

# Analiza utjecaja smjera strujanja fluida na izmjenu topline u dvocijevnom izmjenjivaču topline

---

Jeleč, Jure

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:190:967698>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA SMJERA STRUJANJA FLUIDA NA  
IZMJENU TOPLINE U DVOCIJEVNOM IZMJENJIVAČU  
TOPLINE**

Rijeka, rujan 2022.

Jure Jeleč

0069062940

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA SMJERA STRUJANJA FLUIDA NA  
IZMJENU TOPLINE U DVOCIJEVNOM IZMJENJIVAČU  
TOPLINE**

Mentorica: Prof. dr. sc. Anica Trp

Rijeka, rujan 2022.

Jure Jeleč  
0069062940

Rijeka, 13. ožujka 2022.

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

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Jure Jeleč (0069062940)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Procesno i energetska strojarstvo**

Zadatak: **ANALIZA UTJECAJA SMJERA STRUJANJA FLUIDA NA IZMJENU TOPLINE U DVOCIJEVNOM IZMJENJIVAČU TOPLINE / ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FLUID FLOW DIRECTION ON HEAT EXCHANGE IN A DOUBLE TUBE HEAT EXCHANGER**


### Opis zadatka:

U svrhu analize utjecaja smjera strujanja fluida na izmjene topline u dvocijevnom rekuperatoru potrebno je postaviti jednadžbe toplinske bilance i jednadžbu prolaza topline. Za odabrane parametre potrebno je provesti termodinamički proračun te izvršiti analizu procesa izmjene topline. Analizirati utjecaj smjera strujanja fluida na izmjenu topline te usporediti karakteristične fizikalne veličine i rezultate proračuna. Rad mora obuhvatiti: uvod, opis fizikalnog problema izmjene topline i 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.

  
Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Anica Trp

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## Izjava o akademskoj čestitosti

Izjavljujem kako je moj diplomski rad pod nazivom „Analiza utjecaja smjera strujanja fluida na izmjenu topline u dvocijevnom izmjenjivaču topline“ izrađen samostalno uz pomoć dane literature, radova koji su navedeni u popisu literature, svih stečenih znanja tijekom studija i uz pomoć mentorice.

Rijeka, rujan 2022.

Jure Jeleč

Handwritten signature of Jure Jeleč in blue ink, written over a horizontal line.

## **Zahvala**

*Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Anici Trp na strpljenju, uloženom trudu, razumijevanju i prenešenom znanju pri izradi ovoga rada kao i tijekom cijelog studija. Posebno se želim zahvaliti svojim roditeljima na bezuvjetnoj podršci tijekom cijelog studija. Također želim zahvaliti svojoj zaručnici koja mi je bila neizmijerna podrška tijekom školovanja i izrade diplomskog rada.*

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. IZMJENA TOPLINE .....	2
2.1. Osnovni oblici izmjene topline .....	2
2.1.1. Izmjena topline provođenjem.....	2
2.1.2. Izmjena topline konvekcijom .....	4
2.1.3. Izmjena topline zračenjem .....	6
2.2. Prolaz topline.....	9
3. IZMJENJIVAČI TOPLINE .....	11
3.1. Podjela izmjenjivača topline .....	11
3.2. Rekuperativni izmjenjivači topline .....	12
3.2.1. Istosmjerni rekuperatori .....	13
3.2.2. Protusmjerni rekuperatori.....	16
3.2.3. Križni (unakrsni) rekuperatori.....	18
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN IZMJENE TOPLINE UNUTAR DVOCIJEVNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE.....	20
4.1. Istosmjerno strujanje fluida unutar dvocijevnog izmjenjivača topline.....	21
4.1.1. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 50 °C.....	21
4.1.2. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 60 °C.....	36
4.1.3. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 70 °C.....	49
4.2. Protusmjerno strujanje fluida unutar dvocijevnog izmjenjivača topline.....	61
4.2.1. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 50 °C.....	61
4.2.2. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 60 °C.....	71
4.2.3. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 70 °C.....	80
5. USPOREDBA DOBIVENIH REZULTATA .....	90
5.1. Usporedba rezultata za istosmjerni i protusmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 segmenata .....	90
5.2. Usporedba rezultata za istosmjerni i protusmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 20 segmenata .....	93

5.3. Usporedba rezultata za istosmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 i 20 segmenata ..	96
5.4. Usporedba rezultata za protusmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 i 20 segmenata .....	98
6. ZAKLJUČAK .....	100
7. LITERATURA .....	101
Popis oznaka.....	102
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	104
ABSTRACT AND KEY WORDS.....	105
Popis slika .....	106



## 1. UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada je analiza izmjene topline unutar dvocijevnog izmjenjivača topline odnosno provedba termodinamičkog proračuna za međusobni smjer strujanja fluida u istosmjernom i protusmjernom toku u dvocijevnom izmjenjivaču topline. Proračun se provodi kako bi se moglo utvrditi na koji način smjer strujanja fluida unutar izmjenjivača topline utječe na izmijenjeni toplinski tok, iskoristivost topline i stupanj djelovanja izmjenjivača topline, odnosno kako bi se utvrdilo koji je izmjenjivač topline povoljniji za primjenu. Izmjenjivači topline služe izmjenjivanju topline odnosno toplinskog toka između dva ili više fluida. Osnovna podjela izmjenjivača topline vrši se na rekuperatore, regeneratore i direktne izmjenjivače topline. U ovom radu posebice se obraća pažnja na rekuperatore i njihovu analizu, kako na istosmjerne tako i na protusmjerne rekuperatore. Opisane su osnove izmjene topline, prolaz topline kroz ravnu stijenk i prolaz topline kroz stijenk cijevi. Termodinamički proračun je proveden za dvocijevni izmjenjivač topline zadanih geometrijskih karakteristika i odabranih ulaznih podataka. Ulazni podaci za hladniju vodu koja struji kroz unutarnju cijev su isti za sve razmatrane slučajeve, a podaci koji se mijenjaju su ulazna brzina strujanja tople vode koja struji kroz vanjsku cijev te njena ulazna temperatura. Analiziran je 1 segment dvocijevnog izmjenjivača topline duljine 2 m, a za usporedbu su analizirani izmjenjivači topline s 10 i 20 segmenata. Nakon provedenog proračuna, prikazana je usporedba dobivenih rezultata za istosmjerne i protusmjerne dvocijevne izmjenjivače topline s 10 segmenata i 20 segmenata. Također je prikazana usporedba dobivenih rezultata za istosmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 i 20 segmenata te za protusmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 i 20 segmenata. Usporedbe su prikazane dijagramima za različite ulazne brzine i ulazne temperature tople struje za istosmjerno i protusmjerno strujanje fluida.

## 2. IZMJENA TOPLINE

Tri su osnovna oblika izmjene topline: provođenje, konvekcija i zračenje.

Provođenje topline je oblik izmjene topline specifičan tijelima čije su primarne čestice krute i značajno ne mijenjaju svoj položaj u strukturi tijela. Toplina se prenosi međusobnim djelovanjem molekula različitih brzina i temperatura. Molekule koje imaju višu temperaturu imaju i veću brzinu te u sudaru s molekulama niže temperature i brzine njima predaju dio kinetičke energije. Izmijenjeni toplinski tok usmjeren je s molekula više temperature prema molekulama niže temperature.

Konvekcija je oblik izmjene topline između krute stijenke i fluida. Toplina se izmjenjuje gibanjem čestica kapljevine koje izravnim dodirrom predaju toplinu česticama krute stijenke.

Zračenje je oblik izmjene topline gdje se toplina izmjenjuje putem elektromagnetskih valova kojima su valne duljine različite. Izmjena topline zračenjem odvija se između stijenki koje nisu u neposrednom dodiru, a između njih se može nalaziti plin ili vakuum koji je više ili niže temperature nego što su temperature stijenki koje izmjenjuju toplinu. Dakle, izmjena topline zračenjem nije vezana za tvar kao što je to slučaj kod provođenja topline i konvekcije. [1]

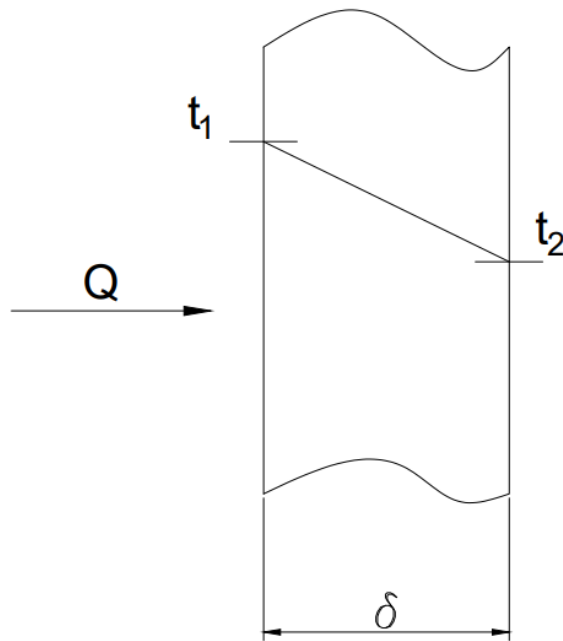
### 2.1. Osnovni oblici izmjene topline

#### 2.1.1. Izmjena topline provođenjem

U nastavku će se obraditi izmjena topline provođenjem kroz ravnu stijenku i stijenku cijevi. U oba slučaja pretpostavka je da su stijenke konstantne temperature, odnosno promatraju se stacionarna stanja.

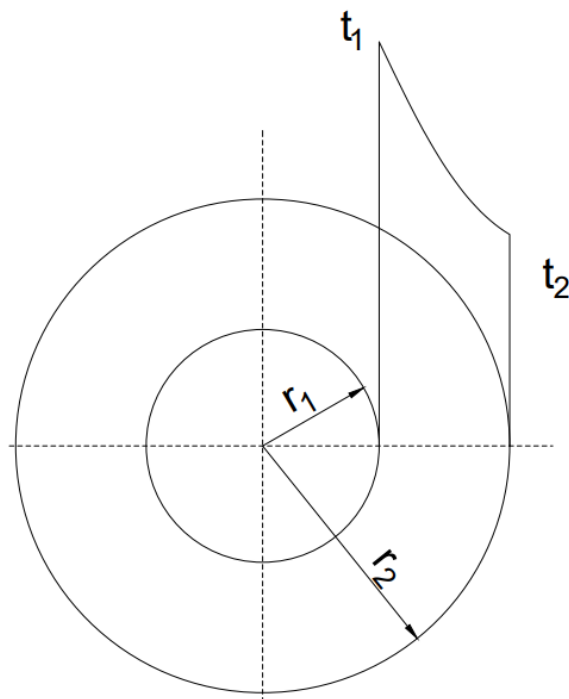
Provođenje topline kroz ravnu stijenku opisano je Fourierovim zakonom provođenja topline koji glasi:

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \cdot F \quad (2.01)$$



*Slika 2.1 Provođenje topline kroz ravnu stijenku*

Provođenje topline kroz stijenku cijevi može se računski jednostavno obraditi uz pretpostavku da temperatura ovisi isključivo o polumjeru cijevi te da je provođenje topline stacionarno i usmjereno u radijalnom smjeru. Raspodjela temperature po polumjeru  $r$  nije linearna. Nagib krivulje veći je na manjem polumjeru zbog manje površine za protok topline i veće gustoće toplinskog toka. [2]



*Slika 2.2 Provođenje topline kroz stijenku cijevi*

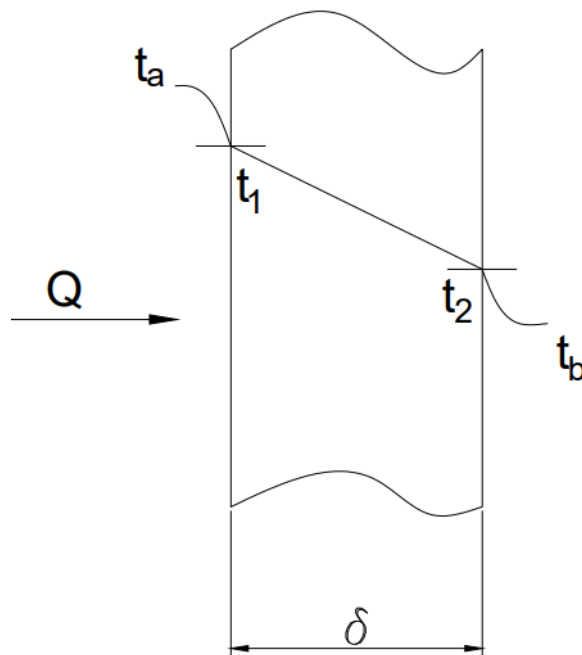
Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.02)$$

### 2.1.2. Izmjena topline konvekcijom

Konvekcija može biti slobodna (prirodna) ili prisilna odnosno nametnuta. Do slobodne konvekcije dolazi samo kod nejednolikoga rasporeda temperatura, odnosno kada je temperatura stijenke različita od temperature fluida s kojim je u dodiru. Dakle, do strujanja fluida dolazi uslijed izmjene topline. Kod prisilne konvekcije nije takav slučaj. Strujanje fluida se zbiva djelovanjem nekoga vanjskoga čimbenika kao što je rad ventilatora, pumpe, djelovanje vjetra, itd. U oba slučaja izmijenjeni toplinski tok se računa prema izrazu:

$$Q = \alpha_a \cdot F \cdot (t_a - t_1) = \alpha_b \cdot F \cdot (t_2 - t_b) \quad (2.03)$$



Slika 2.3 Izmjena topline konvekcijom

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  se računa pomoću bezdimenzijskih značajki koje su utvrđene eksperimentalnim putem.

Nusseltova značajka za cijevi:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (2.04)$$

Za prisilno strujanje Nusseltova značajka ovisi o Reynoldsovoj (Re) i Prandtlovoj (Pr) značajci:

$$\text{Pr} = \frac{v}{a} = \frac{\frac{\eta}{\rho}}{\frac{\lambda}{c \cdot \rho}} = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} \quad (2.05)$$

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (2.06)$$

Za slobodnu konvekciju Nusseltova značajka ovisi o Prandtlovoj (2.05) i Grashofovoj (Gr) značajci:

$$\text{Gr} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \cdot \frac{g_x \cdot d^3}{\nu^2} \quad (2.07)$$

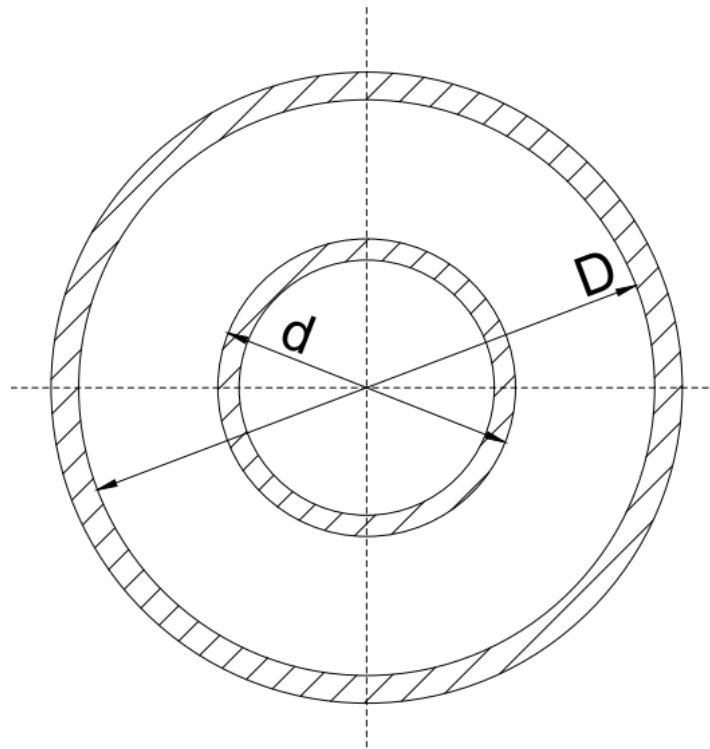
Izraz za računanje koeficijenta prijelaza topline kod prisilnog turbulentnog strujanja u cijevi:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = 0,0398 \cdot \text{Pr} \cdot \frac{\text{Re}^{\frac{3}{4}}}{1 + A \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{8}} \cdot (\text{Pr} - 1)} \quad (2.08)$$

$A=1,74$  za plinove, a za kapljevine s  $\text{Pr}>1$  vrijedi:

$$A = 1,5 \cdot \text{Pr}^{-\frac{1}{8}}$$

Za cijevi koje nisu kružnog poprečnog presjeka, potrebno je izračunati ekvivalentni promjer. Kao primjer će se uzeti cijev u cijevi. [4]



Slika 2.4 Cijev u cijevi

Ekvivalentni promjer za vanjsku cijev unutarnjeg promjera  $D$  se računa prema sljedećem izrazu:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)}{\pi(D + d)} = D - d \quad (2.09)$$

Površina  $F$  je površina poprečnog presjeka cijevi odnosno u ovom slučaju površina prstenastog presjeka, a  $O$  predstavlja opseg koji struja oplakuje.

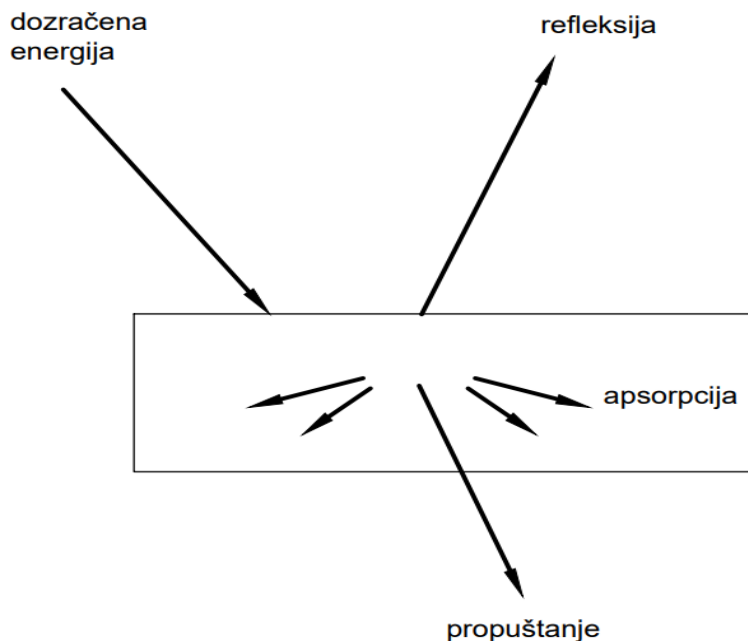
### 2.1.3. Izmjena topline zračenjem

Kao što je već rečeno, zračenje je oblik izmjene topline gdje se toplina izmjenjuje putem elektromagnetskih valova kojima su valne duljine različite. Osnovne karakteristike elektromagnetskog zračenja su valna duljina  $\lambda$  i frekvencija  $f$ .

$$\lambda \cdot f = c \quad (2.10)$$

Tijekom zračenja kroz pojedini medij, frekvencija ostaje konstantna dok se mijenjaju brzina svjetlosti  $c$  i valna duljina  $\lambda$ .

Ozračeno tijelo na koje dolazi energija zračenja jedan dio toga zračenja će odbiti (reflektirati), jedan dio će apsorbirati odnosno upiti te će jedan djelomično propustiti kroz tijelo.



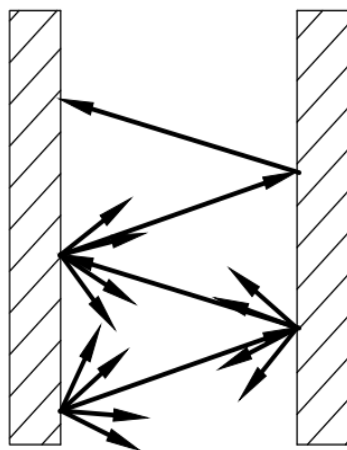
*Slika 2.5 Raspodjela dozračene energije*

Zbroj koeficijenata refleksije, apsorpcije i propuštanja mora biti jednak 1.

$$r + a + d = 1 \quad (2.11)$$

Tijelo koje sve zrake upija naziva se crno tijelo. Ono emitira zračenje koje je jednako dozračenom zračenju po intenzitetu i vrsti. Dakle, za crno tijelo vrijedi  $a = 1$ . Crno tijelo je moguće samo teorijski dok su u praksi sva tijela tzv. siva tijela koja ne apsorbiraju cijelo zračenje. [2]

U nastavku je opisana izmjena topline zračenjem između dvije usporedne stijenke. Toplinski tok izmjenjuju dvije usporedne stijenke koje su nepropusne za zračenje i odvojene propusnim medijem kao što je vakuum, zrak i sl. Razmak između stijenki mora biti malen u odnosu na veličinu stijenki. S obzirom na to da su stijenke nepropusne za zrake, sve što krene sa stijenke 1 dođe na stijenku 2. Ukupna energija koja se tako odašilje s  $1 \text{ m}^2$  površine nazivamo svjetloćom površine.



