

# Termodinamička analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline

---

Capar, Marianne

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:098981>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**TERMODINAMIČKA ANALIZA IZMJENE TOPLINE U  
CIJEVNOM IZMJENJIVAČU TOPLINE**

Rijeka, studeni 2023.

Marianne Capar  
0035212216

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**TERMODINAMIČKA ANALIZA IZMJENE TOPLINE U  
CIJEVNOM IZMJENJIVAČU TOPLINE**

Mentorica: Prof. dr. sc. Anica Trp

Rijeka, studeni 2023.

Marianne Capar  
0035212216

Rijeka, 9. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Tehnički izmjenjivači topline**  
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Marianne Capar (0035212216)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Procesno i energetska strojarstvo**

Zadatak: **TERMODINAMIČKA ANALIZA IZMJENE TOPLINE U CIJEVNOM  
IZMJENJIVAČU TOPLINE / THERMODYNAMIC ANALYSIS OF HEAT  
TRANSFER IN A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER**

### Opis zadatka:

Potrebno je provesti termodinamički proračun te izvršiti analizu izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline. Postaviti jednadžbu toplinske bilance i jednadžbu prolaza topline. Opisati i provesti termodinamičke proračune za odabrane izvedbe i geometrijske karakteristike te pogonske uvjete unutar cijevnog izmjenjivača topline. Analizirati utjecaj odabranih parametara na proces izmjene topline te usporediti karakteristične fizikalne veličine i rezultate proračuna. Rad mora obuhvatiti: uvod, osnove tehničkih izmjenjivača topline, opis fizikalnog problema izmjene topline, metode termodinamičkog proračuna, prikaz i analizu dobivenih rezultata, zaključak, popis oznaka, popis korištene literature te sažetak i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Marianne Capar*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Anica Trp

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## **IZJAVA**

o samostalnoj izvedbi Diplomskog rada

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

U Rijeci, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ZAHVALA

*Zahvaljujem prof.dr.sc. Anici Trp na ukazanom povjerenju, prenesenom znanju i razumijevaju tijekom studija i izrade ovog rada.*

# Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. PRIJELAZ TOPLINE.....	2
2.1. Osnovni oblici prijelaza topline .....	2
2.1.1. Provođenje topline .....	2
2.1.2. Konvekcija .....	6
2.1.3. Zračenje.....	9
2.2. Prolaz topline .....	11
3. TEHNIČKI IZMJENJIVAČI TOPLINE .....	14
3.1. Rekuperativni izmjenjivači topline .....	14
3.1.1. Podjela rekuperatora prema smjeru strujanja fluida .....	15
3.1.2. Podjela rekuperatora prema vrsti izrade.....	19
3.2. Regenerativni izmjenjivači topline .....	22
3.3. Direktni izmjenjivači topline .....	23
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN I ANALIZA IZMJENE TOPLINE U CIJEVNOM IZMJENJIVAČU TOPLINE.....	24
4.1. Analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu .....	24
4.1.1. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline bez pregrada .....	24
4.1.2. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s pregradama.....	30
4.1.3. Analiza rezultata .....	36
4.2. Analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu .....	39
4.2.1. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline bez pregrada .....	39
4.2.2. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s pregradama.....	44

4.2.3. Analiza rezultata .....	51
4.3. Analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu .....	54
4.3.1. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline bez pregrada .....	54
4.3.2. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s pregradama.....	59
4.3.3. Analiza rezultata .....	65
4.4. Usporedba rezultata za cijevne izmjenjivače topline s različitim brojem cijevi u cijevnom snopu .....	68
5. ZAKLJUČAK .....	77
6. LITERATURA .....	79
7. POPIS OZNAKA .....	80
8. POPIS SLIKA .....	83
8. POPIS TABLICA .....	85
9. SAŽETAK .....	86
9. SUMMARY .....	87



## 1. UVOD

Pojam toplinske ravnoteže se koristi kada se govori o dva tijela jednakih temperatura. Tijela različitih temperatura nastoje postići toplinsku ravnotežu.

Izmjenjivač topline je aparat unutar kojeg dva ili više fluida izmjenjuju toplinsku energiju, prilikom čega se jedan od fluida hladi ili zagrijava pomoću drugog. Primjena izmjenjivača topline je široka. Primjerice, koriste se u postrojenjima centralnog grijanja, kao bojleri ili radijatori te u postrojenjima rashladne tehnike u obliku isparivača ili kondenzatora. Također, primjenu pronalaze i u termoenergetskim postrojenjima, kao i u kemijskoj i prehrambenoj industriji.

U ovom radu provest će se termodinamička analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline, pri čemu je izvršen analitički proračun za slučajeve različitog broja cijevi u cijevnom snopu i dva međusobna smjera strujanja fluida; istosmjerni i protusmjerni. Odabrane izvedbe izmjenjivača topline su bez pregrada u bubnju i s pregradama u bubnju.

Rad se sastoji od pet poglavlja. Na samom početku su dane osnove izmjene topline, kako bi se pobliže objasnio princip rada izmjenjivača topline. Potom je prikazana njihova podjela te su opisane osnovne karakteristike svake od skupina.

U četvrtom poglavlju proveden je termodinamički proračun, nakon čega su analizirani rezultati izlaznih temperatura obje struje, izmijenjenih toplinskih tokova i iskoristivosti topline. Nadalje, izvršena je usporedba izračunatih vrijednosti za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu.

Zaključak te osvrta na cjelokupan rad i dobivene rezultate, dani su u posljednjem poglavlju.

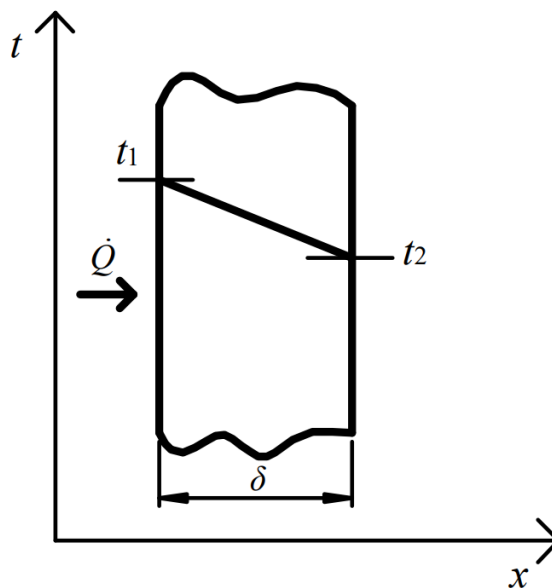
## 2. PRIJELAZ TOPLINE

### 2.1. Osnovni oblici prijelaza topline

Tehnički izmjenjivači topline su naprave unutar kojih fluidi izmjenjuju toplinu. Navedena izmjena energije naziva se prijelaz topline. Osnovni oblici prijelaza topline su provođenje, konvekcija i zračenje. Provođenje i konvekcija su vezani za tvar, dok zračenje nije, što znači da između tijela koja izmjenjuju toplinu može biti područje s manjom ili većom temperaturom od tih tijela.

#### 2.1.1. Provođenje topline

Prijenos topline kroz krutu stijenku naziva se provođenje topline. Ostvaruje se međudjelovanjem čestica koje imaju različitu prosječnu brzinu i temperaturu. Dio kinetičke energije se prilikom sudara prenosi s bržih molekula s većom temperaturom, na sporije molekule s manjom temperaturom, stoga izmijenjeni toplinski tok ima smjer temperaturnog pada.



Slika 2.1. Provođenje topline kroz ravnu stijenku

Slika 2.1. prikazuje stacionarno provođenje topline kroz ravnu stijenku. Ono se opisuje Fourierovim zakonom provođenja topline koji glasi:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \cdot F \text{ [W]} \quad (2.1.)$$

gdje je:

$\lambda$  – koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

$t_1, t_2$  – temperature na površinama stijenke [°C, K]

$\delta$  – debljina stijenke [mm]

$F$  – površina stijenke (površina izmjene topline) [m<sup>2</sup>]

Gustoća toplinskog toka računa se kao:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{F} = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.2.)$$

Izmijenjena toplina u vremenu  $\tau$  [s] iznosi:

$$Q = \dot{Q} \cdot \tau \text{ [J]} \quad (2.3.)$$

Toplinski otpor  $W$  jednak je:

$$W = \frac{\delta}{\lambda \cdot F} \text{ [K/W]} \quad (2.4.)$$

Toplinska vodljivost  $L$ ,

$$L = \frac{1}{W} = \frac{\lambda \cdot F}{\delta} \text{ [W/K]} \quad (2.5.)$$

Specifični toplinski otpor  $w$  iznosi:

$$w = W \cdot F = \frac{\delta}{\lambda} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (2.6.)$$

Koeficijent toplinskog otpora  $\omega$  računa se kao:

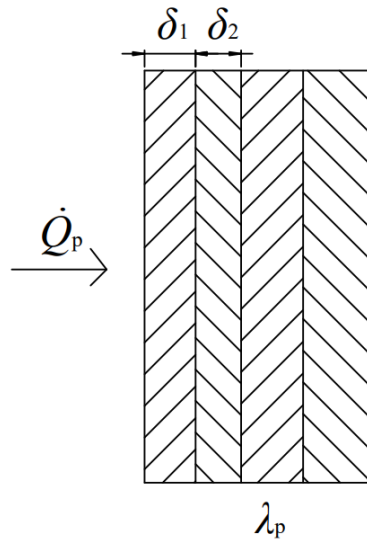
$$\omega = \frac{F \cdot W}{\delta} = \frac{1}{\lambda} \text{ [mK/W]} \quad (2.7.)$$

U slučaju kada je stijenka sastavljena iz više slojeva različitih materijala, toplinski tok može prolaziti poprečno kroz slojeve ili duž slojeva stijenke.

Kada su slojevi stijenke smješteni uzastopno, na način kako je prikazano slikom 2.2., tada se toplinski otpori zbrajaju kako slijedi:

$$W_p = \sum_{i=1}^n W_i = \frac{\delta_1 \cdot \omega_1 + \delta_2 \cdot \omega_2 + \dots + \delta_n \cdot \omega_n}{F} \quad (2.8.)$$

gdje je  $W_p$  ukupni toplinski otpor.



Slika 2.2. Toplinski tok poprečno na slojeve višeslojne stijenke

Toplinski tok poprečno na slojeve  $\dot{Q}_p$  tada iznosi:

$$\dot{Q}_p = (t_1 - t_2) \cdot \frac{F}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (2.9.)$$

Prosječni koeficijent toplinskog otpora  $\omega_p$  računa se kao:

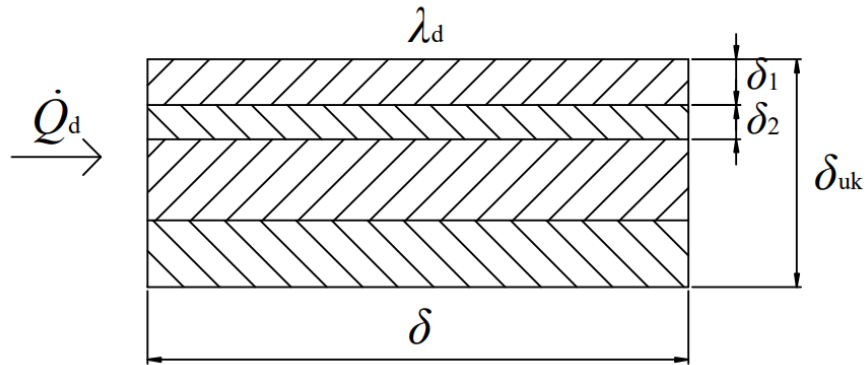
$$\omega_p = \frac{\omega_1 \cdot \delta_1 + \omega_2 \cdot \delta_2 + \dots + \omega_n \cdot \delta_n}{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n} \quad (2.10.)$$

Prosječni koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda_p$  je jednak:

$$\lambda_p = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (2.11.)$$

Kada je stijenka sastavljena od usporedno smještenih slojeva, kao na slici 2.3., tada se vrijednosti toplinskih vodljivosti zbrajaju pa prosječni koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda_d$  iznosi:

$$\lambda_d = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \quad (2.12.)$$



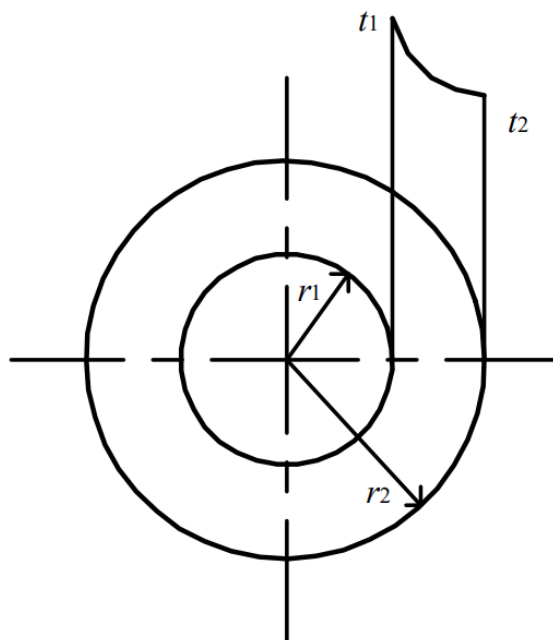
Slika 2.3. Toplinski tok duž slojeva višeslojne stijenke

Toplinski tok duž slojeva iznosi:

$$\dot{Q}_d = \frac{\lambda_d \cdot (t_1 - t_2) \cdot F}{\delta} \quad (2.13.)$$

Prosječni koeficijent toplinske vodljivosti uzdužno na slojeve veći je od prosječnog koeficijenta poprečno na slojeve,

$$\lambda_d > \lambda_p \quad (2.14.)$$



Slika 2.4. Provođenje topline kroz stijenku cijevi

U slučaju kada se toplinski tok provodi kroz stijenku cijevi, što je prikazano slikom 2.4., toplinski tok je jednak:

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \text{ [W]} \quad (2.15.)$$

gdje je:

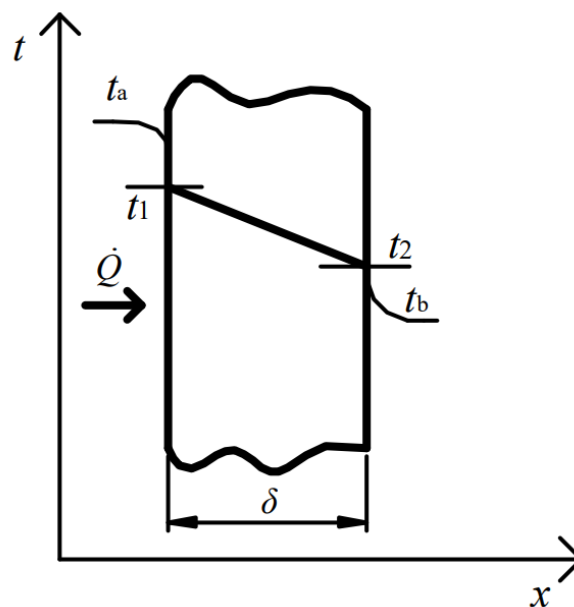
$L$  – duljina cijevi [m]

$r_1$  – unutarnji polumjer cijevi [m]

$r_2$  – vanjski polumjer cijevi [m]

### 2.1.2. Konvekcija

Izmjena topline između fluida i krute stijenke naziva se konvekcija. Slika 2.5. prikazuje prijenos topline konvekcijom, gdje se s lijeve strane nalazi topliji fluid koji predaje toplinu konvekcijom na lijevu površinu stijenke, a s desne strane hladniji fluid koji preuzima toplinu konvekcijom s desne površine stijenke.



Slika 2.5. Prijenos topline konvekcijom

Razlikuju se prirodna ili slobodna konvekcija i prisilna, odnosno nametnuta konvekcija. Slobodna konvekcija se javlja u slučajevima kada su dodirna stijenka i fluid različitih temperatura pa je strujanje fluida uzrokovano izmjenom topline. Kada je strujanje fluida podržano vanjskim

uvjetima, kao što je npr. razlika tlakova ili rad pogonskog uređaja (ventilator, pumpa), tada se radi o prisilnoj konvekciji.

Jednadžba kontinuiteta, tj. jednadžba očuvanja mase, Navier – Stokesove jednadžbe, tj. jednadžbe očuvanja količine gibanja i jednadžba očuvanja energije zajedno s početnim i rubnim uvjetima čine Oberbeckov matematički model kojim je opisan prijenos topline konvekcijom. Rješavanjem diferencijalnih jednadžbi strujanja i prijelaza topline dobivaju se raspodjele brzina, tlakova i temperatura. Analitičko rješavanje spomenutog matematičkog modela koristi se za jednostavne geometrije i daje rješenje u svim točkama domene. Suprotno navedenom, numeričko rješavanje upotrebljava se u slučaju složenih geometrija, prilikom čega se rješenja dobivaju samo u zadanim čvorovima domene.

Rješavanje bezdimenzijskih oblika diferencijalnih jednadžbi strujanja i prijelaza topline vrši se postupkom eksperimentalne integracije koji se zasniva na povezivanju eksperimenta s teoremom sličnosti. Rješavanjem se dobivaju polja bezdimenzijskih brzina, tlakova i temperatura, koja će onda vrijediti za sve probleme koji zadovoljavaju definirani kriterij sličnosti.

Izmijenjeni toplinski tok opisan je Newtonovom jednadžbom prijelaza topline konvekcijom koja glasi:

$$\dot{Q} = F \cdot \alpha_a \cdot (t_a - t_1) \text{ [W]} \quad (2.16.)$$

odnosno,

$$\dot{Q} = F \cdot \alpha_b \cdot (t_2 - t_b) \text{ [W]} \quad (2.17.)$$

gdje je:

$F$  – površina izmjene topline [ $\text{m}^2$ ]

$\alpha_a$  - koeficijent prijelaza topline konvekcijom s toplijeg fluida na lijevu površinu stijenke [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$\alpha_b$  - koeficijent prijelaza topline konvekcijom s desne površine stijenke na hladniji fluid [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$t_a$  – temperatura toplijeg fluida [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

$t_b$  – temperatura hladnijeg fluida [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

$t_1, t_2$  – temperature površina stijenke [ $^{\circ}\text{C}$ , K]

Izmijenjena toplina je jednaka:

$$Q = \dot{Q} \cdot \tau \text{ [J]} \quad (2.18.)$$

gdje je:

$\tau$  – vrijeme [s]

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom  $\alpha$  ovisi o fizikalnim svojstvima i načinu strujanja fluida. Nije sadržan u diferencijalnim jednadžbama strujanja i prijelaza topline, ali ovisi o svim fizikalnim veličinama o kojima ovise rješenja diferencijalnih jednadžbi strujanja i prijelaza topline.

Izrazi za određivanje bezdimenzijske Nusseltove značajke, koja u sebi sadrži  $\alpha$ , za različite uvjete strujanja, utvrđeni su eksperimentalno. Nusseltova značajka definirana je jednadžbom:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (2.19.)$$

gdje  $l$  [m] označava duljinu ploče, odnosno,

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (2.20.)$$

gdje je  $d$  [m] promjer cijevi, ukoliko se radi o cijevi.

Navedena značajka u empirijskim izrazima za različite uvjete strujanja ovisi o tri bezdimenzijske značajke. To su: Prandtlova, Reynoldsova i Grashofova značajka.

Prandtlova značajka računa se kao:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} \quad (2.21.)$$

gdje je:

$\nu$  - kinematički viskozitet [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$a$  – koeficijent temperaturene vodljivosti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\eta$  – dinamički viskozitet [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

$c$  – specifični toplinski kapacitet [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

Izraz za izračun Reynoldsove značajke je sljedeći:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (2.22.)$$

pri čemu  $w$  označava brzinu strujanja fluida u  $\text{m}/\text{s}$ .



Grashofova značajka jednaka je:

$$\text{Gr} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \cdot \frac{g_x \cdot l^3}{\nu^2} \quad (2.23.)$$

gdje je:

$\frac{\rho - \rho_0}{\rho}$  – relativna promjena gustoće

$g_x$  – gravitacijsko ubrzanje [ $\text{m/s}^2$ ]

Kao i kod računanja Nusseltove značajke, duljina ploče  $l$  zamjenjuje se promjerom cijevi  $d$ , ako se toplina izmjenjuje konvekcijom s površinom stijenke cijevi. Nadalje, u slučaju izrazito prisilnog strujanja Nusseltova značajka ovisi o Prandtlovoj i Reynoldsovoj značajci,

$$\text{Nu} = \text{Nu} (\text{Pr}, \text{Re}) \quad (2.24.)$$

Razlog navedenog je to što se kod prisilnog strujanja pri većim brzinama sile uzgona zanemaruju u odnosu na sile tromosti. U slučaju slobodne konvekcije, Reynoldsova značajka nema utjecaj na Nusseltovu,

$$\text{Nu} = \text{Nu} (\text{Pr}, \text{Gr}) \quad (2.25.)$$

Za prijelazno područje, u kojem postoji utjecaj prisilnog i slobodnog strujanja vrijedi:

$$\text{Nu} = \text{Nu} (\text{Pr}, \text{Re}, \text{Gr}) \quad (2.26.)$$

### 2.1.3. Zračenje

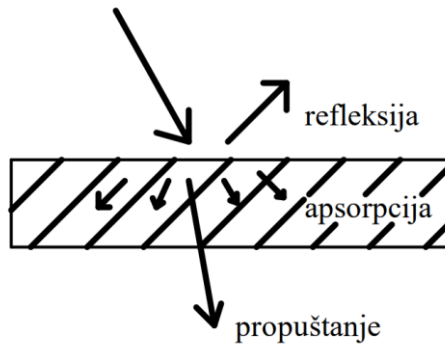
Prijelaz topline zračenjem vrši se putem elektromagnetskih valova između stijenki koje se međusobno ne dodiruju.

Temeljne karakteristike jednog elektromagnetskog vala su valna duljina  $\lambda$  [m], frekvencija  $f$  [ $\text{s}^{-1}$ ] i brzina svjetlosti  $c$  [m/s], pri čemu vrijedi:

$$\lambda \cdot f = c \text{ [m/s]} \quad (2.27.)$$

Prolaskom zračenja kroz različite medije frekvencija ostaje ista, dok se valna duljina i brzina svjetlosti mijenjaju.

Dio dozračene energije na tijelo se reflektira ili odbija od površine, dio se apsorbira unutar tijela, a dio se propušta kroz tijelo, što je prikazano slikom 2.6.



Slika 2.6. Energija zračenja koja dolazi na ozračeno tijelo

Tada vrijedi:

$$r + a + d = 1 \quad (2.28.)$$

gdje je:

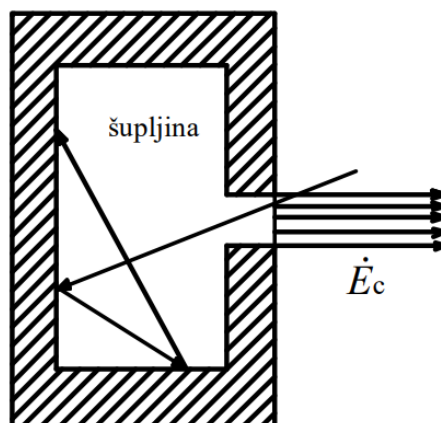
$r$  – koeficijent refleksije

$a$  – koeficijent apsorpcije

$d$  – koeficijent propuštanja

Kada je  $a = 1$ ,  $r = 0$  i  $d = 0$ , govori se o crnom tijelu, koje u potpunosti apsorpira svu dozračenu energiju. Energija koju to tijelo emitira je jednaka je dozračenoj energiji. Sva tijela u prirodi ne apsorbiraju cijelo zračenje te se nazivaju sivim tijelima.

U nastavku je prikazano zračenje iz šupljine čije se stijenke održavaju na jednolikoj temperaturi.



Slika 2.7. Zračenje iz šupljine

Kada zraka ulazi kroz otvor neke šupljine, kako je prikazano slikom 2.7., ona se djelomično apsorbira, a dijelom se više puta reflektira o stijenke. Time je postignuta gotovo potpuna apsorpcija dozračene energije te zračenje koje iz šupljine izlazi kroz mali otvor ima svojstva zračenja crnog tijela.

Prema Stefan-Boltzmannovom zakonu, odzračena energija crnog tijela iznosi:

$$\dot{E}_c = \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.29.)$$

gdje je:

$\dot{E}_c$  – odzračena energija crnog tijela [W/m<sup>2</sup>]

$\sigma$  – univerzalna konstanta zračenja [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

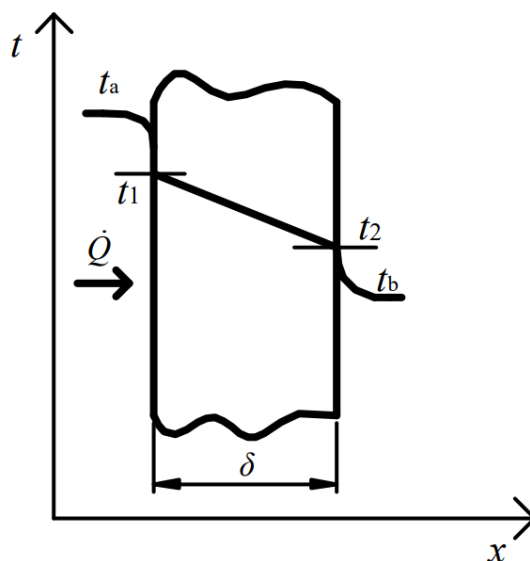
$T$  – termodinamička temperatura [K]

Za proračune se koristi idući izraz:

$$\dot{E}_c = C_c \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.30.)$$

gdje  $C_c$  označava konstantu zračenja crnog tijela, koja iznosi  $100^4 \cdot \sigma$ , odnosno  $5,667 \frac{\text{W}}{\text{m}^2(100\text{K})^4}$ .

## 2.2. Prolaz topline



Slika 2.8. Prolaz topline kroz ravnu stijenku

Prolaz topline je složeni oblik izmjene topline koji predstavlja izmjenu topline između dva fluida odijeljena krutom stijenkom. Sastoji se od dva osnovna oblika prijelaza topline, provođenja i konvekcije. Toplinski tok se prenosi konvekcijom s toplijeg fluida na lijevu površinu stijenke, zatim se provodi kroz samu stijenku, nakon čega se toplina izmijenjuje konvekcijom od desne površine stijenke prema hladnijem fluidu, kako je prikazano slikom 2.8.

