 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{16-10}{\ln(16-10)} = 12,8 \text{ °C}$$



Slika 3.1 Graf za očitavanje korekcijskog faktora  $F$  [2]

$P = 0,2$  ;  $R = 2,5$

Očitano:  $F = 0,97$

$$\Delta T_m = 12,8 \times 0,97 = 12,42 \text{ }^\circ\text{C}$$

**Površina izmjene topline:**

$$A_f = \frac{Q}{U_f \Delta T_m} = \frac{2507,4 \times 10^3}{1410,1 \times 12,42} = 143,2 \text{ m}^2 \quad (3.7)$$

$$A_c = \frac{Q}{U_c \Delta T_m} = \frac{2507,4 \times 10^3}{1875,6 \times 12,42} = 107,64 \text{ m}^2 \quad (3.8)$$

Gdje je:

$A_f$  - površina izmjene topline sa prljanjem,  $\text{m}^2$

$A_c$  - površina izmjene topline bez prljanja,  $\text{m}^2$

Usvajamo  $A_f$  kao  $A_o$  (vanjska površina izmjene topline bazirana na vanjskom promjeru cijevi za daljnji proračun).

**Promjer plašta:**

$$D_s = 0,637 \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \left[ \frac{A_o(PR)^2 d_o}{L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

$$D = 0,637 \sqrt{\frac{1}{0,93}} \left[ \frac{143,2 \times 1,37^2 \times 0,019}{8} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,523 \text{ m} \approx 20,59 \text{ in.}$$

Gdje je:

$CL$  - konstanta rasporeda cijevi, za  $90^\circ$  i  $45^\circ$   $CL = 1$

$CTP$  - konstanta proračuna broja cijevi, za jedan prolaz cijevi  $CTP = 0,93$

**Broj cijevi:**

$$N_t = 0,785 \left( \frac{CTP}{CL} \right) \frac{D_s^2}{(PR)^2 d_o^2} \quad (3.10)$$

$$N_t = 0,785 \left( \frac{0,93}{1} \right) \frac{0,523^2}{1,37^2 \times 0,019^2} = 294,7 \approx 295$$

Na osnovi dobivenih podataka iz tablice uzimamo standardne dimenzije:

$D_s = 23,25 \text{ in.} \approx 0,591 \text{ m}$

$N_t = 341$

$B = (0,4-0,6)D_s = 0,3 \text{ m}$  ; odrez 25%



Tablica 3.3 *Tablica za odabir broja cijevi na osnovi promjera plašta* [2]

Tube-Shell Layouts (Tube Counts)

Shell ID (in.)	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
<i>3/4-in. OD tubes on 1-in. square pitch</i>					
8	32	26	20	20	
10	52	52	40	36	
12	81	76	68	68	60
13 ¼	97	90	82	76	70
15 ¼	137	124	116	108	108
17 ¼	177	166	158	150	142
19 ¼	224	220	204	192	188
<i>3/4-in. OD tubes on 1-in. square pitch</i>					
21 ¼	277	270	246	240	234
23 ¼	341	324	308	302	292
25	413	394	370	356	346
27	481	460	432	420	408
29	553	526	480	468	456
31	657	640	600	580	560
33	749	718	688	676	648
35	845	824	780	766	748
37	934	914	886	866	838
39	1049	1024	982	968	948
<i>1-in. OD tubes on 1 1/4-in. square pitch</i>					
8	21	16	14		
10	32	32	26	24	
12	48	45	40	38	36
13 ¼	61	56	52	48	44
15 ¼	81	76	68	68	64
17 ¼	112	112	96	90	82
19 ¼	138	132	128	122	116
21 ¼	177	166	158	152	148
23 ¼	213	208	192	184	184
25	260	252	238	226	222
27	300	288	278	268	260
29	341	326	300	294	286
31	406	398	380	368	358
33	465	460	432	420	414
35	522	518	488	484	472
37	596	574	562	544	532
39	665	644	624	612	600

## 3.2 PROVJERA DOBIVENIH PODATAKA PRELIMINARNOM ANALIZOM

Srednja temperatura hladnije struje:

$$T_{mc} = \frac{T_{c1} + T_{c2}}{2} = \frac{15 + 19}{2} = 17 \text{ °C} \quad (3.11)$$

Tablica 3.2 Svojstva vode pri temperaturi  $T_{mc}$

Specifični toplinski kapacitet, $c_p$	4183 J/(kgK)
Gustoća, $\rho$	998,86 kg/m <sup>3</sup>
Dinamička viskoznost fluida u cijevima, $\mu_s$	$10,67 \times 10^{-4}$ (Ns)/m <sup>2</sup>
Toplinska provodnost fluida u cijevima, $k$	0,599 W/(mK)
Prandtlov broj, $Pr$	7,51