Slika 2.6 Izmjena energije zračenjem između dvije usporedne stijenke

Stefan-Boltzmannov zakon zračenja topline kaže da je odzračena energija crnog tijela proporcionalna četvrtoj potenciji termodinamičke temperature toga tijela. [3]

$$E_c = \sigma \cdot T^4 = C_c \cdot \frac{T^4}{100^4} \quad (2.12)$$

$$C_c = 100^4 \cdot \sigma = 5,667 \frac{W}{m^2(100K)^4} \quad (2.13)$$

Odzračena energija sivog tijela se računa prema izrazu:

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot C_c \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (2.14)$$

Emitirane energije stijenki iznose:

$$E_1 = \varepsilon_1 \cdot C_c \cdot \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \quad (2.15)$$

$$E_2 = \varepsilon_2 \cdot C_c \cdot \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \quad (2.16)$$

Gustoća toplinskog toka koji se izmjenjuje zračenjem između usporednih stijenki računa se prema:

$$q_{12} = \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad (2.17)$$



## 2.2. Prolaz topline

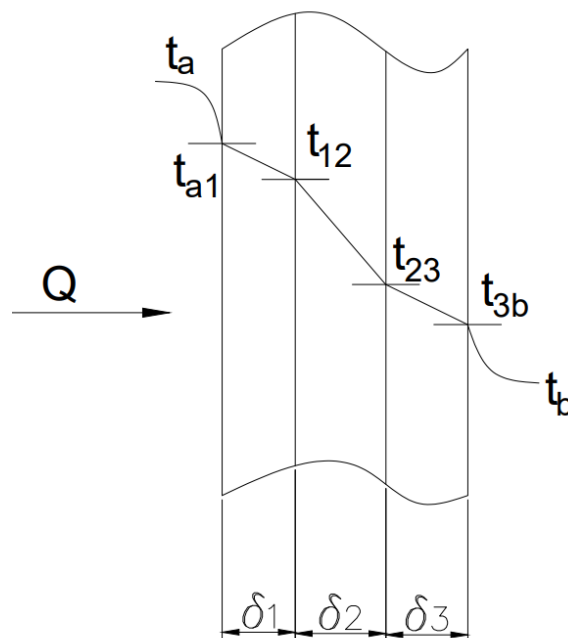
Prolaz topline je način izmjene topline između fluida koji su međusobno odvojeni stijenkom. Sastoji se od izmjene topline konvekcijom između toplijeg fluida i površine stijenke, provođenja topline kroz stijenku i od izmjene topline konvekcijom između površine stijenke i hladnijeg fluida.

Izmijenjeni toplinski tok u slučaju prolaza topline kroz ravnu stijenku računa se prema izrazu:

$$Q = k \cdot F \cdot (t_a - t_b) \quad (2.18)$$

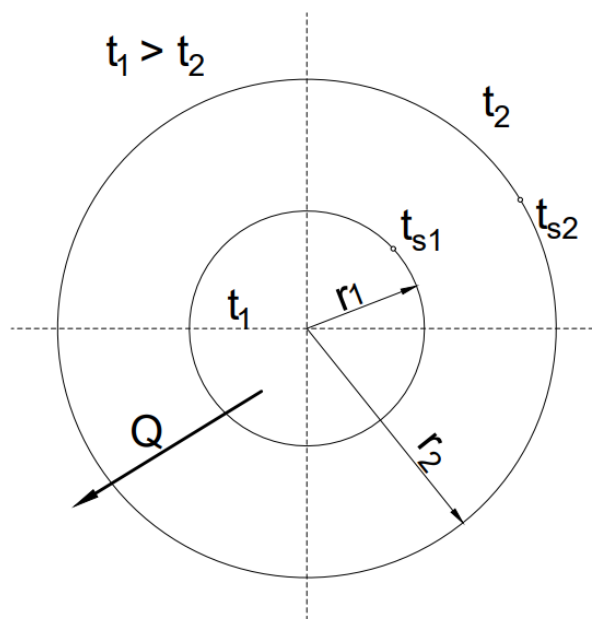
Koeficijent prolaza topline  $k$  dobiva se zbrajanjem uzastopnih specifičnih toplinskih otpora. Obuhvaća specifične toplinske otpore koji se pojavljuju s obje strane stijenke pri izmjeni topline konvekcijom kao i otpor provođenju topline kroz stijenku. Iz toga slijedi izraz za računanje koeficijenta prolaza topline:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad (2.19)$$



Slika 2.7 Prolaz topline kroz ravnu stijenku

Prolaz topline kroz stijenku cijevi uzima u obzir izmjenu topline s fluida u cijevi na unutarnju površinu stijenke cijevi polumjera  $r_1$ , provođenje topline kroz cijevnu stijenku te izmjenu topline s vanjske površine stijenke cijevi polumjera  $r_2$  na fluid koji struji oko cijevi.



Slika 2.8 Prolaz topline kroz stijenku cijevi

Izmijenjeni toplinski tok se računa prema izrazu:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \cdot \alpha_2}} (t_1 - t_2) \quad (2.20)$$

Koeficijent prolaza topline  $k$  za prolaz topline kroz cilindričnu stijenku se računa prema izrazu:

$$r \cdot k = \frac{1}{\frac{1}{r_1 \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \alpha_2}} \quad (2.21)$$

Promjer  $r$  s lijeve strane jednadžbe je vrijednost polumjera na kojem je manji koeficijent prijelaza topline odnosno gdje je slabiji prijelaz topline pa je prema tome  $r = r_u$  ako je  $\alpha_u < \alpha_v$ , a  $r = r_v$  ako je  $\alpha_v < \alpha_u$ . [3]

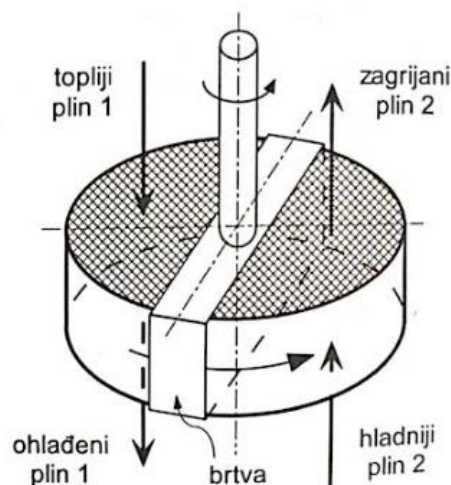
### 3. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline su toplinski aparati namijenjeni za izmjenjivanje topline odnosno toplinskog toka između dva ili više fluida. Vrlo su bitni i učestali uređaji u skoro svim područjima tehnike pogotovo u procesnoj tehnici, termotehnici te u rashladnoj tehnici.

#### 3.1. Podjela izmjenjivača topline

Izmjenjivači topline se dijele na tri osnovne grupe:

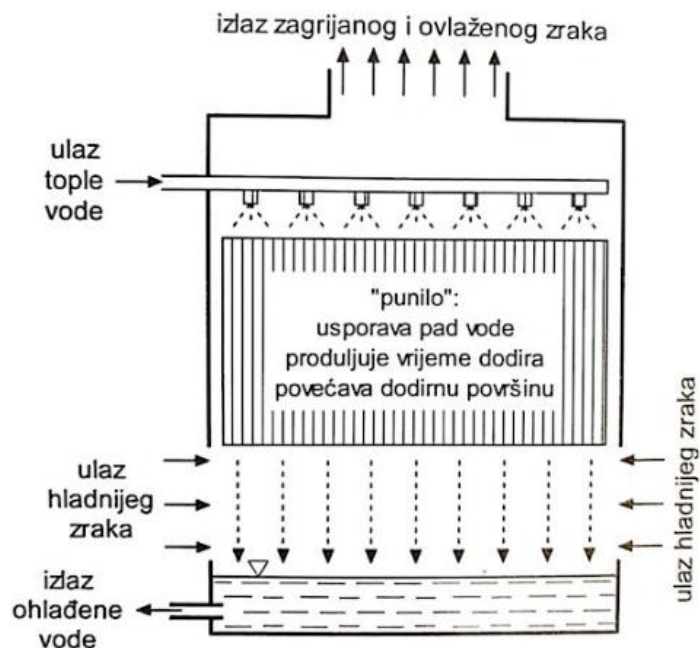
1. Rekuperatori, kod kojih su fluidi odvojeni krutom i nepropusnom stijenkom kroz koju se izmjenjuje toplina. Toplina se izmjenjuje konvekcijom na strani toplijeg i hladnijeg fluida s površinom stijenke te provođenjem kroz krutu stijenku,
2. Regeneratori, kod kojih se izmjena topline između toplijeg i hladnijeg plina odvija preko krute akumulacijske mase. Akumulacijska masa je naizmjenično u dodiru s toplijim plinom koji grije akumulacijsku masu, da bi se u sljedećem dijelu ciklusa akumulacijska masa hladila u dodiru s hladnijim plinom predajući mu preuzetu toplinu od toplijeg plina.



Slika 3.1 Rotirajući regenerator [1]

3. Direktni izmjenjivači topline kod kojih se toplina izmjenjuje izravnim dodirrom dviju struja u mješalištu. Ako su dvije struje koje imaju različito agregatno stanje u dodiru (kapljevina i plin), tada se kapljevina fino raspršuje postižući veliku površinu dodira. Osim izmjene

toplina, u ovakvom slučaju dolazi do pojave izmjene tvari. Ako su u dodiru dvije struje koje su istog agregatnog stanja, one iz izmjenjivača toplina izlaze zajedno (pomiješane). Ako su različitog agregatnog stanja onda se iz izmjenjivača toplina odvoje odvojeno. [2]

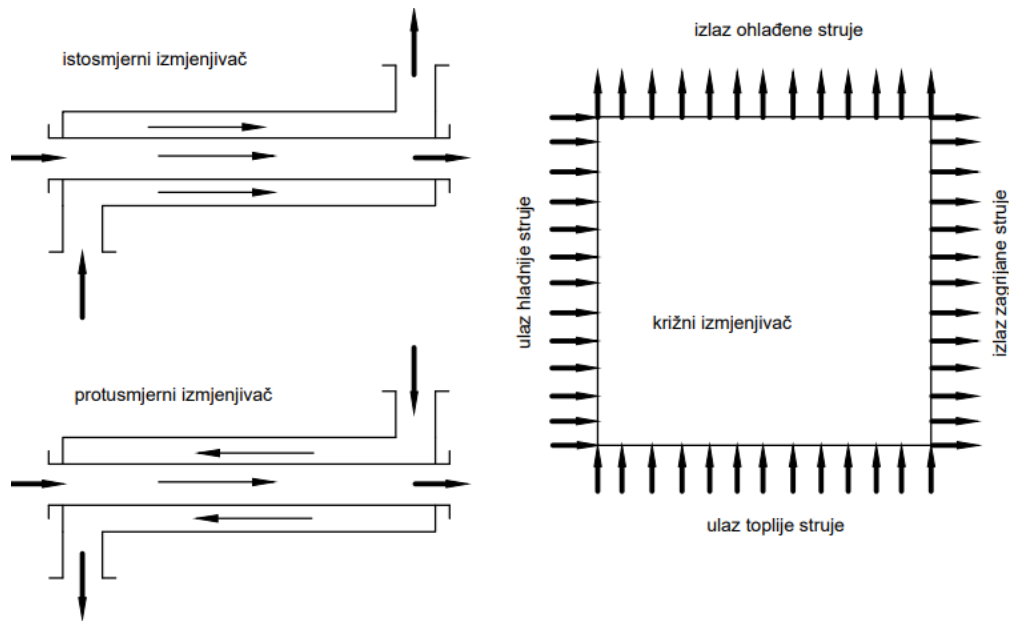


Slika 3.2 Direktni izmjenjivač toplina [1]

### 3.2. Rekuperativni izmjenjivači toplina

Osnovni tipovi rekuperatora su oni gdje svaka struje prolazi samo jednom kroz rekuperator. Dijele se na tri osnovna tipa prema međusobnom smjeru strujanja fluida:

- istosmjerni rekuperatori su takvi rekuperatori kod kojih struje teku paralelno i u istom smjeru,
- protusmjerni rekuperatori su takvi rekuperatori kod kojih struje teku paralelno ali u suprotnim smjerovima i
- križni (unakrsni) rekuperatori su takvi rekuperatori kod kojih se struje križaju.



Slika 3.3 Osnovni tipovi rekuperatora

### 3.2.1. Istosmjerni rekuperatori

Kod istosmjernog rekuperatora struje ulaze na istom kraju i teku paralelno u istom smjeru. Izmijenjena toplina definira se dvjema jednadžbama:

jednadžbom toplinske bilance:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2') \quad (3.01)$$

i jednadžbom prolaza topline

$$Q = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m \quad (3.02)$$

gdje je srednja logaritamska razlika temperatura  $\Delta t_m$ :

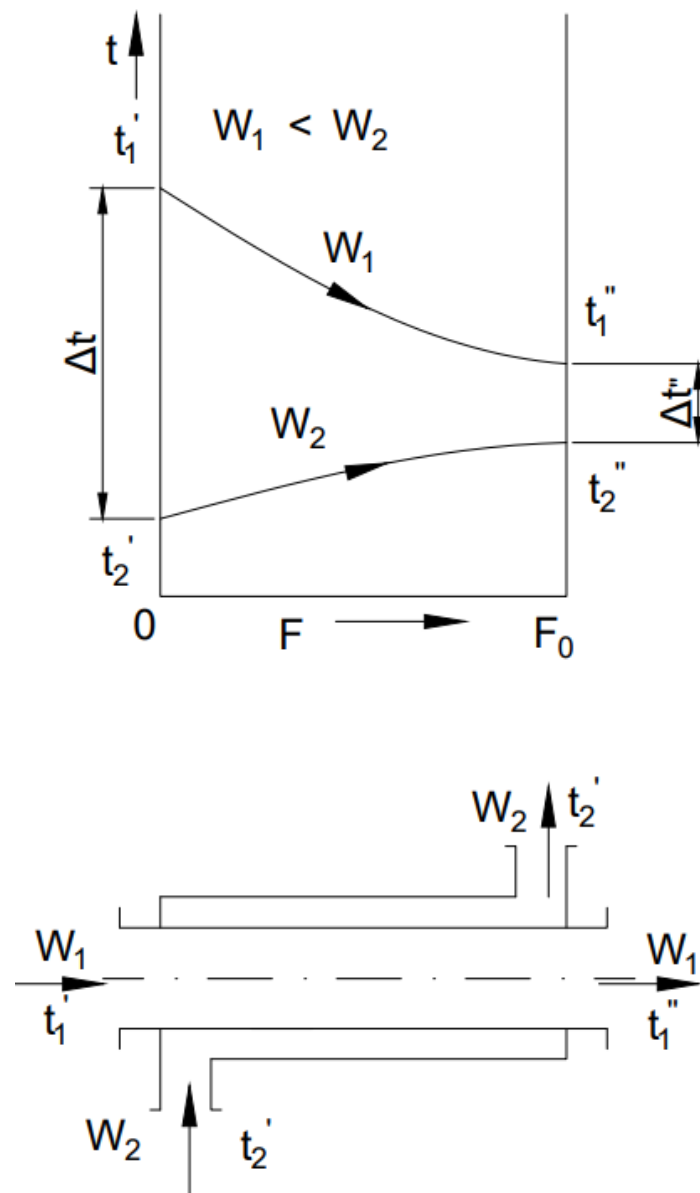
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \quad (3.03)$$

$\Delta t'$  je razlika temperatura fluida na jednom kraju izmjenjivača topline i računa se prema izrazu:

$$\Delta t' = t_1' - t_2' \quad (3.04)$$

$\Delta t''$  je razlika temperatura fluida na drugom kraju izmjenjivača topline i računa se prema izrazu:

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' \quad (3.05)$$



Slika 3.4  $t$ - $F$  dijagram istosmjernog rekuperatora

Iskoristivost topline  $\varepsilon$  definira se kao omjer promjene temperature slabije struje odnosno struje manjeg toplinskog kapaciteta i razlike ulaznih temperatura struja te se računa prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_1' - t_2')} \quad (3.06)$$

Kako je pogonska bezdimenzijska značajka:

$$\phi = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (3.07)$$

proizlazi da je iskoristivost topline izmjenjivača topline jednaka pogonskog bezdimenzijskoj značajci  $\phi$ .

$$\varepsilon = \phi \quad (3.08)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline je omjer izmijenjene topline kod izmjenjivača topline konačne površine i izmijenjene topline kod istog takvog tipa izmjenjivača ali beskonačno velike površine. Prema tome stupanj djelovanja istosmjernog izmjenjivača topline računa se:

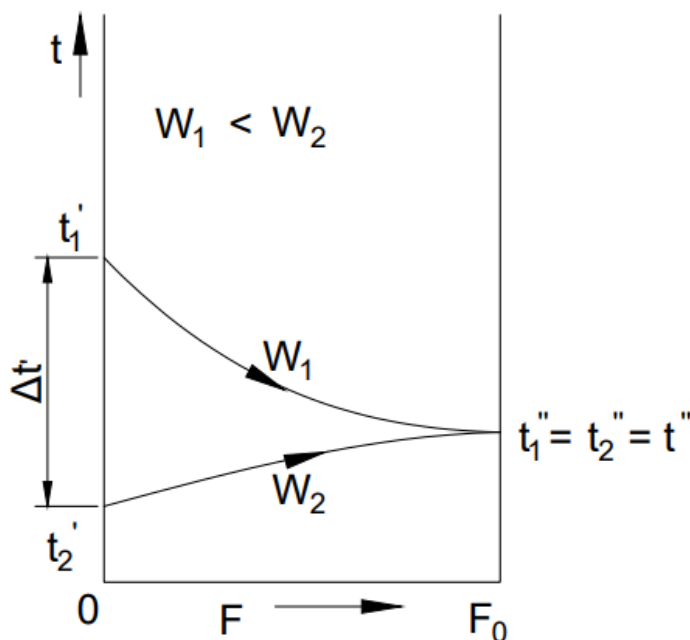
$$\eta = \frac{Q}{Q_\infty} \quad (3.09)$$

Kada bi površina istosmjernog izmjenjivača topline težila u beskonačnost, izlazna temperatura obiju struja bila bi jednaka i vrijednost bi joj bila između ulaznih temperatura  $t_1'$  i  $t_2'$ . Izmijenjena toplina u izmjenjivaču beskonačno velikoga izmjenjivača topline računa se prema izrazu:

$$Q_\infty = W_1 \cdot (t_1' - t'') \quad (3.10)$$

Prema tome, stupanj djelovanja istosmjernog izmjenjivača topline računa se kao:

$$\eta = \frac{W_1 \cdot (t_1' - t_1'')}{W_1 \cdot (t_1' - t'')} = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t''} \quad (3.11)$$



Slika 3.5  $t$ - $F$  dijagram izmjenjivača topline s beskonačno velikom površinom izmjene topline

Izlaznu temperaturu  $t''$  možemo odrediti iz bilance topline:

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

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

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

$$t'' = \frac{W_1 \cdot t'_1 + W_2 \cdot t'_2}{W_1 + W_2}$$

Slijedi stupanj djelovanja istosmjernog izmjenjivača topline:

$$\eta = \frac{t'_1 - t''}{t'_1 - t''} = \frac{t'_1 - t''}{t'_1 - \frac{W_1 t'_1 + W_2 t'_2}{W_1 + W_2}} = \frac{t'_1 - t''}{\frac{t'_1 W_1 + t'_1 W_2 - W_1 t'_1 - W_2 t'_2}{W_1 + W_2}}$$

$$\eta = \frac{(W_1 + W_2)(t'_1 - t'')}{W_2(t'_1 - t'_2)} = \frac{W_1 + W_2}{W_2} \cdot \frac{t'_1 - t''}{t'_1 - t'_2} = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \frac{t'_1 - t''}{t'_1 - t'_2}$$

Uzimajući u obzir izraz za bezdimenzijsku pogonsku značajku (3.07) slijedi konačan izraz za proračun stupnja djelovanja istosmjernog izmjenjivača topline:

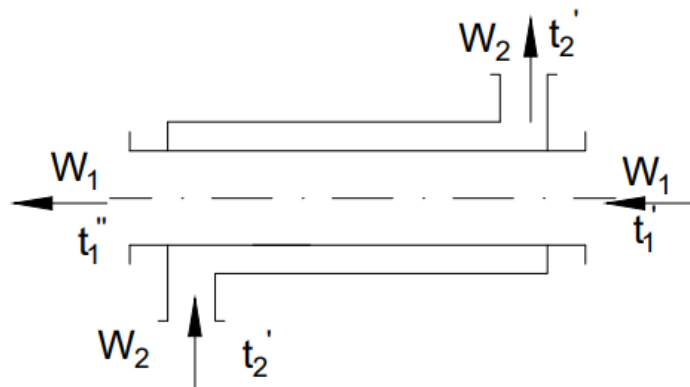
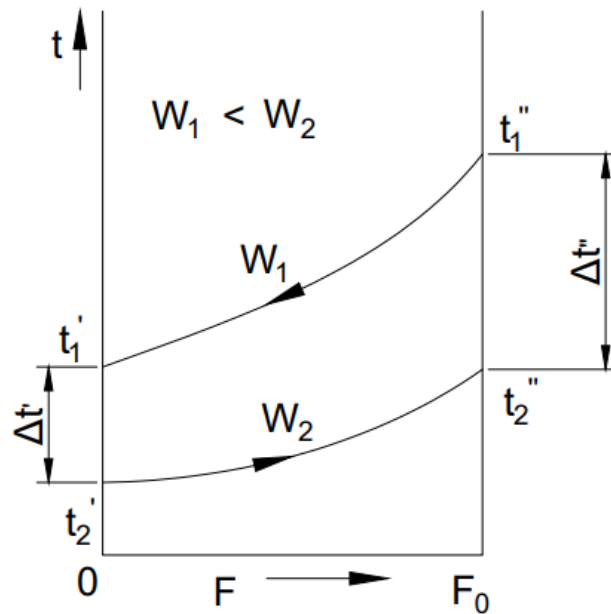
$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \phi \quad (3.12)$$

### 3.2.2. Protusmjerni rekuperatori

Kod protusmjernog rekuperatora struje ulaze na suprotnim krajevima i teku paralelno u suprotnim smjerovima. Izmijenjena toplina definira se kao i kod istosmjernog rekuperatora jednadžbom toplinske bilance i jednadžbom prolaza topline (3.02). Jednadžba toplinske bilance glasi:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t'_1 - t''_1) = G_2 \cdot c_2 \cdot (t''_2 - t'_2) \quad (3.13)$$





Slika 3.6  $t$ - $F$  dijagram protusmjernog rekuperatora

Iz dijagrama za istosmjerni i protusmjerni rekuperator vidljivo je da je kod istosmjernog rekuperatora izlazna temperatura toplije struje uvijek veća od izlazne temperature hladnije struje dok kod protusmjernog rekuperatora izlazna temperatura hladnije struje može biti veća od izlazne temperature toplije struje. To je jedan od čimbenika zašto je protusmjerno strujanje bolje od istosmjernog.