Izmijenjeni toplinski tok pri prolazu topline kroz ravnu stijenku je jednak:

$$\dot{Q} = k \cdot F \cdot (t_a - t_b) \text{ [W]} \quad (2.31.)$$

gdje je:

$k$  – koeficijent prolaza topline [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$t_a, t_b$  – temperature fluida [ $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ]

Ukupni toplinski otpor  $W$ , za slučaj prikazan slikom 2.8., suma je toplinskih otpora u smjeru pada temperature: otpora pri prijelazu topline konvekcijom s toplijeg fluida na površinu stijenke s lijeve strane, otpora provođenju topline kroz stijenku te otpora prilikom prijelaza topline konvekcijom s površine stijenke na hladniji fluid s desne strane, odnosno:

$$W = \frac{1}{F} \left( \frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b} \right) \text{ [K/W]} \quad (2.32.)$$

Ukoliko je stijenka sastavljena iz više slojeva, tada ukupni toplinski otpor iznosi:

$$W = \frac{1}{F} \left( \frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b} \right) \text{ [K/W]} \quad (2.33.)$$

Izmijenjeni toplinski tok moguće je izračunati i sljedećom jednačbom:

$$\dot{Q} = \frac{(t_a - t_b)}{W} \text{ [W]} \quad (2.34.)$$

Usporedbom jednačbe (2.34.) s jednačbom (2.31.) slijedi:

$$k = \frac{1}{F \cdot W} \text{ [W}/\text{m}^2\text{K]} \quad (2.35.)$$

Uvrštavanjem jednačbe (2.33.) u jednačbu (2.35.) slijedi konačan izraz za koeficijent prolaza topline kada je stijenka sastavljena od više različitih slojeva,

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b}\right)} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (2.36.)$$

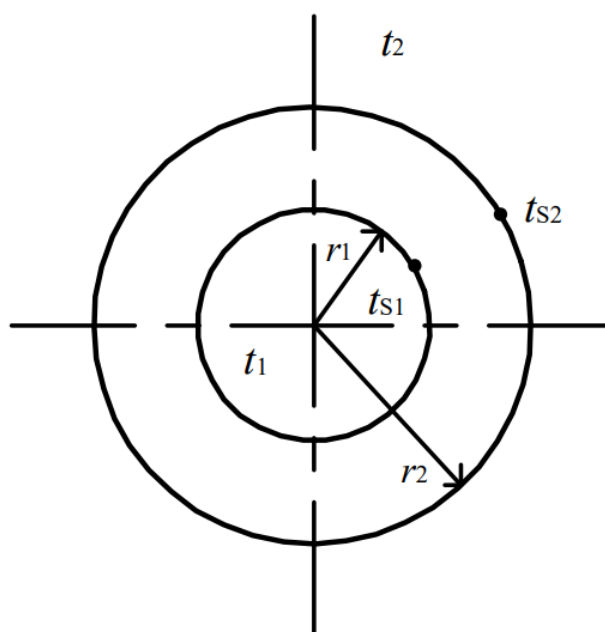
Pri prolazu topline kroz stijenku cijevi, kako je prikazano slikom 2.9., gdje se toplinski tok prenosi konvekcijom s fluida koji struji unutar cijevi prema unutarnjoj površini stijenke, zatim se provodi kroz samu stijenku te se prenosi konvekcijom s vanjske stijenke na fluid koji struji oko cijevi, izmijenjeni toplinski tok je jednak:

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \cdot \alpha_2}} (t_1 - t_2) \text{ [W]} \quad (2.37.)$$

gdje je:

$r_1, r_2$  – unutarnji i vanjski polumjer cijevi [m]

$L$  – duljina cijevi [m]



Slika 2.9. Prolaz topline kroz stijenku cijevi

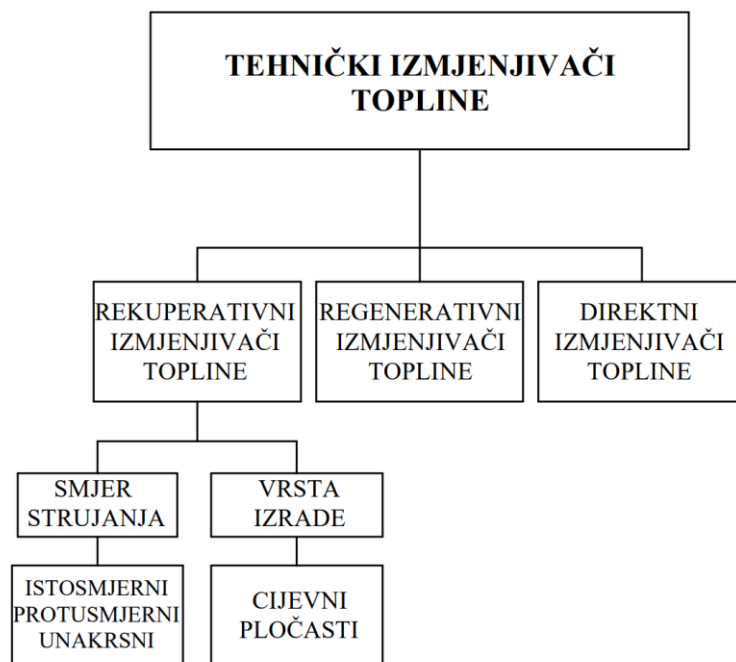
Za stijenku sastavljenu iz više slojeva, koeficijent prolaza topline iznosi:

$$r \cdot k = \frac{1}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) + \frac{1}{r_{i+1} \cdot \alpha_{i+1}}} \text{ [W/mK]} \quad (2.36.)$$

pri čemu vrijedi:  $r = r_1$  za  $\alpha_1 < \alpha_{i+1}$ ,  $r = r_{i+1}$  za  $\alpha_1 > \alpha_{i+1}$ .

### 3. TEHNIČKI IZMJENJIVAČI TOPLINE

Prema osnovnoj podjeli, tehnički izmjenjivači topline dijele se na: rekuperativne izmjenjivače topline ili rekuperatore, regenerativne izmjenjivače topline, odnosno regeneratore i direktne izmjenjivače topline. Nadalje, rekuperatore je moguće podijeliti prema smjeru strujanja i vrsti izrade. Prema smjeru strujanja razlikuju se istosmjerni, protusmjerni i unakrsni ili križni rekuperatori. Prema vrsti izrade, rekuperatori se dijele na cijevne (s i bez pregrada) i pločaste. Slika 3.1. prikazuje navedenu podjelu izmjenjivača topline.



Slika 3.1. Podjela izmjenjivača topline

#### 3.1. Rekuperativni izmjenjivači topline

Fluidi različitih temperatura, koji struje unutar rekuperatora, razdvojeni su krutom stijenkom te se toplina izmjenjuje prolazom topline, tj. konvekcijom s površinama stijenke i provođenjem kroz krutu stijenku. Rekuperativne izmjenjivače topline je moguće podijeliti s obzirom na smjer strujanja fluida na istosmjerne, protusmjerne i unakrsne. Ovisno o obliku razdjelne stijenke, rekuperatori se dijele na cijevne i pločaste, što označava podjelu prema vrsti izrade.

### 3.1.1. Podjela rekuperatora prema smjeru strujanja fluida

Prema međusobnom smjeru strujanja fluida, rekuperativni izmjenjivači topline dijele se na: istosmjerne, protusmjerne i unakrsne ili križne rekuperatore.

U slučaju istosmjernog rekuperatora, struje koje izmjenjuju toplinu su paralelne i teku u istim smjerovima. Izmijenjeni toplinski tok može se definirati jednadžbom toplinske bilance i jednadžbom prolaza topline:

Jednadžba toplinske bilance, odnosno jednakost izmijenjenih toplinskih tokova struja 1 i 2:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2') \\ &= W_1(t_1' - t_1'') = W_2(t_2'' - t_2') \quad [\text{W}]\end{aligned}\quad (3.1.)$$

gdje je:

$G_1$  – maseni protok slabije struje [kg/s]

$G_2$  – maseni protok jače struje [kg/s]

$c_1$  – specifični toplinski kapacitet slabije struje [J/kgK]

$c_2$  – specifični toplinski kapacitet jače struje [J/kgK]

$t_1'$  – ulazna temperatura slabije struje [°C, K]

$t_1''$  – izlazna temperatura slabije struje [°C, K]

$t_2'$  – ulazna temperatura jače struje [°C, K]

$t_2''$  – izlazna temperatura jače struje [°C, K]

$W_1$  – toplinski kapacitet slabije struje [W/K]

$W_2$  – toplinski kapacitet jače struje [W/K]

Dogovorno vrijedi da zbog mogućnosti primjene dijagrama za proračun izmjenjivača topline struja manjeg toplinskog kapaciteta, odnosno slabija struja, ima indeks 1, a struja većeg toplinskog kapaciteta, tj. jača struja, indeks 2.

Jednadžba prolaza topline glasi:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m \quad [\text{W}]\quad (3.2.)$$

gdje je:

$F_0$  – površina izmjene topline [ $m^2$ ]

$\Delta t_m, \Delta T_m$  – srednja logaritamska razlika temperatura, tj, srednja temperaturna razlika duž površine izmjene topline [ $^{\circ}C, K$ ]

Srednju logaritamsku razliku temperatura moguće je izračunati prema sljedećem izrazu:

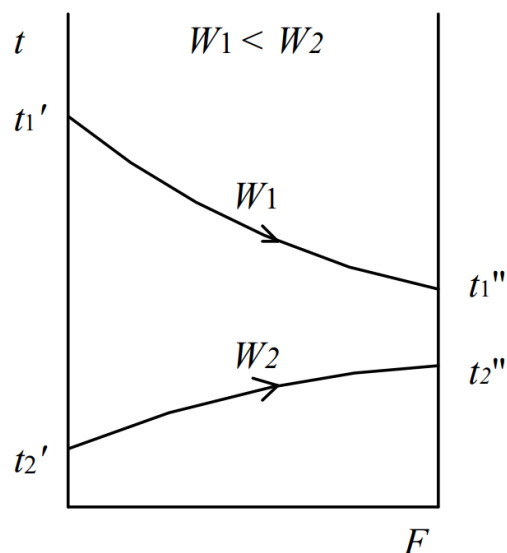
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} \text{ [}^{\circ}C, K\text{]} \quad (3.3.)$$

gdje je:

$\Delta t' = t_1' - t_2'$  - razlika temperatura na ulazu u izmjenjivač topline [ $^{\circ}C, K$ ]

$\Delta t'' = t_1'' - t_2''$  – razlika temperatura na izlazu iz izmjenjivača topline [ $^{\circ}C, K$ ]

Slika 3.2. prikazuje temperaturne promjene u istosmjernom rekuperatoru. Struja  $W_1$  ima manji toplinski kapacitet i više joj se mijenja temperatura, radi čega je njena krivulja strmija. Struja većeg toplinskog kapaciteta  $W_2$  se u prikazanom slučaju zagrijava. Temperatura jače struje se manje mijenja zbog većeg toplinskog kapaciteta.

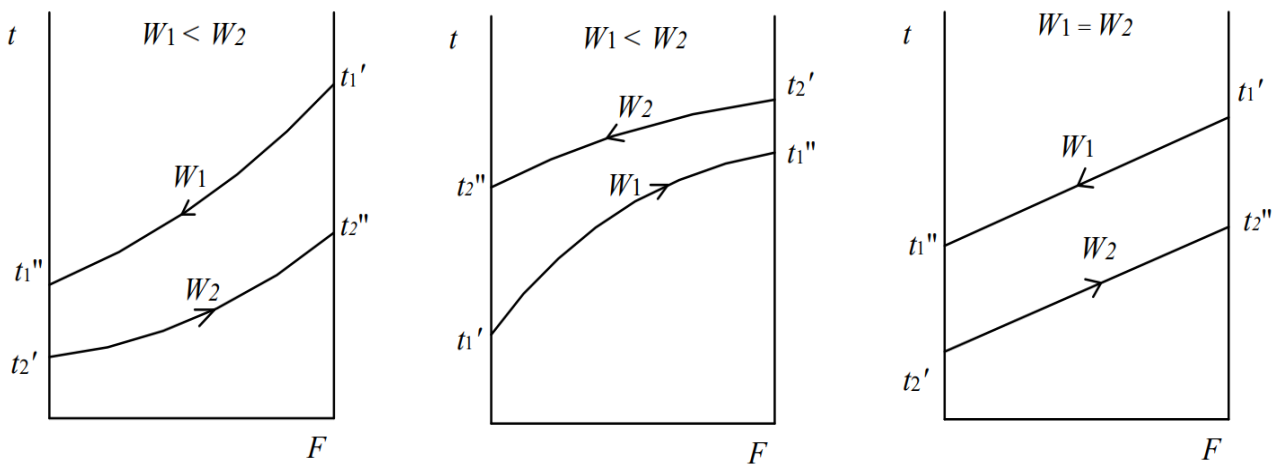


Slika 3.2. Temperaturne promjene u istosmjernom rekuperatoru

Unutar protusmjernog rekuperatora struje koje izmjenjuju toplinu teku u suprotnim smjerovima te su paralelne. Slika 3.3. daje prikaz temperaturnih promjena u protusmjernom rekuperatoru za



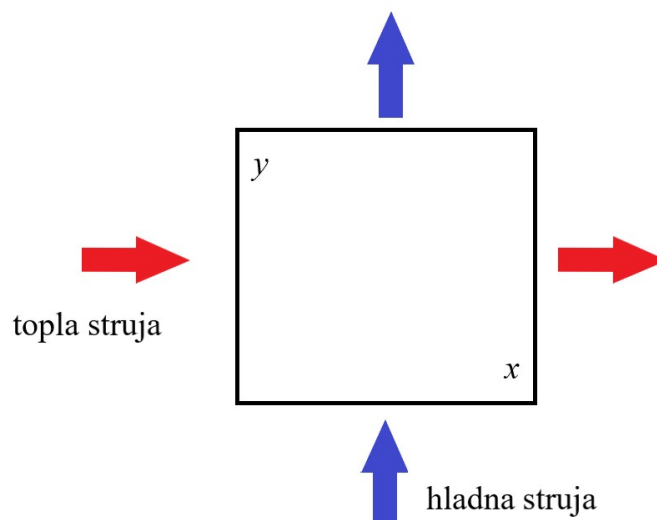
slučajeve kada je struja koja se hladi slabija struja  $W_1$ , kada se hladi jača struja  $W_2$  te kada struje  $W_1$  i  $W_2$  imaju jednake toplinske kapacitete.



Slika 3.3. Temperaturne promjene u protusmjernom rekuperatoru

U slučaju protusmjernog toka, izlazna temperatura hladnijeg fluida može biti veća od izlazne temperature toplijeg fluida, zbog čega je protusmjerno strujanje povoljnije od istosmjernog, gdje je izlazna temperatura toplijeg fluida uvijek veća od izlazne temperature hladnijeg fluida. Također, za zadane pogonske uvjete, protusmjerno strujanje zahtjeva najmanju, a istosmjerno strujanje najveću površinu izmjenjivača topline.

U unakrsnom rekuperatoru struje koje izmjenjuju toplinu se međusobno križaju, kako što je prikazano slikom 3.4.



Slika 3.4. Smjer strujanja tople i hladne struje kroz unakrsni rekuperator

Temperature navedenih struja su funkcije dviju prostornih koordinata  $x$  i  $y$ , dok su u slučaju istosmjernih i protusmjernih rekuperatora temperature funkcije samo jedne prostorne koordinate.

Iskoristivost topline  $\varepsilon$  definira se kao omjer stvarno izmijenjenog toplinskog toka i maksimalno mogućeg izmijenjenog toplinskog toka  $\dot{Q}_\infty$ .

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_\infty} \quad (3.4.)$$

U slučaju protusmjernog izmjenjivača topline raspisivanjem izraza 3.4. dobiva se:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_\infty} = \frac{W_1 \cdot (t_1' - t_1'')}{W_1 \cdot (t_1' - t_2')} = \frac{W_1 \cdot \Phi \cdot (t_1' - t_2')}{W_1 \cdot (t_1' - t_2')} \quad (3.5.)$$

gdje je  $\Phi$  bezdimenzijska "pogonska" karakteristika koja je svojstvena aparatu i njegovom načinu rada, a jednaka je:

$$\Phi = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (3.6.)$$

Konačan izraz za iskoristivost topline rekuperatora, dobiven sređivanjem izraza 3.5., je jednak:

$$\varepsilon = \Phi = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (3.7.)$$

Dakle, iskoristivost topline je omjer stvarno postignute promjene temperature slabije struje prema razlici ulaznih temperatura dovedenih struja. Najveću iskoristivost topline postižu protusmjerni, a najmanju istosmjerni rekuperatori. Ukoliko vrijedi:  $\frac{W_1}{W_2} = 0$ , tada je iskoristivost topline jednaka za sva tri tipa rekuperatora.

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline  $\eta$  je omjer između stvarno izmijenjenog toplinskog toka kod konačne površine izmjene topline  $F_0$  i maksimalno mogućeg toplinskog toka koji bi se izmijenio u takvom tipu izmjenjivača topline u kojem bi njegova površina težila u beskonačnost.

Također, ovisi o tipu rekuperatora. Za protusmjerni i unakrsni rekuperator vrijedi:

$$\eta = \frac{\dot{Q}(F_0)}{\dot{Q}_\infty(F_0)} = \frac{W_1 \cdot (t_1' - t_2') \cdot \Phi_{p,k}}{W_1 \cdot (t_1' - t_2')} = \Phi_{p,k} = \varepsilon \quad (3.8.)$$

Kada bi površina istosmjernog rekuperatora bila beskonačno velika, izlazna temperatura obje struje bi bila jednaka, što se može označiti kao  $t''$ . Stupanj djelovanja izmjenjivača topline iznosi:

$$\eta_i = \frac{W_1 \cdot (t_1' - t_1'')}{W_1 \cdot (t_1' - t'')} = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_1' - t'')} \quad (3.9.)$$

Izlaznu temperaturu  $t''$  moguće je odrediti iz bilance topline:

$$W_1 \cdot (t'_1 - t'') = W_2 \cdot (t'' - t'_2)$$

$$t'' = \frac{W_1 \cdot t'_1 + W_2 \cdot t'_2}{W_1 + W_2} \quad (3.10.)$$

Uvrštavanjem izraza (3.10.) u izraz (3.9.) dobiva se:

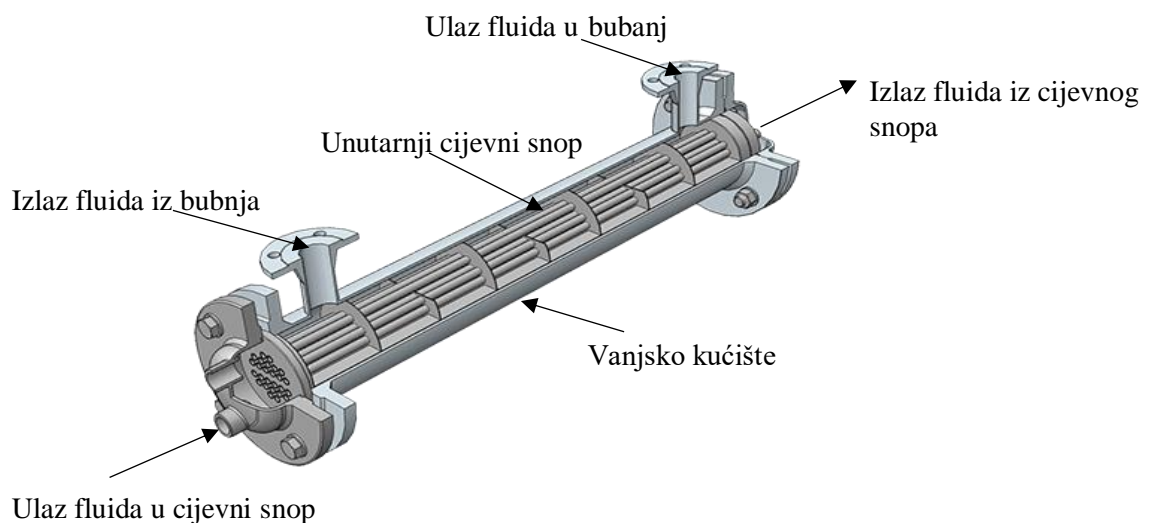
$$\eta_i = \frac{t'_1 - t''}{t'_1 - \frac{W_1 \cdot t'_1 + W_2 \cdot t'_2}{W_1 + W_2}} \quad (3.11.)$$

Sređivanjem slijedi konačni izraz za računanje stupnja djelovanja istosmjernog izmjenjivača topline:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \frac{t'_1 - t''}{t'_1 - t'_2} = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i \quad (3.12.)$$

### 3.1.2. Podjela rekuperatora prema vrsti izrade

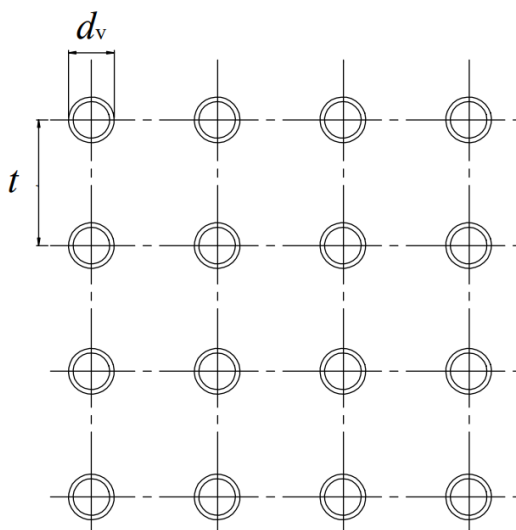
S obzirom na vrstu izrade rekuperatori se dijele na cijevne, s i bez pregrada u bubnju te na pločaste izmjenjivače topline. Cijevni izmjenjivači topline sastoje se od snopova cijevi koje su smještene unutar bubnja, pri čemu jedan fluid struji unutar cijevi, a drugi oko cijevi. Osnovni dijelovi cijevnog izmjenjivača topline, prikazanog slikom 3.5. su: vanjsko kućište ili omotač, izrađen od čelika ili lijevanog željeza, unutarnji cijevni snop te komora za ulaz i izlaz fluida.



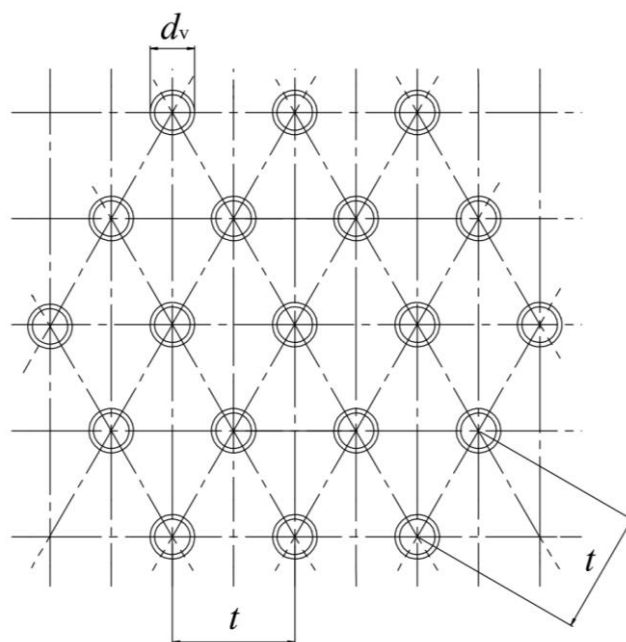
Slika 3.5. Cijevni izmjenjivač topline [7]

Kao što je ranije navedeno, cijevni izmjenjivači topline mogu biti izvedeni na dva načina; s pregradama na strani fluida koji struji oko cijevi i bez pregrada na strani fluida koji struji oko cijevi. Kod izmjenjivača topline bez pregrada, fluid struji paralelno s osi cijevi. Dodatkom pregrada fluid struji naizmjenice uzdužno i poprečno s obzirom na os cijevi te ima duži put kroz sam izmjenjivač topline i veću turbulenciju, a time i bolji prijelaz topline. Najčešće su korištene segmentne pregrade, no mogu biti napravljene i u obliku kružnih ploča ili prstenova.

Unutar bubnja, cijevi mogu biti smještene paralelno, slika 3.6., ili u šahovskom rasporedu na način da tvore pravilne šesterokute, koji se češće koristi te je prikazan slikom 3.7.  $t$  [m] označava razmak između cijevi, a  $d_v$  [m] vanjski promjer cijevi.



Slika 3.6. Paralelno smještene cijevi



Slika 3.7. Šahovski raspored cijevi

Ukupan broj cijevi  $n$  koje je moguće smjestiti unutar bubnja kod šahovskog rasporeda, ovisi o broju upisanih šesterokuta  $m$ , te se računa prema idućem izrazu:

$$n = 1 + 3 \cdot m + 3 \cdot m^2 \quad (3.13.)$$

Promjer bubnja  $D$ , određuje se na temelju odabranog broja cijevi,

$$D = b + d_v + 2 \cdot e \text{ [m]} \quad (3.14.)$$

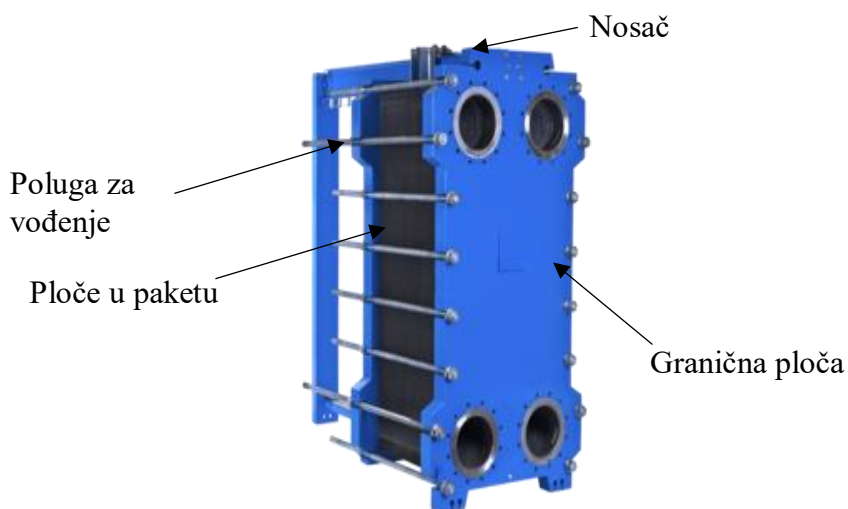
gdje je:

$b = (n' - 1)$  – duljina dijagonale šesterokuta [m]

$n'$  – broj cijevi u dijagonali

$e$  – udaljenost cijevi od kraja bubnja [m]

Pločasti izmjenjivači topline okarakterizirani se velikom površinom izmjene topline na malom volumenu, odnosno, kompaktnošću. Njihova površina izmjene topline sastoji se od velikog broja tankih ploča, koje su skupljene u paket, pri čemu kroz svaku drugu ploču struji isti fluid. Svaku od ploča moguće je izvaditi iz paketa, prekontrolirati te po potrebi očistiti ili zamijeniti. Slika 3.8. prikazuje pločasti izmjenjivač topline i njegove sastavne dijelove.