Koeficijent prijelaza topline na strani plašta:

$$\frac{h_o \times D_e}{k} = 0,36 \left( \frac{D_e \times G_s}{\mu} \right)^{0,55} \left( \frac{c_p \times \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (3.12)$$

Ekvivalentni promjer na strani plašta:

$$D_e = \frac{4 \left( P_T^2 - \pi \times \frac{d_o^2}{4} \right)}{\pi d_o} = \frac{4 \left( 0,0254^2 - \pi \times \frac{0,019^2}{4} \right)}{\pi \times 0,019} = 0,0242 \text{ m} \quad (3.13)$$

Zazor cijevi:

$$C = P_T - d_o = 0,0254 - 0,019 = 0,0064 \text{ m} \quad (3.14)$$

**Površina uz koju struji tok u plaštu:**

$$A_s = \frac{D_s \times C \times B}{P_T} = \frac{0,591 \times 0,0064 \times 0,3}{0,0254} = 0,0447 \text{ m}^2 \quad (3.15)$$

**Maseni fluks kroz plašt:**

$$G_s = \frac{\dot{m}_s}{A_s} = \frac{60}{0,0447} = 1342,3 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad (3.16)$$

**Reynoldsov broj:**

$$Re = \frac{G_s D_e}{\mu} = \frac{1342,3 \times 0,0242}{8,15 \times 10^{-4}} = 39857 \quad (3.17)$$

**Temperatura stijenke:**

$$T_w = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{c1} + T_{c2}}{2} + \frac{T_{h1} + T_{h2}}{2} \right) \quad (3.18)$$
$$T_w = \frac{1}{2} \left( \frac{15 + 19}{2} + \frac{35 + 25}{2} \right) = 23,5 \text{ }^\circ\text{C} \approx 296,5 \text{ K}$$

očitano:

$$\mu_w = 9,09 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$$

iz (3.12):

$$\frac{h_o \times 0,0242}{0,612} = 0,36 \left( \frac{0,0242 \times 1342,3}{8,15 \times 10^{-4}} \right)^{0,55} \left( \frac{4179 \times 8,15 \times 10^{-4}}{0,612} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{8,15 \times 10^{-4}}{9,09 \times 10^{-4}} \right)^{0,14}$$

$$h_o = 5394,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Koeficijent prijelaza topline na strani cijevi:**

$$h_i = \frac{Nu_t k}{d_i} \quad (3.19)$$

**Nusseltov broj na strani cijevi:**

$$Nu_t = \frac{\frac{f}{2}(Re-1000)Pr}{1+12,7\left(\frac{f}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (3.20)$$

**Faktor otpora trenja na strani cijevi:**

$$f = (1,58 \ln Re - 3,28)^{-2} \quad (3.21)$$

**Reynoldsov broj:**

$$Re = \frac{\rho_t u_m d_i}{\mu} \quad (3.22)$$

**Brzina struje u cijevima:**

$$u_m = \frac{\dot{m}_t}{\rho_t A_{tp}} \quad (3.23)$$

**Ukupna unutarnja površina cijevi po kojoj struji fluid:**

$$A_{tp} = \frac{\pi d_i^2}{4} \times \frac{N_t}{2} = \frac{\pi \times 0,016^2}{4} \times \frac{341}{2} = 0,0343 \text{ m}^2 \quad (3.24)$$

iz (3.23):

$$u_m = \frac{150}{998,86 \times 0,0343} = 4,38 \text{ m/s}$$

iz (3.22)

$$Re = \frac{998,86 \times 4,38 \times 0,016}{10,67 \times 10^{-4}} = 65605$$

iz (3.21)

$$f = (1,58 \ln(65605) - 3,28)^{-2} = 0,00493$$

iz (3.20)

$$Nu_t = \frac{\frac{0,00493}{2} \times (65605 - 1000) \times 7,51}{1 + 12,7 \left( \frac{0,00493}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( 7,51^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} = 429$$

iz (3.19)

$$h_i = \frac{429 \times 0,595}{0,016} = 15953 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Ukupni koeficijent prolaza topline:**

$$U_f = \left[ \frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o R_{ft}}{d_i} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k} + R_{ft} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (3.25)$$

$$U_f = \left[ \frac{0,019}{0,016 \times 15953} + \frac{0,019 \times 0,000179}{0,016} + \frac{0,019 \ln\left(\frac{19}{16}\right)}{2 \times 45} + 0,000176 + \frac{1}{5394,2} \right]^{-1}$$

$$U_f = 1468,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_c = \left[ \frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (3.24)$$

$$U_c = \left[ \frac{0,019}{0,016 \times 15953} + \frac{0,019 \ln\left(\frac{19}{16}\right)}{2 \times 45} + \frac{1}{5394,2} \right]^{-1}$$

$$U_c = 3377,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Pad tlaka na strani plašta:**

$$\Delta p_s = \frac{f G_s^2 (N_b + 1) D_s}{2 \rho_s D_e \varphi_s} \quad (3.25)$$