Iskoristivost topline kod protusmjernog rekuperatora računa se kao i kod istosmjernog prema izrazu (3.06). Stupanj djelovanja izmjenjivača topline je omjer izmijenjene topline kod izmjenjivača konačne površine i izmijenjene topline kod istog takvog tipa izmjenjivača ali beskonačno velike površine. Prema tome stupanj djelovanja protusmjernog izmjenjivača topline računa se kao:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\alpha}} \quad (3.14)$$

U teoretskom slučaju, kada bi protusmjerni izmjenjivač topline bio beskonačno velike površine tada bi došlo do izjednačavanja izlazne temperature slabije struje  $t_1''$  i ulazne temperature jače struje  $t_2'$ .

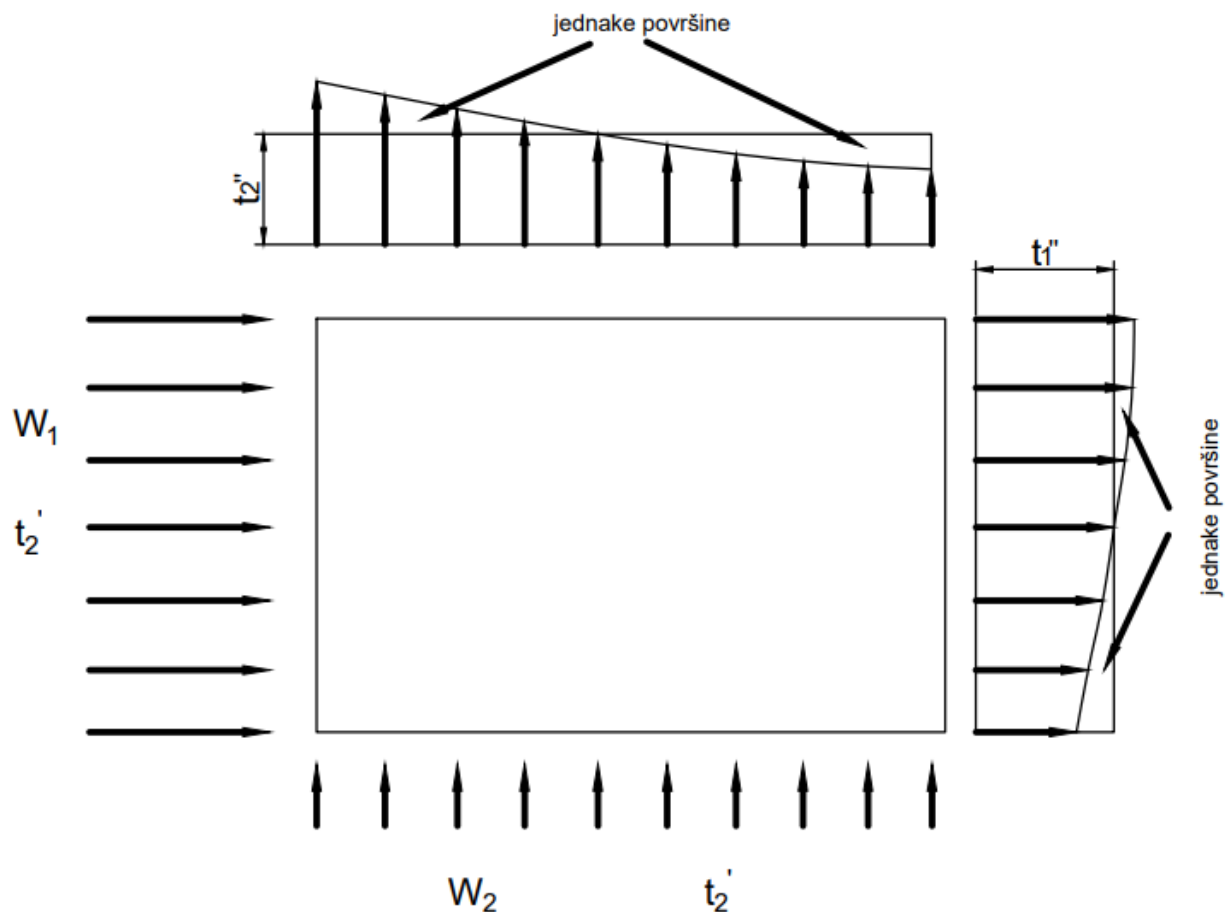
$$\eta = \frac{W_1 \cdot (t_1' - t_1'')}{W_1 \cdot (t_1' - t_2')} \quad (3.15)$$

Uzimajući u obzir izraz (3.07) za pogonsku bezdimenzijsku značajku, tada izraz za stupanj djelovanja protusmjernog izmjenjivača topline glasi:

$$\eta = \frac{W_1 \cdot \phi \cdot (t_1' - t_2')}{W_1 \cdot (t_1' - t_2')} = \phi \quad (3.16)$$

### 3.2.3. Križni (unakrsni) rekuperatori

Ovaj tip izmjenjivača topline kompliciraniji je za matematički opis od istosmjernog i protusmjernog. Kod križnog rekuperatora smjerovi strujanja struja koje izmjenjuju toplinu su međusobno okomiti tj. križaju se. Sve strujnice na ulazu imaju jednoliku raspoređenu temperaturu dok na izlazu raspodjela temperature nije jednolika.. Istosmjerni i protusmjerni rekuperatori na izlazu imaju konstantne temperature.

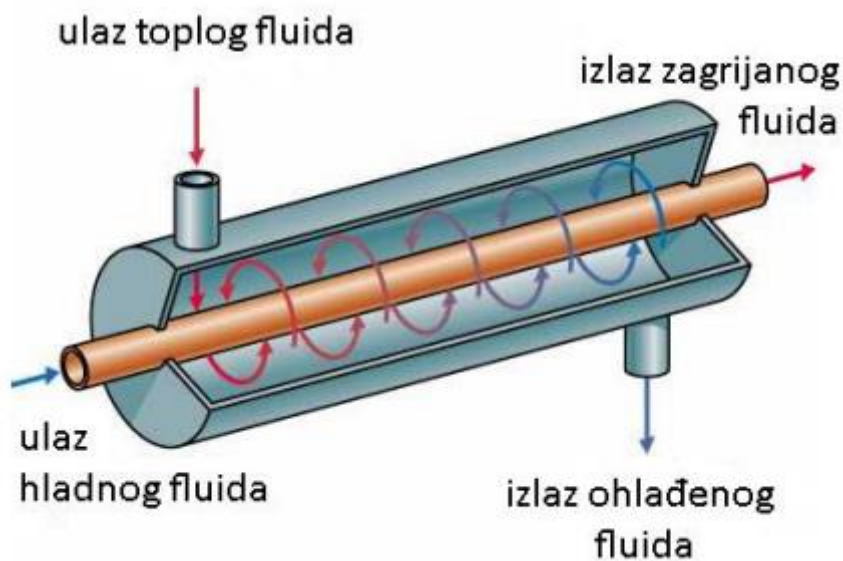


Slika 3.7 Raspodjela temperatura na ulazu i izlazu križnog rekuperatora

Iskoristivost topline se računa kao i za istosmjerni i protusmjerni rekuperator prema izrazu (3.06). Najveću iskoristivost topline ima protusmjerni rekuperator, a najmanju istosmjerni rekuperator. Za zadani  $kF_0/W_1$  najveća iskoristivost topline dobiva se primjenom protusmjernog rekuperatora, zatim križnog te istosmjernog rekuperatora. Također za zadani  $\epsilon$  najmanja potrebna površina za izmjenu topline je kod protusmjernog rekuperatora, zatim križnog te istosmjernog rekuperatora. Stupanj djelovanja križnog rekuperatora računa se kao i za protusmjerni rekuperator.[4]

#### 4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN IZMJENE TOPLINE UNUTAR DVOCIJEVNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE

Geometrijske karakteristike razmatranog dvocijevnog izmjenjivača topline su sljedeće. Unutarnji i vanjski promjer unutarnje cijevi iznose 42 mm i 48 mm. Unutarnji i vanjski promjer vanjske cijevi iznose 100 mm i 109 mm, a duljina cijevi je 2 m za 1 segment. Za usporedbu su analizirani izmjenjivači topline s 10 i 20 segmenata. Obje cijevi su napravljene od čelika. Odabrano je da kroz unutarnju i vanjsku cijev struji voda. Kroz unutarnju cijev struji voda ulazne temperature 10 °C i ulazne brzine 0,5 m/s. Proračuni su provedeni za različite ulazne temperature i ulazne brzine vode koja struji kroz vanjsku cijev. Kroz vanjsku cijev struji voda s ulaznim temperaturama 50 °C, 60 °C i 70 °C te ulaznim brzinama 0,5 m/s, 1 m/s te 1,5 m/s. Razmatran je međusobni smjer strujanja fluida u istosmjernom i protusmjernom toku. U oba slučaja potrebno je izračunati izlazne temperature obiju struja, izmijenjene toplinske tokove za sve razmatrane slučajeve kao i iskoristivosti topline i stupnjeve djelovanja izmjenjivača topline. Nakon provedenih proračuna bilo je potrebno izvršiti usporedbu.



Slika 4.1 Segment dvocijevnog izmjenjivača topline [6]

## 4.1. Istosmjerno strujanje fluida unutar dvocijevnog izmjenjivača topline

### 4.1.1. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 50 °C

U prvom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Jednadžba kontinuiteta iz koje se računa maseni protok unutarnje struje:

$$G_u \cdot v_u = F_u \cdot w_u \quad (4.01)$$

odnosno:

$$G_u = F_u \cdot w_u \cdot \rho_u \quad (4.02)$$

Iz termodinamičkih tablica očitana je gustoća vode za temperaturu 10 °C.[5]

$$\rho_u(10^\circ\text{C}) = 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.03)$$

te slijedi maseni protok unutarnje struje:

$$G_u = \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_u \cdot \rho_u = \frac{0,042^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,5 \cdot 999 = 0,6920 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.04)$$

Istim postupkom računa se maseni protok vanjske struje:

$$G_v \cdot v_v = F_v \cdot w_v \quad (4.05)$$

odnosno:

$$G_v = F_v \cdot w_v \cdot \rho_v \quad (4.06)$$

Ekvivalentni promjer se računa prema izrazu (2.09):

$$d_{ek} = D_u - d_v = 100 - 48 = 52 \text{ mm} \quad (4.07)$$

Iz termodinamičkih tablica očitana je gustoća vode za temperaturu 50 °C. [5]

$$\rho_v(50^\circ\text{C}) = 987,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.08)$$

Uvrštavanjem u jednadžbu (4.06) dobiva se maseni protok vanjske struje:

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,5 \cdot 987,5 = 1,0486 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.09)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu:

$$W_u = G_u \cdot c_u \quad (4.10)$$

Iz termodinamičkih tablica očitano je specifični toplinski kapacitet vode za temperaturu 10 °C.[5]

$$c_u(10^\circ\text{C}) = 4201,5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \quad (4.11)$$

Slijedi toplinski kapacitet unutarnje struje:

$$W_u = 0,6920 \cdot 4201,5 = 2907,4380 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.12)$$

Iz termodinamičkih tablica očitano je specifični toplinski kapacitet vode za temperaturu 50 °C.[5]

$$c_v(50^\circ\text{C}) = 4184,5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \quad (4.13)$$

Toplinski kapacitet vanjske struje:

$$W_v = G_v \cdot c_v = 1,0486 \cdot 4184,5 = 4387,8667 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.14)$$

$$W_u = 2907,4380 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 4387,8667 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.15)$$

Struja manjeg toplinskog kapaciteta  $W$  je slabija struja i označava se indeksom 1, a struja većeg toplinskog kapaciteta je jača struja i označava se indeksom 2.

Koeficijent prijelaza topline računa se pomoću bezdimenzijskih značajki.

Dinamički viskozitet  $\eta$  očitano je iz termodinamičkih tablica za vodu temperaturu 10 °C.[5]

$$\eta_u(10^\circ\text{C}) = 1,3061 \cdot 10^{-3} \text{ Pas} \quad (4.16)$$

Reynoldsova značajka za strujanje u cijevi računa se prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_u \cdot d_u}{\nu} = \frac{w_u \cdot d_u}{\frac{\eta_u}{\rho_u}} = \frac{w_u \cdot d_u \cdot \rho_u}{\eta_u} = \frac{0,5 \cdot 0,042 \cdot 999}{1,3061 \cdot 10^{-3}} = 16062,3229 \quad (4.17)$$

Reynoldsova značajka je veća od kritične Reynoldsove značajke ( $Re > Re_k \approx 2300$ ), što znači da se radi o turbulentnom strujanju odnosno o prisilnom turbulentnom strujanju u cijevi. Prema tome, Nusseltova značajka računa se prema izrazu (2.08), dok se Prandtlova značajka računa prema izrazu (2.05).

Koeficijent toplinske vodljivosti vode pri 10 °C očitani su iz termodinamičkih tablica.[5]

$$\lambda_u(10\text{ °C}) = 0,5765 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (4.18)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{1,3061 \cdot 10^{-3} \cdot 4201,5}{0,5765} = 9,5188 \quad (4.19)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.17) i (4.19) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 9,52 \cdot \frac{16062,32^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 9,52^{\frac{1}{8}} \cdot 16062,32^{\frac{1}{8}} \cdot 8,52} = 139,5293 \quad (4.20)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  unutarnjoj cijevi:

$$\alpha_u = \frac{Nu \cdot \lambda_u}{d_u} = \frac{139,5293 \cdot 0,5765}{0,042} = 1915,2057 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.21)$$

Isti postupak se ponavlja i za strujanje u vanjskoj cijevi.

Dinamički viskozitet  $\eta$  očitani su iz termodinamičkih tablica za vodu temperature 50 °C.[5]

$$\eta_v(50\text{ °C}) = 0,5497 \cdot 10^{-3} \text{ Pas} \quad (4.22)$$

Koeficijent toplinske vodljivosti vode pri 50 °C očitani su iz termodinamičkih tablica:

$$\lambda_v(50\text{ °C}) = 0,6390 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (4.23)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{0,5 \cdot 0,052 \cdot 987,5}{0,5497 \cdot 10^{-3}} = 46707,2949 \quad (4.24)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,5497 \cdot 10^{-3} \cdot 4184,5}{0,6390} = 3,5997 \quad (4.25)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.24) i (4.25) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 3,6 \cdot \frac{46707,29^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 3,6^{-\frac{1}{8}} \cdot 46707,29^{-\frac{1}{8}} \cdot 2,6} = 243,8690 \quad (4.26)$$

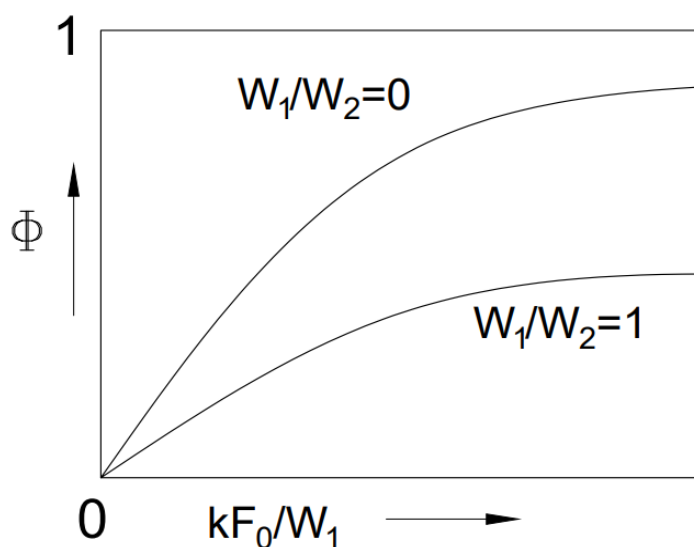
Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{243,8690 \cdot 0,6390}{0,052} = 2996,7748 \frac{W}{m^2K} \quad (4.27)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 2996,77}} = 1141,0511 \frac{W}{m^2K} \quad (4.28)$$

Funkciju  $\Phi_i$  računamo da bi izračunali izlaznu temperaturu slabije struje, a potom i izmijenjeni toplinski tok kao i izlaznu temperaturu jače struje. Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline koji povezuje 3 bezdimenzijske značajke o kojima ovisi izmijenjeni toplinski tok, a to su  $\Phi$ ,  $\frac{kF_0}{W_1}$  i  $\frac{W_1}{W_2}$ .



Slika 4.2 Dijagram za proračun izmjenjivača topline



Bezdimenzijska značajka  $\frac{kF_0}{W_1}$  računa se prema izrazu:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1141,05 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1036 \quad (4.29)$$

$F_0$  predstavlja površinu izmjene topline na strani slabije struje.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{4387,87} = 0,6626 \quad (4.30)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.29) i (4.30).

$$\Phi_i = 0,0931 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.31)$$

$$\Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = t'_1 - t''_1$$

Konačan izraz za izračun izlazne temperature slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,0931 \cdot (10 - 50) = 13,72 \text{ °C} \quad (4.32)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu:

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (13,724 - 10) = 10816,12 \text{ W} \quad (4.33)$$

Prema jednadžbi toplinske bilance (3.01) izmijenjeni toplinski tok je:

$$Q = W_2 \cdot (t'_2 - t''_2) \quad (4.34)$$

$$\frac{Q}{W_2} = t'_2 - t''_2$$

Konačan izraz za izračun izlazne temperature jače struje:

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{10827,31}{4387,87} = 47,53 \text{ °C} \quad (4.35)$$

Izmijenjeni toplinski tok može se računati i korištenjem izraza (3.02).

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1'}} = \frac{(50 - 10) - (47,53 - 13,72)}{\ln \frac{50 - 10}{47,53 - 13,72}} = 36,82 \text{ °C} \quad (4.36)$$

$F_0$  se računa prema izrazu:

$$F_0 = d_u \cdot \pi \cdot L = 0,042 \cdot \pi \cdot 2 = 0,2639 \text{ m}^2 \quad (4.37)$$

Slijedi izmijenjeni toplinski tok prema izrazu (3.02):

$$Q = 1141,51 \cdot 0,264 \cdot 36,82 = 11091,55 \text{ W} \quad (4.38)$$

Iskoristivost topline kod istosmjernog izmjenjivača je jednaka bezdimenzijskoj pogonskoj karakteristici odnosno funkciji  $\Phi_i$ .