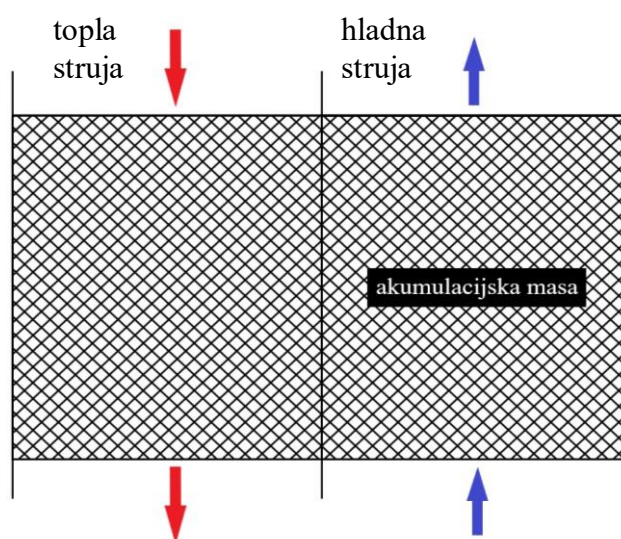
Slika 3.8. Pločasti izmjenjivač topline [6]

Strujanje jednog fluida može biti u istom ili suprotnom smjeru kroz naredane kanale između ploča. Sama ploča može imati ravnu ili orebrenu površinu. Ravna površina je najjednostavnije, ali i najmanje efikasno rješenje, bolja izmjena topline se zbog turbulentnog strujanja postiže korištenjem ploča s orebrenom površinom. U upotrebi su različiti profili orebrenja, a dodatno poboljšanje se postiže ukoliko se ploče postavljaju jedna na drugu naizmjenično, okrenute za  $180^\circ$ .

Najkvalitetniji, a ujedno i najskuplji materijal za izradu ploča je titan. Otporan je na različite vrste agresivnih fluida, kao i na morsku vodu.

### 3.2. Regenerativni izmjenjivači topline

Izmjenjivač topline kod kojeg se izmjena topline između dva plina vrši posredstvom krute mase naziva se regenerativni izmjenjivač topline ili regeneratorski. Plinovi predstavljaju toplu i hladnu struju, a kruta masa je akumulacijska masa. Smjer strujanja tople i hladne struje te akumulacijska masa, prikazani su slikom 3.9.



*Slika 3.9. Akumulacijska masa i smjer strujanja tople i hladne struje kroz regenerativni izmjenjivač topline*

Izmjena topline odvija se na idući način: topla struja u određenom vremenskom intervalu, koji se još naziva i topli period, grije akumulacijsku masu koja ima veliki toplinski kapacitet. Potom, akumulacijska masa u idućem vremenskom intervalu, hladnom periodu, grije hladnu struju. Grijanje i hlađenje akumulacijske mase ponavlja se naizmjenično u jednakim vremenskim intervalima. Akumulacijska masa može biti nehigroskopna, što znači da se izmjena topline i prijenos tvari vrši na površini mase. Nadalje, kada se radi o higroskopnoj akumulacijskoj masi, difuzija se vrši i unutar same mase ili higroskopnog stroja.

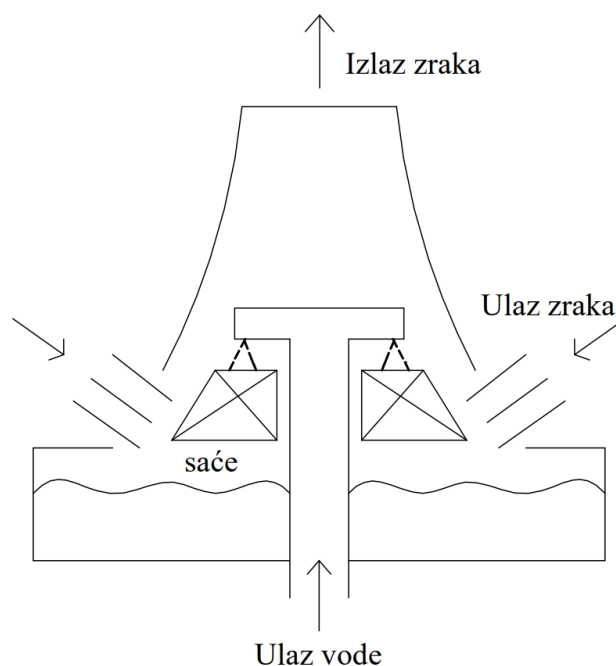
Za razliku od rekuperatora, gdje su temperature struja funkcije prostornih koordinata, u slučaju regeneratorskog, temperature plinova i akumulacijske mase funkcija su prostornih koordinata i vremena.

Prema smjeru strujanja tople u odnosu na hladnu struju, regeneratori se dijele na protusmjerne i istosmjerne. Prema temperaturnom području rada, razlikuju se idući regeneratori: regeneratori koji rade u području visokih temperatura i regeneratori koji rade u području srednjih temperatura i niskih temperatura.

Također, razlikuju se suhi i vlažni regeneratori. Suhi regeneratori prenose osjetnu toplinu, dok se unutar vlažnog regeneratora, ako je bar jedna od struja smjesa plinova i pare, odvija prijenos topline i tvari, tj. osjetne i latentne topline, zbog toga što će se parna komponenta smjese ukapljiti ako je temperatura akumulacijske mase za vrijeme grijanja niža od temperature rošenja iste.

### 3.3. Direktni izmjenjivači topline

Unutar direktnih izmjenjivača topline izmjena topline se odvija izravnim dodirnom struja u prostoru mješališta. Najčešće korištena kombinacija fluida su kapljevina i para. Direktna izmjena topline najčešće je prisutna unutar rashladnih tornjeva s prirodnom cirkulacijom i miješajućih sekcija klima komora. Slikom 3.10. prikazan je rashladni toranj, čiji je princip rada kratko opisan u nastavku. Voda koja dolazi iz sustava, raspršuje se po saću. Zrak dolazi iz suprotnog smjera i u dodiru s vodom se grije, dok se voda hladi. Zagrijani zrak se potom diže prema vrhu tornja te zajedno s dijelom vlage odlazi u okolinu.



Slika 3.10. Rashladni toranj s prirodnom cirkulacijom

## 4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN I ANALIZA IZMJENE TOPLINE U CIJEVNOM IZMJENJIVAČU TOPLINE

U idućim potpoglavljima izvršit će se proračun cijevnog izmjenjivača topline koji se koristi za grijanje bazenske vode. Namjena je zagrijati hladnu vodu od odabrane ulazne temperature na veću izlaznu temperaturu, pri čemu se zagrijavanje vrši toplom vodom. Odabrani ulazni parametri su idući. Unutarnji i vanjski promjer cijevi u cijevnom snopu iznose 6,48 mm i 10,3 mm. Duljina izmjenjivača topline je 500 mm. Kroz unutarnji cijevni snop struji topla voda ulazne temperature 90 °C i volumnog protoka 1,8 m<sup>3</sup>/h. Unutar bubnja struji hladna voda čija ulazna temperatura iznosi 25 °C. Proračuni su provedeni za različite volumne protoke hladne vode koji iznose 9 m<sup>3</sup>/h, 12 m<sup>3</sup>/h, 15 m<sup>3</sup>/h, 18 m<sup>3</sup>/h i 21 m<sup>3</sup>/h. Razmatra se cijevni izmjenjivač topline čije su cijevi raspoređene u šahovski raspored s tri, četiri i pet upisanih šesterokuta. Razmatra se istosmjerno i protusmjerno strujanje fluida kao i izvedbe izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju. U ovom slučaju odabrane su segmentne pregrade. Cijevi i bubanj su izrađeni od nehrđajućeg čelika.

Za promatrane slučajeve potrebno je odrediti izlazne temperature tople i hladne vode, izmijenjene toplinske tokove, iskoristivosti topline i toplinske stupnjeve djelovanja.

### 4.1. Analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovom potpoglavljju će se provesti proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline za odabrane dimenzije i šahovski raspored cijevi u cijevnom snopu s tri upisana šesterokuta. Analiziraju se izvedbe izmjenjivača topline bez i s pregradama za slučaj istosmjernog i protusmjernog toka.

Prikazat će se proračun u slučaju kada volumni protok hladne vode iznosi 9 m<sup>3</sup>/h, dok će rezultati za preostale slučajeve (12 m<sup>3</sup>/h, 15 m<sup>3</sup>/h, 18 m<sup>3</sup>/h, 21 m<sup>3</sup>/h) biti dani tablično.

#### 4.1.1. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline bez pregrada

Kada su cijevi u cijevnom snopu smještene u šahovski raspored na način da tvore tri upisana šesterokuta, broj cijevi u dijagonali  $n'$  je:

$$n' = 2 \cdot m + 1 = 2 \cdot 3 + 1 = 7 \quad (4.1.)$$



gdje je  $m$  broj upisanih šesterokuta.

Ukupni broj cijevi  $n$  računa se kao:

$$n = 1 + 3 \cdot m + 3 \cdot m^2 = 1 + 3 \cdot 3 + 3 \cdot 3^2 = 37 \quad (4.2.)$$

Promjer bubnja  $D$  je:

$$D = b + d_v + 2e = 86,52 + 10,3 + 2 \cdot 10 = 116,82 \text{ mm} \quad (4.3.)$$

Duljina dijagonale šesterokuta,

$$b = (n' - 1) \cdot t = (7-1) \cdot 14,42 = 86,52 \text{ mm} \quad (4.4.)$$

Razmak između cijevi je jednak:

$$t = 1,3 \dots 1,5 \cdot d_v = 1,4 \cdot 10,3 = 14,42 \text{ mm} \quad (4.5.)$$

Udaljenost cijevi od kraja bubnja  $e$  mora biti veća od 6 mm, stoga se usvaja vrijednost od 10 mm.

Po izračunatom promjeru bubnja  $D$ , usvojena je prva veća standardna vrijednost, koja je u ovom slučaju iznosi: NO 125.

Vanjski promjer bubnja  $D_v$  za usvojenu standardnu vrijednost NO 125 iznosi 133 mm.

Unutarnji promjer bubnja računa se kao:

$$D_u = D_v - 2 \cdot s = 133 - 2 \cdot 4 = 125 \text{ mm} \quad (4.6.)$$

Iz termodinamičkih tablica očitana su iduća fizikalna svojstva za pretpostavljenu srednju vrijednost temperature tople vode  $\overline{t_{tw}} = 80^\circ\text{C}$ . Specifični toplinski kapacitet  $c$  je 4,199 kJ/kgK, gustoća  $\rho$  iznosi 972 m<sup>3</sup>/kg, dinamički viskozitet  $\eta$  jednak je  $0,3556 \cdot 10^{-3}$  Pa·s, a koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  je 0,669 W/mK. Za pretpostavljenu srednju vrijednost temperature hladne vode  $\overline{t_{tw}}$  od 30 °C očitane su sljedeće vrijednosti. Specifični toplinski kapacitet  $c$  iznosi 4,1805 kJ/kgK, gustoća  $\rho$  je jednaka 995 m<sup>3</sup>/kg, dinamički viskozitet  $\eta$  je  $0,8019 \cdot 10^{-3}$  Pa·s i koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  iznosi 0,6125 W/mK,

Toplinski kapacitet tople vode računa se kao:

$$W_{tw} = \dot{V}_{tw} \cdot \rho_{tw} \cdot c_{tw} = \frac{1,8}{3600} \cdot 972 \cdot 4,199 \cdot 10^3 = 2040,714 \text{ W/K} = W_1 \quad (4.7.)$$

Toplinski kapacitet hladne vode je jednak:

$$W_{hw} = \dot{V}_{hw} \cdot \rho_{hw} \cdot c_{hw} = \frac{9}{3600} \cdot 995 \cdot 4,1805 \cdot 10^3 = 10398,998 \text{ W/K} = W_2 \quad (4.8.)$$

Kao što je navedeno u potpoglavlju 3.1.1., radi mogućnosti primjene dijagrama za proračun izmjenjivača topline, struja manjeg toplinskog kapaciteta označava se indeksom 1, a struja većeg toplinskog kapaciteta indeksom 2. Stoga, topla voda predstavlja slabiju struju  $W_1$ , a hladna jaču struju  $W_2$ .

Za proračun koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani tople vode potrebno je odrediti vrijednost Reynoldsove značajke:

$$Re = \frac{w_{tw} \cdot d_u \cdot \rho_{tw}}{\eta_{tw}} = \frac{0,3678 \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot 972}{0,3556 \cdot 10^{-3}} = 6875,8566 \quad (4.9.)$$

iz jednadžbe kontinuiteta slijedi:

$$w_{tw} = \frac{4 \cdot V'_{tw}}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{4 \cdot \frac{1,8}{3600}}{(6,84 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi \cdot 37} = 0,3678 \text{ m/s} \quad (4.10.)$$

Prandtlova značajka iznosi:

$$Pr = \frac{\eta_{tw} \cdot c_{tw}}{\lambda_{tw}} = \frac{0,3556 \cdot 10^{-3} \cdot 4,199 \cdot 10^3}{0,669} = 2,2319 \quad (4.11.)$$

Nusseltova značajka za prisilno, izobraženo, turbulentno strujanje je jednaka:

$$Nu = \frac{\alpha_u \cdot d_u}{\lambda_{tw}} = 0,0398 \cdot Pr \cdot \frac{Re^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot Pr^{-\frac{1}{8}} \cdot Re^{-\frac{1}{8}} (Pr - 1)}$$

$$Nu = 0,0398 \cdot 2,2319 \cdot \frac{6875,8566^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 2,2319^{-\frac{1}{8}} \cdot 6875,8566^{-\frac{1}{8}} (2,2319 - 1)}$$

$$Nu = 43,1653 \quad (4.12.)$$

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani tople vode,

$$\alpha_u = Nu \cdot \frac{\lambda_{tw}}{d_u} = 43,1653 \cdot \frac{0,669}{6,84 \cdot 10^{-3}} = 4221,873 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.13.)$$

Nakon određenog koeficijenta prijelaza topline u unutrašnjem cijevnom snopu, potrebno je izračunati koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani hladne vode.

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{w_{hw} \cdot d_{ekv} \cdot \rho_{hw}}{\eta_{hw}} = \frac{0,2721 \cdot 0,0231 \cdot 995}{0,8019 \cdot 10^{-3}} = 7804,9241 \quad (4.14.)$$

Brzina strujanja vode u bubnju:

$$w_{hw} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{hw}}{D_u^2 \cdot \pi - n \cdot d_v^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot \frac{9}{3600}}{(125 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi - 37 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi} = 0,2721 \text{ m/s} \quad (4.15.)$$

Ekvivalentni promjer iznosi:

$$d_{ekv} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} = \frac{(125 \cdot 10^{-3})^2 - 37 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2}{(125 \cdot 10^{-3}) + 37 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})} = 0,0231 \text{ m} \quad (4.16.)$$

Prandtlova značajka je jednaka:

$$Pr = \frac{\eta_{hw} \cdot c_{hw}}{\lambda_{hw}} = \frac{0,8019 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1805 \cdot 10^3}{0,6125} = 5,4732 \quad (4.17.)$$

Nusseltova značajka računa se kao:

$$Nu = \frac{\alpha_v \cdot d_{ekv}}{\lambda_{hw}} = C \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 0,0304 \cdot 7804,9241^{0,8} \cdot 5,4732^{\frac{1}{3}} = 69,6384 \quad (4.18.)$$

Konstanta  $C$  se za šahovski razmještaj cijevi računa idućim izrazom

$$C = 0,026 \cdot \frac{t}{d_v} - 0,006 = 0,026 \cdot \frac{14,42}{10,3} - 0,006 = 0,0304 \quad (4.19.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani hladne vode je,

$$\alpha_v = Nu \cdot \frac{\lambda_{hw}}{d_{ekv}} = 69,6384 \cdot \frac{0,6125}{0,0231} = 2002,5134 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.20.)$$

Nakon određenih koeficijenata prijelaza topline za obje struje, moguće je izračunati koeficijent prolaza topline  $k$ .

Koeficijent prolaza topline  $k$ :

$$\alpha_u > \alpha_v, r = r_v$$

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{10,3 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{6,84 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{1}{\frac{r_v}{\alpha_u \cdot r_u} + \frac{r_v}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{1}{\alpha_v}}$$

Koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  za nehrđajući kromov čelik iznosi 25,586 W/mK.

$$k = \frac{1}{\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{4221,873 \cdot 3,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{25,586} \cdot \ln\left(\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{1}{2002,5134}}$$

$$k = 1065,59 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.21.)$$

Površina izmjenjivača topline je jednaka:

$$F_0 = n \cdot \pi \cdot d_u \cdot L = 37 \cdot \pi \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot (500 \cdot 10^{-3}) = 0,3975 \text{ m}^2 \quad (4.22.)$$

Za očitavanje pogonske karakteristike  $\Phi$  iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline, potrebno je izračunati iduće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{1065,59 \cdot 0,3975}{2040,714} = 0,2075 \quad (4.23.)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2040,714}{10398,998} = 0,1962 \quad (4.24.)$$

Očitana vrijednost  $\Phi_i$  iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline je 0,183.

Izlazna temperatura slabije struje računa se idućim izrazom:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i(t_1' - t_2') = 90 - 0,183(90 - 25) = 78,11 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.25.)$$

Izmijenjeni toplinski tok je jednak:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 78,11) = 24274,29 \text{ W} \quad (4.26.)$$

Izlazna temperatura jače struje:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{24274,29}{10398,998} + 25 = 27,33 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.27.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{65 - 50,78}{\ln\left(\frac{65}{50,78}\right)} = 57,59 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.28.)$$

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 90 - 25 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 78,11 - 27,33 = 50,78 \text{ }^\circ\text{C}$$

Provjera se vrši jednadžbom prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 1065,59 \cdot 0,3975 \cdot 57,59 = 24394,65 \text{ W} \quad (4.29.)$$

Iskoristivost topline je jednaka:

$$\varepsilon_i = \Phi_i = 0,183 \quad (4.30.)$$

Toplinski stupanj djelovanja:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = \left(1 + \frac{2040,714}{10398,998}\right) \cdot 0,183 = 0,2189 \quad (4.31.)$$

Za protusmjerni tok fluida vrijede isti odabrani parametri i iste izračunate vrijednosti kao i za istosmjerni tok.

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitana vrijednost  $\Phi_p$  je 0,184.

Izlazna temperatura slabije struje je jednaka:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_p(t_1' - t_2') = 90 - 0,184(90 - 25) = 78,04 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.32.)$$

Izmijenjeni toplinski tok:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 78,04) = 24406,933 \text{ W} \quad (4.33.)$$

Izlazna temperatura jače struje iznosi:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{24406,933}{10398,998} + 25 = 27,35 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.34.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se kao:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{53,04 - 62,65}{\ln\left(\frac{53,04}{62,65}\right)} = 57,73 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.35.)$$

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 78,04 - 25 = 53,04 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 90 - 27,35 = 62,65 \text{ }^\circ\text{C}$$

Provjeru je moguće izvršiti korištenjem jednadžbe prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 1065,59 \cdot 0,3975 \cdot 57,73 = 24445,657 \text{ W} \quad (4.36.)$$

Iskoristivost topline je jednaka:

$$\varepsilon_p = \Phi_p = 0,184 \quad (4.37.)$$

Toplinski stupanj djelovanja iznosi:

$$\eta_p = \Phi_p = \varepsilon_p = 0,184 \quad (4.38.)$$

#### 4.1.2. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s pregradama

U idućim koracima potrebno je dimenzionirati pregrade. Odabrane su segmentne pregrade.

Visina pregrade računa se kao:

$$m = 0,6 \dots 0,8 \cdot D_u = 0,7 \cdot D_u = 0,7 \cdot (125 \cdot 10^{-3}) = 0,0875 \text{ m} \quad (4.39.)$$

Površina slobodnog presjeka za kružni isječak iznosi:

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{m - R_u}{R_u} = \frac{0,0875 - 0,0625}{0,0625} = 0,4$$

$$R_u = \frac{D_u}{2} = \frac{125 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,0625 \text{ m}$$

$$\theta = 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{m - R_u}{R_u}\right) = 2 \cdot \cos^{-1}(0,4) = 132,84^\circ$$

$$F_p = \frac{R_u^2}{2} \left[ \frac{\theta \cdot \pi}{180} - \sin \theta \right] = \frac{0,0625^2}{2} \left[ \frac{132,84 \cdot \pi}{180} - \sin 132,84 \right] = 3,096 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (4.40.)$$

Udaljenost između pregrada je jednaka:

$$h = \frac{F_p \cdot t}{D_u \cdot (t - d_v)} = \frac{3,096 \cdot 10^{-3} \cdot 14,42 \cdot 10^{-3}}{125 \cdot 10^{-3} \cdot (14,42 - 10,3) \cdot 10^{-3}} = 0,08669 \text{ m} \quad (4.41.)$$

Broj pregrada:

$$n_p = \frac{L}{h} + 1 = \frac{500 \cdot 10^{-3}}{0,08669} + 1 = 6,7677 \quad (4.42.)$$

Usvaja se 7 pregrada.

Udaljenost između pregrada:

$$h = \frac{L}{n_p - 1} = \frac{500 \cdot 10^{-3}}{7 - 1} = 0,0833 \text{ m} \quad (4.43.)$$

U idućim koracima računat će se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani vode u bubnju. Prvo je potrebno odrediti prosječnu brzinu strujanja u bubnju koja se računa kao aritmetička sredina najveće i najmanje vrijednosti brzine strujanja u bubnju.

Najveća brzina strujanja u bubnju je jednaka:

$$w_{\max} = \frac{V_{\text{hw}}}{F_p} = \frac{9}{3,096 \cdot 10^{-3}} = 0,8075 \text{ m/s} \quad (4.44.)$$

Najmanja brzina strujanja u bubnju iznosi:

$$w_{\min} = \frac{V_{\text{hw}}}{F} = \frac{V_{\text{hw}}}{\frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} - n \cdot \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{9}{\frac{(125 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4} - 37 \cdot \frac{(10,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4}}$$

$$w_{\min} = 0,2721 \text{ m/s} \quad (4.45.)$$

Prosječna brzina strujanja u bubnju:

$$w_{\text{hw}} = \frac{w_{\min} + w_{\max}}{2} = \frac{0,2721 + 0,8075}{2} = 0,53978 \text{ m/s} \quad (4.46.)$$

Sada je potrebno izračunati vrijednosti Reynoldsove, Prandtlove, Nusseltove značajke te ekvivalentni promjer.

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{w_{\text{hw}} \cdot d_{\text{ekv}} \cdot \rho_{\text{hw}}}{\eta_{\text{hw}}} = \frac{0,53978 \cdot 0,0231 \cdot 995}{0,8019 \cdot 10^{-3}} = 15471,578 \quad (4.47.)$$

Ekvivalentni promjer računa se kao:

$$d_{\text{ekv}} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} = \frac{(125 \cdot 10^{-3})^2 - 37 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2}{(125 \cdot 10^{-3}) + 37 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})} = 0,0231 \text{ m} \quad (4.48.)$$

Prandtlova značajka:

$$Pr = \frac{\eta_{\text{hw}} \cdot c_{\text{hw}}}{\lambda_{\text{hw}}} = \frac{0,8019 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1805 \cdot 10^3}{0,6125} = 5,4732 \quad (4.49.)$$

Nusseltova značajka iznosi

$$Nu = \frac{\alpha_v \cdot d_{\text{ekv}}}{\lambda_{\text{hw}}} = K \cdot C \cdot \varepsilon \cdot Re^n \cdot Pr^{0,4} = 0,8159 \cdot 1,14 \cdot 0,26 \cdot 15471,578^{0,6} \cdot 5,4732^{0,4}$$

$$Nu = 155,787 \quad (4.50.)$$

Za šahovski raspored cijevi vrijedi:  $n = 0,6$ ;  $\varepsilon = 0,26$

Konstanta  $K$  je funkcija kuta  $\varphi$ . Vrijednost  $\varphi$  računa se prema izrazu 4.51., dok je iznos  $K$  (4.52.) dobiven linearnom interpolacijom vrijednosti očitanih iz tablica. Vrijednost konstante  $C$ , koja ovisi o vrsti razmještaja cijevi unutar cijevnog snopa, određena je prema izrazu 4.53.

$$K = f(\varphi), \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{h}{m}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0,0833}{0,0875}\right) = 43,59^\circ \quad (4.51.)$$

$$K(43,59^\circ) = K(40^\circ) + \frac{43,59 - 40}{50 - 40} \cdot (K(50^\circ) - K(40^\circ))$$

$$K(43,59^\circ) = 0,78 + \frac{43,59 - 40}{50 - 40} \cdot (0,88 - 0,78)$$

$$K(43,41^\circ) = 0,8159 \quad (4.52.)$$

$$C = 1 + 0,1 \cdot \frac{t}{d_v} = 1 + 0,1 \cdot \frac{14,42}{10,3} = 1,14 \quad (4.53.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani hladne vode iznosi:

$$\alpha_v = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{hw}}}{d_{\text{ekv}}} = 155,787 \cdot \frac{0,6125}{0,0231} = 4330,716 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.54.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani tople vode koja struji kroz unutarnji cijevni snop, određen je u prethodnom proračunu i iznosi:

$$\alpha_u = 4221,873 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline  $k$  iznosi:

$$\alpha_v > \alpha_u, r = r_u$$

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{10,3 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{6,84 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{r_u}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{r_u}{\alpha_v \cdot r_v}}$$

Koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  za nehrđajući kromov čelik iznosi 25,586 W/mK.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{4221,873} + \frac{3,42 \cdot 10^{-3}}{25,586} \cdot \ln\left(\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{3,42 \cdot 10^{-3}}{4330,716 \cdot 5,15 \cdot 10^{-3}}}$$

$$k = 2210,7052 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.55.)$$



Površina izmjenjivača topline je jednaka:

$$F_0 = n \cdot \pi \cdot d_u \cdot L = 37 \cdot \pi \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot (500 \cdot 10^{-3}) = 0,3975 \text{ m}^2 \quad (4.56.)$$

Za očitavanje pogonske karakteristike  $\Phi$  iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline, potrebno je izračunati iduće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{2210,7052 \cdot 0,3975}{2040,714} = 0,431 \quad (4.57.)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2040,714}{10398,998} = 0,1962 \quad (4.58.)$$

Očitana vrijednost  $\Phi$  iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline je  $\Phi_i = 0,336$ .