**Korekcijski faktor viskoznosti:**

$$\varphi_s = \left( \frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0,14} = \left( \frac{8,15 \times 10^{-4}}{9,09 \times 10^{-4}} \right)^{0,14} = 0,9848 \quad (3.26)$$

**Faktor trenja na strani plašta:**

$$f = e^{0,576 - 0,19 \ln Re} = e^{0,576 - 0,19 \ln 39857} = 0,238 \quad (3.27)$$

**Broj pregrada:**

$$N_b = \frac{L}{B} - 1 = \frac{8}{0,3} - 1 = 26 \quad (3.28)$$

iz (3.25)

$$\Delta p_s = \frac{0,238 \times 1342,3^2 \times (26 + 1) \times 0,591}{2 \times 995,7 \times 0,0242 \times 0,9848} = 144180 \text{ Pa} \approx 20,9 \text{ psi}$$

**Duljina cijevi:**

$$L = \frac{A_o}{\pi d_o N_t} \quad (3.29)$$

iz (3.7)

$$A_o = \frac{2507,4 \times 10^3}{1468,2 \times 12,42} = 137,5 \text{ m}^2$$

iz (3.29)

$$L = \frac{137,5}{\pi \times 0,019 \times 341} = 6,75 \text{ m} < 8 \text{ m}$$

**Pad tlaka na strani cijevi:**

$$\Delta p_t = \left( 4f \frac{LN_p}{d_i} + 4N_p \right) \frac{\rho_t u_m^2}{2} \quad (3.30)$$

$$\Delta p_t = \left( 4 \times 0,00493 \times \frac{6,75 \times 1}{0,016} + 4 \times 1 \right) \frac{998,86 \times 4,38^2}{2}$$

$$\Delta p_t = 118035 \text{ Pa} \approx 17,12 \text{ psi}$$



## 4. DISKUSIJA REZULTATA

**Zadatak:** Dimenzionirati shell and tube izmjenjivač topline koji će vodom masenog protoka 60 kg/s u plaštu grijati vodu u cijevima s masenim protokom 150 kg/s. Početna temperatura toplije vode je 35 °C a izlazne 25 °C. Temperatura hladnije vode na ulazu je 15 °C.

Proračunom je utvrđeno da je potreban toplinski tok 2507,4 kW a izlazna temperatura hladnije vode 19 °C.

Izvršenjem proračuna dolazi se do dimenzija koje će zadovoljiti potrebne parametre:

$$D_s = 0,591\text{m}$$

$$N_t = 341$$

$$N_b = 26$$

$$L = 6,75\text{m}$$

## 5. ZAKLJUČAK

Shell and tube izmjenjivač topline jedan je od najčešće korištenih tipova izmjenjivača topline u industrijskim aplikacijama zbog svoje robusnosti, učinkovitosti i sposobnosti za rad pri visokim temperaturama i tlakovima. Zadatak ovog rada je dimenzioniranje shell and tube izmjenjivača topline koji služi za zagrijavanje vode u jednom prolazu.

U radu je korištena analitička metoda proračuna koja se sastoji od:

**Toplinske analize:** Izračun koeficijenta prolaza topline ( $U$ ) i potrebne površine za prijenos topline koristeći formule koje uključuju srednju logaritamsku temperaturnu razliku.

**Hidrauličke analize:** Proračun pada tlaka na strani plašta i cijevi te osiguravanje da brzina fluida bude unutar prihvatljivih granica kako bi se izbjegli problemi s erozijom.

Dobivene su geometrijske karakteristike izmjenjivača topline koje zadovoljava prijenos zadanog toplinskog toka. Međutim, dodatne analize su potrebne kako bi se osiguralo da je konstrukcija ekonomična i optimalna. Ovo uključuje provjeru operativnih i kapitalnih troškova, učinkovitost prijenosa topline, pada tlaka i drugih ključnih parametara koji utječu na ukupnu izvedbu i ekonomičnost izmjenjivača topline.

## LITERATURA

[1] *Heat exchangers*. Arhse (02.08.2020.)

<https://www.arhse.com/heat-exchangers/> (03.06.2024.)

[2] Kakac, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

[3] Galović A.: *Termodinamika II*, Zagreb; Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003.