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,0931 \quad (4.39)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12)

$$\eta = (1 + 0,6626) \cdot 0,0931 = 0,1545 \quad (4.40)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka je:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1141,05 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,0357 \quad (4.41)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.30) i (4.41).

$$\Phi_i = 0,4951 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.42)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,4951 \cdot (10 - 50) = 29,80 \text{ °C} \quad (4.43)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (29,80 - 10) = 57569,64 \text{ W} \quad (4.44)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{57569,64}{4387,87} = 36,88 \text{ °C} \quad (4.45)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(50 - 10) - (36,88 - 29,80)}{\ln \frac{50 - 10}{36,88 - 29,80}} = 19,01 \text{ °C} \quad (4.46)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1141,05 \cdot 2,64 \cdot 19,01 = 57265,19 \text{ W} \quad (4.47)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,4951 \quad (4.48)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,6626) \cdot 0,4951 = 0,8230 \quad (4.49)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka je:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1141,05 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,0713 \quad (4.50)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.30) i (4.50).

$$\Phi_i = 0,5822 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.51)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,5822 \cdot (10 - 50) = 33,29 \text{ °C} \quad (4.52)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (33,29 - 10) = 67717,07 \text{ W} \quad (4.53)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{67717,07}{4387,87} = 34,57 \text{ °C} \quad (4.54)$$

Srednja logaritamska razliku temperatura računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(50 - 10) - (34,57 - 33,29)}{\ln \frac{50 - 10}{34,57 - 33,29}} = 11,2492 \text{ °C} \quad (4.55)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1141,05 \cdot 5,28 \cdot 11,25 = 67778,37 \text{ W} \quad (4.56)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,5822 \quad (4.57)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,6626) \cdot 0,5822 = 0,9665 \quad (4.58)$$

U drugom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1 \cdot 987,5 = 2,0971 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.59)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (4.10):

$$W_v = G_v \cdot c_v = 2,0971 \cdot 4184,5 = 8775,3150 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.60)$$

$$W_u = 2907,4380 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 8775,3150 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.61)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{1 \cdot 0,052 \cdot 987,5}{0,5497 \cdot 10^{-3}} = 93414,5898 \quad (4.62)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,5497 \cdot 10^{-3} \cdot 4184,5}{0,6390} = 3,5997 \quad (4.63)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.62) i (4.63) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 3,6 \cdot \frac{93414,59^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 3,6^{-\frac{1}{8}} \cdot 93414,59^{-\frac{1}{8}} \cdot 2,6} = 426,57 \quad (4.64)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{426,57 \cdot 0,6390}{0,052} = 5241,8890 \frac{W}{m^2K} \quad (4.65)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 5241,89}} = 1330,8931 \frac{W}{m^2K} \quad (4.66)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1330,89 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1207 \quad (4.67)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{8775,32} = 0,3313 \quad (4.68)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.67) i (4.68).

$$\Phi_i = 0,1111 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.69)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1111 \cdot (10 - 50) = 14,44 \text{ °C} \quad (4.70)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (14,44 - 10) = 12909,03 \text{ W} \quad (4.71)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{12909,09}{8775,32} = 48,52 \text{ °C} \quad (4.72)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(50 - 10) - (48,52 - 14,44)}{\ln \frac{50 - 10}{48,52 - 14,44}} = 36,96 \text{ °C} \quad (4.73)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1330,89 \cdot 0,264 \cdot 36,96 = 12896,08 \text{ W} \quad (4.74)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,1111 \quad (4.75)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,3313) \cdot 0,1111 = 0,1478 \quad (4.76)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1330,89 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,2080 \quad (4.77)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.68) i (4.77).

$$\Phi_i = 0,6011 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.78)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,6011 \cdot (10 - 50) = 34,04 \text{ °C} \quad (4.79)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (34,04 - 10) = 69894,86 \text{ W} \quad (4.80)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{68894,86}{8775,32} = 42,15 \text{ °C} \quad (4.81)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se prema izrazu (3.03)

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1'}} = \frac{(50 - 10) - (42,15 - 34,04)}{\ln \frac{50 - 10}{42,15 - 34,04}} = 19,87 \text{ °C} \quad (4.82)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1330,89 \cdot 2,64 \cdot 19,87 = 69814,23 \text{ W} \quad (4.83)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,6011 \quad (4.84)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,3313) \cdot 0,6011 = 0,7995 \quad (4.85)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1330,89 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,4160 \quad (4.86)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.68) i (4.86).

$$\Phi_i = 0,7209 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.87)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,7209 \cdot (10 - 50) = 38,84 \text{ °C} \quad (4.88)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (38,84 - 10) = 83850,57 \text{ W} \quad (4.89)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{83850,57}{8775,32} = 40,44 \text{ °C} \quad (4.90)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(50 - 10) - (40,44 - 38,84)}{\ln \frac{50 - 10}{40,44 - 38,84}} = 11,93 \text{ °C} \quad (4.91)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1330,89 \cdot 5,28 \cdot 11,93 = 83833,29 \text{ W} \quad (4.92)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,7209 \quad (4.93)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,3313) \cdot 0,7209 = 0,9588 \quad (4.94)$$

U trećem razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Za unutarnju struju vrijede sve vrijednosti prethodno izračunate.

Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1,5 \cdot 987,5 = 3,1458 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.95)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (4.10):

$$W_v = G_v \cdot c_v = 3,1458 \cdot 4184,5 = 13163,41 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.96)$$

$$W_u = 2907,44 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 13163,41 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.97)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{1,5 \cdot 0,052 \cdot 987,5}{0,5497 \cdot 10^{-3}} = 140121,88 \quad (4.98)$$



Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,5497 \cdot 10^{-3} \cdot 4184,5}{0,6390} = 3,5997 \quad (4.99)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.98) i (4.99) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 3,6 \cdot \frac{140121,88^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 3,6^{-\frac{1}{8}} \cdot 140121,88^{-\frac{1}{8}} \cdot 2,6} = 591,12 \quad (4.100)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{591,12 \cdot 0,6390}{0,052} = 7263,65 \frac{W}{m^2K} \quad (4.101)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 7263,65}} = 1418,61 \frac{W}{m^2K} \quad (4.102)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1418,61 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1288 \quad (4.103)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{13163,41} = 0,2208 \quad (4.104)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.103) i (4.104).

$$\Phi_i = 0,1195 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.105)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1195 \cdot (10 - 50) = 14,78 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.106)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (14,78 - 10) = 13897,56 \text{ W} \quad (4.107)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{13897,56}{13163,41} = 48,94 \text{ °C} \quad (4.108)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(50 - 10) - (48,94 - 14,78)}{\ln \frac{50 - 10}{48,94 - 14,78}} = 37,00 \text{ °C} \quad (4.109)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1418,61 \cdot 0,264 \cdot 37 = 13856,98 \text{ W} \quad (4.110)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,1195 \quad (4.111)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2208) \cdot 0,1195 = 0,1458 \quad (4.112)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1418,61 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,2876 \quad (4.113)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.104) i (4.113).

$$\Phi_i = 0,6495 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.114)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,6495 \cdot (10 - 50) = 35,98 \text{ °C} \quad (4.115)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (35,98 - 10) = 75535,29 \text{ W} \quad (4.116)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{75535,29}{13163,41} = 44,26 \text{ °C} \quad (4.117)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1'}} = \frac{(50 - 10) - (44,26 - 35,98)}{\ln \frac{50 - 10}{44,26 - 35,98}} = 20,14 \text{ °C} \quad (4.118)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok :

$$Q = 1418,61 \cdot 2,64 \cdot 20,14 = 75426,93 \text{ W} \quad (4.119)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,6495 \quad (4.120)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2208) \cdot 0,6495 = 0,7924 \quad (4.121)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1418,61 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,5752 \quad (4.122)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.104) i (4.122).

$$\Phi_i = 0,7838 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.123)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,7838 \cdot (10 - 50) = 41,35 \text{ °C} \quad (4.124)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (41,35 - 10) = 91148,24 \text{ W} \quad (4.125)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{91148,24}{13163,41} = 43,08 \text{ °C} \quad (4.126)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(50 - 10) - (43,08 - 41,35)}{\ln \frac{50 - 10}{43,08 - 41,35}} = 12,18 \text{ °C} \quad (4.127)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1418,61 \cdot 5,28 \cdot 12,18 = 91231,38 \text{ W} \quad (4.128)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,7838 \quad (4.129)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2208) \cdot 0,7838 = 0,9532 \quad (4.130)$$

#### 4.1.2. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 60 °C.

U prvom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Za unutarnju struju vrijede sve vrijednosti prethodno izračunate.

Iz termodinamičkih tablica očitana je gustoća vode za 60 °C.[5]

$$\rho_v(60^\circ\text{C}) = 983 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.141)$$

Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,5 \cdot 983 = 1,0438 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.142)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (4.10):

Iz termodinamičkih tablica očitana je specifični toplinski kapacitet vode za 60 °C.[5]

$$c_v(60^\circ\text{C}) = 4191 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \quad (4.143)$$

$$W_v = G_v \cdot c_v = 1,0438 \cdot 4191 = 4374,5911 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.144)$$

$$W_u = 2907,44 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 4374,59 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.145)$$

Iz termodinamičkih tablica očitano je dinamički viskozitet vode za 60 °C.[5]

$$\eta_v(60^\circ\text{C}) = 0,4701 \cdot 10^{-3} \text{ Pas} \quad (4.146)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{0,5 \cdot 0,052 \cdot 983}{0,4701 \cdot 10^{-3}} = 54367,16 \quad (4.147)$$

Iz termodinamičkih tablica očitano je koeficijent toplinske vodljivosti vode za 60 °C.[5]

$$\lambda_v(60^\circ\text{C}) = 0,651 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (4.148)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,4701 \cdot 10^{-3} \cdot 4191}{0,651} = 3,0264 \quad (4.149)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.147) i (4.149) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 3,03 \cdot \frac{54367,16^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 3,03^{\frac{1}{8}} \cdot 54367,16^{-\frac{1}{8}} \cdot 2,03} = 255,8180 \quad (4.150)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{255,82 \cdot 0,651}{0,052} = 3202,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.151)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 3202,67}} = 1165,96 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.152)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1165,96 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1058 \quad (4.153)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{4374,59} = 0,6646 \quad (4.154)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.153) i (4.154).

$$\Phi_i = 0,0987 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.155)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,0987 \cdot (10 - 60) = 14,94 \text{ °C} \quad (4.156)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (14,94 - 10) = 14362,75 \text{ W} \quad (4.157)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{14362,75}{4374,59} = 56,72 \text{ °C} \quad (4.158)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (56,72 - 14,94)}{\ln \frac{60 - 10}{56,72 - 14,94}} = 45,77 \text{ °C} \quad (4.159)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1165,96 \cdot 0,264 \cdot 45,77 = 14088,62 \text{ W} \quad (4.160)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,0987 \quad (4.161)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,66) \cdot 0,0987 = 0,1638 \quad (4.162)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1165,96 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,0587 \quad (4.163)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.154) i (4.163).

$$\Phi_i = 0,4982 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.164)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,4982 \cdot (10 - 60) = 34,91 \text{ °C} \quad (4.165)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (34,91 - 10) = 72424,33 \text{ W} \quad (4.166)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{72424,33}{4374,59} = 43,44 \text{ °C} \quad (4.167)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (43,44 - 34,91)}{\ln \frac{60 - 10}{43,44 - 34,91}} = 23,45 \text{ °C} \quad (4.168)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1165,96 \cdot 2,64 \cdot 23,45 = 72182,25 \text{ W} \quad (4.169)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,4982 \quad (4.170)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 6646) \cdot 0,4982 = 0,8270 \quad (4.171)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1165,96 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,1174 \quad (4.172)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.154) i (4.172).

$$\Phi_i = 0,5833 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.173)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,5833 \cdot (10 - 60) = 39,17 \text{ °C} \quad (4.174)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (3.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (39,17 - 10) = 84810,02 \text{ W} \quad (4.175)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{84810,02}{4374,59} = 40,62 \text{ °C} \quad (4.176)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (40,62 - 39,17)}{\ln \frac{60 - 10}{40,62 - 39,17}} = 13,71 \text{ °C} \quad (4.177)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1165,96 \cdot 5,28 \cdot 13,71 = 84402,45 \text{ W} \quad (4.178)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,5833 \quad (4.179)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):



$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 6646) \cdot 0,5833 = 0,9683 \quad (4.180)$$

U drugom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Za unutarnju struju vrijede sve vrijednosti prethodno izračunate.

Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1 \cdot 983 = 2,0876 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.181)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (3.11):

$$W_v = G_v \cdot c_v = 2,0876 \cdot 4191 = 8749,13 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.182)$$

$$W_u = 2907,44 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 8749,13 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.183)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{01 \cdot 0,052 \cdot 983}{0,4701 \cdot 10^{-3}} = 108734,31 \quad (4.183)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,4701 \cdot 10^{-3} \cdot 4191}{0,651} = 3,0264 \quad (4.184)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.183) i (4.184) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 3,03 \cdot \frac{108734,31^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 3,03^{-\frac{1}{8}} \cdot 108734,31^{-\frac{1}{8}} \cdot 2,03} = 445,17 \quad (4.185)$$

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha$ :

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{445,17 \cdot 0,651}{0,052} = 5573,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.186)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 5573,19}} = 1348,70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.187)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1348,70 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1224 \quad (4.188)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{8749,13} = 0,3323 \quad (4.189)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.188) i (4.189).

$$\Phi_i = 0,1108 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.190)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1108 \cdot (10 - 60) = 15,54 \text{ °C} \quad (4.191)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (15,54 - 10) = 16107,22 \text{ W} \quad (4.192)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{16107,22}{8749,13} = 58,16 \text{ °C} \quad (4.193)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (58,16 - 15,54)}{\ln \frac{60 - 10}{58,16 - 15,54}} = 46,21 \text{ °C} \quad (4.194)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1348,70 \cdot 0,264 \cdot 46,21 = 16453,38 \text{ W} \quad (4.195)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,1108 \quad (4.196)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,3323) \cdot 0,1108 = 0,1474 \quad (4.197)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1348,70 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,22 \quad (4.198)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.189) i (4.198).

$$\Phi_i = 0,6045 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.199)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6045 \cdot (10 - 60) = 40,23^\circ\text{C} \quad (4.200)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (40,23 - 10) = 87891,91 \text{ W} \quad (4.201)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{87891,91}{8749,13} = 49,95^\circ\text{C} \quad (4.202)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (49,95 - 40,23)}{\ln \frac{60 - 10}{49,95 - 40,23}} = 24,59^\circ\text{C} \quad (4.203)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1348,7 \cdot 2,64 \cdot 24,59 = 87554,37 \text{ W} \quad (4.204)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06)

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,6045 \quad (4.205)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,3323) \cdot 0,6045 = 0,8040 \quad (4.206)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1348,70 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,45 \quad (4.207)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.189) i (4.207).

$$\Phi_i = 0,7222 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.208)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,7222 \cdot (10 - 60) = 46,11^\circ\text{C} \quad (4.209)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (46,11 - 10) = 104987,66 \text{ W} \quad (4.210)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{104987,66}{8749,13} = 48,00^\circ\text{C} \quad (4.211)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (48 - 46,11)}{\ln \frac{60 - 10}{48 - 46,11}} = 14,69^\circ\text{C} \quad (4.212)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1348,7 \cdot 5,28 \cdot 14,69 = 104609,89 \text{ W} \quad (4.213)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,7222 \quad (4.214)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,3323) \cdot 0,7222 = 0,9605 \quad (4.215)$$

U trećem razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Za unutarnju struju vrijede sve vrijednosti prethodno izračunate.

Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1,5 \cdot 983 = 3,1314 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.216)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (4.10):

$$W_v = G_v \cdot c_v = 3,1314 \cdot 4191 = 13123,70 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.217)$$

$$W_u = 2907,44 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 13123,70 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.218)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{1,5 \cdot 0,052 \cdot 983}{0,4701 \cdot 10^{-3}} = 163101,47 \quad (4.219)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,4701 \cdot 10^{-3} \cdot 4191}{0,651} = 3,0264 \quad (4.220)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.219) i (4.220) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 3,03 \cdot \frac{163101,47^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 3,03^{-\frac{1}{8}} \cdot 163101,47^{-\frac{1}{8}} \cdot 2,03} = 615,0373 \quad (4.221)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{615,04 \cdot 0,651}{0,052} = 7699,83 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.222)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 7699,83}} = 1432,48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.223)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1432,48 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1300 \quad (4.224)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{13123,70} = 0,2215 \quad (4.225)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.224) i (4.225).

$$\Phi_i = 0,1222 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.226)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1222 \cdot (10 - 60) = 16,11 \text{ °C} \quad (4.227)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (16,11 - 10) = 17764,46 \text{ W} \quad (4.228)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{17764,46}{13123,78} = 58,65 \text{ °C} \quad (4.229)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (58,65 - 16,11)}{\ln \frac{60 - 10}{58,65 - 16,11}} = 46,17 \text{ °C} \quad (4.230)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1432,48 \cdot 0,264 \cdot 46,17 = 17460,33 \text{ W} \quad (4.231)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,1222 \quad (4.232)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2215) \cdot 0,1222 = 0,1491 \quad (4.233)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1432,48 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,30 \quad (4.234)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.225) i (4.234).

$$\Phi_i = 0,6515 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.235)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6515 \cdot (10 - 60) = 42,58^\circ\text{C} \quad (4.236)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (42,58 - 10) = 94724,40 \text{ W} \quad (4.237)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{94724,40}{13123,78} = 52,78^\circ\text{C} \quad (4.238)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (52,78 - 42,58)}{\ln \frac{60 - 10}{52,78 - 42,58}} = 25,04^\circ\text{C} \quad (4.239)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1432,48 \cdot 2,64 \cdot 25,04 = 94694,95 \text{ W} \quad (4.240)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,6515 \quad (4.241)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2215) \cdot 0,6515 = 0,7948 \quad (4.242)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1432,48 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,60 \quad (4.243)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.225) i (4.243).

$$\Phi_i = 0,7843 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.244)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,7843 \cdot (10 - 60) = 49,22^\circ\text{C} \quad (4.245)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (49,22 - 10) = 114029,80 \text{ W} \quad (4.246)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{114029,80}{13123,78} = 51,31^\circ\text{C} \quad (4.247)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t'_2 - t'_1) - (t''_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t''_2 - t''_1}} = \frac{(60 - 10) - (51,31 - 49,22)}{\ln \frac{60 - 10}{51,31 - 49,22}} = 15,09^\circ\text{C} \quad (4.248)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1432,48 \cdot 5,28 \cdot 15,09 = 114133,13 \text{ W} \quad (4.249)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,7843 \quad (4.250)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):



$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2215) \cdot 0,7843 = 0,9568 \quad (4.251)$$

#### 4.1.3. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 70 °C

U prvom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Za unutarnju struju vrijede sve vrijednosti prethodno izračunate.

Iz termodinamičkih tablica očitana je gustoća vode za 70 °C.[5]

$$\rho_v(70^\circ\text{C}) = 977,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.252)$$

Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,5 \cdot 977,5 = 1,0379 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.253)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (4.10):

Iz termodinamičkih tablica očitana je specifični toplinski kapacitet vode za 70 °C.[5]

$$c_v(70^\circ\text{C}) = 4195 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \quad (4.254)$$

$$W_v = G_v \cdot c_v = 1,0379 \cdot 4195 = 4353,9905 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.255)$$

$$W_u = 2907,44 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 4353,99 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.256)$$

Iz termodinamičkih tablica očitana je dinamički viskozitet vode za 60 °C.[5]

$$\eta_v(70^\circ\text{C}) = 0,4062 \cdot 10^{-3} \text{ Pas} \quad (4.257)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{0,5 \cdot 0,052 \cdot 977,5}{0,4062 \cdot 10^{-3}} = 62567,7 \quad (4.258)$$

Iz termodinamičkih tablica očitano je koeficijent toplinske vodljivosti vode za 70 °C.[5]

$$\lambda_v(70^\circ\text{C}) = 0,66 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (4.259)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,4062 \cdot 10^{-3} \cdot 4195}{0,66} = 2,5818 \quad (4.260)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.258) i (4.260) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 2,58 \cdot \frac{62567,7^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 2,58^{-\frac{1}{8}} \cdot 62567,7^{-\frac{1}{8}} \cdot 1,58} = 265,6167 \quad (4.261)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{265,62 \cdot 0,66}{0,052} = 3371,33 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.262)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 3371,33}} = 1184,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.263)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1184,84 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1075 \quad (4.264)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{4353,99} = 0,6678 \quad (4.265)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.264) i (4.265).

$$\Phi_i = 0,0989 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.266)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,0989 \cdot (10 - 70) = 15,93 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.267)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (15,93 - 10) = 17241,12 \text{ W} \quad (4.268)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{17241,12}{4353,99} = 66,04 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.269)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (66,04 - 15,93)}{\ln \frac{70 - 10}{66,04 - 15,93}} = 54,91 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.270)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1184,84 \cdot 0,264 \cdot 54,91 = 17175,73 \text{ W} \quad (4.271)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,0989 \quad (4.272)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,6678) \cdot 0,0989 = 0,1652 \quad (4.273)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1184,84 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,0754 \quad (4.274)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.265) i (4.274).

$$\Phi_i = 0,4999 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.275)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,4999 \cdot (10 - 70) = 39,99 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.276)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (39,99 - 10) = 87194,13 \text{ W} \quad (4.277)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{87194,13}{4353,99} = 49,97 \text{ °C} \quad (4.278)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (49,97 - 39,99)}{\ln \frac{70 - 10}{49,97 - 39,99}} = 27,89 \text{ °C} \quad (4.279)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1184,84 \cdot 2,64 \cdot 27,89 = 87239,30 \text{ W} \quad (4.280)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,4999 \quad (4.281)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,6678) \cdot 0,4999 = 0,8348 \quad (4.282)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1184,84 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,1508 \quad (4.283)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.265) i (4.283).

$$\Phi_i = 0,5831 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.284)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,5831 \cdot (10 - 70) = 44,99 \text{ °C} \quad (4.285)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (44,99 - 10) = 101731,33 \text{ W} \quad (4.286)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{101731,33}{4353,99} = 46,63 \text{ °C} \quad (4.287)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (46,63 - 44,99)}{\ln \frac{70 - 10}{46,63 - 44,99}} = 16,21 \text{ °C} \quad (4.288)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1184,84 \cdot 5,28 \cdot 16,21 = 101409,03 \text{ W} \quad (4.289)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,5831 \quad (4.290)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,6678) \cdot 0,5831 = 0,9738 \quad (4.291)$$

U drugom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Za unutarnju struju vrijede sve vrijednosti prethodno izračunate.

Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1 \cdot 977,5 = 2,0759 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.292)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (4.10):

$$W_v = G_v \cdot c_v = 2,0759 \cdot 4195 = 8708,54 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.293)$$

$$W_u = 2907,44 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 8708,54 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.294)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{1 \cdot 0,052 \cdot 977,5}{0,4062 \cdot 10^{-3}} = 125135,40 \quad (4.295)$$

Uvrštavajući očitane vrijednosti dinamičkog viskoziteta, specifičnog toplinskog kapaciteta i koeficijenta toplinske vodljivosti u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,4062 \cdot 10^{-3} \cdot 4195}{0,66} = 2,5818 \quad (4.296)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.295) i (4.296) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 2,58 \cdot \frac{125135,4^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 2,58^{-\frac{1}{8}} \cdot 125135,4^{-\frac{1}{8}} \cdot 1,58} = 459,9248 \quad (4.297)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{459,92 \cdot 0,66}{0,052} = 5837,45 \frac{W}{m^2K} \quad (4.298)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 5837,45}} = 1361,76 \frac{W}{m^2K} \quad (4.299)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1361,76 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1236 \quad (4.300)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{8708,54} = 0,3339 \quad (4.301)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.300) i (4.301).

$$\Phi_i = 0,1135 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.302)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,1135 \cdot (10 - 70) = 16,81 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.303)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (16,81 - 10) = 19799,67 \text{ W} \quad (4.304)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{19799,67}{8708,54} = 67,73 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.305)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (67,73 - 16,81)}{\ln \frac{70 - 10}{67,73 - 16,81}} = 55,34 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.306)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1362,76 \cdot 0,264 \cdot 55,34 = 19909,60 \text{ W} \quad (4.307)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,1135 \quad (4.308)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,33) \cdot 0,1135 = 0,1510 \quad (4.309)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1361,76 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,2360 \quad (4.310)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.301) i (4.310).

$$\Phi_i = 0,6055 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.311)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,6055 \cdot (10 - 70) = 46,33 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.312)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (46,33 - 10) = 105627,30 \text{ W} \quad (4.313)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{105627,3}{8708,54} = 57,87 \text{ °C} \quad (4.314)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (57,87 - 46,33)}{\ln \frac{70 - 10}{57,87 - 46,33}} = 29,40 \text{ °C} \quad (4.315)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1361,76 \cdot 2,64 \cdot 29,40 = 105694,36 \text{ W} \quad (4.316)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,6055 \quad (4.317)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 3339) \cdot 0,6055 = 0,8053 \quad (4.318)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1361,76 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,4720 \quad (4.319)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.301) i (4.319).

$$\Phi_i = 0,7222 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.320)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,7222 \cdot (10 - 70) = 53,33 \text{ °C} \quad (4.321)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):



$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (53,33 - 10) = 125979,38 \text{ W} \quad (4.322)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{125979,38}{8708,54} = 55,53 \text{ °C} \quad (4.323)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (55,53 - 53,33)}{\ln \frac{70 - 10}{55,53 - 53,33}} = 17,48 \text{ °C} \quad (4.324)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1361,76 \cdot 5,28 \cdot 17,48 = 125682,82 \text{ W} \quad (4.325)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,7222 \quad (4.326)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 3339) \cdot 0,7222 = 0,9605 \quad (4.327)$$

U trećem razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Za unutarnju struju vrijede sve vrijednosti prethodno izračunate. Maseni protok vanjske struje računa se prema izrazu (4.06):

$$G_v = \frac{d_{ek}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_v \cdot \rho_v = \frac{0,052^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1,5 \cdot 977,5 = 3,1139 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.328)$$

Toplinski kapacitet odnosno vodena vrijednost struje računa se prema izrazu (4.10):

$$W_v = G_v \cdot c_v = 3,1139 \cdot 4195 = 13062,81 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.329)$$

$$W_u = 2907,44 \frac{\text{W}}{\text{K}} < W_v = 13062,81 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (4.330)$$

Prema izrazu (2.06):

$$Re = \frac{w_v \cdot d_{ek}}{\nu} = \frac{w_v \cdot d_v}{\frac{\eta_v}{\rho_v}} = \frac{w_v \cdot d_{ek} \cdot \rho_v}{\eta_v} = \frac{1,5 \cdot 0,052 \cdot 977,5}{0,4062 \cdot 10^{-3}} = 187703,10 \quad (4.331)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.254), (4.257) i (4.259) u izraz (2.05) dobiva se vrijednost Prandtlove značajke:

$$Pr = \frac{0,4062 \cdot 10^{-3} \cdot 4195}{0,66} = 2,5818 \quad (4.332)$$

Uvrštavajući vrijednosti (4.331) i (4.332) u izraz (2.08) dobiva se vrijednost Nusseltove značajke:

$$Nu = 0,0398 \cdot 2,58 \cdot \frac{187703,1^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 2,58^{-\frac{1}{8}} \cdot 187703,1^{-\frac{1}{8}} \cdot 1,58} = 633,6164 \quad (4.333)$$

Kombinirajući izraze (2.08) i (4.20) računa se koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  u vanjskoj cijevi:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{ek}} = \frac{633,62 \cdot 0,66}{0,052} = 8042,10 \frac{W}{m^2K} \quad (4.334)$$

Koeficijent prolaza topline kroz stijenku cijevi računa se prema izrazu (2.19)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1915,21} + \frac{0,021}{45} \ln \frac{24}{21} + \frac{0,021}{0,024 \cdot 8042,1}} = 1442,47 \frac{W}{m^2K} \quad (4.335)$$

Funkcija  $\Phi_i$  očitava se iz dijagrama za proračun izmjenjivača topline pomoću sljedećih bezdimenzijskih značajki koje se računaju prema izrazima (4.29) i (4.30).

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1442,47 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1309 \quad (4.336)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{13062,81} = 0,2226 \quad (4.337)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.336) i (4.337).

$$\Phi_i = 0,1205 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.338)$$

Izlazna temperatura slabije struje računa se prema izrazu (4.32):

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,1205 \cdot (10 - 70) = 17,23 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.339)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (17,23 - 10) = 21020,79 \text{ W} \quad (4.340)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35)

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{21020,79}{13062,81} = 68,39 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.341)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (68,39 - 17,23)}{\ln \frac{70 - 10}{68,39 - 17,23}} = 55,46 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.342)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1442,47 \cdot 0,264 \cdot 55,46 = 21119,84 \text{ W} \quad (4.343)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,1205 \quad (4.344)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2226) \cdot 0,1205 = 0,1470 \quad (4.345)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1442,47 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,3093 \quad (4.346)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.337) i (4.346).

$$\Phi_i = 0,6529 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.347)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,6529 \cdot (10 - 70) = 49,17 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.348)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (49,17 - 10) = 113884,42 \text{ W} \quad (4.349)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{113884,42}{13062,81} = 61,27 \text{ °C} \quad (4.350)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (61,27 - 49,17)}{\ln \frac{70 - 10}{61,27 - 49,17}} = 29,92 \text{ °C} \quad (4.351)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1442,47 \cdot 2,64 \cdot 29,92 = 113938,97 \text{ W} \quad (4.352)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,6529 \quad (4.353)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2226) \cdot 0,6529 = 0,7965 \quad (4.354)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1142,47 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,0739 \quad (4.355)$$

Iz dijagrama za proračun istosmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_i$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.337) i (4.355).

$$\Phi_i = 0,7850 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.356)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,7850 \cdot (10 - 70) = 57,10 \text{ °C} \quad (4.357)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (57,10 - 10) = 136940,42 \text{ W} \quad (4.358)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{136940,42}{13062,81} = 59,50 \text{ °C} \quad (4.359)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se prema izrazu (3.03):

$$\Delta t_m = \frac{(t_2' - t_1') - (t_2'' - t_1'')}{\ln \frac{t_2' - t_1'}{t_2'' - t_1''}} = \frac{(70 - 10) - (59,50 - 57,10)}{\ln \frac{70 - 10}{59,50 - 57,10}} = 17,89 \text{ °C} \quad (4.360)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1442,47 \cdot 5,28 \cdot 17,89 = 136254,56 \text{ W} \quad (4.361)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_i = 0,7850 \quad (4.362)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.12):

$$\eta = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \Phi_i = (1 + 0,2226) \cdot 0,7850 = 0,9577 \quad (4.363)$$

## 4.2. Protusmjerno strujanje fluida unutar dvocijevnog izmjenjivača topline

### 4.2.1. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 50 °C

U prvom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.29) i (4.30) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1141,05 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1036$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{4387,87} = 0,6626$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.29) i (4.30).

$$\Phi_i = 0,0952 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.364)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,0952 \cdot (10 - 50) = 13,81 \text{ °C} \quad (4.365)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (13,81 - 10) = 11077,35 \text{ W} \quad (4.366)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{11077,35}{4387,87} = 47,48 \text{ °C} \quad (4.367)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(47,48 - 10) - (50 - 13,81)}{\ln \frac{47,48 - 10}{50 - 13,81}} = 36,83 \text{ °C} \quad (4.368)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1141,05 \cdot 0,264 \cdot 36,83 = 11094,56 \text{ W} \quad (4.369)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,0952 \quad (4.370)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,0952 \quad (4.371)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1141,05 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,04 \quad (4.372)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.30) i (4.372).

$$\Phi_i = 0,5532 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.373)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,5532 \cdot (10 - 50) = 32,13 \text{ °C} \quad (4.374)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (32,13 - 10) = 64341,65 \text{ W} \quad (4.375)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{64341,65}{4387,87} = 35,34 \text{ °C} \quad (4.376)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(35,34 - 10) - (50 - 32,13)}{\ln \frac{35,34 - 10}{50 - 32,13}} = 21,39 \text{ °C} \quad (4.377)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1141,05 \cdot 2,64 \cdot 21,39 = 64434,46 \text{ W} \quad (4.378)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,5532 \quad (4.379)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,5532 \quad (4.380)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1141,05 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,07 \quad (4.381)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.30) i (4.381).

$$\Phi_i = 0,7497 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.382)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,7497 \cdot (10 - 50) = 39,99 \text{ °C} \quad (4.383)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (39,99 - 10) = 87194,13 \text{ W} \quad (4.384)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{87194,13}{4387,87} = 30,13 \text{ °C} \quad (4.385)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(30,13 - 10) - (50 - 39,99)}{\ln \frac{30,13 - 10}{50 - 39,99}} = 14,49 \text{ °C} \quad (4.386)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1141,05 \cdot 5,28 \cdot 14,49 = 87298,54 \text{ W} \quad (4.387)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,7497 \quad (4.389)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,7497 \quad (4.390)$$

U drugom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.67) i (4.68) te iznose:



$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1330,89 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,1208$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{8775,32} = 0,3313$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.67) i (4.68).

$$\Phi_i = 0,1115 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.391)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1115 \cdot (10 - 50) = 14,46 \text{ °C} \quad (4.392)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (14,46 - 10) = 12967,18 \text{ W} \quad (4.393)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{12967,18}{8775,32} = 48,52 \text{ °C} \quad (4.394)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(48,52 - 10) - (50 - 14,46)}{\ln \frac{48,52 - 10}{50 - 14,46}} = 37,01 \text{ °C} \quad (4.395)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1330,89 \cdot 0,264 \cdot 37,01 = 13003,65 \text{ W} \quad (4.396)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,1115 \quad (4.397)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,1115 \quad (4.398)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1330,89 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,21 \quad (4.399)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.68) i (4.399).

$$\Phi_i = 0,6516 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.400)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6516 \cdot (10 - 50) = 36,06 \text{ °C} \quad (4.401)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (36,06 - 10) = 75767,89 \text{ W} \quad (4.402)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{75767,89}{8775,32} = 41,37 \text{ °C} \quad (4.403)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(41,37 - 10) - (50 - 36,06)}{\ln \frac{41,37 - 10}{50 - 36,06}} = 21,49 \text{ °C} \quad (4.404)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1330,89 \cdot 2,64 \cdot 21,49 = 75506,18 \text{ W} \quad (4.405)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,6516 \quad (4.406)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,6516 \quad (4.407)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1330,89 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,42 \quad (4.408)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.68) i (4.408).

$$\Phi_i = 0,8569 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.409)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,8569 \cdot (10 - 50) = 44,28 \text{ °C} \quad (4.410)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1(t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (44,28 - 10) = 99667,04 \text{ W} \quad (4.411)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{99667,04}{8775,32} = 38,64 \text{ °C} \quad (4.412)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(38,64 - 10) - (50 - 44,28)}{\ln \frac{38,64 - 10}{50 - 44,28}} = 14,22 \text{ °C} \quad (4.413)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1330,89 \cdot 5,28 \cdot 14,22 = 99925,35 \text{ W} \quad (4.414)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,8569 \quad (4.415)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,8569 \quad (4.416)$$

U trećem razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.103) i (4.104) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1418,61 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,13$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{13163,41} = 0,2208$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.103) i (4.104).

$$\Phi_i = 0,1197 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.417)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1197 \cdot (10 - 50) = 14,79 \text{ °C} \quad (4.418)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (14,79 - 10) = 13926,64 \text{ W} \quad (4.419)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{13926,64}{13163,41} = 48,94 \text{ °C} \quad (4.420)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(48,94 - 10) - (50 - 14,79)}{\ln \frac{48,94 - 10}{50 - 14,79}} = 37,04 \text{ °C} \quad (4.421)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok::

$$Q = 1418,61 \cdot 0,264 \cdot 37,04 = 13871,96 \text{ W} \quad (4.422)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,1197 \quad (4.423)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,1197 \quad (4.424)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1418,61 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,29 \quad (4.425)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.104) i (4.425).

$$\Phi_i = 0,6889 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.426)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6889 \cdot (10 - 50) = 37,56 \text{ °C} \quad (4.427)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (37,56 - 10) = 80129,05 \text{ W} \quad (4.428)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{80129,05}{13163,41} = 43,91 \text{ °C} \quad (4.429)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(43,91 - 10) - (50 - 37,56)}{\ln \frac{43,91 - 10}{50 - 37,56}} = 21,41 \text{ °C} \quad (4.430)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1418,61 \cdot 2,64 \cdot 21,41 = 80183,24 \text{ W} \quad (4.431)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,6889 \quad (4.432)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,6889 \quad (4.433)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1418,61 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,58 \quad (4.434)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.104) i (4.434).

$$\Phi_i = 0,8917 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.435)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,8917 \cdot (10 - 50) = 45,67 \text{ °C} \quad (4.436)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (45,67 - 10) = 103708,38 \text{ W} \quad (4.437)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 50 - \frac{103708,38}{13163,41} = 42,12 \text{ °C} \quad (4.438)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(42,12 - 10) - (50 - 45,67)}{\ln \frac{42,12 - 10}{50 - 45,67}} = 13,87 \text{ °C} \quad (4.439)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1418,61 \cdot 5,28 \cdot 13,87 = 103889,92 \text{ W} \quad (4.440)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,8917 \quad (4.441)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,8917 \quad (4.442)$$

#### 4.2.2. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 60 °C

U prvom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.153) i (4.154) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1165,96 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,11$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{4374,59} = 0,6646$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.153) i (4.154).

$$\Phi_i = 0,0989 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.443)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,0989 \cdot (10 - 60) = 14,95 \text{ °C} \quad (4.444)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (14,95 - 10) = 14391,83 \text{ W} \quad (4.445)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{14391,83}{4374,59} = 56,71 \text{ °C} \quad (4.446)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(56,71 - 10) - (60 - 14,95)}{\ln \frac{56,71 - 10}{60 - 14,95}} = 45,87 \text{ °C} \quad (4.447)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1165,96 \cdot 0,264 \cdot 45,87 = 14119,40 \text{ W} \quad (4.448)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,0989 \quad (4.449)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,0989 \quad (4.450)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1165,96 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,06 \quad (4.451)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.154) i (4.451).

$$\Phi_i = 0,5601 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.452)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,5601 \cdot (10 - 60) = 38,01 \text{ °C} \quad (4.453)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (38,01 - 10) = 81437,39 \text{ W} \quad (4.454)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{81437,39}{4374,59} = 41,38 \text{ °C} \quad (4.455)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(41,38 - 10) - (60 - 38,01)}{\ln \frac{41,38 - 10}{60 - 38,01}} = 26,41 \text{ °C} \quad (4.456)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1165,96 \cdot 2,64 \cdot 26,41 = 81293,53 \text{ W} \quad (4.457)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,5601 \quad (4.458)$$



Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,5601 \quad (4.459)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1165,96 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,12 \quad (4.460)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.154) i (4.460).

$$\Phi_i = 0,7556 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.461)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,7556 \cdot (10 - 60) = 47,78 \text{ °C} \quad (4.462)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (47,78 - 10) = 109843,08 \text{ W} \quad (4.463)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{109843,08}{4374,59} = 34,89 \text{ °C} \quad (4.464)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(34,89 - 10) - (60 - 47,78)}{\ln \frac{34,89 - 10}{60 - 47,78}} = 17,81 \text{ °C} \quad (4.465)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1165,96 \cdot 5,28 \cdot 17,81 = 109643,15 \text{ W} \quad (4.467)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,7556 \quad (4.468)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,7556 \quad (4.469)$$

U drugom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.188) i (4.189) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1348,70 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,12$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{8749,13} = 0,3323$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.188) i (4.189).

$$\Phi_i = 0,1119 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.470)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1119 \cdot (10 - 60) = 15,60 \text{ °C} \quad (4.471)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (15,60 - 10) = 16281,66 \text{ W} \quad (4.472)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{16281,66}{8749,13} = 58,14 \text{ °C} \quad (4.473)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(58,14 - 10) - (60 - 15,60)}{\ln \frac{58,14 - 10}{60 - 15,60}} = 46,13 \text{ °C} \quad (4.474)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1348,70 \cdot 0,264 \cdot 46,13 = 16424,90 \text{ W} \quad (4.475)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,1119 \quad (4.476)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,1119 \quad (4.477)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1348,70 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,22 \quad (4.478)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.189) i (4.478).

$$\Phi_i = 0,6551 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.479)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i(t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6551 \cdot (10 - 60) = 42,76 \text{ °C} \quad (4.480)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (42,76 - 10) = 95247,73 \text{ W} \quad (4.481)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{95247,73}{8749,13} = 49,11 \text{ °C} \quad (4.482)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(49,11 - 10) - (60 - 42,76)}{\ln \frac{49,11 - 10}{60 - 42,76}} = 26,70 \text{ °C} \quad (4.483)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1348,70 \cdot 2,64 \cdot 26,70 = 95067,17 \text{ W} \quad (4.484)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,6551 \quad (4.485)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,6551 \quad (4.486)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1348,70 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,45 \quad (4.487)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.189) i (4.487).

$$\Phi_i = 0,8611 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.488)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,8611 \cdot (10 - 60) = 53,06 \text{ °C} \quad (4.489)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (53,06 - 10) = 125194,37 \text{ W} \quad (4.490)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{125194,37}{8749,13} = 45,69 \text{ °C} \quad (4.491)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t_2'' - t_1') - (t_2' - t_1'')}{\ln \frac{t_2'' - t_1'}{t_2' - t_1''}} = \frac{(45,69 - 10) - (60 - 53,06)}{\ln \frac{45,69 - 10}{60 - 53,06}} = 17,56 \text{ °C} \quad (4.492)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1348,70 \cdot 5,28 \cdot 17,56 = 125047,15 \text{ W} \quad (4.493)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,8611 \quad (4.494)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,8611 \quad (4.495)$$

U trećem razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.224) i (4.225) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1432,48 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,13$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{13123,70} = 0,2215$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.224) i (4.225).

$$\Phi_i = 0,1224 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.496)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1224 \cdot (10 - 60) = 16,12 \text{ °C} \quad (4.497)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (16,12 - 10) = 17793,83 \text{ W} \quad (4.498)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{17793,83}{13123,78} = 58,64 \text{ °C} \quad (4.499)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(58,64 - 10) - (60 - 16,12)}{\ln \frac{58,64 - 10}{60 - 16,12}} = 46,22 \text{ °C} \quad (4.500)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1432,48 \cdot 0,264 \cdot 46,22 = 17479,24 \text{ W} \quad (4.501)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,1224 \quad (4.502)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,1224 \quad (4.503)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1432,48 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,3 \quad (4.504)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.225) i (4.504).

$$\Phi_i = 0,6923 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.505)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6923 \cdot (10 - 60) = 44,62^\circ\text{C} \quad (4.506)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (44,62 - 10) = 100655,57 \text{ W} \quad (4.507)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{100655,57}{13123,78} = 52,33^\circ\text{C} \quad (4.508)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(52,33 - 10) - (60 - 44,62)}{\ln \frac{52,33 - 10}{60 - 44,62}} = 26,62^\circ\text{C} \quad (4.509)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1432,48 \cdot 2,64 \cdot 26,62 = 100670,11 \text{ W} \quad (4.510)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,6923 \quad (4.511)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,6923 \quad (4.512)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1432,48 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,60 \quad (4.513)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.225) i (4.513).