Izlazna temperatura slabije struje iznosi:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i(t_1' - t_2') = 90 - 0,336(90 - 25) = 68,16 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.59.)$$

Izmijenjeni toplinski tok je jednak:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 68,16) = 44569,20 \text{ W} \quad (4.60.)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se kao:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{44569,20}{10398,998} + 25 = 29,29 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.61.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{65 - 38,87}{\ln\left(\frac{65}{38,87}\right)} = 50,82 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.62.)$$

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 90 - 25 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 68,16 - 29,29 = 38,87 \text{ }^\circ\text{C}$$

Provjeru je moguće izvršiti pomoću jednadžbe prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 2210,7052 \cdot 0,3975 \cdot 50,82 = 44660,75 \text{ W} \quad (4.63.)$$

Iskoristivost topline je:

$$\varepsilon_i = \Phi_i = 0,336 \quad (4.64.)$$

Toplinski stupanj djelovanja iznosi:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = \left(1 + \frac{2040,714}{10398,998}\right) \cdot 0,336 = 0,402 \quad (4.65.)$$

U idućem dijelu ovog proračuna, razmatra se slučaj izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline kada je međusobni smjer strujanja fluida protusmjerni. Ostali parametri jednaki su kao u slučaju istosmjernog toka fluida.

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitana je vrijednost  $\Phi_p$  koja iznosi 0,339.

Izlazna temperatura slabije struje iznosi:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_p(t_1' - t_2') = 90 - 0,339(90 - 25) = 67,97 \text{ °C} \quad (4.66.)$$

Izmijenjeni toplinski tok je jednak:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 67,97) = 44967,13 \text{ W} \quad (4.67.)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se kao:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{44967,13}{10398,998} + 25 = 29,32 \text{ °C} \quad (4.68.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{42,97 - 60,68}{\ln\left(\frac{42,97}{60,68}\right)} = 51,32 \text{ °C} \quad (4.69.)$$

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 67,97 - 25 = 42,97 \text{ °C}$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 90 - 29,32 = 60,68 \text{ °C}$$

Provjera se vrši korištenjem jednadžbe prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 2210,7052 \cdot 0,3975 \cdot 51,32 = 45090,69 \text{ W} \quad (4.70.)$$

Iskoristivost topline iznosi:

$$\varepsilon_p = \Phi_p = 0,339 \quad (4.71.)$$

Toplinski stupanj djelovanja je:

$$\eta_p = \Phi_p = \varepsilon_p = 0,339 \quad (4.72.)$$

Na jednak, prethodno opisan, način provedeni su proračuni za slučajeve kada volumni protoci hladne vode iznose 12, 15, 18 i 21 m<sup>3</sup>/h. Tablice 4.1 - 4.4. prikazuju rezultate proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu, koji sadrže izlazne temperature tople i hladne vode, izmijenjene toplinske tokove, iskoristivosti topline i toplinske stupnjeve djelovanja izmjenjivača topline za volumne protoke hladne vode u iznosu od 12 m<sup>3</sup>/h, 15 m<sup>3</sup>/h, 18 m<sup>3</sup>/h i 21 m<sup>3</sup>/h.

Tablica 4.1. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 12 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t''_{tw}$	$t''_{hw}$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	77,20 °C	27,88 °C	26131,34 W	26211,06 W	0,197	0,226
	Protusmjerni tok	77,13 °C	27,89 °C	26263,98 W	26267,37 W	0,198	0,198
S pregradama	Istosmjerni tok	66,93 °C	29,40 °C	47089,48 W	47135,11 W	0,355	0,407
	Protusmjerni tok	66,73 °C	29,43 °C	47487,41 W	47502,078 W	0,358	0,358

Tablica 4.2. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t''_{tw}$	$t''_{hw}$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	76,35 °C	28,61 °C	27855,75 W	28363,41 W	0,210	0,235
	Protusmjerni tok	76,16 °C	28,63 °C	28253,69 W	28371,19 W	0,213	0,213
S pregradama	Istosmjerni tok	66,08 °C	29,82 °C	48813,88 W	48929,59 W	0,368	0,411
	Protusmjerni tok	65,89 °C	29,84 °C	49201,61 W	49248,30 W	0,371	0,371

Tablica 4.3. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 18 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 18 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t''_{tw}$	$t''_{hw}$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	75,44 °C	29,43 °C	29712,79 W	30000 W	0,224	0,246
	Protusmjerni tok	75,31 °C	29,44 °C	29978,09 W	30025,97 W	0,226	0,226
S pregradama	Istosmjerni tok	65,37 °C	30,42 °C	50272,99 W	50285,15 W	0,379	0,416
	Protusmjerni tok	65,24 °C	30,43 °C	50538,28 W	50602,14 W	0,381	0,381

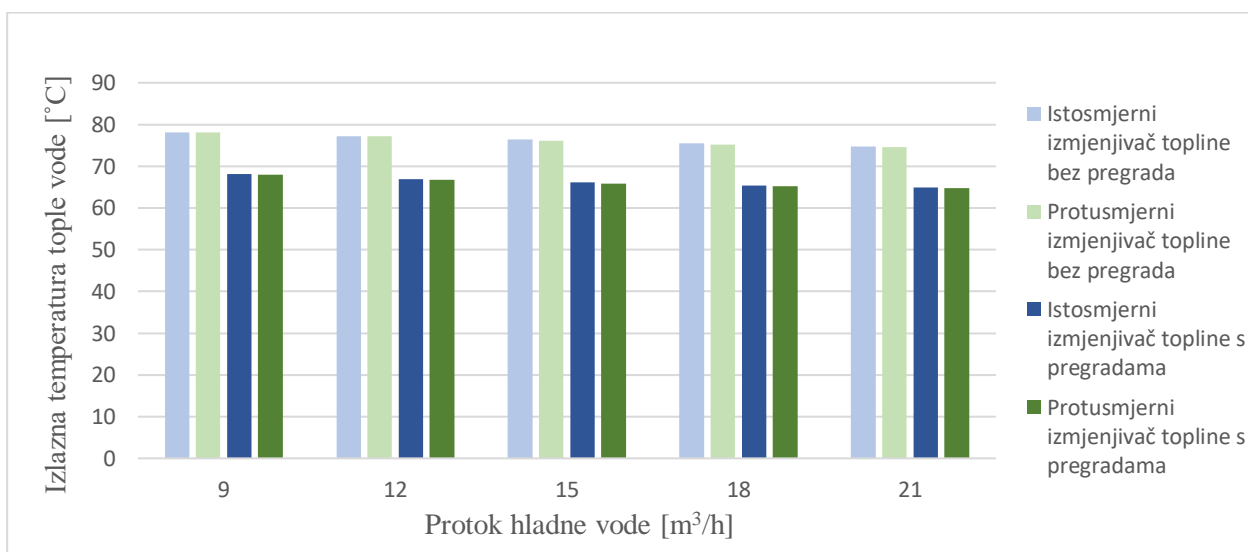
Tablica 4.4. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 21 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t''_{tw}$	$t''_{hw}$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	74,66 °C	30,29 °C	31304,55 W	31320,05 W	0,236	0,285
	Protusmjerni tok	74,60 °C	30,30 °C	31437,20 W	31464,37 W	0,237	0,237
S pregradama	Istosmjerni tok	64,91 °C	31,11 °C	51201,51 W	51369,34 W	0,386	0,419
	Protusmjerni tok	64,72 °C	31,13 °C	51599,45 W	51608,37 W	0,389	0,389

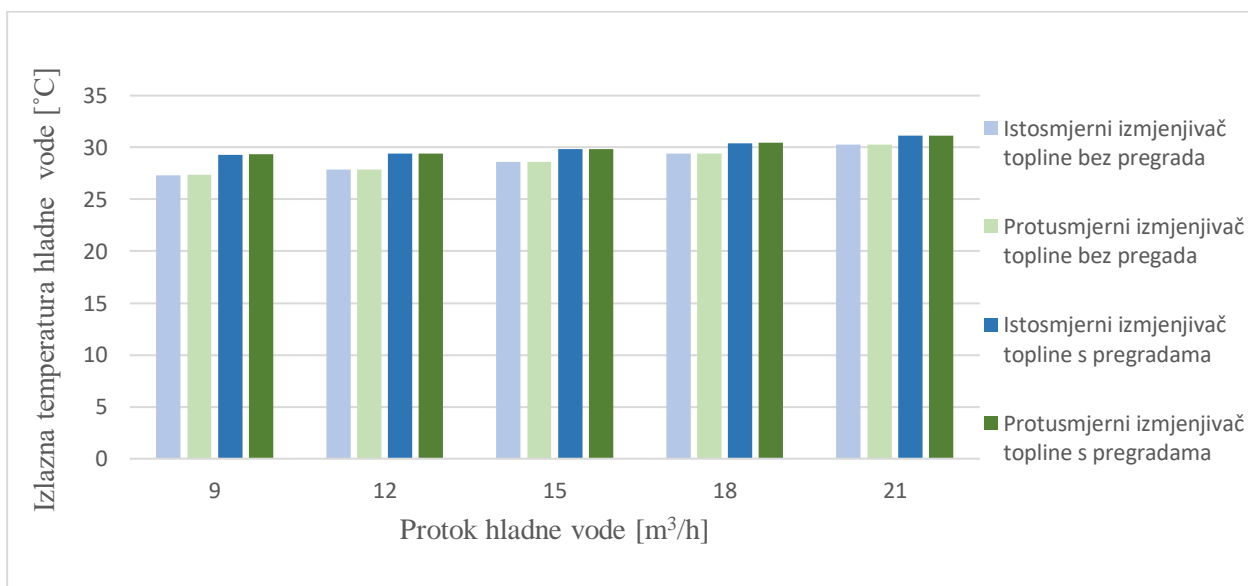
#### 4.1.3. Analiza rezultata

U ovom potpoglavlju analizirat će se rezultati dobiveni proračunom koji je proveden u potpoglavljima 4.1.1. i 4.1.2. Slikama 4.1., 4.2., 4.3. i 4.4. grafički su prikazani dobiveni rezultati pri proračunu cijevnog izmjenjivača topline s 37 cijevi u untrašnjem cijevnom snopu. Dani su rezultati za izvedbe s i bez pregrada te za istosmjerni i protusmjerni tok.

Slika 4.1. prikazuje usporedbu izlaznih temperatura tople vode za protoke hladne vode u rasponu od 9 m<sup>3</sup>/h do 21 m<sup>3</sup>/h te za slučajeve istosmjernog i protusmjernog toka bez pregrada i sa segmentnim pregradama u bubnju. Na osi apscisa prikazani su protoci hladne vode, a na osi ordinata izlazne temperature tople vode. Nijansama plave boje prikazane su temperature u slučaju istosmjernog strujanja, a nijansama zelene boje su prikazane temperature kada je strujanje protusmjerno. Vidljivo je da su izlazne temperature tople vode najmanje u slučaju kada volumni protok hladne vode iznosi 21 m<sup>3</sup>/h. Moguće je primijetiti da su izlazne temperature tople vode manje u izvedbama s pregradama u bubnju. Dodatak pregrada više utječe na smanjenje izlazne temperature tople vode nego smjer strujanja fluida, čiji je utjecaj zanemariv.

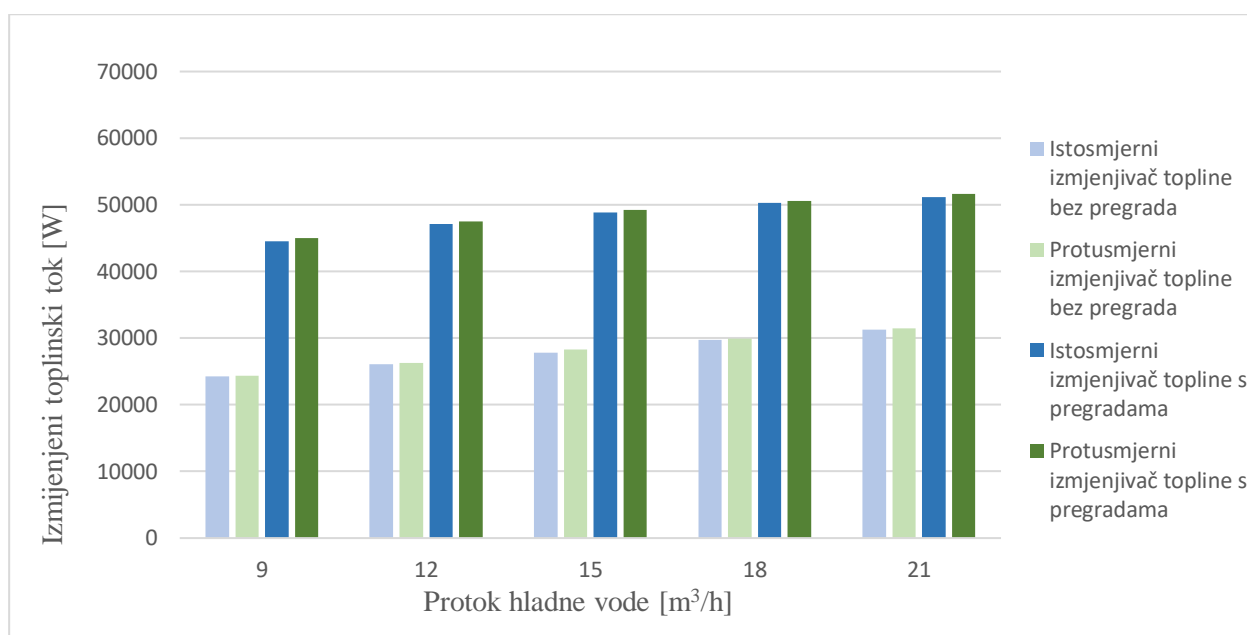


Slika 4.1. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu



Slika 4.2. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu

Slikom 4.2. dan je prikaz promjene izlaznih temperatura hladne vode. Os ordinata prikazuje izlaznu temperaturu hladne vode, dok se na osi apscisa nalaze protoci hladne vode. Vidljivo je da je izlazna temperatura najveća kada je najveći volumni protok hladne vode. Nadalje, izlazne temperature hladne vode veće su u slučaju protusmjernog toka. Temperature su veće u izvedbama s pregradama, u odnosu na one bez pregrada.

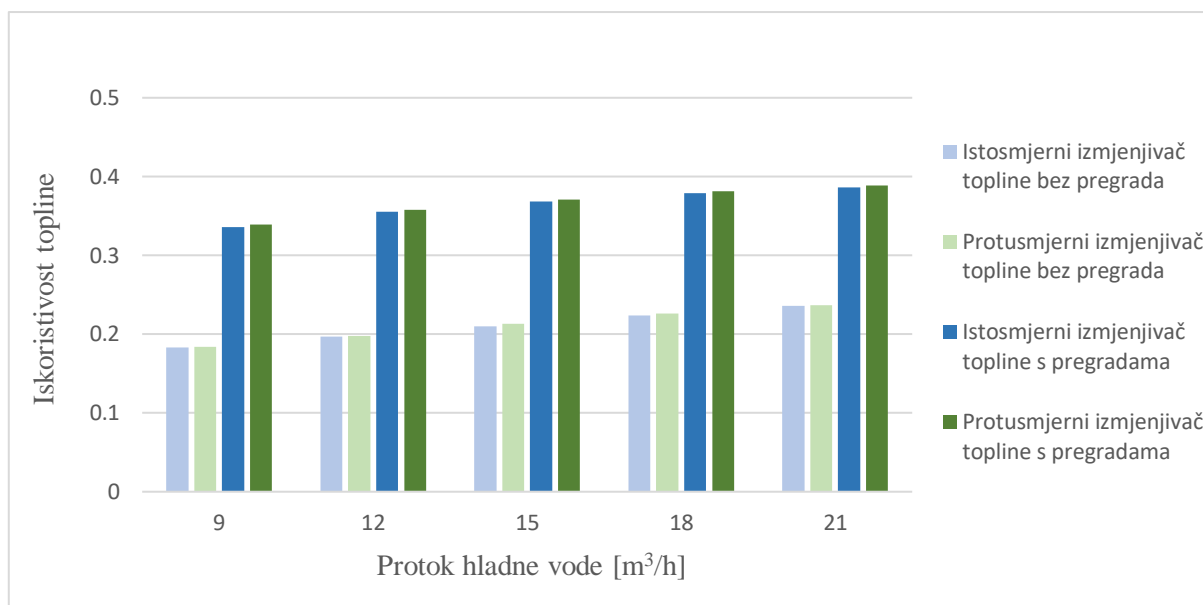


Slika 4.3. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu

Slika 4.3. prikazuje izmijenjene toplinske tokove za različite protoke hladne vode. Vidljivo je da se vrijednosti izmijenjenih toplinskih tokova povećavaju s povećanjem volumnog protoka hladne vode, dakle najveće su kada je protok 21 m³/h. Nadalje, izmijenjeni toplinski tokovi veći su kada se u bubnju nalaze pregrade. Dodatak pregrada ima veći utjecaj na iznos izmijenjenog toplinskog toka nego međusobni smjer strujanja fluida. Kada je volumni protok hladne vode 21 m³/h izmijenjeni toplinski tok je 65 % veći u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada.

Slikom 4.4. dana je usporedba iskoristivosti topline za različite protoke hladne vode. Moguće je zapaziti da je iskoristivost topline najveća u slučaju protusmjernog toka s pregradama u bubnju, kada je volumni protok hladne vode jednak 21 m³/h. Dakle, iskoristivost topline raste s povećanjem protoka hladne vode i značajno je veća u slučaju izvedbe izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama u bubnju, u odnosu na izmjenjivač topline bez pregrada. Dodatak pregrada u bubanj ima veći utjecaj na povećanje iskoristivosti topline nego smjer strujanja fluida.

Iskoristivost topline je 65 % veća u izmjenjivaču topline s pregradama u odnosu na izmjenjivač topline bez pregrada kada je volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h.



Slika 4.4. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu

#### 4.2. Analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovom potpoglavlju će se provesti proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline za odabrane dimenzije i šahovski raspored cijevi s četiri upisana šesterokuta. Analiziraju se slučajevi istosmjernog i protusmjernog toka te izvedbe izmjenjivača topline bez i s pregradama.

Prikazat će se proračun u slučaju kada volumni protok hladne vode iznosi 9 m<sup>3</sup>/h, dok će rezultati za preostale slučajeve (12 m<sup>3</sup>/h, 15 m<sup>3</sup>/h, 18 m<sup>3</sup>/h, 21 m<sup>3</sup>/h) biti dani tablično.

##### 4.2.1. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline bez pregrada

Kada su cijevi u cijevnom snopu smještene u šahovski raspored na način da tvore četiri upisana šesterokuta, broj cijevi u dijagonali  $n'$  je:

$$n' = 2 \cdot m + 1 = 2 \cdot 4 + 1 = 9 \quad (4.73.)$$

gdje je  $m$  broj upisanih šesterokuta.

Ukupni broj cijevi  $n$  računa se kao:

$$n = 1 + 3 \cdot m + 3 \cdot m^2 = 1 + 3 \cdot 4 + 3 \cdot 4^2 = 61 \quad (4.74.)$$

Promjer bubnja je jednak:

$$D = b + d_v + 2e = 115,36 + 10,3 + 2 \cdot 10 = 145,66 \text{ mm} \quad (4.75.)$$

Duljina dijagonale šesterokuta iznosi:

$$b = (n' - 1) \cdot t = (9-1) \cdot 14,42 = 115,36 \text{ mm} \quad (4.76.)$$

Razmak između cijevi je:

$$t = 1,3 \dots 1,5 \cdot d_v = 1,4 \cdot 10,3 = 14,42 \text{ mm} \quad (4.77.)$$

Usvojena vrijednost udaljenosti cijevi od kraja bubnja  $e$  je 10 mm.

Po izračunatom promjeru bubnja  $D$ , usvaja se prva veća standardna vrijednost, odnosno NO 150.

Vanjski promjer bubnja  $D_v$  za usvojenu standardnu vrijednost NO150 je jednak 159 mm.

Unutarnji promjer bubnja računa se kao:

$$D_u = D_v - 2 \cdot s = 159 - 2 \cdot 4 = 151 \text{ mm} \quad (4.78.)$$

Toplinski kapacitet tople vode  $W_{tw}$  izračunat je u potpoglavlju 4.1.1. izrazom 4.7. te iznosi 2040,714 W/K. Toplinski kapacitet hladne vode  $W_{hw}$  određen je izrazom 4.8. te je jednak 10398,998 W/K. Topla voda je slabija struju  $W_1$ , a hladna voda jača struju  $W_2$ .

Za proračun koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani tople vode, potrebno je odrediti vrijednost Reynoldsove značajke:

$$Re = \frac{w_{tw} \cdot d_u \cdot \rho_{tw}}{\eta_{tw}} = \frac{0,2231 \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot 972}{0,3556 \cdot 10^{-3}} = 4170,6015 \quad (4.79.)$$

Iz jednadžbe kontinuiteta slijedi:

$$w_{tw} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{tw}}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{4 \cdot \frac{1,8}{3600}}{(6,84 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi \cdot 61} = 0,2231 \text{ m/s} \quad (4.80.)$$

Prandtlova značajka iznosi:

$$Pr = \frac{\eta_{tw} \cdot c_{tw}}{\lambda_{tw}} = \frac{0,3556 \cdot 10^{-3} \cdot 4,199 \cdot 10^3}{0,669} = 2,2319 \quad (4.81.)$$



Nusseltova značajka je:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_u \cdot d_u}{\lambda_{tw}} = 0,0398 \cdot \text{Pr} \cdot \frac{\text{Re}^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot \text{Pr}^{-\frac{1}{8}} \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{8}} (\text{Pr} - 1)} \quad (4.82.)$$

$$\text{Nu} = 0,0398 \cdot 2,2319 \cdot \frac{4170,6015^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 2,2319^{-\frac{1}{8}} \cdot 4170,6015^{-\frac{1}{8}} (2,2319 - 1)}$$

$$\text{Nu} = 29,001$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom na strani tople vode iznosi:

$$\alpha_u = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{tw}}{d_u} = 29,001 \cdot \frac{0,669}{6,84 \cdot 10^{-3}} = 2836,54 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.83.)$$

Iduće je potrebno odrediti koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani hladne vode. U prvom koraku određuje se vrijednost Reynoldsove značajke:

$$\text{Re} = \frac{w_{hw} \cdot d_{ekv} \cdot \rho_{hw}}{\eta_{hw}} = \frac{0,1949 \cdot 0,021 \cdot 995}{0,8019 \cdot 10^{-3}} = 5067,3767 \quad (4.84.)$$

Brzina strujanja vode u bubnju je:

$$w_{hw} = \frac{4 \cdot V_{hw}}{D_u^2 \cdot \pi - n \cdot d_v^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot \frac{9}{3600}}{(151 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi - 61 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi} = 0,1949 \text{ m/s} \quad (4.85.)$$

Ekvivalentni promjer računa se kao:

$$d_{ekv} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} = \frac{(151 \cdot 10^{-3})^2 - 61 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2}{(151 \cdot 10^{-3}) + 61 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})} = 0,021 \text{ m} \quad (4.86.)$$

Prandtlova značajka iznosi:

$$\text{Pr} = \frac{\eta_{hw} \cdot c_{hw}}{\lambda_{hw}} = \frac{0,8019 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1805 \cdot 10^3}{0,6125} = 5,4732 \quad (4.87.)$$

Nusseltova značajka je jednaka:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_v \cdot d_{ekv}}{\lambda_{hw}} = C \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} = 0,0304 \cdot 5067,3767^{0,8} \cdot 5,4732^{\frac{1}{3}} = 49,2925 \quad (4.88.)$$

Konstanta  $C$  za šahovski razmještaj cijevi je:

$$C = 0,026 \cdot \frac{t}{d_v} - 0,006 = 0,026 \cdot \frac{14,42}{10,3} - 0,006 = 0,0304 \quad (4.89.)$$

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani hladne vode računa se prema idućem izrazu:

$$\alpha_v = Nu \cdot \frac{\lambda_{hw}}{d_{ekv}} = 49,2925 \cdot \frac{0,6125}{0,021} = 1437,697 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.90.)$$

Kada su određeni koeficijenti prijelaza topline, moguće je izračunati koeficijent prolaza topline  $k$  kako slijedi:

$$\alpha_u > \alpha_v, r = r_v$$

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{10,3 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{6,84 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{1}{\frac{r_v}{\alpha_u \cdot r_u} + \frac{r_v}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{1}{\alpha_v}}$$

Koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  za nehrđajući kromov čelik je 25,586 W/mK.

$$k = \frac{1}{\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{2836,54 \cdot 3,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{25,586} \cdot \ln\left(\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{1}{1437,697}}$$

$$k = 764,042 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.91.)$$

Površina izmjenjivača topline je jednaka:

$$F_0 = n \cdot \pi \cdot d_u \cdot L = 61 \cdot \pi \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot (500 \cdot 10^{-3}) = 0,6554 \text{ m}^2 \quad (4.92.)$$

Za očitavanje vrijednosti pogonske karakteristike  $\Phi$  iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline, potrebno je odrediti iduće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{764,042 \cdot 0,6554}{2040,714} = 0,2454 \quad (4.93.)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2040,714}{10398,998} = 0,1962 \quad (4.94.)$$

Očitana vrijednost  $\Phi_1$  iz dijagrama za proračun istosmjernih izmjenjivača topline je 0,212.

Izlazna temperatura slabije struje je:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_1(t_1' - t_2') = 90 - 0,212(90 - 25) = 76,22 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.95.)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se kao:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 76,22) = 28121,04 \text{ W} \quad (4.96.)$$

Izlazna temperatura jače struje iznosi:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{28121,04}{10398,998} + 25 = 27,70 \text{ °C} \quad (4.97.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se kao:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{65 - 48,52}{\ln\left(\frac{65}{48,52}\right)} = 56,36 \text{ °C} \quad (4.98.)$$

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 90 - 25 = 65 \text{ °C}$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 76,22 - 27,70 = 48,52 \text{ °C}$$

Provjeru je moguće izvršiti putem jednadžbe prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 764,042 \cdot 0,6554 \cdot 56,36 = 28220,78 \text{ W} \quad (4.99.)$$

Iskoristivost topline iznosi:

$$\varepsilon_i = \Phi_i = 0,212 \quad (4.100.)$$

Toplinski stupanj djelovanja je:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = \left(1 + \frac{2040,714}{10398,998}\right) \cdot 0,212 = 0,2369 \quad (4.101.)$$

U idućem dijelu proračuna se za iste odabrane parametre razmatra izmjena topline u slučaju kada je međusobni smjer strujanja fluida protusmjerni.

Iz dijagrama za proračun protusmjernih izmjenjivača topline očitana je vrijednost  $\Phi_p$  koja iznosi 0,213.