$$\Phi_i = 0,8945 = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (4.514)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t_1'' = t_1' - \Phi_i \cdot (t_1' - t_2') = 10 - 0,8945 \cdot (10 - 60) = 54,73 \text{ °C} \quad (4.515)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t_1'' - t_1') = 2907,44 \cdot (54,73 - 10) = 130049,79 \text{ W} \quad (4.516)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t_2'' = t_2' - \frac{Q}{W_2} = 60 - \frac{130049,79}{13123,78} = 50,09 \text{ °C} \quad (4.554)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t_2'' - t_1') - (t_2' - t_1'')}{\ln \frac{t_2'' - t_1'}{t_2' - t_1''}} = \frac{(50,09 - 10) - (60 - 54,73)}{\ln \frac{50,09 - 10}{60 - 54,73}} = 17,16 \text{ °C} \quad (4.555)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1432,48 \cdot 5,28 \cdot 17,16 = 129789,56 \text{ W} \quad (4.556)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,8945 \quad (4.557)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,8945 \quad (4.558)$$

#### 4.2.3. Termodinamički proračun za ulaznu temperaturu tople vode 70 °C

U prvom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.264) i (4.265) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1184,84 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,11$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{4353,99} = 0,6678$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.264) i (4.265).

$$\Phi_i = 0,0991 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.559)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,0991 \cdot (10 - 70) = 15,95 \text{ °C} \quad (4.560)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (15,95 - 10) = 17299,27 \text{ W} \quad (4.561)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{17299,27}{4353,99} = 66,03 \text{ °C} \quad (4.562)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(66,03 - 10) - (70 - 15,95)}{\ln \frac{66,03 - 10}{70 - 15,95}} = 55,03 \text{ °C} \quad (4.563)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:



$$Q = 1184,84 \cdot 0,264 \cdot 55,03 = 17213,26 \text{ W} \quad (4.564)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,0991 \quad (4.565)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,0991 \quad (4.566)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1184,84 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,08 \quad (4.567)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.265) i (4.567).

$$\Phi_i = 0,5646 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.568)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,5646 \cdot (10 - 70) = 43,87 \text{ °C} \quad (4.569)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (43,87 - 10) = 98474,99 \text{ W} \quad (4.570)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{98474,99}{4353,99} = 47,38 \text{ °C} \quad (4.571)$$

Srednja logaritamskarazlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(47,38 - 10) - (70 - 43,87)}{\ln \frac{47,38 - 10}{70 - 43,87}} = 31,42 \text{ °C} \quad (4.572)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1184,84 \cdot 2,64 \cdot 31,42 = 98281,06 \text{ W} \quad (4.573)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,5646 \quad (4.574)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,5646 \quad (4.575)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1184,84 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,15 \quad (4.576)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.265) i (4.576).

$$\Phi_i = 0,7583 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.577)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,7583 \cdot (10 - 70) = 55,50 \text{ °C} \quad (4.578)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (55,50 - 10) = 132288,52 \text{ W} \quad (4.579)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{132288,52}{4353,99} = 39,62 \text{ °C} \quad (4.580)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(39,62 - 10) - (70 - 55,50)}{\ln \frac{39,62 - 10}{70 - 55,50}} = 21,17 \text{ °C} \quad (4.581)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok: rezultata:

$$Q = 1184,84 \cdot 5,28 \cdot 21,17 = 132438,57 \text{ W} \quad (4.582)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,7583 \quad (4.583)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,7583 \quad (4.584)$$

U drugom razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $w_v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.300) i (4.301) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1361,76 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,12$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{8708,54} = 0,3339$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.300) i (4.301).

$$\Phi_i = 0,1137 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.585)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1137 \cdot (10 - 70) = 16,82 \text{ °C} \quad (4.586)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (16,82 - 10) = 19828,74 \text{ W} \quad (4.587)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{19828,74}{8708,54} = 67,72 \text{ °C} \quad (4.588)$$

Srednjaa logaritamska razlika temperatue računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(67,72 - 10) - (70 - 16,82)}{\ln \frac{67,72 - 10}{70 - 16,82}} = 55,42 \text{ °C} \quad (4.589)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1361,76 \cdot 0,264 \cdot 55,42 = 19923,75 \text{ W} \quad (4.590)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,1137 \quad (4.591)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,1137 \quad (4.592)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1361,76 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,24 \quad (4.593)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.301) i (4.593).

$$\Phi_i = 0,6573 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.594)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6573 \cdot (10 - 70) = 49,44^\circ\text{C} \quad (4.595)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (49,44 - 10) = 114669,43 \text{ W} \quad (4.596)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{114669,43}{8708,54} = 56,83^\circ\text{C} \quad (4.597)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(56,83 - 10) - (70 - 49,44)}{\ln \frac{56,83 - 10}{70 - 49,44}} = 31,91^\circ\text{C} \quad (4.598)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1361,76 \cdot 2,64 \cdot 31,91 = 114717,93 \text{ W} \quad (4.599)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,6573 \quad (4.600)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,6573 \quad (4.601)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1361,76 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,47 \quad (4.602)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.301) i (4.602).

$$\Phi_i = 0,8634 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.603)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,8634 \cdot (10 - 70) = 61,81^\circ\text{C} \quad (4.604)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (61,81 - 10) = 150634,47 \text{ W} \quad (4.607)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{150634,47}{8708,54} = 52,71^\circ\text{C} \quad (4.608)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(52,71 - 10) - (70 - 61,81)}{\ln \frac{52,71 - 10}{70 - 61,81}} = 20,91^\circ\text{C} \quad (4.609)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1361,76 \cdot 5,28 \cdot 20,91 = 150344,84 \text{ W} \quad (4.610)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,8634 \quad (4.611)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,8634 \quad (4.612)$$

U trećem razmatranom slučaju, topla voda kroz vanjsku cijev struji brzinom  $= 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Vrijednosti bezdimenzijskih značajki izračunate su jednadžbama (4.336) i (4.337) te iznose:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1442,47 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 0,13$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2907,44}{13062,81} = 0,2226$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.336) i (4.337).

$$\Phi_i = 0,1211 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.613)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,1211 \cdot (10 - 70) = 17,27 \text{ °C} \quad (4.614)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (17,27 - 10) = 21137,09 \text{ W} \quad (4.615)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{21137,09}{13062,81} = 68,38 \text{ °C} \quad (4.616)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(68,38 - 10) - (70 - 17,27)}{\ln \frac{68,38 - 10}{70 - 17,27}} = 55,51 \text{ °C} \quad (4.617)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1442,47 \cdot 0,264 \cdot 55,51 = 21138,88 \text{ W} \quad (4.618)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,1211 \quad (4.619)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,1211 \quad (4.620)$$

Za izmjenjivač topline s 10 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1442,47 \cdot 10 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 1,3 \quad (4.621)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.336) i (4.621).

$$\Phi_i = 0,6938 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.622)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,6938 \cdot (10 - 70) = 51,63 \text{ °C} \quad (4.623)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (51,63 - 10) = 121036,73 \text{ W} \quad (4.624)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{121036,73}{13062,81} = 60,73 \text{ °C} \quad (4.625)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(60,73 - 10) - (70 - 51,63)}{\ln \frac{60,73 - 10}{70 - 51,63}} = 31,86 \text{ °C} \quad (4.626)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1442,47 \cdot 2,64 \cdot 31,86 = 121326,73 \text{ W} \quad (4.627)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):

$$\varepsilon = \Phi_p = 0,6938 \quad (4.628)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,6938 \quad (4.629)$$

Za izmjenjivač topline s 20 segmenata bezdimenzijska značajka iznosi:

$$\frac{kF_0}{W_1} = \frac{k \cdot n \cdot d_u \cdot \pi \cdot L}{W_1} = \frac{1442,47 \cdot 20 \cdot 0,042 \cdot \pi \cdot 2}{2907,44} = 2,62 \quad (4.630)$$

Iz dijagrama za proračun protusmjernog izmjenjivača topline očitava se funkcija  $\Phi_p$  pomoću izračunatih vrijednosti (4.337) i (4.630).

$$\Phi_i = 0,8954 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} \quad (4.631)$$

Prema izrazu (4.32) računa se izlazna temperatura slabije struje:

$$t''_1 = t'_1 - \Phi_i \cdot (t'_1 - t'_2) = 10 - 0,8954 \cdot (10 - 70) = 63,72 \text{ °C} \quad (4.632)$$

Izmijenjeni toplinski tok računa se prema izrazu (4.33):

$$Q = W_1 \cdot (t''_1 - t'_1) = 2907,44 \cdot (63,72 - 10) = 156187,68 \text{ W} \quad (4.633)$$

Izlazna temperatura jače struje računa se prema izrazu (4.35):

$$t''_2 = t'_2 - \frac{Q}{W_2} = 70 - \frac{156187,68}{13062,81} = 58,04 \text{ °C} \quad (4.634)$$

Srednja logaritamska razlika temperature računa se prema izrazu:

$$\Delta t_m = \frac{(t''_2 - t'_1) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t''_2 - t'_1}{t'_2 - t''_1}} = \frac{(58,04 - 10) - (70 - 63,72)}{\ln \frac{58,04 - 10}{70 - 63,72}} = 20,52 \text{ °C} \quad (4.635)$$

Prema izrazu (3.02) možemo izračunati izmijenjeni toplinski tok:

$$Q = 1442,47 \cdot 5,28 \cdot 20,52 = 156285,28 \text{ W} \quad (4.636)$$

Iskoristivost topline računa se prema izrazu (3.06):



$$\varepsilon = \Phi_p = 0,8954 \quad (4.637)$$

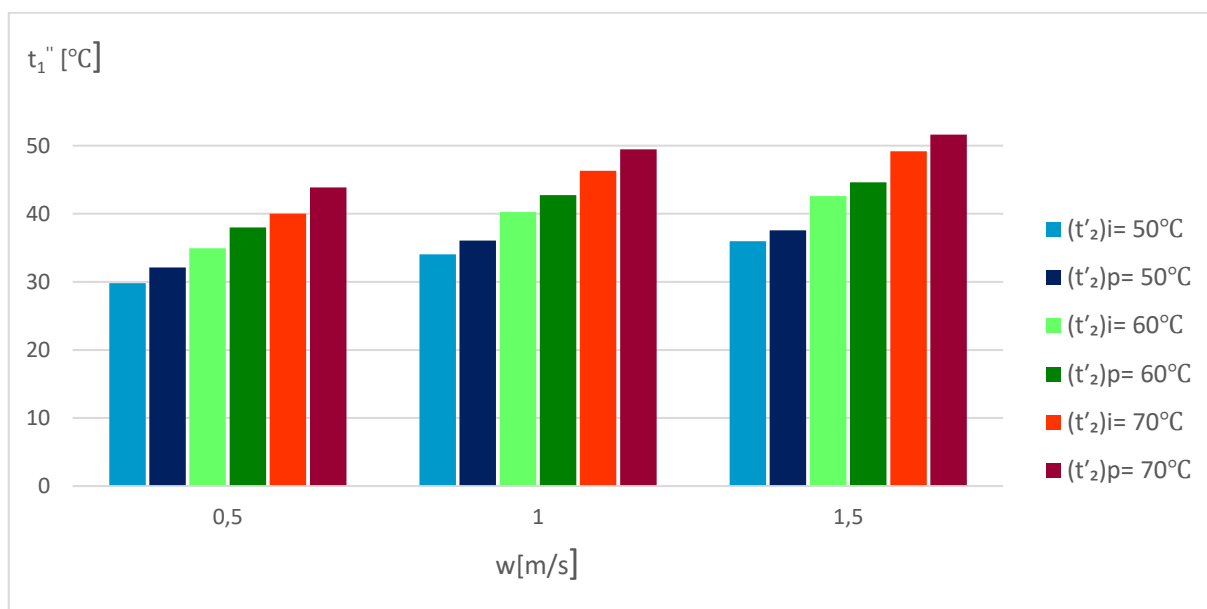
Stupanj djelovanja izmjenjivača topline računa se prema izrazu (3.16):

$$\varepsilon = \Phi_p = \eta_p = 0,8954 \quad (4.638)$$

## 5. USPOREDBA DOBIVENIH REZULTATA

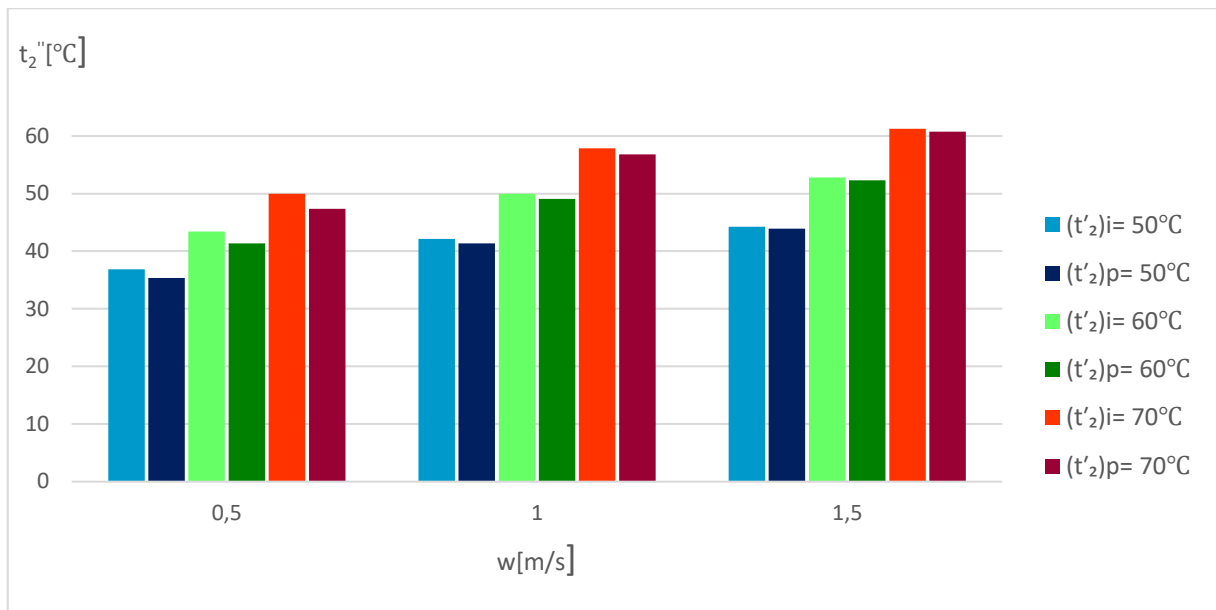
### 5.1. Usporedba rezultata za istosmjerni i protusmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 segmenata

Rezultati će se usporediti za izmjenjivač topline s 10 segmenata, ukupne duljine 20 m. Dijagramima će biti prikazana usporedba izlaznih temperatura slabije struje kao i izlaznih temperatura jače struje, izmijenjenih toplinskih tokova, iskoristivosti topline i stupnjeva djelovanja izmjenjivača topline. U svim dijagramima biti će prikazana usporedba za različite ulazne brzine i ulazne temperature jače struje, za istosmjerno i protusmjerno strujanje fluida.



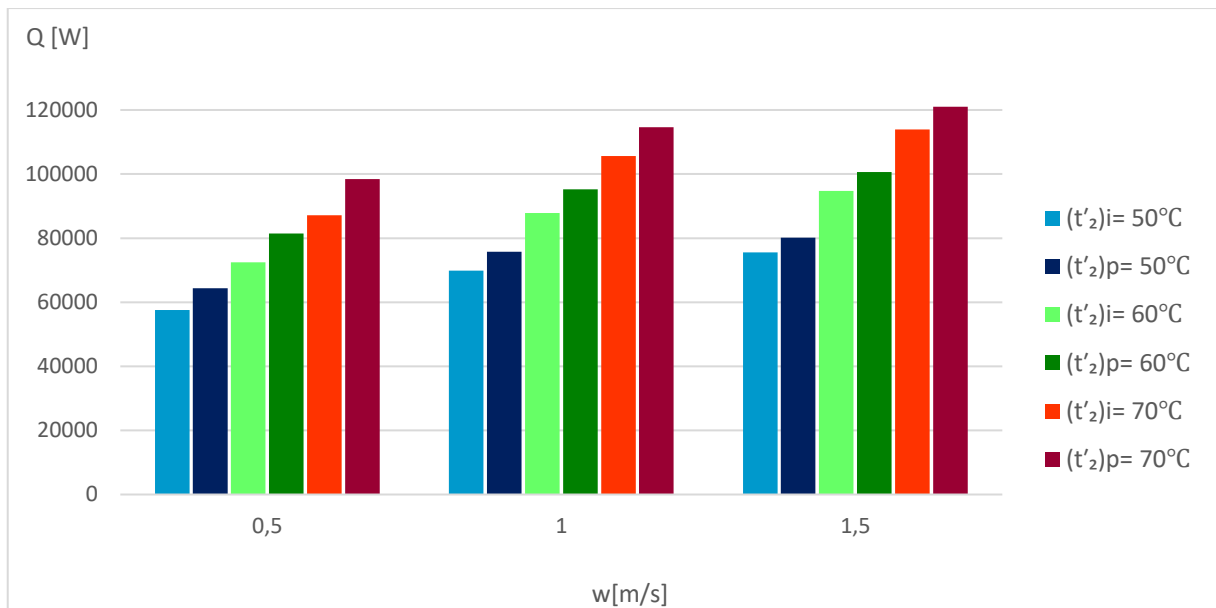
Slika 5.1 Izlazne temperature slabije struje

Iz dijagrama na slici 5.1 vidljivo je da se izlazna temperatura slabije struje povećava s povećanjem ulazne brzine strujanja jače struje te s povećanje ulazne temperature jače struje. Izlazne temperature slabije struje veće su u slučaju protusmjernog strujanja.



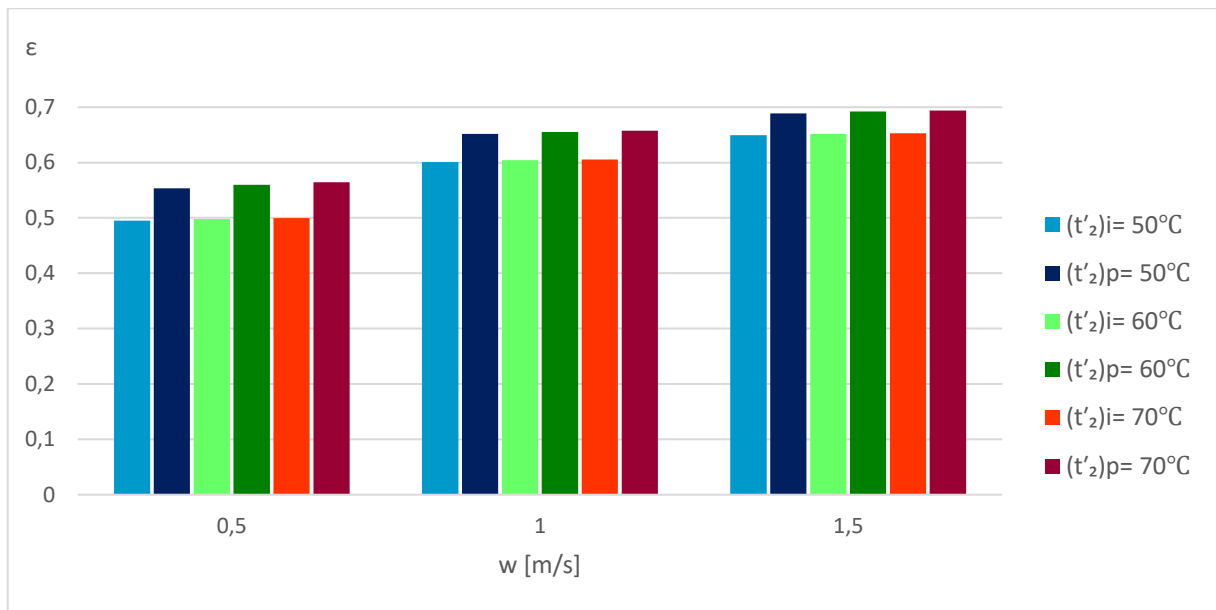
*Slika 5.2 Izlazne temperature jače struje*

Iz dijagrama na slici 5.2 vidljivo je da je izlazna temperatura jače struje veća kod većih ulaznih brzina i ulaznih temperatura jače struje. Izlazna temperatura jače struje veća je pri istosmjernom strujanju.



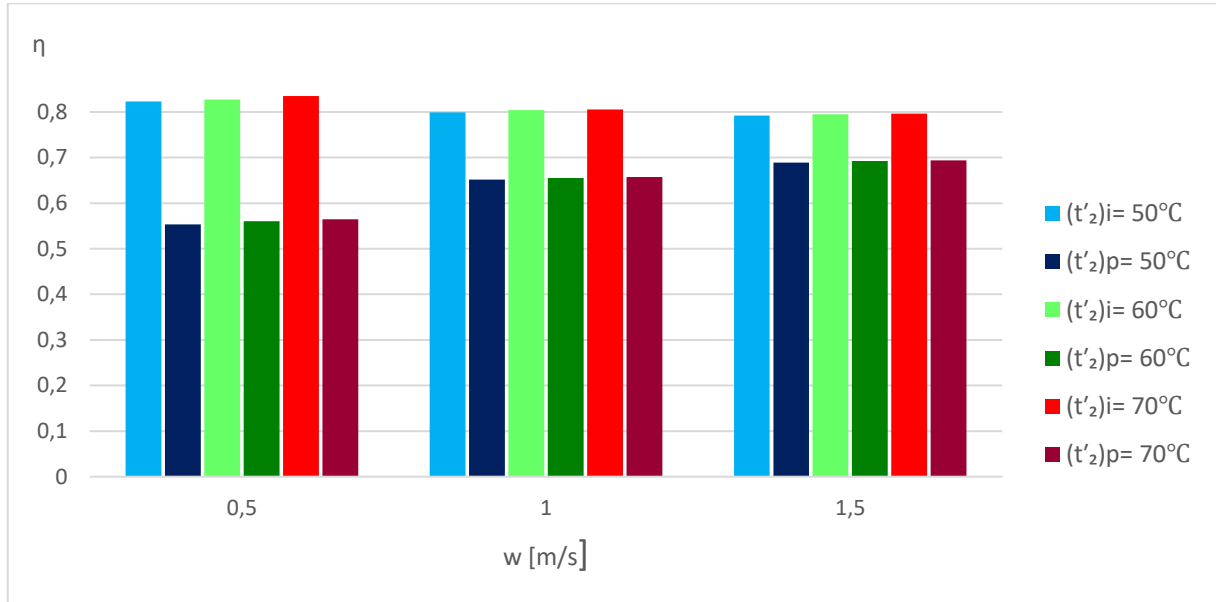
*Slika 5.3 Izmijenjeni toplinski tokovi*

Iz dijagrama na slici 5.3 vidljivo je da se izmijenjeni toplinski tokovi povećaju s povećanjem ulaznih brzina i ulaznih temperatura jače struje. Izmijenjeni toplinski tokovi veći su kod protusmjernog strujanja.



Slika 5.4 Iskoristivosti topline

Iz dijagrama na slici 5.4 vidljivo je da se iskoristivosti topline povećavaju s povećanjem ulazne brzine i ulazne temperature jače struje. Ulazna brzina jače struje ima veći utjecaj na povećanje iskoristivosti topline od ulazne temperature jače struje. Iskoristivosti topline veće su kod protusmjernog strujanja.

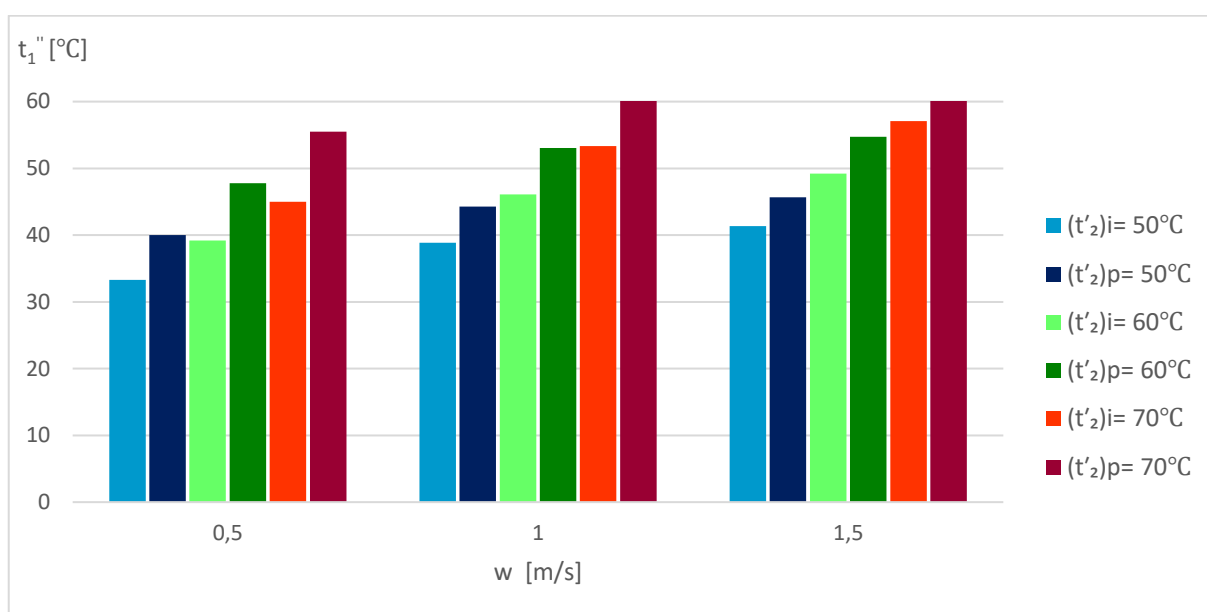


Slika 5.5 Stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline

Iz dijagrama na slici 5.5 vidljivo je da se stupnjevi djelovanja s povećanjem ulazne temperature gotovo ne mijenjaju. S povećanjem ulazne brzine se kod istosmjernog strujanja smanjuju, a kod protusmjernog strujanja se povećavaju.

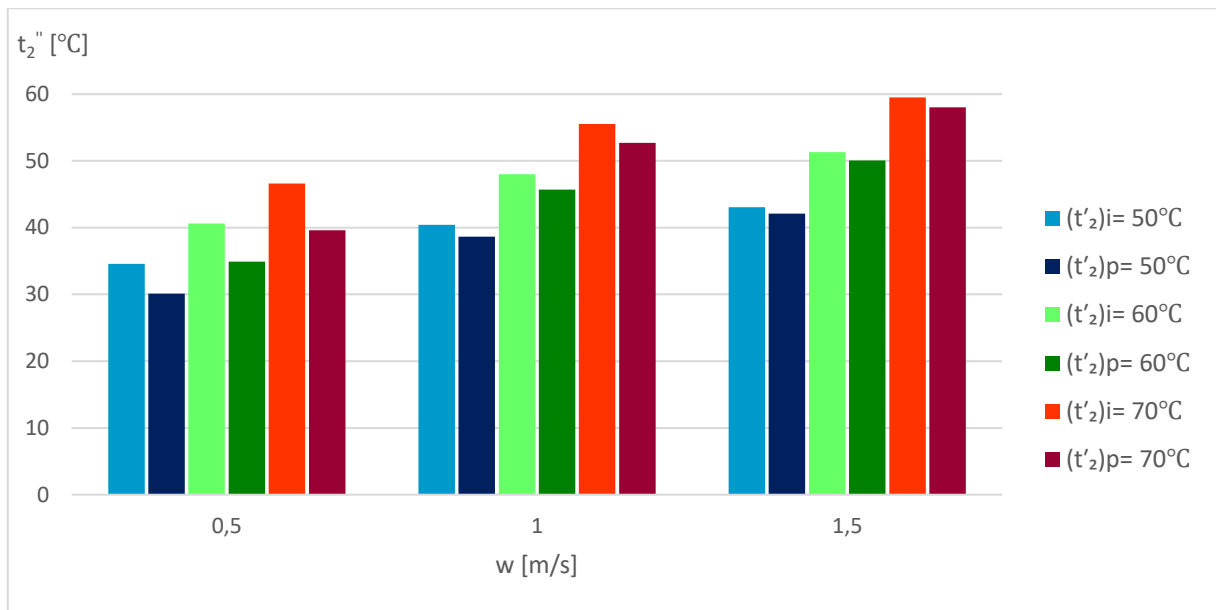
## 5.2. Usporedba rezultata za istosmjerni i protusmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 20 segmenata

Rezultati će se usporediti za izmjenjivač topline s 20 segmenata, ukupne duljine 40 m. Dijagramima će biti prikazane izlazne temperature slabije struje kao i izlazne temperature jače struje, izmijenjeni toplinski tokovi, iskoristivosti topline i stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline. U svim dijagramima biti će prikazana usporedba za različite ulazne brzine i ulazne temperature jače struje za istosmjerno i protusmjerno strujanje fluida.



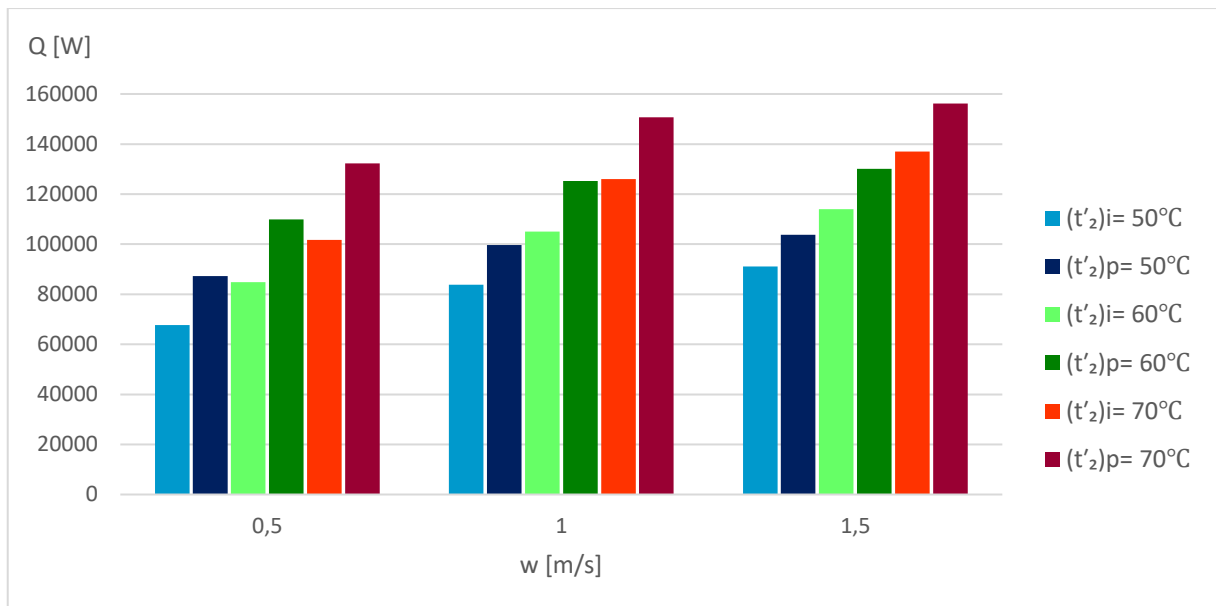
Slika 5.6 Izlazne temperature slabije struje

Iz dijagrama na slici 5.6 vidljivo je da izlazna temperatura slabije struje raste s porastom ulazne brzine strujanja jače struje te s porastom ulazne temperature jače struje. Izlazne temperature slabije struje veće su pri protusmjernom strujanju.



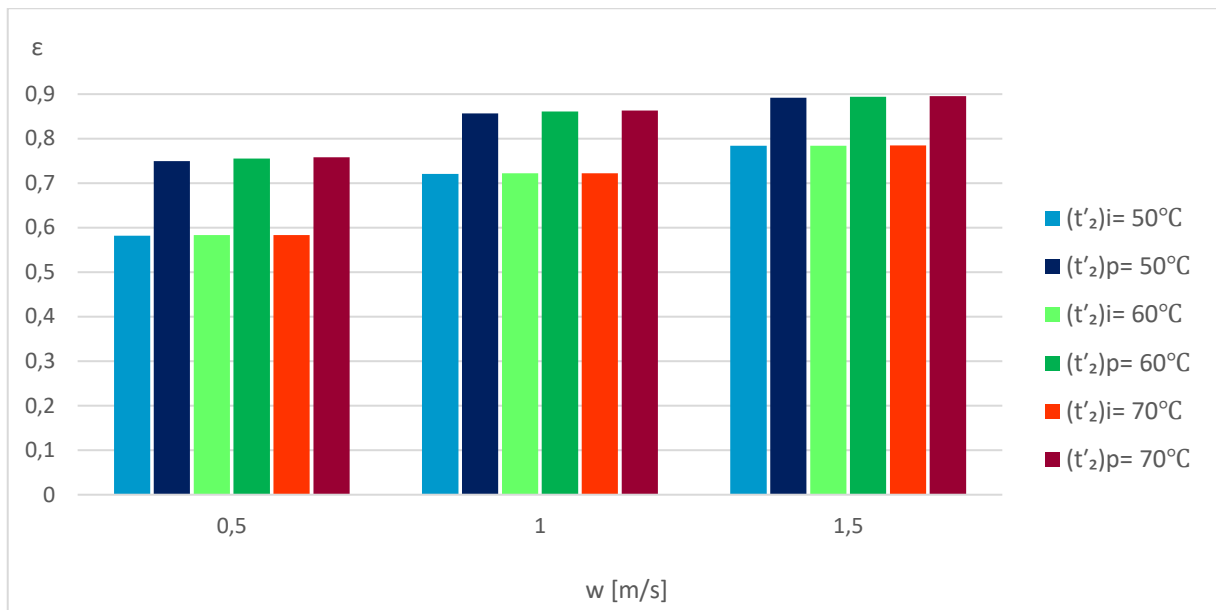
*Slika 5.7 Izlazne temperature jače struje*

Iz dijagrama na slici 5.7 vidljivo je da izlazna temperatura jače struje raste s povećanjem ulazne brzine jače struje te s povećanjem ulazne temperature jače struje. Izlazne temperature jače struje veće su pri istosmjernom strujanju.



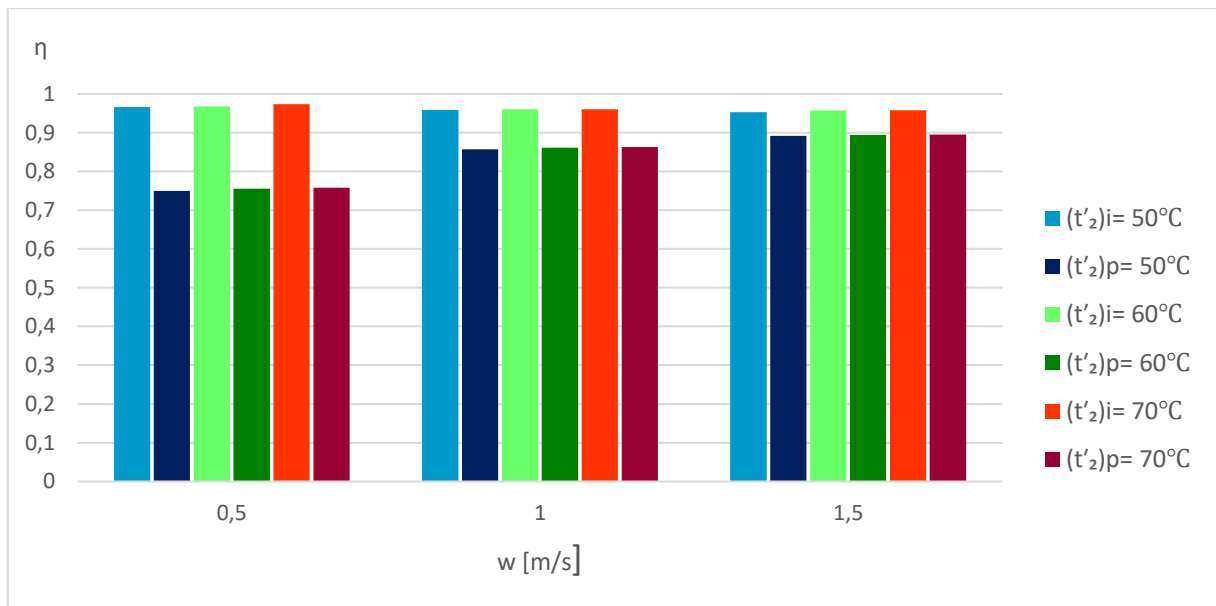
*Slika 5.8 Izmijenjeni toplinski tokovi*

Iz dijagrama na slici 5.8 vidljivo je da se izmijenjeni toplinski tokovi proporcionalno povećavaju s povećanjem ulazne temperature jače struje te s povećanjem ulazne brzine jače struje. Pri protusmjernom strujanju izmijeni se više toplinskog toka.



Slika 5.9 Iskoristivosti topline

Iz dijagrama na slici 5.9 vidljivo je da su iskoristivosti topline veće kod protusmjernog strujanja i to su veće što je veća ulazna brzina strujanja jače struje. Također se neznatno povećavaju s povećanjem ulazne temperature jače struje.

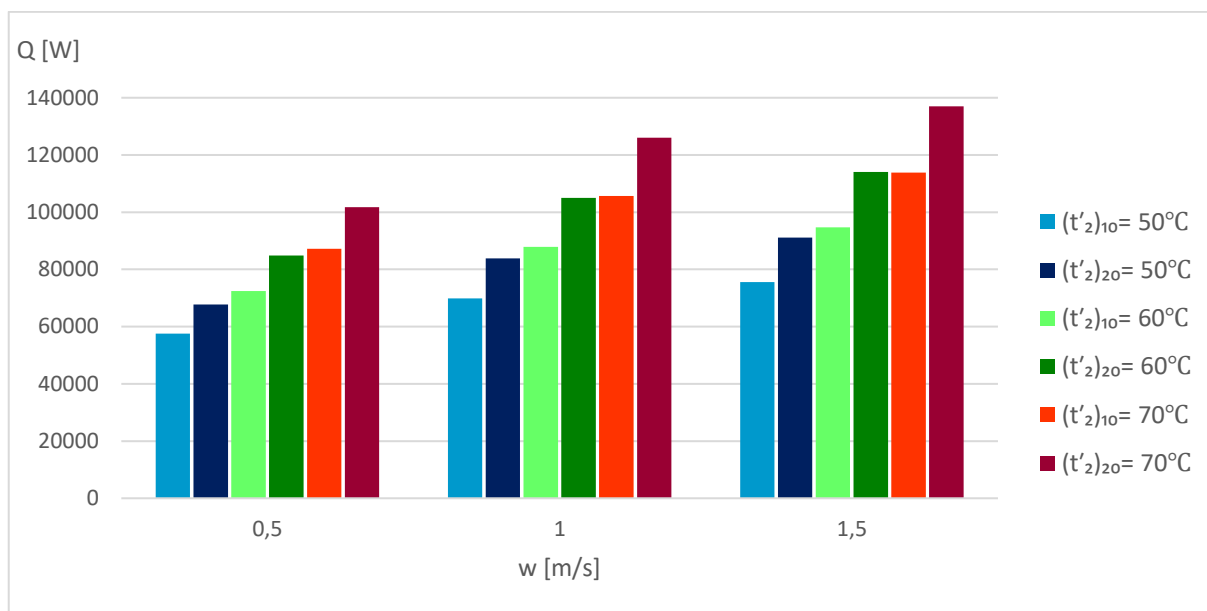


Slika 5.10 Stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline raste neznatno s povećanjem ulazne temperature jače struje, a smanjuje se s povećanjem ulazne brzine strujanja jače temperature kod istosmjernog strujanja. Kod protusmjernog strujanja također neznatno raste s povećanjem ulazne temperature jače struje i raste s povećanjem ulazne brzine strujanja jače temperature.

### 5.3. Usporedba rezultata za istosmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 i 20 segmenata

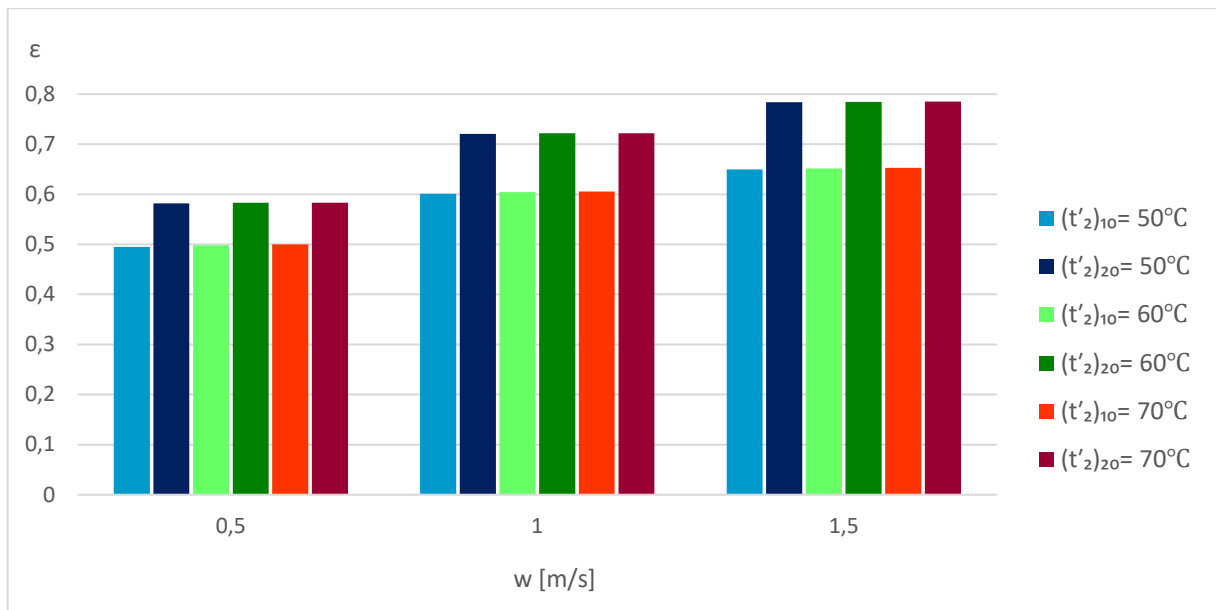
U dijagramima će biti prikazana usporedba za različite ulazne brzine i različite ulazne temperature jače struje dvocijevnog izmjenjivača topline s 10 i 20 segmenata za istosmjerno strujanje fluida.