Izlazna temperatura slabije struje iznosi:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_p(t_1' - t_2') = 90 - 0,213(90 - 25) = 76,16 \text{ °C} \quad (4.102.)$$

Izmijenjeni toplinski tok:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 76,16) = 28253,69 \text{ W} \quad (4.103.)$$

Izlazna temperatura jače struje je jednaka:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{28253,69}{10398,998} + 25 = 27,72 \text{ °C} \quad (4.104.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se kao:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{52,16 - 62,28}{\ln\left(\frac{52,16}{62,28}\right)} = 56,534 \text{ °C} \quad (4.105.)$$

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 76,155 - 25 = 52,16 \text{ °C}$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 90 - 27,72 = 62,28 \text{ °C}$$

Provjera se vrši postavljanjem jednadžbe prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 764,042 \cdot 0,6554 \cdot 56,54 = 28310,88 \text{ W} \quad (4.106.)$$

Iskoristivost topline iznosi:

$$\varepsilon_p = \Phi_p = 0,213 \quad (4.107.)$$

Toplinski stupanj djelovanja je:

$$\eta_p = \Phi_p = \varepsilon_p = 0,213 \quad (4.108.)$$

#### 4.2.2. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s pregradama

Visina pregrade iznosi:

$$m = 0,6 \dots 0,8 \cdot D_u = 0,7 \cdot D_u = 0,7 \cdot (151 \cdot 10^{-3}) = 0,1057 \text{ m} \quad (4.109.)$$

Površina slobodnog presjeka za kružni isječak računa se kao:

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{m - R_u}{R_u} = \frac{0,1057 - 0,0755}{0,0755} = 0,4$$

$$R_u = \frac{D_u}{2} = \frac{151 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,0755 \text{ m}$$

$$\theta = 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{m - R_u}{R_u}\right) = 2 \cdot \cos^{-1}(0,4) = 132,84^\circ$$

$$F_p = \frac{R_u^2}{2} \left[ \frac{\theta \cdot \pi}{180} - \sin \theta \right] = \frac{0,0755^2}{2} \left[ \frac{132,84 \cdot \pi}{180} - \sin 132,84 \right] = 4,518 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (4.110.)$$

Udaljenost između pregrada je jednaka:

$$h = \frac{F_p \cdot t}{D_u \cdot (t - d_v)} = \frac{4,518 \cdot 10^{-3} \cdot 14,42 \cdot 10^{-3}}{151 \cdot 10^{-3} \cdot (14,42 - 10,3) \cdot 10^{-3}} = 0,1047 \text{ m} \quad (4.111.)$$

Broj pregrada:

$$n_p = \frac{L}{h} + 1 = \frac{500 \cdot 10^{-3}}{0,1047} + 1 = 5,78 \quad (4.112.)$$

Usvaja se 6 pregrada.

Udaljenost između pregrada je:

$$h = \frac{L}{n_p - 1} = \frac{500 \cdot 10^{-3}}{6 - 1} = 0,1 \text{ m} \quad (4.113.)$$

Za računanje koeficijenta prijelaza topline  $\alpha$  na strani vode u bubnju, potrebno je odrediti prosječnu brzinu strujanja u bubnju koja se računa kao aritmetička sredina najveće i najmanje vrijednosti brzine strujanja u bubnju.

Najveća brzina strujanja u bubnju je:

$$w_{\max} = \frac{V_{hw}}{F_p} = \frac{9}{4,518 \cdot 10^{-3}} = 0,5533 \text{ m/s} \quad (4.114.)$$

Najmanja brzina strujanja u bubnju računa se kao:

$$w_{\min} = \frac{V_{hw}}{F} = \frac{V_{hw}}{\frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} - n \cdot \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{9}{\frac{(151 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4} - 61 \cdot \frac{(10,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4}}$$

$$w_{\min} = 0,1949 \text{ m/s} \quad (4.115.)$$

Prosječna brzina strujanja u bubnju:

$$w_{hw} = \frac{w_{\min} + w_{\max}}{2} = \frac{0,1949 + 0,5533}{2} = 0,3741 \text{ m/s} \quad (4.116.)$$

Reynoldsova značajka iznosi:

$$Re = \frac{w_{hw} \cdot d_{ekv} \cdot \rho_{hw}}{\eta_{hw}} = \frac{0,3741 \cdot 0,021 \cdot 995}{0,8019 \cdot 10^{-3}} = 9726,555 \quad (4.117.)$$

Ekvivalentni promjer računa se kao:

$$d_{\text{ekv}} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} = \frac{(151 \cdot 10^{-3})^2 - 61 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2}{(151 \cdot 10^{-3}) + 61 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})} = 0,021 \text{ m} \quad (4.118.)$$

Prandtlova značajka je:

$$\text{Pr} = \frac{\eta_{\text{hw}} \cdot c_{\text{hw}}}{\lambda_{\text{hw}}} = \frac{0,8019 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1805 \cdot 10^3}{0,6125} = 5,4732 \quad (4.119.)$$

Nusseltova značajka:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_v \cdot d_{\text{ekv}}}{\lambda_{\text{hw}}} = K \cdot C \cdot \varepsilon \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{0,4} = 0,8141 \cdot 1,14 \cdot 0,26 \cdot 9726,555^{0,6} \cdot 5,4732^{0,4}$$

$$\text{Nu} = 117,6597 \quad (4.120.)$$

Za šahovski raspored cijevi vrijedi:  $n = 0,6$ ;  $\varepsilon = 0,26$ .

Konstanta  $K$  je funkcija kuta  $\varphi$ . Vrijednost  $\varphi$  računa se prema izrazu 4.121., dok je iznos  $K$  (4.122.) dobiven linearnom interpolacijom vrijednosti očitanih iz tablica. Vrijednost konstante  $C$ , koja ovisi o vrsti razmještaja cijevi unutar cijevnog snopa, određena je prema izrazu 4.123.

$$K = f(\varphi), \varphi = \tan^{-1} \left( \frac{h}{m} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{0,1}{0,1057} \right) = 43,41^\circ \quad (4.121.)$$

$$K(43,59^\circ) = K(40^\circ) + \frac{43,59 - 40}{50 - 40} \cdot (K(50^\circ) - K(40^\circ))$$

$$K(43,59^\circ) = 0,78 + \frac{43,59 - 40}{50 - 40} \cdot (0,88 - 0,78)$$

$$K(43,41^\circ) = 0,8141 \quad (4.122.)$$

$$C = 1 + 0,1 \cdot \frac{t}{d_v} = 1 + 0,1 \cdot \frac{14,42}{10,3} = 1,14 \quad (4.123.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani hladne vode je:

$$\alpha_v = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{hw}}}{d_{\text{ekv}}} = 117,6597 \cdot \frac{0,6125}{0,021} = 3431,7426 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.124.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani tople vode koja struji kroz unutarnji cijevni snop, određen je u prethodnom proračunu i iznosi:

$$\alpha_u = 2836,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline  $k$  iznosi:

$$\alpha_v > \alpha_u, r = r_u$$

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{10,3 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{6,84 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{r_u}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{r_u}{\alpha_v \cdot r_v}}$$

Koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  kromovog nehrđajućeg čelika iznosi 25,586 W/mK.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{2836,54} + \frac{3,42 \cdot 10^{-3}}{25,586} \cdot \ln\left(\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{3,42 \cdot 10^{-3}}{3431,7426 \cdot 5,15 \cdot 10^{-3}}}$$

$$k = 1664,531 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.125.)$$

Površina izmjenjivača topline je jednaka:

$$F_0 = n \cdot \pi \cdot d_u \cdot L = 61 \cdot \pi \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot (500 \cdot 10^{-3}) = 0,6554 \text{ m}^2 \quad (4.126.)$$

Za očitavanje pogonske karakteristike  $\Phi$  iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline, potrebno je izračunati iduće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{1664,531 \cdot 0,6554}{2040,714} = 0,534 \quad (4.127.)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2040,714}{10398,998} = 0,1962 \quad (4.128.)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitana je vrijednost  $\Phi_i$  koja iznosi 0,394.

Izlazna temperatura slabije struje je:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i(t_1' - t_2') = 90 - 0,394(90 - 25) = 64,39 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.129.)$$

Izmijenjeni toplinski tok iznosi:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 64,39) = 52262,68554 \text{ W} \quad (4.130.)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se kao:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{52262,68554}{10398,998} + 25 = 30,03 \text{ °C} \quad (4.131.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{65 - 34,36}{\ln\left(\frac{65}{34,36}\right)} = 48,07 \text{ °C} \quad (4.132.)$$

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 90 - 25 = 65 \text{ °C}$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 64,39 - 30,03 = 34,36 \text{ °C}$$

Za provjeru se postavlja jednadžba prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 1664,531 \cdot 0,6554 \cdot 48,07 = 52436,65 \text{ W} \quad (4.133.)$$

Iskoristivost topline iznosi:

$$\varepsilon_i = \Phi_i = 0,394 \quad (4.134.)$$

Toplinski stupanj djelovanja je:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = \left(1 + \frac{2040,714}{10398,998}\right) \cdot 0,394 = 0,4713 \quad (4.135.)$$

U idućem dijelu ovog proračuna, razmatra se slučaj izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline kada je međusobni smjer strujanja fluida protusmjerni. Ostali odabrani parametri jednaki su kao u slučaju istosmjernog strujanja.

Očitana vrijednost  $\Phi_p$  dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline je 0,4.

Izlazna temperatura slabije struje je:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_p(t_1' - t_2') = 90 - 0,4(90 - 25) = 64 \text{ °C} \quad (4.136.)$$

Izmijenjeni toplinski tok iznosi:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 70,5) = 53058,56 \text{ W} \quad (4.137.)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se kao:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{53058,564}{10398,998} + 25 = 30,10 \text{ °C} \quad (4.138.)$$



Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{39 - 59,90}{\ln\left(\frac{39}{59,90}\right)} = 48,70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.139.)$$

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 64 - 25 = 39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 90 - 30,10 = 59,90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jednadžba prolaza topline, koja se koristi za provjeru:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 1664,531 \cdot 0,6554 \cdot 48,70 = 53132,87 \text{ W} \quad (4.140.)$$

Iskoristivost topline iznosi:

$$\varepsilon_p = \Phi_p = 0,4 \quad (4.141.)$$

Toplinski stupanj djelovanja je:

$$\eta_p = \Phi_p = \varepsilon_p = 0,4 \quad (4.142.)$$

Na jednak, prethodno opisan, način provedeni su proračuni za slučajeve kada volumni protoci hladne vode iznose 12, 15, 18 i 21 m<sup>3</sup>/h. Tablice 4.5 - 4.8. daju rezultate proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu, koji sadrže izlazne temperature tople i hladne vode, izmijenjene toplinske tokove, iskoristivosti topline i toplinske stupnjeve djelovanja izmjenjivača topline za različite volumne protoke hladne vode.

Tablica 4.5. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 12 m<sup>3</sup>/h

		$\dot{V}_{hw} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$					
		$t_{tw}''$	$t_{hw}''$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta t_m}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	74,73 °C	28,25 °C	31171,91 W	31386,05 W	0,235	0,270
	Protusmjerni tok	74,60 °C	28,27 °C	31437,20 W	31457,24 W	0,237	0,237
S pregradama	Istosmjerni tok	63,03 °C	29,97 °C	55048,26 W	55057,00 W	0,415	0,476
	Protusmjerni tok	62,77 °C	29,99 °C	55578,85 W	55726,42 W	0,419	0,419

Tablica 4.6. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t_{tw}''$	$t_{hw}''$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	73,56 °C	28,93 °C	33559,54 W	33727,19 W	0,253	0,283
	Protusmjerni tok	73,49 °C	28,94 °C	33692,19 W	33820,76 W	0,254	0,254
S pregradama	Istosmjerni tok	62,18 °C	30,28 °C	56772,66 W	56985,64 W	0,428	0,478
	Protusmjerni tok	61,92 °C	30,31 °C	57303,25 W	57551,12 W	0,432	0,432

Tablica 4.7. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 18 m<sup>3</sup>/h

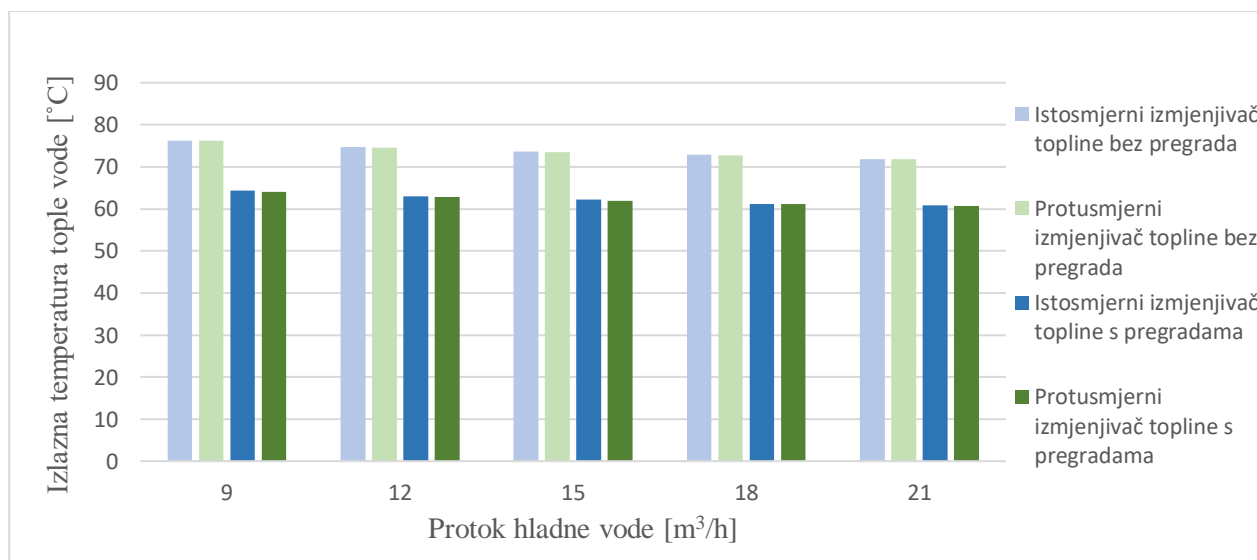
$\dot{V}_{hw} = 18 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t_{tw}''$	$t_{hw}''$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	72,84 °C	29,68 °C	35018,65 W	35645,91 W	0,264	0,289
	Protusmjerni tok	72,65 °C	29,71 °C	35416,59 W	35685,27 W	0,267	0,267
S pregradama	Istosmjerni tok	61,21 °C	30,82 °C	58762,36 W	58861,99 W	0,443	0,487
	Protusmjerni tok	61,14 °C	30,83 °C	58895,01 W	58910,59 W	0,444	0,444

Tablica 4.8. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h

		$\dot{V}_{hw} = 21 \text{ m}^3/\text{h}$					
		$t_{tw}''$	$t_{hw}''$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	71,87 °C	26,53 °C	37008,35 W	37042,81 W	0,279	0,302
	Protusmjerni tok	71,80 °C	26,54 °C	37140,99 W	37189,84 W	0,280	0,280
S pregradama	Istosmjerni tok	60,88 °C	31,45 °C	59425,59 W	59442,16 W	0,448	0,486
	Protusmjerni tok	60,69 °C	31,47 °C	59823,53 W	59920,54 W	0,451	0,451

#### 4.2.3. Analiza rezultata

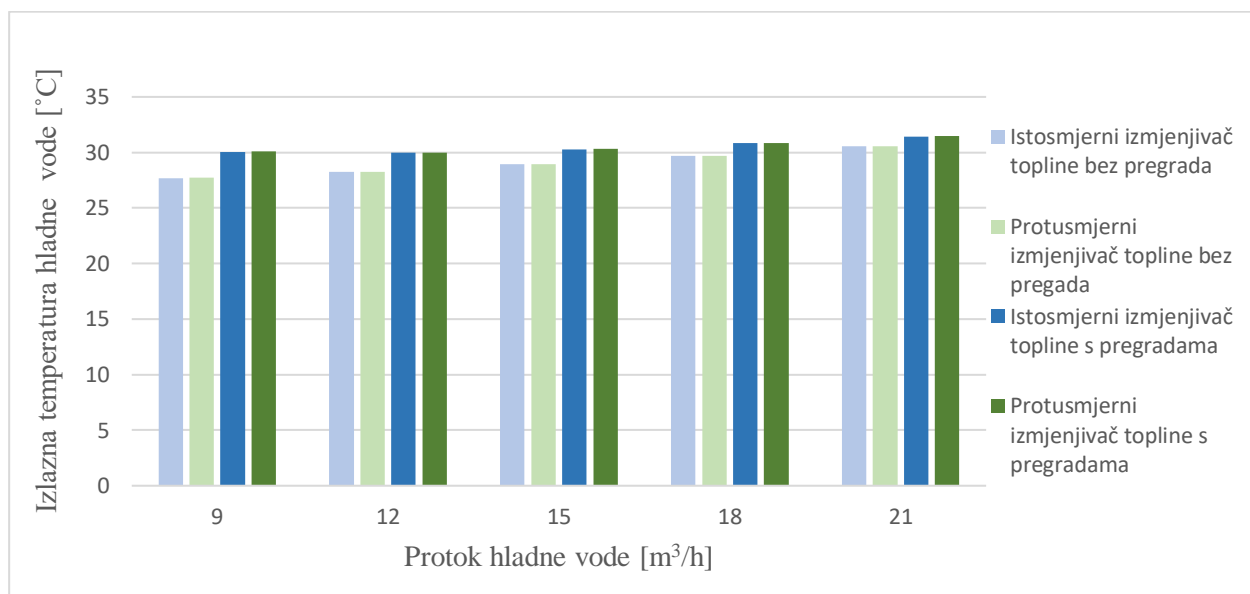
U ovom potpoglavlju analizirat će se rezultati dobiveni proračunom cijevnog izmjenjivača topline koji je proveden u potpoglavljima 4.2.1. i 4.2.2. Slikama 4.5., 4.6., 4.7. i 4.8. grafički su prikazani dobiveni rezultati za istosmjerni i protusmjerni tok te za izvedbe bez i s pregradama u bubnju.



Slika 4.5. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu

Slika 4.5. prikazuje izlazne temperature tople vode za različite volumne protoke hladne vode. Na osi apscisa se nalaze volumni protoci hladne vode, dok os ordinata prikazuje izlaznu temperaturu

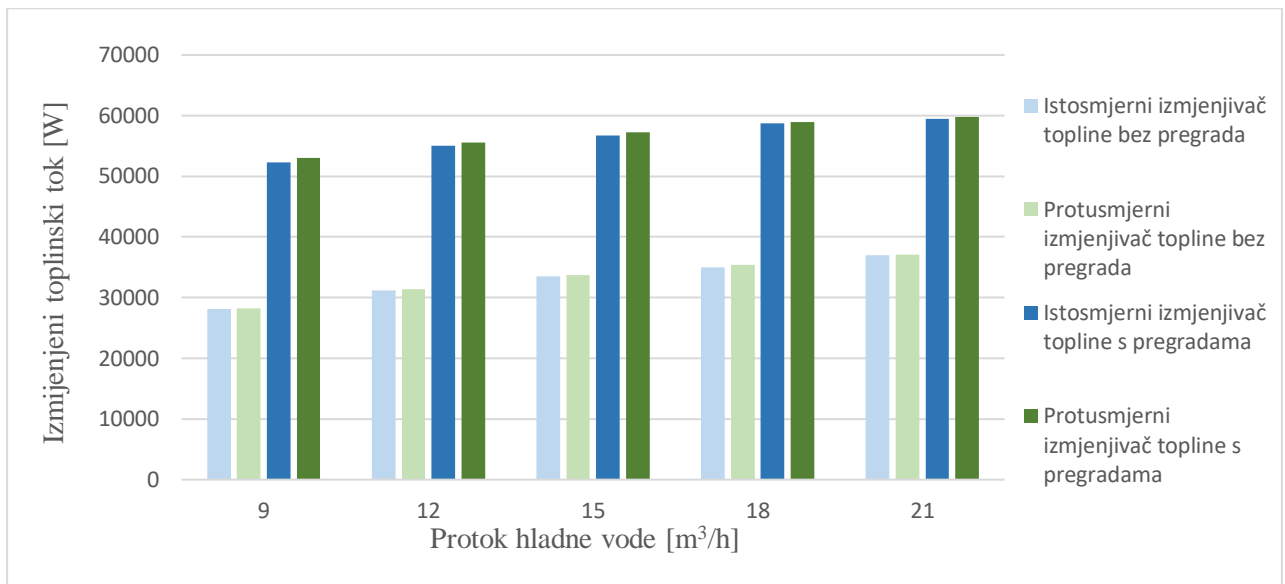
tope vode. Nijansama plave boje prikazane su temperature u slučaju istosmjernog strujanja, a nijansama zelene boje su prikazane temperature kada je strujanje protusmjerno. Najniže vrijednosti izlazne temperature tople vode su kada volumni protok hladne vode iznosi 21 m<sup>3</sup>/h. Nadalje, dodatak pregrada u bubanj ima veći utjecaj na sniženje izlazne temperature tople vode nego međusobni smjer strujanja fluida.



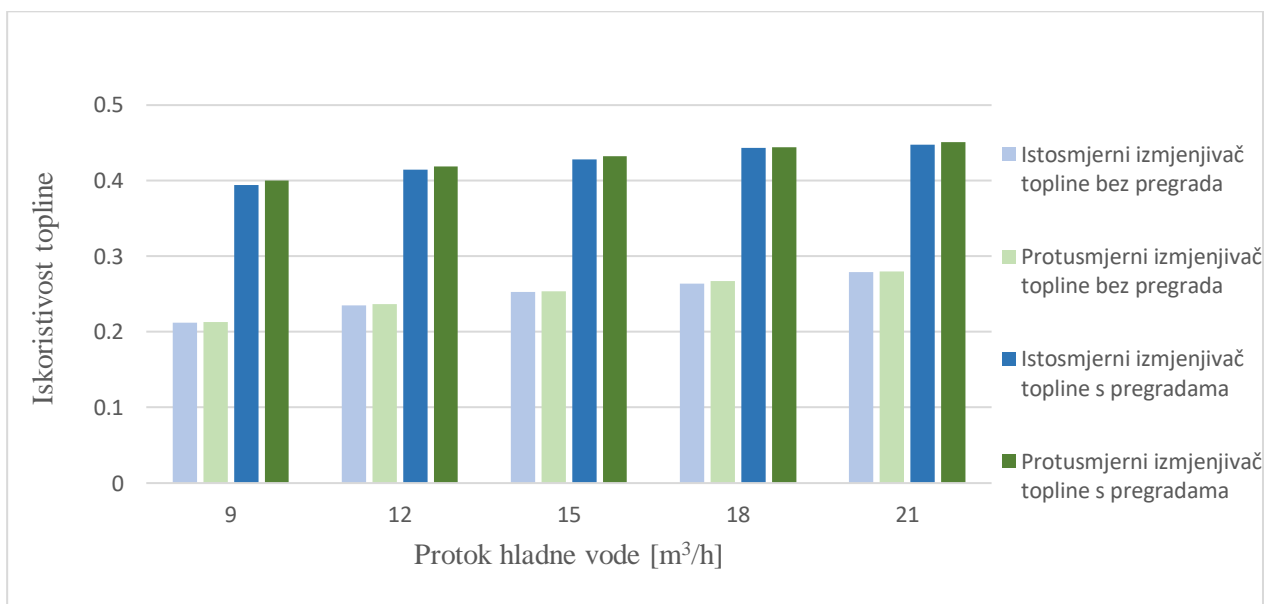
*Slika 4.6. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu*

Slika 4.6. prikazuje usporedbu izlaznih temperatura hladne vode za 61 cijev u cijevnom snopu. Najviša izlazna temperatura hladne vode je kod protusmjernog izmjenjivača topline s pregradama kada volumni protok hladne vode iznosi 21 m<sup>3</sup>/h. Izlazne temperature hladne vode malo su veće u slučaju protusmjernog toka.

Slikom 4.7. prikazani su izmijenjeni toplinski tokovi u odnosu na protok hladne vode. Vidljiv je porast izmijenjenog toplinskog toka s porastom protoka hladne vode. Izmijenjeni toplinski tok je najveći u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama, kada je i protok hladne vode najveći. Za navedeni slučaj je izmijenjeni toplinski tok 62 % veći u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada.



Slika 4.7. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu



Slika 4.8. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu

Slika 4.8. prikazuje usporedbu iskoristivosti topline s porastom protoka hladne vode. Vidljivo je da iskoristivost topline raste s povećanjem protoka hladne vode. Također, veće iskoristivosti topline su u slučaju protusmjernog toka. Dodatak pregrada ima veći utjecaj na povećavanje iskoristivosti topline nego međusobni smjer strujanja fluida. Kada je protok hladne vode 21 m³/h, iskoristivost topline u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama je za 62 % veća u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada.

### 4.3. Analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovom potpoglavlju će se provesti proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline za odabrane dimenzije i šahovski raspored cijevi u cijevnom snopu s pet upisanih šesterokuta. Analiziraju se slučajevi istosmjernog i protusmjernog toka fluida te izvedbe bez i s pregradama u bubnju.

Prikazat će se proračun u slučaju kada volumni protok hladne vode iznosi  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ , dok će rezultati za preostale slučajeve ( $12 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ ) biti dani tablično.

#### 4.3.1. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline bez pregrada

Kada su cijevi u cijevnom snopu smještene u šahovski raspored na način da tvore pet upisanih šesterokuta, broj cijevi u dijagonali  $n'$  je:

$$n' = 2 \cdot m + 1 = 2 \cdot 5 + 1 = 11 \quad (4.143.)$$

gdje je  $m$  broj upisanih šesterokuta.

Ukupni broj cijevi  $n$  računa se kao:

$$n = 1 + 3 \cdot m + 3 \cdot m^2 = 1 + 3 \cdot 5 + 3 \cdot 5^2 = 91 \quad (4.144.)$$

Promjer bubnja je jednak:

$$D = b + d_v + 2e = 144,42 + 10,3 + 2 \cdot 10 = 174,5 \text{ mm} \quad (4.145.)$$

Duljina dijagonale šesterokuta,

$$b = (n' - 1) \cdot t = (11 - 5) \cdot 14,42 = 144,42 \text{ mm} \quad (4.146.)$$

Razmak između cijevi računa se kao:

$$t = 1,3 \dots 1,5 \cdot d_v = 1,4 \cdot 10,3 = 14,42 \text{ mm} \quad (4.147.)$$

Usvojena vrijednost udaljenosti cijevi od kraja bubnja  $e$  je 10 mm.

Po izračunatom promjeru bubnja  $D$ , usvaja se prva veća standardne vrijednost, odnosno NO 200.

Za odabranu standardnu vrijednost NO 200 vanjski promjer bubnja  $D_v$  je jednak 216 mm.

Unutarnji promjer bubnja iznosi:

$$D_u = D_v - 2 \cdot s = 216 - 2 \cdot 6 = 204 \text{ mm} \quad (4.148.)$$

Toplinski kapaciteti tople i hladne vode izračunati su izrazima (4.7.) i (4.8.) te iznose 2040,714 W/K i 10398,989 W/K. Kao što je navedeno u potpoglavlju 3.1.1., vrijedi da struja manjeg toplinskog kapaciteta ima indeks 1, a struja većeg toplinskog kapaciteta indeks 2. Stoga, topla voda predstavlja slabiju struju  $W_1$ , a hladna jaču struju  $W_2$ .

Za proračun koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani tople vode, potrebno je odrediti vrijednost Reynoldsove značajke:

$$Re = \frac{w_{tw} \cdot d_u \cdot \rho_{tw}}{\eta_{tw}} = \frac{0,1495 \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot 972}{0,3556 \cdot 10^{-3}} = 2795,6779 \quad (4.149.)$$

Iz jednadžbe kontinuiteta slijedi:

$$w_{tw} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{tw}}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{4 \cdot \frac{1,8}{3600}}{(6,84 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi \cdot 91} = 0,1495 \text{ m/s} \quad (4.150.)$$

Prandtlova značajka je:

$$Pr = \frac{\eta_{tw} \cdot c_{tw}}{\lambda_{tw}} = \frac{0,3556 \cdot 10^{-3} \cdot 4,199 \cdot 10^3}{0,669} = 2,2319 \quad (4.151.)$$

Nusseltova značajka iznosi:

$$Nu = \frac{\alpha_u \cdot d_u}{\lambda_{tw}} = 0,0398 \cdot Pr \cdot \frac{Re^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot Pr^{-\frac{1}{8}} \cdot Re^{-\frac{1}{8}} (Pr - 1)} \quad (4.152.)$$

$$Nu = 0,0398 \cdot 2,2319 \cdot \frac{2795,6779^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 2,2319^{-\frac{1}{8}} \cdot 2795,6779^{-\frac{1}{8}} (2,2319 - 1)}$$

$$Nu = 21,0841$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom na strani tople vode je jednak:

$$\alpha_u = Nu \cdot \frac{\lambda_{tw}}{d_u} = 21,0841 \cdot \frac{0,669}{6,84 \cdot 10^{-3}} = 2062,1686 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.153.)$$

Potrebno je odrediti i koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani hladne vode. U prvom koraku određuje se vrijednost Reynoldsove značajke:

$$Re = \frac{w_{hw} \cdot d_{ekv} \cdot \rho_{hw}}{\eta_{hw}} = \frac{0,09959 \cdot 0,028 \cdot 995}{0,8019 \cdot 10^{-3}} = 3460,0042 \quad (4.154.)$$

Brzina strujanja vode u bubnju iznosi:

$$w_{hw} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{hw}}{D_u^2 \cdot \pi - n \cdot d_v^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot \frac{9}{3600}}{(204 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi - 91 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}$$

$$w_{hw} = 0,0996 \text{ m/s} \quad (4.155.)$$

Ekvivalentni promjer računa se kao:

$$d_{ekv} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} = \frac{(204 \cdot 10^{-3})^2 - 91 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2}{(204 \cdot 10^{-3}) + 91 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})} = 0,028 \text{ m} \quad (4.156.)$$

Prandtlova značajka je:

$$Pr = \frac{\eta_{hw} \cdot c_{hw}}{\lambda_{hw}} = \frac{0,8019 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1805 \cdot 10^3}{0,6125} = 5,4732 \quad (4.157.)$$

Nusseltova značajka je jednaka:

$$Nu = \frac{\alpha_v \cdot d_{ekv}}{\lambda_{hw}} = C \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 0,0304 \cdot 3460,0042^{0,8} \cdot 5,4732^{\frac{1}{3}} = 36,3258 \quad (4.158.)$$

Konstanta  $C$  za šahovski razmještaj cijevi iznosi:

$$C = 0,026 \cdot \frac{t}{d_v} - 0,006 = 0,026 \cdot \frac{14,42}{10,3} - 0,006 = 0,0304 \quad (4.159.)$$

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani hladne vode računa se prema idućem izrazu:

$$\alpha_v = Nu \cdot \frac{\lambda_{hw}}{d_{ekv}} = 36,3258 \cdot \frac{0,6125}{0,028} = 794,627 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.160.)$$

Kada su određeni koeficijenti prijelaza topline, moguće je izračunati koeficijent prolaza topline  $k$  kako slijedi:

$$\alpha_u > \alpha_v, r = r_v$$

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{10,3 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{6,84 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{1}{\frac{r_v}{\alpha_u \cdot r_u} + \frac{r_v}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{1}{\alpha_v}}$$



Koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  za nehrđajući kromov čelik iznosi 25,586 W/mK.

$$k = \frac{1}{\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{2062,1686 \cdot 3,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{25,586} \cdot \ln\left(\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{1}{794,6271}}$$

$$k = 482,8414 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.161.)$$

Površina izmjenjivača topline je jednaka:

$$F_0 = n \cdot \pi \cdot d_0 \cdot L = 91 \cdot \pi \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot (500 \cdot 10^{-3}) = 0,9777 \text{ m}^2 \quad (4.162.)$$

Za očitavanje vrijednosti pogonske karakteristike  $\Phi$  iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline, potrebno je odrediti iduće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{482,8414 \cdot 0,9777}{2040,714} = 0,2313 \quad (4.163.)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2040,714}{10398,998} = 0,1962 \quad (4.164.)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernih izmjenjivača topline je očitano vrijednost  $\Phi_i$  koja iznosi 0,214.

Izlazna temperatura slabije struje iznosi:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i(t_1' - t_2') = 90 - 0,214(90 - 25) = 76,09 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.165.)$$

Izmijenjeni toplinski tok je:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 76,09) = 28386,33 \text{ W} \quad (4.166.)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se kao:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{28386,33}{10398,998} + 25 = 27,73 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.167.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{65 - 48,36}{\ln\left(\frac{65}{48,36}\right)} = 56,27 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.168.)$$

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 90 - 25 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 76,09 - 27,73 = 48,36 \text{ }^\circ\text{C}$$

Za provjeru se koristi jednačba prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 482,8414 \cdot 0,9777 \cdot 56,27 = 28563,93 \text{ W} \quad (4.169.)$$

Iskoristivost topline je:

$$\varepsilon_i = \Phi_i = 0,214 \quad (4.170.)$$

Toplinski stupanj djelovanja iznosi:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = \left(1 + \frac{2040,714}{10398,998}\right) \cdot 0,214 = 0,256 \quad (4.171.)$$

U idućem dijelu proračuna se za jednake odabrane parametre izmjena topline u cijevnom izmjenjivaču topline slučaju kada je međusobni smjer strujanja fluida protusmjerni.

Očitana vrijednost  $\Phi_p$  iz dijagrama za proračun protusmjernih izmjenjivača topline je 0,215.

Izlazna temperatura slabije struje računa se kao:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_p(t_1' - t_2') = 90 - 0,215(90 - 25) = 76,03 \text{ °C} \quad (4.172.)$$

Izmijenjeni toplinski tok iznosi:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 76,03) = 28518,98 \text{ W} \quad (4.173.)$$

Izlazna temperatura jače struje je jednaka:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{28518,98}{10398,998} + 25 = 27,74 \text{ °C} \quad (4.174.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura je:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{51,03 - 62,26}{\ln\left(\frac{51,03}{62,26}\right)} = 56,46 \text{ °C} \quad (4.175.)$$

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 76,03 - 25 = 51,03 \text{ °C}$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 90 - 27,74 = 62,26 \text{ °C}$$

Za provjeru se koristi jednačba prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 482,8414 \cdot 0,9777 \cdot 56,46 = 28653,31 \text{ W} \quad (4.176.)$$

Iskoristivost topline iznosi:

$$\varepsilon_p = \Phi_p = 0,215 \quad (4.177.)$$

Toplinski stupanj djelovanja je:

$$\eta_p = \Phi_p = \varepsilon_p = 0,215 \quad (4.178.)$$

#### 4.3.2. Termodinamički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s pregradama

U idućim koracima potrebno je dimenzionirati segmentne pregrade.

Visina pregrade računa se idućim izrazom:

$$m = 0,6 \dots 0,8 \cdot D_u = 0,7 \cdot D_u = 0,7 \cdot (204 \cdot 10^{-3}) = 0,1428 \text{ m} \quad (4.179.)$$

Površina slobodnog presjeka za kružni isječak je:

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{m - R_u}{R_u} = \frac{0,1428 - 0,102}{0,102} = 0,4$$

$$R_u = \frac{D_u}{2} = \frac{204 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,102 \text{ m}$$

$$\theta = 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{m - R_u}{R_u}\right) = 2 \cdot \cos^{-1}(0,4) = 132,84^\circ$$

$$F_p = \frac{R_u^2}{2} \left[ \frac{\theta \cdot \pi}{180} - \sin \theta \right] = \frac{0,102^2}{2} \left[ \frac{132,84 \cdot \pi}{180} - \sin 132,84 \right] = 8,246 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (4.180.)$$

Udaljenost između pregrada iznosi:

$$h = \frac{F_p \cdot t}{D_u \cdot (t - d_v)} = \frac{8,246 \cdot 10^{-3} \cdot 14,42 \cdot 10^{-3}}{204 \cdot 10^{-3} \cdot (14,42 - 10,3) \cdot 10^{-3}} = 0,1415 \text{ m} \quad (4.181.)$$

Broj pregrada:

$$n_p = \frac{L}{h} + 1 = \frac{500 \cdot 10^{-3}}{0,1415} + 1 = 4,53 \quad (4.182.)$$

Usvaja se 5 pregrada.

Udaljenost između pregrada je jednaka:

$$h = \frac{L}{n_p - 1} = \frac{500 \cdot 10^{-3}}{5 - 1} = 0,125 \text{ m} \quad (4.183.)$$

U idućim koracima računat će se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  na strani vode u bubnju. Prvo je potrebno odrediti prosječnu brzinu strujanja u bubnju koja se računa kao aritmetička sredina najveće i najmanje vrijednosti brzine strujanja u bubnju.

Najveća brzina strujanja u bubnju je:

$$w_{\max} = \frac{V_{\text{hw}}}{F_p} = \frac{9}{8,246 \cdot 10^{-3}} = 0,3032 \text{ m/s} \quad (4.184.)$$

Najmanja brzina strujanja u bubnju računa se kao:

$$w_{\min} = \frac{V_{\text{hw}}}{F} = \frac{V_{\text{hw}}}{\frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} - n \cdot \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{9}{\frac{(204 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4} - 91 \cdot \frac{(10,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4}}$$

$$w_{\min} = 0,09959 \text{ m/s} \quad (4.185.)$$

Prosječna brzina strujanja u bubnju iznosi:

$$w_{\text{hw}} = \frac{w_{\min} + w_{\max}}{2} = \frac{0,09959 + 0,3032}{2} = 0,2014 \text{ m/s} \quad (4.186.)$$

Potrebno je izračunati vrijednosti Reynoldsove, Prandtlove, Nusseltove značajke te ekvivalentni promjer.

Reynoldsova značajka:

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{hw}} \cdot d_{\text{ekv}} \cdot \rho_{\text{hw}}}{\eta_{\text{hw}}} = \frac{0,2014 \cdot 0,028 \cdot 995}{0,8019 \cdot 10^{-3}} = 6996,9752 \quad (4.187.)$$

Ekvivalentni promjer je jednak:

$$d_{\text{ekv}} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} = \frac{(204 \cdot 10^{-3})^2 - 91 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})^2}{(204 \cdot 10^{-3}) + 91 \cdot (10,3 \cdot 10^{-3})} = 0,028 \text{ m} \quad (4.188.)$$

Prandtlova značajka:

$$\text{Pr} = \frac{\eta_{\text{hw}} \cdot c_{\text{hw}}}{\lambda_{\text{hw}}} = \frac{0,8019 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1805 \cdot 10^3}{0,6125} = 5,4732 \quad (4.189.)$$

Nusseltova značajka iznosi:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_v \cdot d_{\text{ekv}}}{\lambda_{\text{hw}}} = K \cdot C \cdot \varepsilon \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{0,4} = 0,792 \cdot 1,14 \cdot 0,26 \cdot 6996,9752^{0,6} \cdot 5,4732^{0,4}$$

$$\text{Nu} = 93,939 \quad (4.190.)$$

Za šahovski raspored cijevi vrijedi,  $n = 0,6$  i  $\varepsilon = 0,26$ .

Konstanta  $K$  je funkcija kuta  $\varphi$ . Vrijednost  $\varphi$  računa se prema izrazu 4.191., dok je iznos  $K$  (4.192.) dobiven linearnom interpolacijom vrijednosti očitanih iz tablica. Vrijednost konstante  $C$ , koja ovisi o vrsti razmještaja cijevi unutar cijevnog snopa, određena je prema izrazu 4.193.

$$K = f(\varphi), \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{h}{m}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0,125}{0,1428}\right) = 41,2^\circ \quad (4.191.)$$

$$K(41,2^\circ) = K(40^\circ) + \frac{41,2 - 40}{50 - 40} \cdot (K(50^\circ) - K(40^\circ)) = 0,78 + \frac{41,2 - 40}{50 - 40} \cdot (0,88 - 0,78)$$

$$K(41,2^\circ) = 0,792 \quad (4.192.)$$

$$C = 1 + 0,1 \cdot \frac{t}{d_v} = 1 + 0,1 \cdot \frac{14,42}{10,3} = 1,14 \quad (4.193.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani hladne vode je jednak:

$$\alpha_v = Nu \cdot \frac{\lambda_{hw}}{d_{ekv}} = 93,939 \cdot \frac{0,6125}{0,028} = 2354,9165 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.194.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani tople vode koja struji kroz cijevni snop određen je u prethodnom proračunu:

$$\alpha_u = 2062,1686 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline  $k$  iznosi:

$$\alpha_v > \alpha_u, r = r_u$$

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{10,3 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{6,84 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{r_u}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) + \frac{r_u}{\alpha_v \cdot r_v}}$$

Koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$  kromovog nehrđajućeg čelika iznosi 25,586 W/mK.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{2062,1686} + \frac{3,42 \cdot 10^{-3}}{25,586} \cdot \ln\left(\frac{5,15 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{3,42 \cdot 10^{-3}}{2354,9165 \cdot 5,15 \cdot 10^{-3}}}$$

$$k = 1159,00 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.195.)$$

Površina izmjenjivača topline je jednaka:

$$F_0 = n \cdot \pi \cdot d_u \cdot L = 91 \cdot \pi \cdot (6,84 \cdot 10^{-3}) \cdot (500 \cdot 10^{-3}) = 0,9777 \text{ m}^2 \quad (4.196.)$$

Za očitavanje pogonske karakteristike  $\Phi$  iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline, potrebno je izračunati iduće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{1159,00 \cdot 0,9777}{2040,714} = 0,555 \quad (4.197.)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2040,714}{10398,998} = 0,1962 \quad (4.198.)$$

Očitano vrijednost  $\Phi_i$  dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline je 0,405.

Izlazna temperatura slabije struje je:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i(t_1' - t_2') = 90 - 0,405(90 - 25) = 63,68 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.199.)$$

Izmijenjeni toplinski tok je iznosi:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 63,68) = 53721,80 \text{ W} \quad (4.200.)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se kao:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{53721,80}{10398,998} + 25 = 30,17 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.201.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{65 - 33,51}{\ln\left(\frac{65}{33,51}\right)} = 47,53 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.202.)$$

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 90 - 25 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 63,68 - 30,17 = 33,51 \text{ }^\circ\text{C}$$

Za provjeru se koristi jednadžba prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 1159,00 \cdot 0,9777 \cdot 47,53 = 53856,90 \text{ W} \quad (4.203.)$$

Iskoristivost topline iznosi:

$$\varepsilon_i = \Phi_i = 0,405 \quad (4.204.)$$

Toplinski stupanj djelovanja je jednak:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = \left(1 + \frac{2040,714}{10398,998}\right) \cdot 0,405 = 0,484 \quad (4.205.)$$

U idućem dijelu ovog proračuna, razmatra se slučaj izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline kada je međusobni smjer strujanja fluida protusmjerni.

Očitano vrijednost  $\Phi_p$  iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline je 0,41.

Izlazna temperatura slabije struje je:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_p(t_1' - t_2') = 90 - 0,41(90 - 25) = 63,29 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.206.)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se kao:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2040,714 \cdot (90 - 63,29) = 54516,47 \text{ W} \quad (4.207.)$$

Izlazna temperatura jače struje iznosi:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{54516,47}{10398,998} + 25 = 30,24 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.208.)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln\left(\frac{\Delta t'}{\Delta t''}\right)} = \frac{38,35 - 59,76}{\ln\left(\frac{38,35}{59,76}\right)} = 49,133 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.209.)$$

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 63,35 - 25 = 38,35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 90 - 30,24 = 59,76 \text{ }^\circ\text{C}$$

Provjera se vrši pomoću jednadžbe prolaza topline:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 1159,00 \cdot 0,9777 \cdot 49,133 = 54698,00 \text{ W} \quad (4.210.)$$

Iskoristivost topline je:

$$\varepsilon_p = \Phi_p = 0,41 \quad (4.211.)$$

Toplinski stupanj djelovanja iznosi:

$$\eta_p = \Phi_p = \varepsilon_p = 0,41 \quad (4.212.)$$

Na jednak, prethodno opisan, način provedeni su proračuni izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline za slučajeve kada je volumni protok hladne vode jednak 12, 15, 18 i 21 m<sup>3</sup>/h. Tablice 4.9. - 4.12. prikazuju rezultate proračuna cijevnog izmjenjivača topline s 91 cijevi u cijevnom snopu. Dane su izlazne temperature tople i hladne vode, izmijenjeni toplinski tokovi, iskoristivosti topline i toplinski stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline za različite volumne protoke hladne vode.

Tablica 4.9. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 12 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t_{tw}''$	$t_{hw}''$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	74,47 °C	28,29°C	31702,45 W	31892,62 W	0,239	0,274
	Protusmjerni tok	74,4 °C	28,30°C	31835,14 W	31951,89 W	0,24	0,24
S pregradama	Istosmjerni tok	62,18 °C	30,10 °C	56772,66 W	56932,62 W	0,428	0,491
	Protusmjerni tok	61,86 °C	30,14 °C	57435,90 W	57651,86W	0,433	0,433

Tablica 4.10. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t_{tw}''$	$t_{hw}''$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	73,23 °C	28,97 °C	34222,77 W	34434,73 W	0,258	0,289
	Protusmjerni tok	73,17 °C	28,98 °C	34355,72 W	34519,90 W	0,259	0,259
S pregradama	Istosmjerni tok	61,08 °C	30,41 °C	59027,65 W	59095,97 W	0,445	0,497
	Protusmjerni tok	60,75 °C	30,44 °C	59690,88 W	59717,86 W	0,450	0,450



Tablica 4.11. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 18 m<sup>3</sup>/h

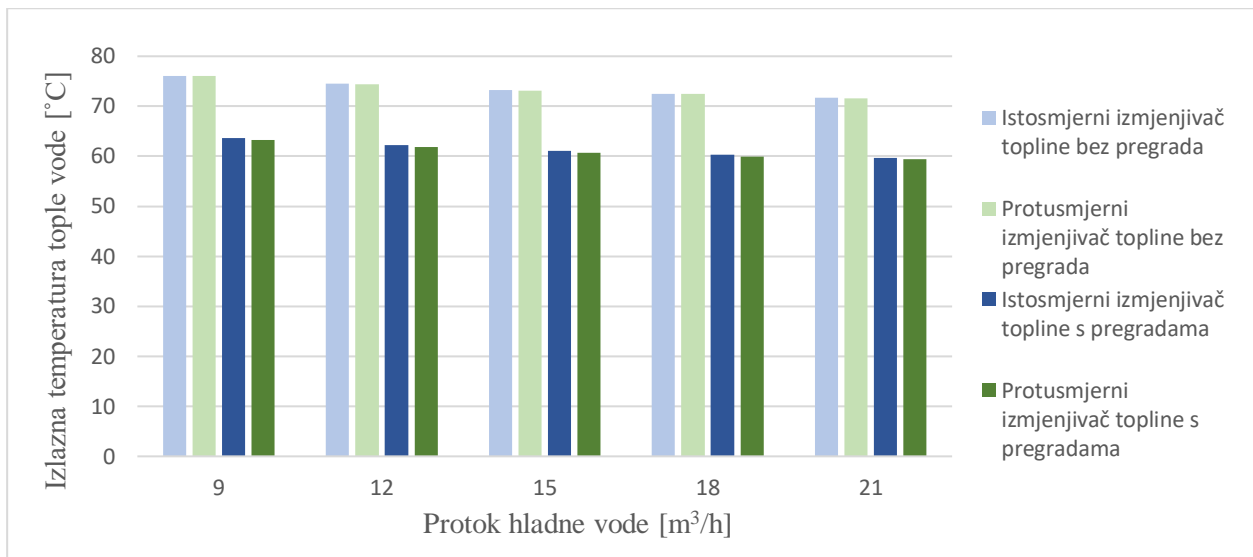
$\dot{V}_{hw} = 18 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t''_{tw}$	$t''_{hw}$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	72,52 °C	29,72 °C	35681,88 W	35789,56 W	0,269	0,295
	Protusmjerni tok	72,45 °C	29,73 °C	35815,53 W	35960,54 W	0,270	0,270
S pregradama	Istosmjerni tok	60,30 °C	30,92 °C	60619,41 W	60791,67 W	0,457	0,502
	Protusmjerni tok	59,97 °C	30,95 °C	61282,64 W	61328,38 W	0,462	0,462

Tablica 4.12. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h

$\dot{V}_{hw} = 21 \text{ m}^3/\text{h}$							
		$t''_{tw}$	$t''_{hw}$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{\Delta tm}$	$\varepsilon$	$\eta$
Bez pregrada	Istosmjerni tok	71,76 °C	30,54 °C	37406,29 W	37617,04 W	0,282	0,306
	Protusmjerni tok	71,61 °C	30,55 °C	37738,93 W	37803,53 W	0,283	0,283
S pregradama	Istosmjerni tok	59,65 °C	31,55 °C	61945,87 W	62104,93 W	0,467	0,506
	Protusmjerni tok	59,39 °C	31,58 °C	62476,46 W	562628,90 W	0,471	0,471

#### 4.3.3. Analiza rezultata

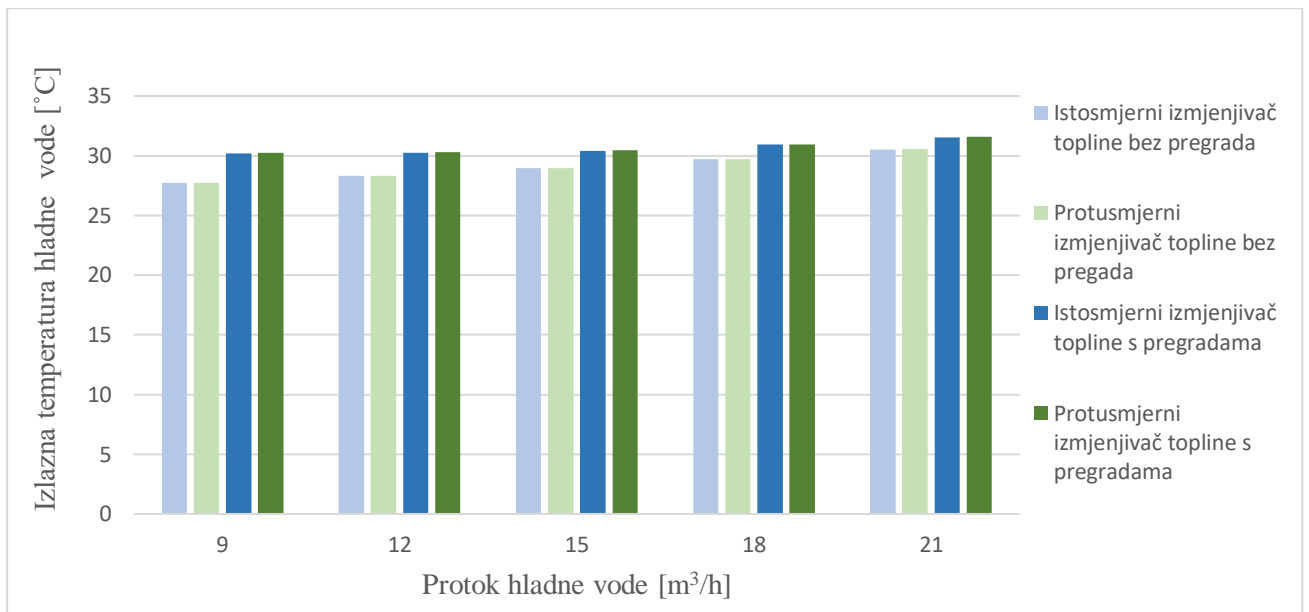
Unutar ovog potpoglavlja analizirat će se rezultati proračuna cijevnog izmjenjivača topline koji je proveden u potpoglavljima 4.3.1. i 4.3.2. Slikama 4.9., 4.10., 4.11. i 4.12. grafički su prikazani dobiveni rezultati, koji su dani za istosmjerni i protusmjerni tok te za izvedbe bez i s pregradama u bubnju.



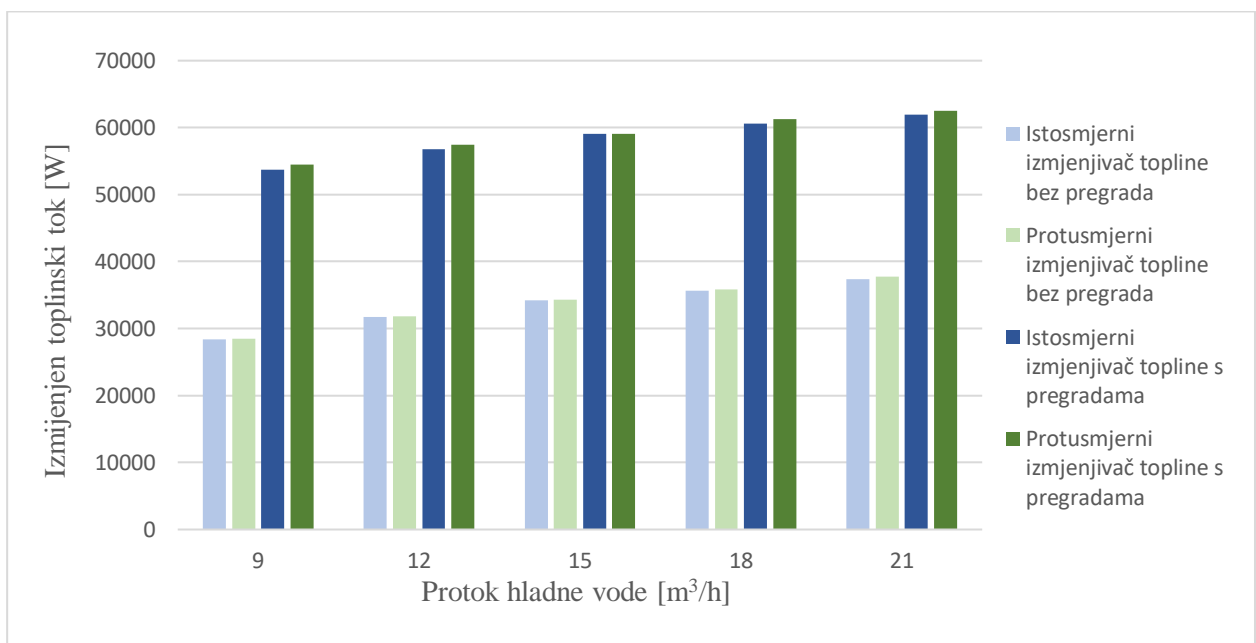
*Slika 4.9. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu*

Slika 4.9. prikazuje izlazne temperature tople vode za različite volumne protoke hladne vode. Na osi apscisa se nalaze volumni protoci hladne vode, dok os ordinata prikazuje izlaznu temperaturu tople vode. Nijansama plave boje prikazane su temperature u slučaju istosmjernog strujanja, a nijansama zelene boje su prikazane temperature kada je strujanje protusmjerno. Vidljivo je da izlazna temperatura tople vode pada s porastom protoka hladne vode. Najniža vrijednosti izlazne temperature tople vode je u protusmjernom izmjenjivaču topline bez pregrada, kada volumni protok hladne vode iznosi 21 m<sup>3</sup>/h. Također, dodatak pregrada u bubanj ima veći utjecaj na smanjenje izlazne temperature tople vode nego međusobni smjer strujanja fluida.

Slika 4.10. prikazuje usporedbu izlaznih temperatura hladne vode u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu. Najviše izlazne temperature hladne vode su kada protok hladne vode iznosi 21 m<sup>3</sup>/h. Nadalje, izlazne temperature hladne vode više su u slučaju protusmjernog toka i kod izvedbe izmjenjivača topline s pregradama u bubnju.



Slika 4.10. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu

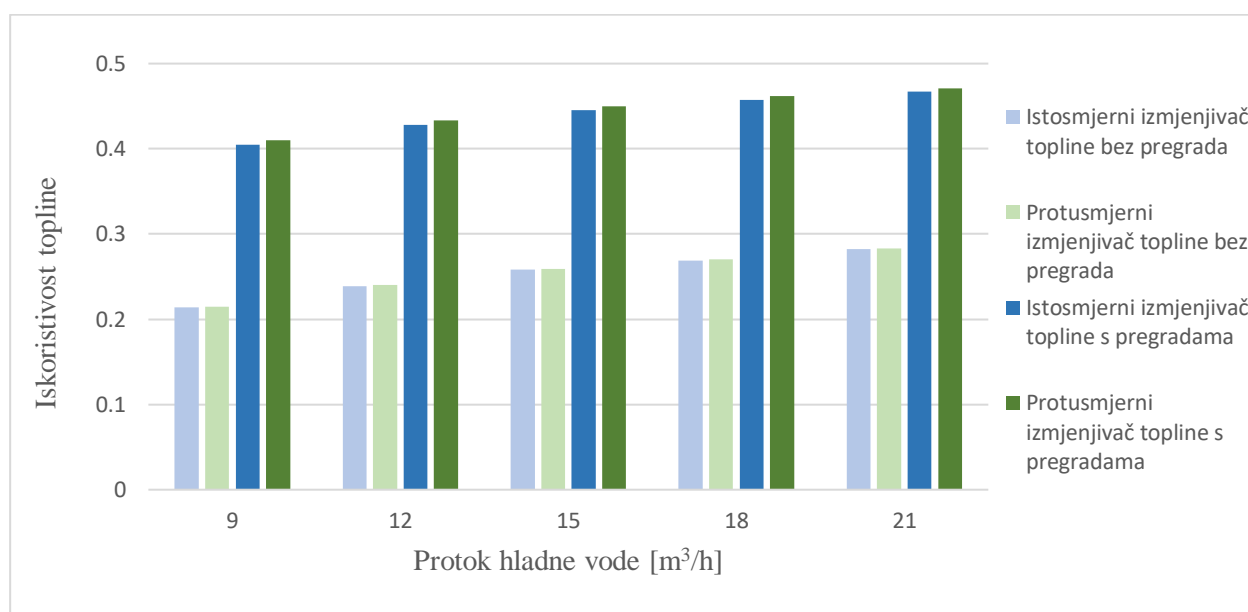


Slika 4.11. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu

Slikom 4.11. prikazani su izmijenjeni toplinski tokovi u cijevnom izmjenjivaču topline u odnosu na protok hladne vode. Vidljiv je porast izmijenjenog toplinskog toka s porastom protoka hladne vode. Najveći izmijenjeni toplinski tok je u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama, kada je protok tople vode najveći. Također, izvedbe izmjenjivača topline s pregradama imaju veći utjecaj na porast izmijenjenog toplinskog toka od međusobnog smjera strujanja fluida. Kada je

protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h, izmijenjeni toplinski tok je 67 % veći u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada.

Slika 4.12. prikazuje usporedbu iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline. Zapažen je porast iskoristivosti topline s porastom protoka hladne vode. Naime, najveća iskoristivost topline je u slučaju protusmjernog izmjenjivača topline s pregradama. Također, iskoristivosti su vidljivo veće kod izvedbe s pregradama. Iskoristivost topline u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama je za 67 % veća u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada, kada je volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h.

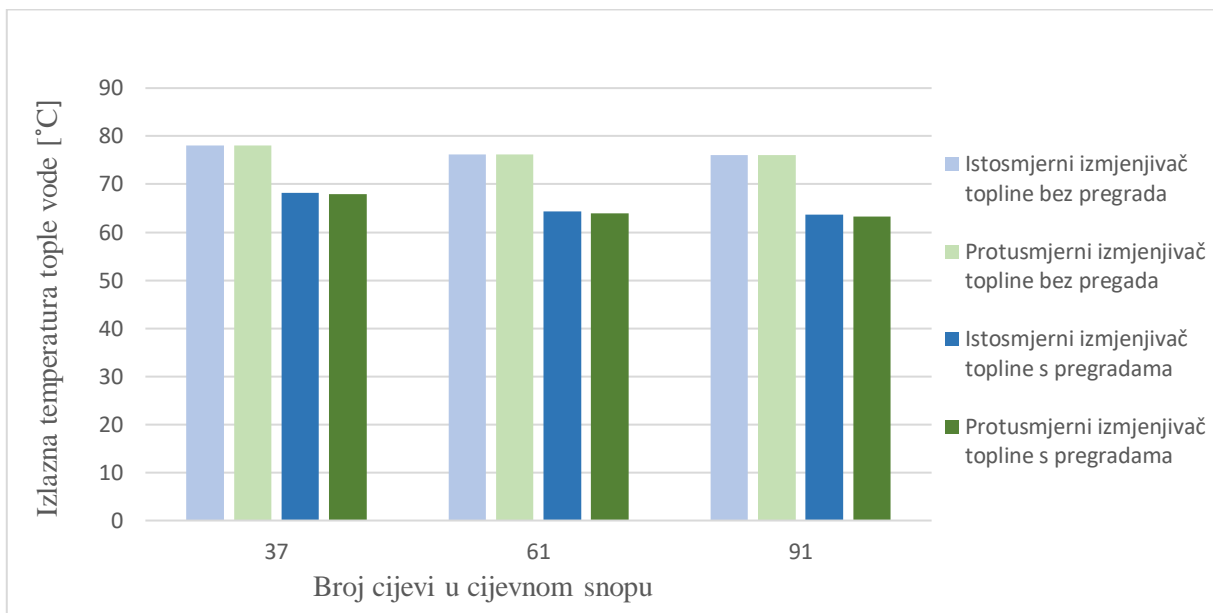


Slika 4.12. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu

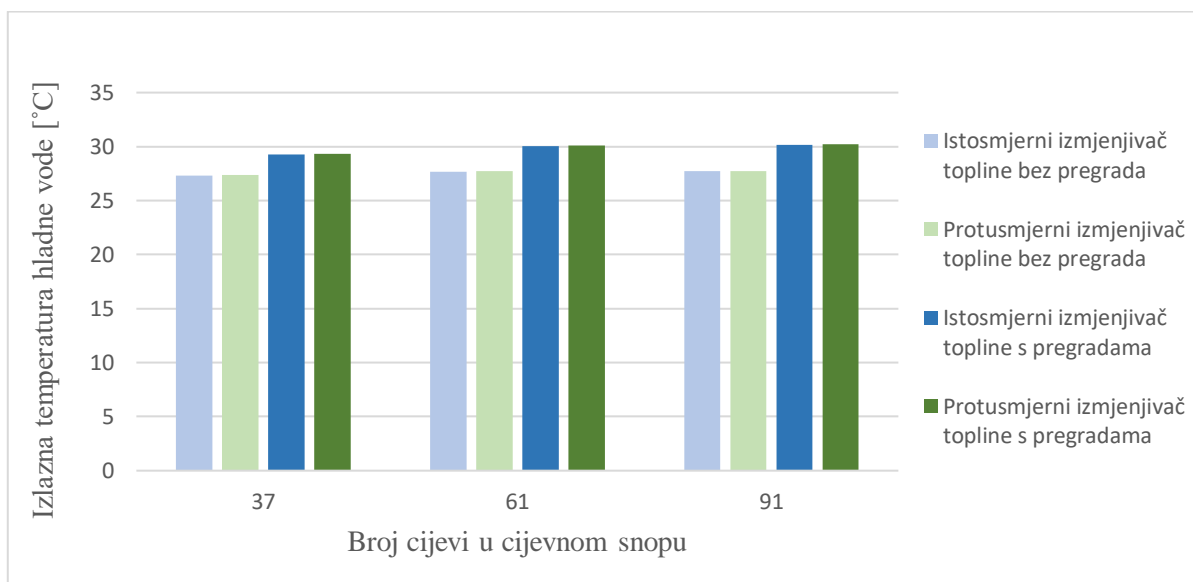
#### 4.4. Usporedba rezultata za cijevne izmjenjivače topline s različitim brojem cijevi u cijevnom snopu

U ovom potpoglavlju će biti prikazana usporedba izlaznih temperatura obje struje, izmijenjenih toplinskih tokova i iskoristivosti topline za cijevne izmjenjivače topline s i bez pregrada za različite brojeve cijevi. Usporedbe će se vršiti za iduće volumne protoke hladne vode: 9, 15 i 21 m<sup>3</sup>/h. Osapisa će u svakom dijagramu prikazivati broj cijevi u cijevnom snopu, dok će se na osi ordinata nalaziti izlazna temperatura tople ili hladne vode, izmijenjeni toplinski tok ili iskoristivost topline. Nijanse zelene boje označavaju protusmjerni izmjenjivač topline bez i s pregradama, dok nijanse plave boje prikazuju istosmjerni izmjenjivač topline bez i s pregradama.

Slika 4.13. prikazuje usporedbu izlaznih temperatura tople vode za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu kada volumni protok hladne vode iznosi  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Vidljiv je pad izlazne temperature tople vode s povećanjem broja cijevi. Najniža izlazna temperatura tople vode je u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama u bubnju s 91 cijevi u cijevnom snopu.



Slika 4.13. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $9 \text{ m}^3/\text{h}$

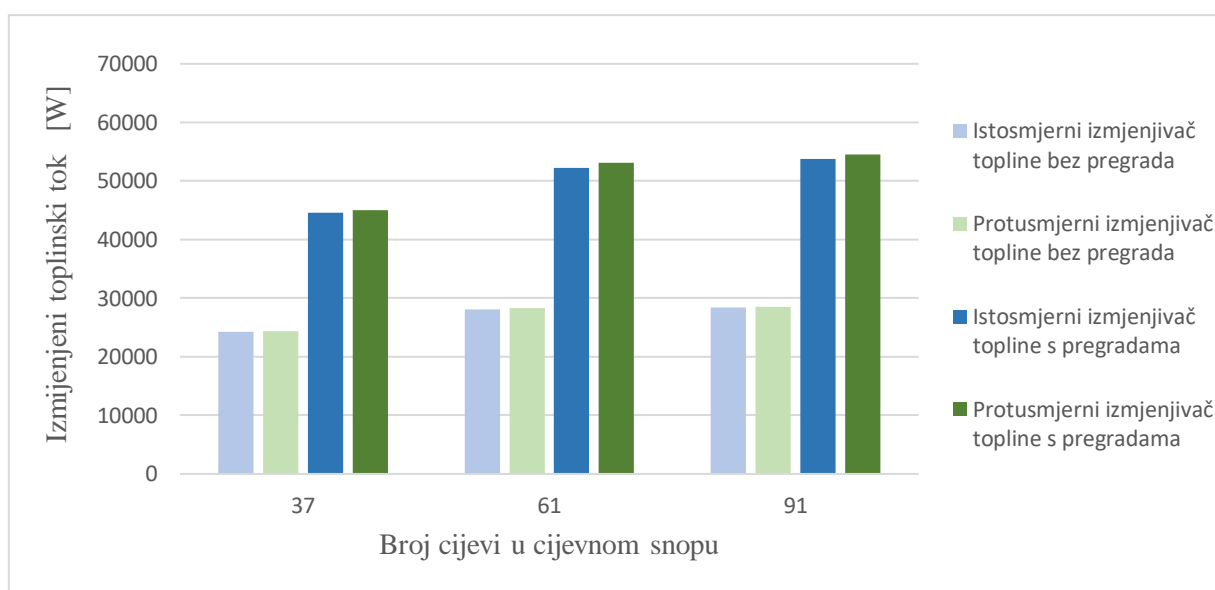


Slika 4.14. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $9 \text{ m}^3/\text{h}$

Usporedba izlaznih temperatura hladne vode za različite brojeve cijevi prikazana je slikom 4.14. Moguće je zapaziti porast izlazne temperature s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu.

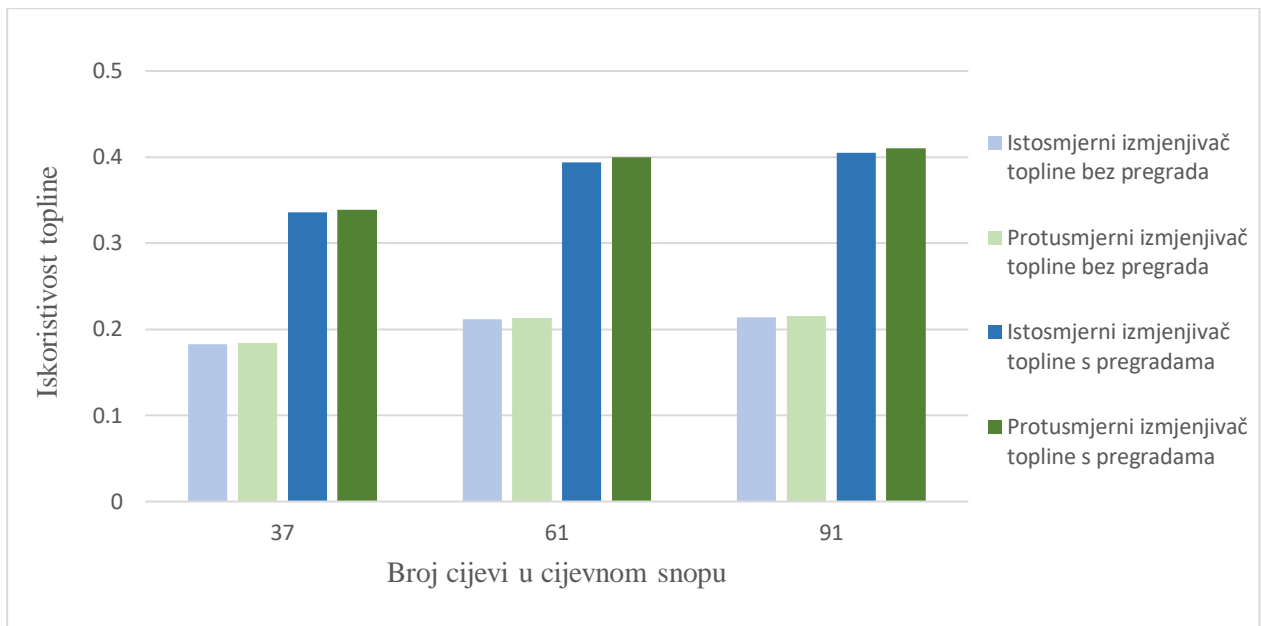
Najviše izlazne temperaturu hladne vode postižu se za najveći broj cijevi u cijevnom snopu. Nadalje, izlazne temperature hladne vode su više kod izvedbi s pregradama.

Slika 4.15. prikazuje usporedbu izmijenjenih toplinskih tokova za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu kada volumni protok hladne vode iznosi  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama u bubnju postiže najveći izmijenjeni toplinski tok s 91 cijevi u cijevnom snopu. Zapažen je porast izmijenjenog toplinskog toka s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu. Nadalje, dodatak pregrada u bubanj ima veći utjecaj na povećanje izmijenjenog toplinskog toka nego međusobni smjer strujanja fluida. Izmijenjeni toplinski tok je za 21 % veći u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama s 91 cijevi u cijevnom snopu u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama s 37 cijevi u cijevnom snopu.

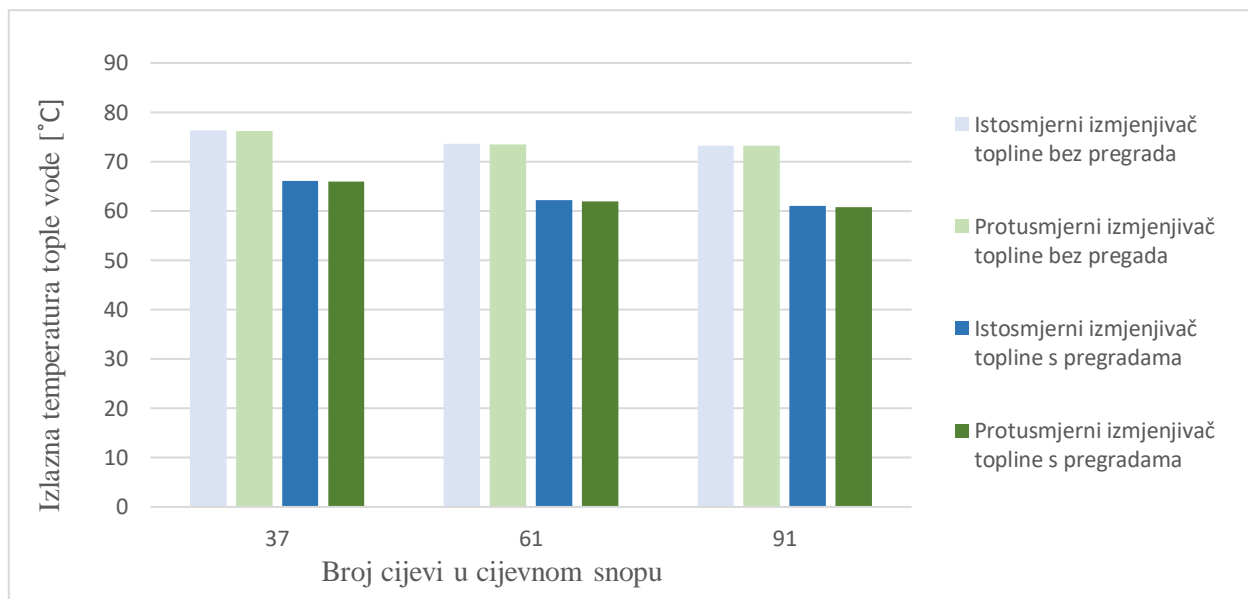


Slika 4.15. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $9 \text{ m}^3/\text{h}$

Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi kada je protok hladne vode  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  prikazana je slikom 4.16. Moguće je zapaziti porast iskoristivosti topline s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu. Najveću iskoristivost topline postiže protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama kada je broj cijevi 91. Također, iskoristivosti topline su više kod izvedbi s pregradama. Iskoristivost topline je 21 % veća u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama s 91 cijevi u cijevnom snopu u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama s 37 cijevi u cijevnom snopu.

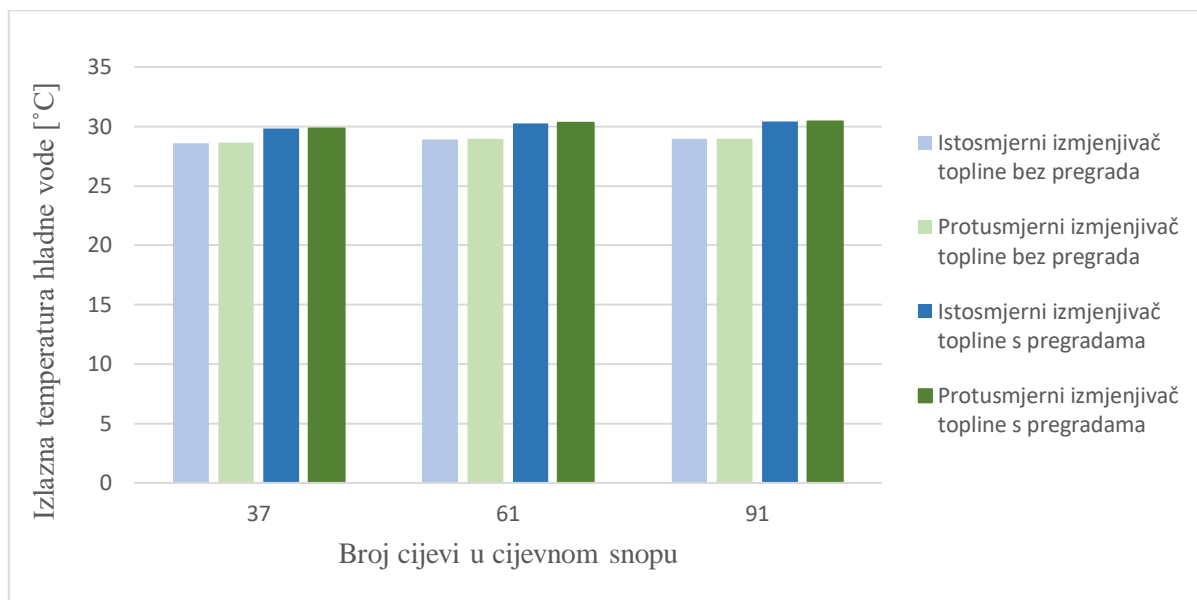


Slika 4.16. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $9 \text{ m}^3/\text{h}$



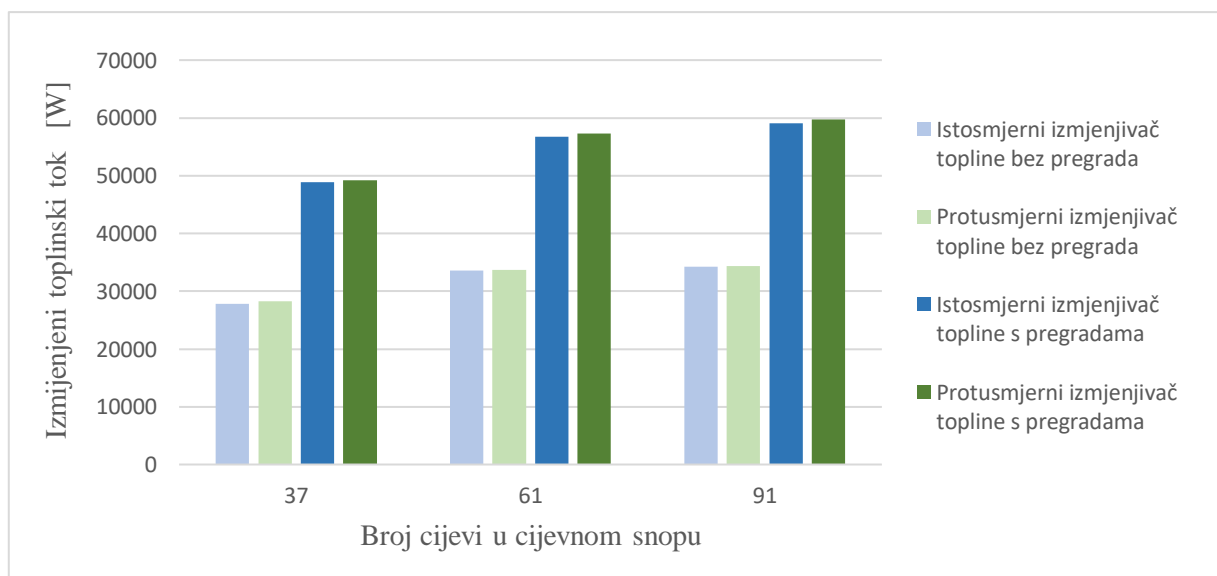
Slika 4.17. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $15 \text{ m}^3/\text{h}$

Slika 4.17. prikazuje usporedbu izlaznih temperatura tople vode za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu kada volumni protok hladne vode iznosi  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ . Vidljivo je da je izlazna temperatura najmanja u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama. Nadalje, izlazne temperature su niže u slučaju izvedbe izmjenjivača topline s pregradama u bubnju.



Slika 4.18. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $15 \text{ m}^3/\text{h}$

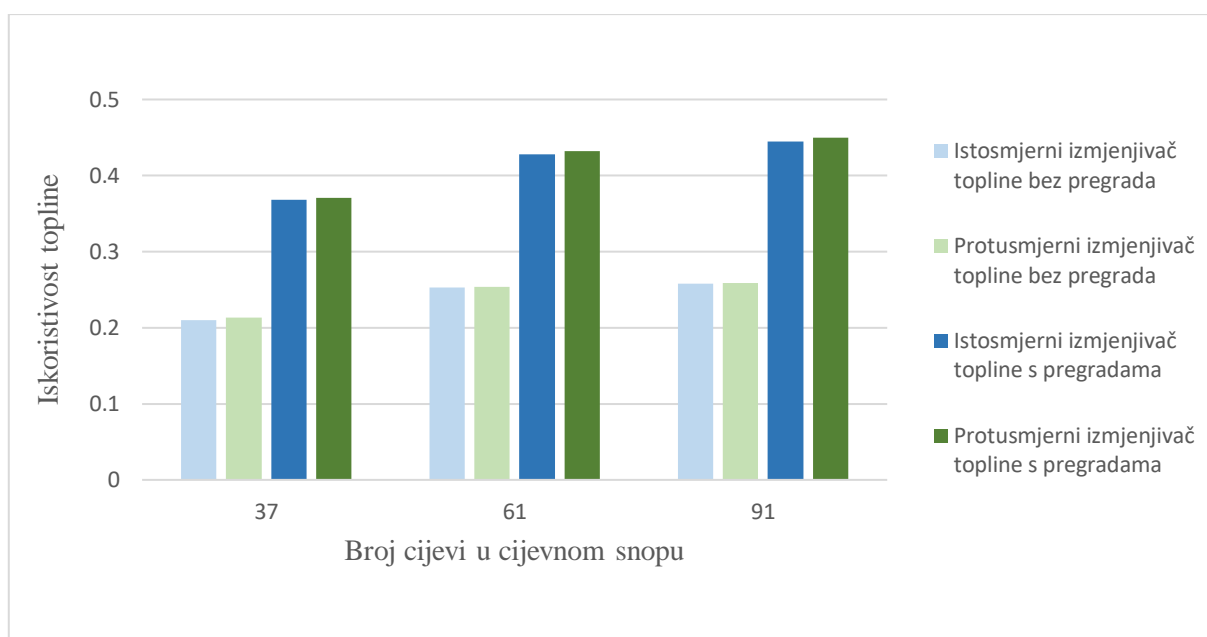
Slikom 4.18. prikazane su izlazne temperature hladne vode za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu kada protok hladne vode iznosi  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ . Vidljiv je porast izlazne temperature hladne vode s povećanjem broja cijevi. Najviša izlazna temperatura hladne vode postignuta je u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama koji se sastoji od 91 cijevi u cijevnom snopu.



Slika 4.19. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $15 \text{ m}^3/\text{h}$



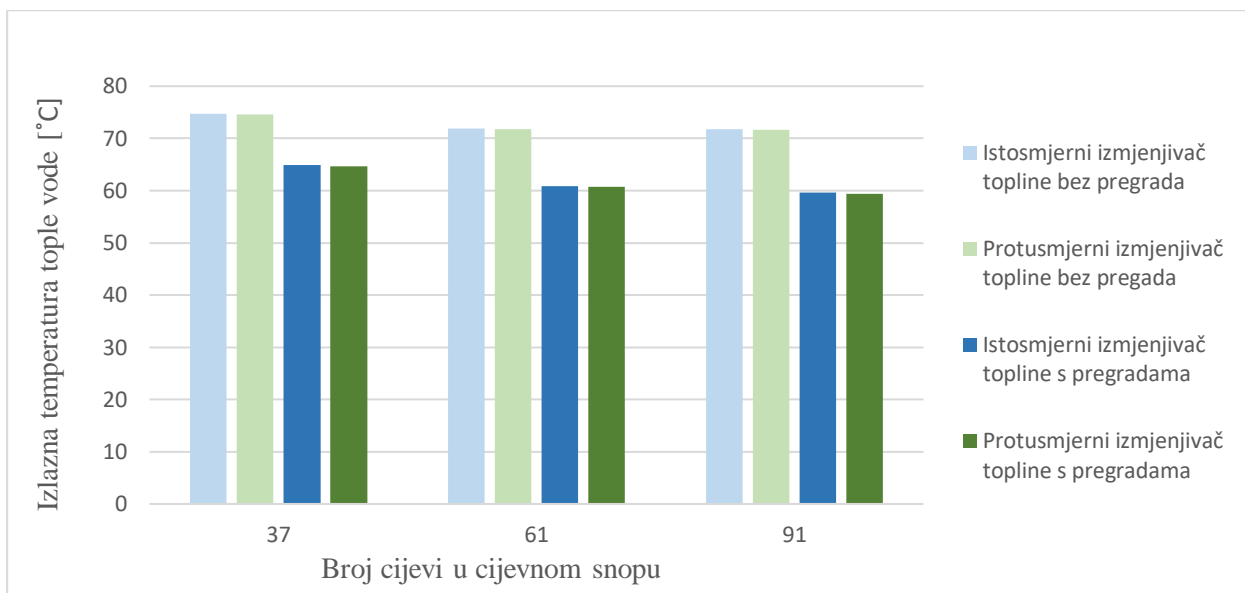
Slikom 4.19. dana je usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu kada volumni protok hladne vode iznosi 15 m<sup>3</sup>/h. Izmijenjeni toplinski tokovi rastu s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu. Također, dodatak pregrada u bubanj ima veći utjecaj na porast izmijenjenog toplinskog toka nego međusobni smjer strujanja fluida. Izmijenjeni toplinski tok je za 21 % veći u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama s 91 cijevi u cijevnom snopu u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama s 37 cijevi u cijevnom snopu.



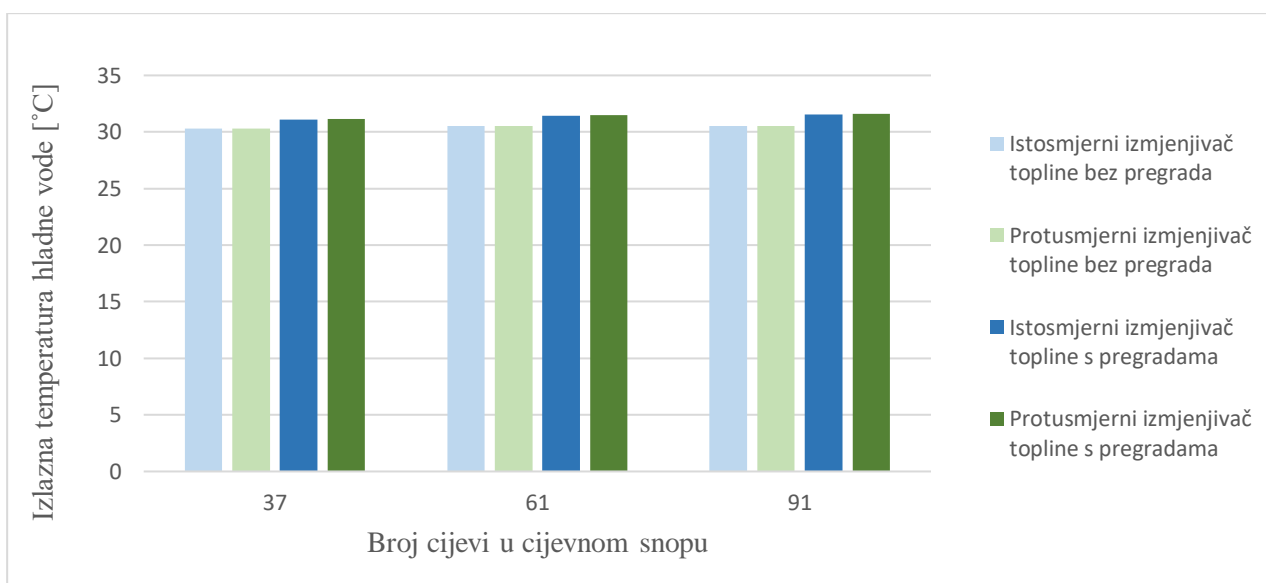
Slika 4.20. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h

Usporedba iskoristivosti topline za različite brojeve cijevi prikazana je slikom 4.20. Moguće je zapaziti porast iskoristivosti topline s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu. Najveću iskoristivost topline postiže protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama kada je broj cijevi 91. Nadalje, iskoristivosti topline su više kod izvedbi s pregradama. Iskoristivost topline je 21 % veća u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama s 91 cijevi u cijevnom snopu u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama s 37 cijevi u cijevnom snopu.

Slika 4.21. prikazuje usporedbu izlaznih temperatura tople vode za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu kada volumni protok hladne vode iznosi 21 m<sup>3</sup>/h. Izlazna temperatura tople vode pada s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu. Niže izlazne temperature tople vode postignute su korištenjem izvedbe izmjenjivača topline s pregradama i većim brojem cijevi u cijevnom snopu.

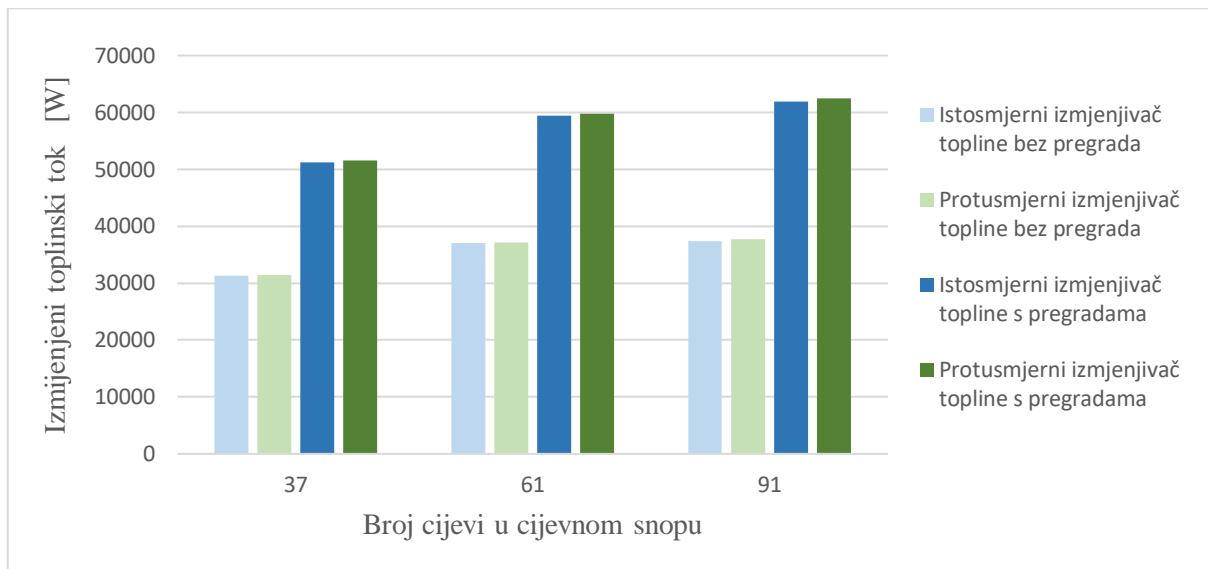


Slika 4.21. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $21 \text{ m}^3/\text{h}$



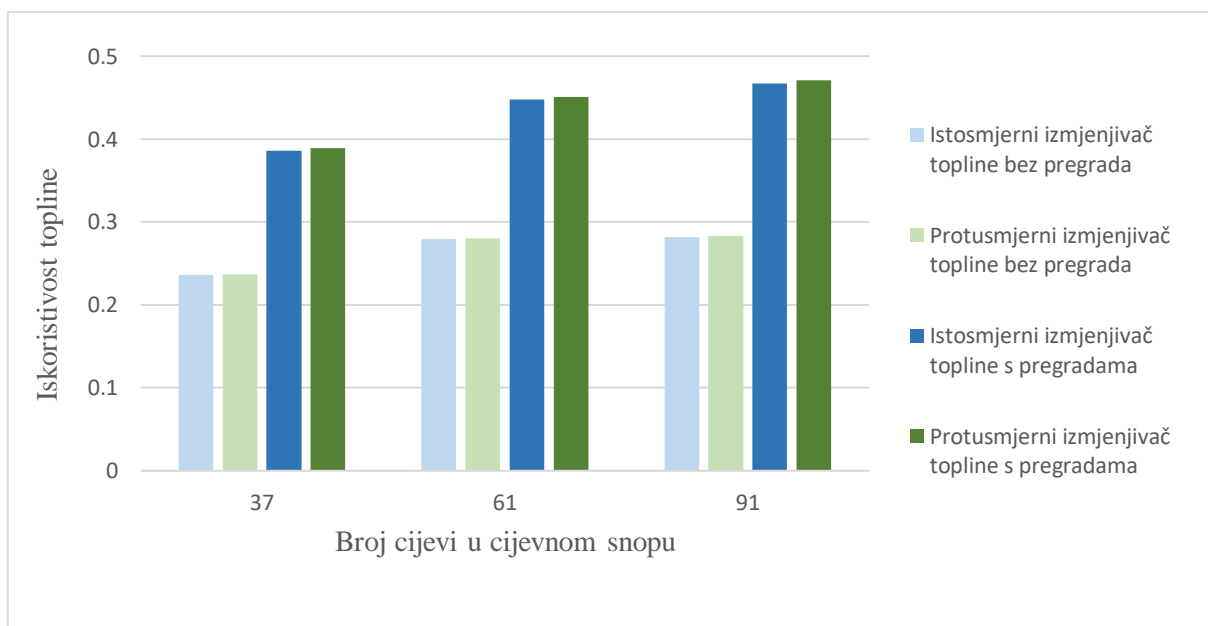
Slika 4.22. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $21 \text{ m}^3/\text{h}$

Usporedba izlaznih temperatura hladne vode za različite brojeve cijevi prikazana je slikom 4.22. Moguće je zapaziti porast izlazne temperature s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu. Također, izlazne temperature tople vode više su kod izmjenjivača topline s pregradama.



Slika 4.23. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $21 \text{ m}^3/\text{h}$

Slika 4.23. prikazuje usporedbu izmijenjenih toplinskih tokova za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu kada volumni protok hladne vode iznosi  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ . Izmijenjeni toplinski tokovi su najveći kada je najveći broj cijevi u snopu. Izvedbe izmjenjivača topline s pregradama izmjenjuju veće količine toplinskog toka u odnosu na izvedbe bez pregrada u bubnju. Izmijenjeni toplinski tok je 21 % veći u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama s 91 cijevi u cijevnom snopu u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama s 37 cijevi u cijevnom snopu.



Slika 4.24. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode  $21 \text{ m}^3/\text{h}$

Usporedba iskoristivosti topline za različite brojeve cijevi prikazana je slikom 4.24. Moguće je zapaziti porast iskoristivosti topline s povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu. Najveću iskoristivost topline postiže protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama kada je broj cijevi 91. Iskoristivosti topline su veće u izvedbama izmjenjivača topline s pregradama u bubnju. Iskoristivost topline je 21 % veća u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama s 91 cijevi u cijevnom snopu u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama s 37 cijevi u cijevnom snopu.

Iz priloženih slika, 4.13. – 4.24., je vidljivo smanjenje izlaznih temperatura tople vode s povećanjem volumnih protoka hladne vode i broja cijevi u bubnju. Izlazna temperatura hladne vode povećava se povećanjem navedenih. Nadalje, najveći izmijenjeni toplinski tokovi i iskoristivosti topline postižu se u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama, koji se sastoji od 91 cijevi u cijevnom snopu, kada protok hladne vode iznosi  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ . To objašnjava činjenica da dodatak pregrada u bubnju pospješuje prijelaz topline, dok je protusmjernan tok povoljniji od istosmjernog. Izmijenjeni toplinski tokovi i iskoristivosti topline su za 21 % veće u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama koji se sastoji od 91 cijevi u cijevnom snopu u odnosu na protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama koji se sastoji od 37 cijevi u unutarnjem cijevnom snopu.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je provedena termodinamička analiza izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline, koji kao radni medij koristi toplu i hladnu vodu. Hladna voda se zagrijava pomoću tople, a cilj je zagrijati hladnu vodu od ulazne temperature na veću izlaznu temperaturu. Za odabrane parametre, analizirane su promjene fizikalnih veličina za: različiti broj cijevi unutar cijevnog snopa, različite izvedbe izmjenjivača topline i smjer strujanja fluida te različite volumne protoke hladne vode.

Na početku su dane osnove izmjene topline, gdje su opisani mehanizmi prijelaza topline. Potom je izvršena podjela izmjenjivača topline na važne skupine. Dane su najvažnije karakteristike svake od njih, kao i principi rada.

Poslije teorijskog dijela je uslijedio proračun cijevnog izmjenjivača topline koji se sastojao od tri dijela. Razmatrale su se izvedbe izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju te istosmjerno i protusmjerno strujanje fluida. Cijevi izmjenjivača topline bile su smještene u šahovski raspored. U prvom dijelu proračuna su tvorile tri upisana šesterokuta, što odgovara broju od 37 cijevi u snopu, u drugom četiri, što odgovara broju od 61 cijevi, a u trećem pet, što odgovara broju od 91 cijevi u cijevnom snopu. U svakom od navedenih proračuna određene su izlazne temperature tople i hladne vode, izmijenjeni toplinski tok, iskoristivost topline i toplinski stupanj djelovanja.

Analiza rezultata se vršila za volumne protoke hladne vode u rasponu od  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  do  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ . Izlazna temperatura tople vode je najmanja u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama, kada je protok hladne vode  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ . Najviša izlazna temperatura hladne vode postiže se u istom tipu izmjenjivača topline za jednak protok. Izmijenjeni toplinski tokovi i iskoristivost topline također rastu s porastom protoka hladne vode.

Uspoređene su i izlazne temperature tople i hladne vode, izmijenjeni toplinski tokovi i iskoristivosti topline za protoke hladne vode od 9, 15 i  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ , za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu. Izlazna temperatura tople vode se smanjuje porastom protoka i broja cijevi. Najmanja je kada protok hladne vode iznosi  $21 \text{ m}^3/\text{h}$  u protusmjernom izmjenjivaču topline s pregradama koji se sastoji od 91 cijevi u cijevnom snopu.

Izlazna temperatura hladne vode, izmijenjeni toplinski tokovi i iskoristivosti topline rastu povećanjem volumnog protoka hladne vode i broja cijevi u cijevnom snopu. U slučaju protusmjernog izmjenjivača topline s pregradama s 91 cijevi u snopu i pri protoku vode od  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ , zapažene su najveće vrijednosti spomenutih veličina.

Nadalje, dodatak pregrada u bubanj izmjenjivača topline ima znatno veći utjecaj na porast izlaznih temperatura hladne vode, izmijenjenih toplinskih tokova i iskoristivosti topline u odnosu na međusobni smjer strujanja fluida, čiji je utjecaj zanemarivo malen.

## 6. LITERATURA

- [1] Trp, A.: „Tehnički izmjenjivači topline“ nastavni materijali, Tehnički fakultet, Rijeka 2022.
- [2] Trp, A., Lenić, K.: „Termodinamika II“ nastavni materijali, Tehnički fakultet, Rijeka 2022.
- [3] Bošnjaković, F.: „Nauka o toplini“, Graphis d.o.o, Zagreb, 2012.
- [4] Ražnjević, K.; „Termodinamičke tablice“, 3. izdanje, Narodna Tehnika Hrvatske, Zagreb 1989.
- [5] Galović, A.: „Termodinamika II“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [6] S interneta, <https://www.hennlich.hr/proizvodi/izmjenjivaci-topline-plocasti-izmjenjivaci-topline-8610/plocasti-izmjenjivac-topline-hcgp-brtvljeni.htm> l (pristupljeno 24.9.2023.)
- [7] S interneta, <https://www.hennlich.hr/proizvodi/izmjenjivaci-topline-cijevni-izmjenjivaci-topline-8611/cijevni-izmjenjivaci-topline.html> (pristupljeno 2.11.2023.)

## 7. POPIS OZNAKA

<i>oznaka</i>	<i>mjerna jedinica</i>	<i>značenje</i>
<i>a</i>	[m <sup>2</sup> /s]	koeficijent temperaturne vodljivosti
<i>a</i>	-	koeficijent apsorpcije
<i>b</i>	[m]	duljina dijagonale šesterokuta
<i>c</i>	[m/s]	brzina svjetlosti
<i>c</i>	[J/kgK]	specifični toplinski kapacitet
<i>C<sub>c</sub></i>	[W/m <sup>2</sup> (100K) <sup>4</sup> ]	konstanta zračenja crnog tijela
<i>d</i>	-	koeficijent propuštanja
<i>d</i>	[m]	promjer cijevi
<i>e</i>	[m]	udaljenost cijevi od kraja bubnja
<i>Ė</i>	[W/m <sup>2</sup> ]	odzračena energija sivog tijela
<i>Ė<sub>c</sub></i>	[W/m <sup>2</sup> ]	odzračena energija crnog tijela
<i>F</i>	[m <sup>2</sup> ]	površina stijenke
<i>f</i>	[s <sup>-1</sup> ]	frekvencija
<i>G</i>	[kg/s]	maseni protok
<i>g<sub>x</sub></i>	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitacijsko ubrzanje
<i>k</i>	[W/m <sup>2</sup> K]	koeficijent prolaza topline
<i>L</i>	[m]	duljina cijevi
<i>L</i>	[W/K]	toplinska vodljivost
<i>m</i>	-	broj upisanih šesterokuta
<i>n</i>	-	broj cijevi
<i>n'</i>	-	broj cijevi u dijagonali
<i>Nu</i>	-	Nusseltova značajka
<i>Pr</i>	-	Prandtlova značajka



<i>oznaka</i>	<i>mjerna jedinica</i>	<i>značenje</i>
$\dot{q}$	[W/m <sup>2</sup> ]	gustoća toplinskog toka
$Q$	[J]	izmijenjena toplina
$\dot{Q}$	[W]	izmijenjeni toplinski tok
$r$	-	koeficijent refleksije
$r$	[m]	polumjer cijevi
Re	-	Reynoldsova značajka
$t$	[m]	razmak između cijevi
$t$	[°C, K]	temperatura
$t'$	[°C, K]	ulazna temperatura
$t''$	[°C, K]	izlazna temperatura
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /h]	volumni protok
$w$	[m/s]	brzina strujanja fluida
$w$	[m <sup>2</sup> K/W]	specifični toplinski otpor
$W$	[K/W]	toplinski otpor
$\delta$	[m]	debljina stijenke
$\varepsilon$	-	iskoristivost topline
$\eta$	[Pa·s]	dinamički viskozitet
$\eta$	-	stupanj djelovanja izmjenjivača topline
$\lambda$	[m]	valna duljina
$\lambda$	[W/mK]	koeficijent toplinske vodljivosti
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematički viskozitet
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća
$\tau$	[s]	vrijeme
$\omega$	[mK/W]	koeficijent toplinskog otpora

## POPIS INDEKSA

1	unutarnji polumjer, slabija struja
2	vanjski polumjer, jača struja
hw	hladna voda
tw	topla voda
u	unutarnji promjer
v	vanjski promjer

## 8. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Provođenje topline kroz ravnu stijenku.....</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2.2. Toplinski tok poprečno na slojeve višeslojne stijenke.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 2.3. Toplinski tok duž slojeva višeslojne stijenke .....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 2.4. Provođenje topline kroz stijenku cijevi .....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 2.5. Prijenos topline konvekcijom.....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 2.6. Energija zračenja koja dolazi na ozračeno tijelo .....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.7. Zračenje iz šupljine .....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.8. Prolaz topline kroz ravnu stijenku .....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 2.9. Prolaz topline kroz stijenku cijevi.....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 3.1. Podjela izmjenjivača topline .....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 3.2. Temperaturne promjene u istosmjernom rekuperatoru .....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 3.3. Temperaturne promjene u protusmjernom rekuperatoru.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 3.4. Smjer strujanja tople i hladne struje kroz unakrsni rekuperator .....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 3.5. Cijevni izmjenjivač topline [7] .....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 3.6. Paralelno smještene cijevi.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 3.7. Šahovski raspored cijevi.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 3.8. Pločasti izmjenjivač topline [6].....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 3.9. Akumulacijska masa i smjer strujanja tople i hladne struje kroz regenerativni izmjenjivač topline.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 3.10. Rashladni toranj s prirodnom cirkulacijom .....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 4.1. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 4.2. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 4.3. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 4.4. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu. ....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 4.5. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>51</i>
<i>Slika 4.6. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>52</i>

<i>Slika 4.7. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 4.8. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu. 53</i>	
<i>Slika 4.9. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 4.10. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 4.11. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu.....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 4.12. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu</i>	<i>68</i>
<i>Slika 4.13. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 9 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 4.14. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 9 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 4.15. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 9 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 4.16. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 9 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>71</i>
<i>Slika 4.17. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>71</i>
<i>Slika 4.18. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 4.19. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 4.20. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 4.21. Usporedba izlaznih temperatura tople vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 4.22. Usporedba izlaznih temperatura hladne vode u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 4.23. Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h .....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 4.24. Usporedba iskoristivosti topline u izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>75</i>

## 8. POPIS TABLICA

<i>Tablica 4.1. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 12 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 4.2. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 4.3. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 18 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>36</i>
<i>Tablica 4.4. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 37 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>36</i>
<i>Tablica 4.5. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 12 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>49</i>
<i>Tablica 4.6. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>50</i>
<i>Tablica 4.7. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 18 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>50</i>
<i>Tablica 4.8. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 61 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>51</i>
<i>Tablica 4.9. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 12 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>64</i>
<i>Tablica 4.10. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 15 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>64</i>
<i>Tablica 4.11. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 18 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>65</i>
<i>Tablica 4.12. Rezultati proračuna izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline s 91 cijevi u cijevnom snopu za volumni protok hladne vode 21 m<sup>3</sup>/h.....</i>	<i>65</i>

## 9. SAŽETAK

Ovaj diplomski rad obuhvaća termodinamičku analizu izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline. U prvom dijelu rada dane su osnove prijelaza topline te je prikazana podjela izmjenjivača topline. Potom je proveden analitički proračun izmjene topline u cijevnom izmjenjivaču topline za različite brojeve cijevi u unutarnjem cijevnom snopu te za istosmjerno i protusmjerno strujanje fluida. Nadalje, unutar proračuna su obuhvaćene izvedbe izmjenjivača topline bez i sa segmentnim pregradama u bubnju. Za odabrane parametre određene su izlazne temperature obje struje, izmijenjeni toplinski tokovi, iskoristivosti topline i toplinski stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline. Izvršena je analiza i usporedba dobivenih rezultata za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu, izvedbe izmjenjivača topline i različite volumne protoke hladne vode u bubnju.

**Ključne riječi:** cijevni izmjenjivač topline bez pregrada, cijevni izmjenjivač topline s pregradama, termodinamička analiza

## 9. SUMMARY

This graduate thesis includes a thermodynamic analysis of heat transfer in a shell and tube heat exchanger. In the first part of this thesis fundamentals of heat transfer are given and classification of heat exchangers is presented. Moreover, analytical calculation of heat transfer in shell and tube heat exchanger is made for different numbers of tubes in the internal tube bundle as well as for direct and counter fluid flow. Furthermore, calculation also covers types of heat exchangers without baffles and with baffles. For chosen parameters, output temperatures of both fluids, exchanged heat fluxes, heat effectivenesses and heat efficiencies are determined. Analysis and comparison of the obtained results for different number of tubes in tube bundle, types of heat exchanger and different cold water volume flows in the shell has been performed.

**Key words:** shell and tube heat exchanger without baffles, shell and tube heat exchanger with baffles, thermodynamic analysis