Slika 5.11 Izmijenjeni toplinski tokovi

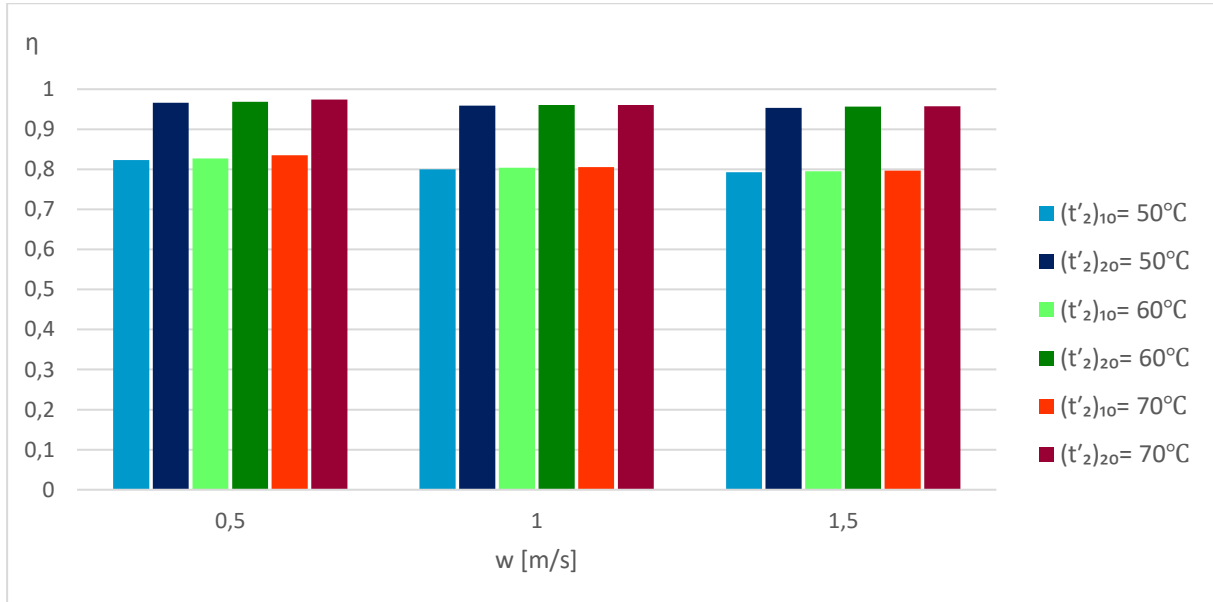
Iz dijagrama na slici 5.11 vidljivo je da su izmijenjeni toplinski tokovi veći što je izmjenjivač topline dulji. Uz to, izmijenjeni toplinski tokovi se povećavaju s povećanjem ulazne brzine i ulazne temperature jače struje.





Slika 5.12 Iskoristivosti topline

Iz dijagrama na slici 5.12 vidljivo je da što je izmjenjivač topline dulji, iskoristivosti topline su veće. Iskoristivosti topline ne ovise značajno o promjeni ulazne temperature jače struje, ali zato ovise o promjeni ulazne brzine strujanja jače struje. Iskoristivosti topline rastu s povećanjem ulazne brzine strujanja jače struje.

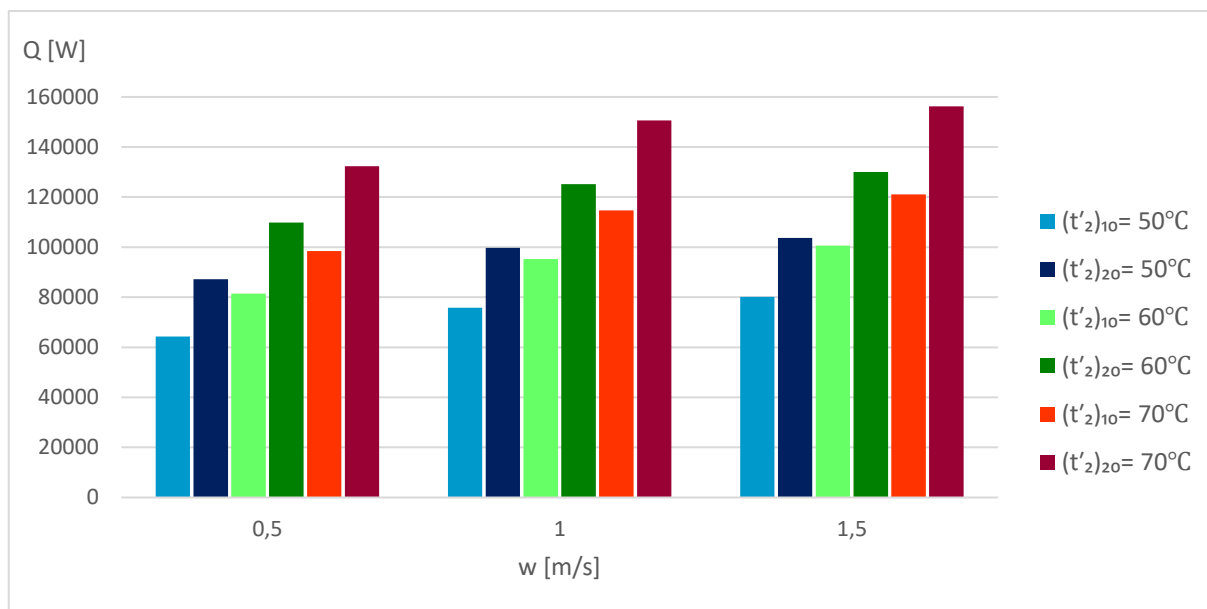


Slika 5.13 Stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline

Iz dijagrama na slici 5.13 vidljivo je da stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline neznatno rastu s povećanjem ulazne temperature jače struje, a smanjuju se s povećanjem ulazne brzine strujanja jače temperature. Što je izmjenjivač topline dulji, stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline su veći.

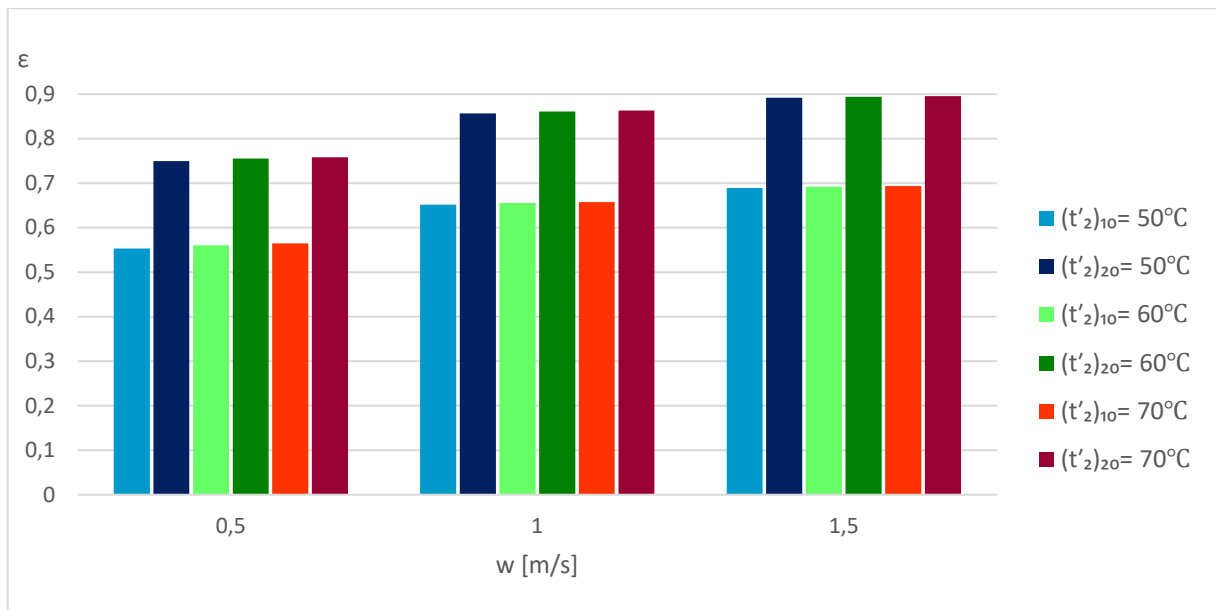
#### 5.4. Usporedba rezultata za protusmjerni dvocijevni izmjenjivač topline s 10 i 20 segmenata

U dijagramima će biti prikazana usporedba za različite ulazne brzine i različite ulazne temperature jače struje dvocijevnog izmjenjivača topline s 10 i 20 segmenata za protusmjerno strujanje fluida.



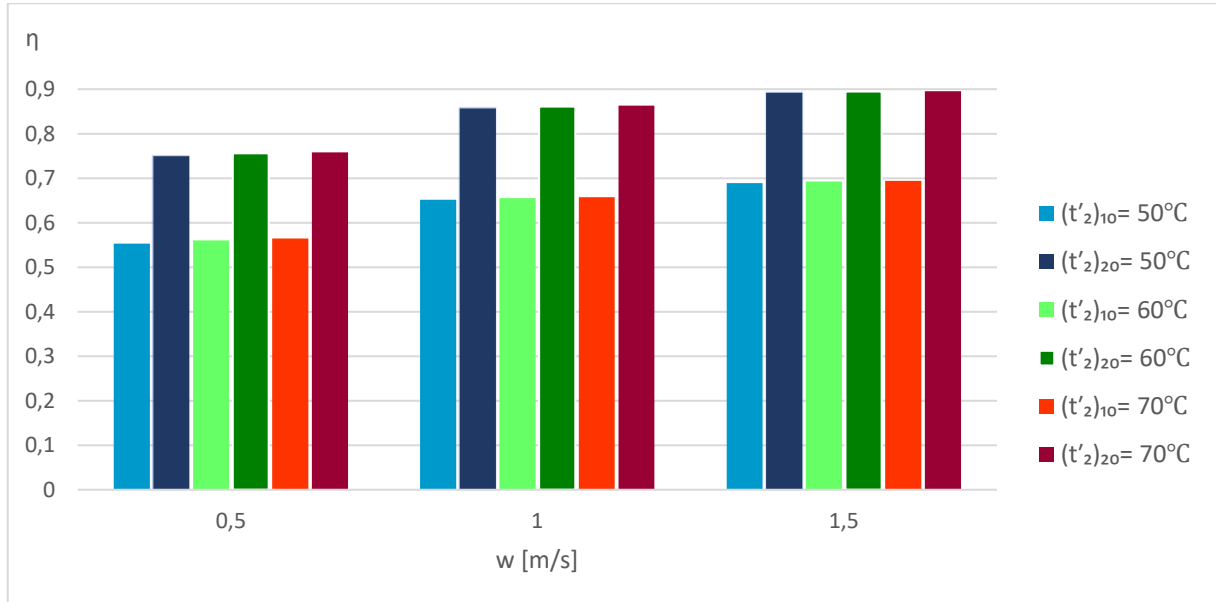
Slika 5.14 Izmijenjeni toplinski tokovi

Iz dijagrama na slici 5.14 vidljivo je da su izmijenjeni toplinski tokovi povećavaju s povećanjem duljine izmjenjivača topline. Izmijenjeni toplinski tokovi se povećavaju s povećanjem ulazne brzine i ulazne temperature jače struje.



Slika 5.15 Iskoristivosti topline

Iz dijagrama na slici 5.15 vidljivo je da se iskoristivosti topline povećavaju proporcionalno s duljinom izmjenjivača topline. Što je izmjenjivač topline dulji, to je iskoristivost topline veća. Iskoristivost topline ne ovisi značajno o promjeni ulazne temperature jače struje, ali zato ovisi o promjeni brzine strujanja jače struje. Iskoristivost topline raste s povećanjem brzine strujanja.



Slika 5.16 Stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline

Iz dijagrama na slici 5.16 vidljivo je da stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline neznatno rastu s povećanjem ulazne temperature jače struje te se povećavaju s povećanjem brzine strujanja jače struje. Što je izmjenjivač topline dulji i stupnjevi djelovanja izmjenjivača topline su veći.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu proveden je termodinamički proračun izmjene topline u dvocijevnom izmjenjivaču topline zadanih geometrijskih karakteristika za istosmjerni i protusmjerni smjer strujanja fluida. Analiziran je 1 segment dvocijevnog izmjenjivača topline duljine 2 m. Za usporedbu su analizirani izmjenjivači topline s 10 i 20 segmenata. Dobivene su informacije o utjecaju smjera strujanja fluida na izmijenjeni toplinski tok, iskoristivost topline i stupanj djelovanja izmjenjivača topline. Izmijenjeni toplinski tok je veći pri protusmjernom nego pri istosmjernom strujanju i proporcionalno se mijenja s ulaznom brzinom jače struje, ulaznom temperaturom jače struje kao i s duljinom samoga izmjenjivača topline. Iskoristivost topline kao i izmijenjeni toplinski tok je veći pri protusmjernom nego pri istosmjernom strujanju. Također proporcionalno raste s ulaznom brzinom jače struje, ulaznom temperaturom jače struje i s duljinom izmjenjivača topline. Stupanj djelovanja izmjenjivača topline zanemarivo raste s povećanjem ulazne temperature jače struje, a smanjuje se s povećanjem ulazne brzine strujanja jače struje kod istosmjernog strujanja. Kod protusmjernog strujanja stupanj djelovanja izmjenjivača topline također zanemarivo raste s povećanjem ulazne temperature jače struje, ali raste i s povećanjem brzine strujanja jače struje. Stupanj djelovanja izmjenjivača topline raste povećanjem duljine izmjenjivača topline i veći je pri istosmjernom strujanju fluida. Može se zaključiti da je za istu površinu izmjene topline povoljnije protusmjerno strujanje jer se može izmijeniti više toplinskog toka i može se iskoristiti više topline.

## 7. LITERATURA

- [1] Halasz, B: "Uvod u termodinamiku", Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [2] Bošnjaković, F.: Nauka o toplini II, Tehnička knjiga Zagreb, 1976
- [3] Trp, A. i Lenić K.: Predavanja iz kolegija: Termodinamika II 2019/2020
- [4] Trp, A.: Predavanja iz kolegija: Tehnički izmjenjivači topline 2019/2020
- [5] Ražnjević, K.: "Termodinamičke tablice", Školska knjiga, Zagreb, 1975
- [6] Basic concepts of heat exchangers, s Interneta, <http://me1065.wikidot.com/automotive-heat-exchangers>, (21.08.2022.)

## Popis oznaka

$a$	$m^2/s$	koeficijent temperaturne vodljivosti
$c$	$J/kgK$	specifični toplinski kapacitet
	$m/s$	brzina svjetlosti
$C_c$	$W/m^2(100K)^4$	konstanta zračenja crnog tijela
$d_{ek}$	$m$	ekvivalentni promjer
$d$	$m$	promjer cijevi
$E$	$W/m^2$	odzračena energija sivog tijela
$E_c$	$W/m^2$	odzračena energija crnog tijela
$E_{1,2}$	$W/m^2$	emitirana energija stijenki
$F$	$m^2$	površina izmjene topline
$f$	$s^{-1}$	frekvencija
$Gr$	-	Grashofova značajka
$G$	$m/s$	maseni protok
$k$	$W/m^2K$	koeficijent prolaza topline
$L$	$m$	duljina cijevi
$Nu$	-	Nusseltova značajka
$O$	$m$	opseg koji oplakuje struja
$Pr$	-	Prandtlova značajka
$q_{12}$	$W/m^2$	gustoća toplinskog toka
$Q$	$W$	izmijenjeni toplinski tok
$r_{1,2}$	$m$	polumjer unutarnje i vanjske cijevi

$Re$	-	Reynoldsova značajka
$t_{a,b}$	°C, K	temperaturu fluida
$t_1, t_2$	°C, K	temperatura na površinama stijenke
$t'$	°C, K	ulazna temperatura struje
$t''$	°C, K	izlazna temperatura struje
$v$	m <sup>3</sup> /kg	specifični volumen
$w$	m/s	brzina strujanja
$W$	W/K	toplinski kapacitet struje
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	koeficijent prijelaza topline
$\delta$	m	debljina stijenke
$\Delta t_m$	°C, K	srednja logaritamska razlika temperatura
$\Delta t'$	°C, K	razlika temperatura na jednom kraju izmjenjivača
$\Delta t''$	°C, K	razlika temperatura na drugom kraju izmjenjivača
$\varepsilon$	-	iskoristivost topline
$\eta$	-	stupanj djelovanja izmjenjivača topline
	Pas	dinamički viskozitet
$\lambda$	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti
	m	valna duljina
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematički viskozitet
$\rho$	kg/ m <sup>3</sup>	gustoća
$\Phi$	-	pogonska bezdimenzijska značajka

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Zadatak ovog diplomskog rada je provedba proračuna izmjene topline unutar dvocijevnog rekuperatora u svrhu analize utjecaja smjera strujanja fluida na samu izmjenu topline. Rekuperatori su izmjenjivači topline kod kojih su fluidi odvojeni krutom i nepropusnom stijenkom kroz koju se izmjenjuje toplina. Toplina se izmjenjuje konvekcijom na strani toplijeg i hladnijeg fluida s površinom stijenke te provođenjem kroz krutu stijenku. U drugom poglavlju opisane su glavne zakonitosti izmjene topline te podjela na osnovne oblike izmjene topline. U trećem poglavlju opisani su izmjenjivači topline i njihova podjela na rekuperatore, regeneratore i direktne izmjenjivače topline. Rekuperatori, zbog svoje važnosti u ovom radu detaljnije su razrađeni. Nasljedno na cijeli rad, proveden je proračun prema zadanim geometrijskim karakteristikama i ulaznim podacima. Svrha proračuna jest analiza utjecaja istosmjernog i protusmjernog strujanja na izmijenjeni toplinski tok, iskoristivost topline i ostale karakteristične fizikalne veličine. U petom poglavlju provedena je analiza i usporedba dobivenih podataka proračunom te su isti prikazani grafički. Zaključno na proračun, protusmjerni izmjenjivač topline je povoljniji jer se za istu površinu izmjene topline izmijeni veći toplinski tok i iskoristi više topline.

Ključne riječi: dvocijevni izmjenjivač topline, istosmjerno i protusmjerno strujanje, izmijenjeni toplinski tok, iskoristivost topline



## **ABSTRACT AND KEY WORDS**

The task of this thesis is the calculation of the heat exchange in the double tube heat exchanger for the purpose of analyzing the influence of fluid flow direction on heat exchange. Recuperators are heat exchangers where the fluids are separated by a solid and impermeable wall through which heat is exchanged. Heat is exchanged by convection on the side of the warmer and colder fluid with the wall surface and conduction through the solid wall. The second chapter describes the main laws of heat exchange and classification of basic forms of heat exchange. The third chapter describes heat exchangers and their basic division into recuperators, regenerators and direct heat exchangers. Recuperators, due to their importance, are elaborated in more details in this paper. As a result of the entire work, calculation was carried out according to the given geometry characteristics and input data. The purpose of the calculation is the analysis of the influence of parallel and counter fluid flow direction, on the exchanged heat flux, heat effectiveness and other characteristic physical values. In the fifth chapter, the analysis and comparison of the obtained data was carried out and the same was presented graphically. Concluding on the calculation, the counter-flow heat exchanger is more favorable because for the same heat exchange surface, a larger heat flux is exchanged inside heat exchanger and more heat is used

Key words: double tube heat exchanger, parallel and counter fluid flow, exchanged heat flux, heat effectiveness

## Popis slika

SLIKA 2.1 PROVOĐENJE TOPLINE KROZ RAVNU STIJENKU .....	3
SLIKA 2.2 PROVOĐENJE TOPLINE KROZ STIJENKU CIJEVI .....	3
SLIKA 2.3 IZMJENA TOPLINE KONVEKCIJOM .....	4
SLIKA 2.4 CIJEV U CIJEVI .....	6
SLIKA 2.5 RASPODJELA DOZRAČENE ENERGIJE .....	7
SLIKA 2.6 IZMJENA ENERGIJE ZRAČENJEM IZMEĐU DVIJE USPOREDNE STIJENKE .....	8
SLIKA 2.7 PROLAZ TOPLINE KROZ RAVNU STIJENKU .....	9
SLIKA 2.8 PROLAZ TOPLINE KROZ STIJENKU CIJEVI .....	10
SLIKA 3.1 ROTIRAJUĆI REGENERATOR [1] .....	11
SLIKA 3.2 DIREKTNI IZMJENJIVAČ TOPLINE [1] .....	12
SLIKA 3.3 OSNOVNI TIPOVI REKUPERATORA .....	13
SLIKA 3.4 T-F DIJAGRAM ISTOSMJERNOG REKUPERATORA .....	14
SLIKA 3.5 T-F DIJAGRAM IZMJENJIVAČA TOPLINE S BESKONAČNO VELIKOM POVRŠINOM IZMJENE TOPLINE.....	15
SLIKA 3.6 T-F DIJAGRAM PROTUSMJERNOG REKUPERATORA .....	17
SLIKA 3.7 RASPODJELA TEMPERATURA NA ULAZU I IZLAZU KRIŽNOG REKUPERATORA .....	19
SLIKA 4.1 SEGMENT DVOCIJEVNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE [6] .....	20
SLIKA 4.2 DIJAGRAM ZA PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE .....	24
SLIKA 5.1 IZLAZNE TEMPERATURE SLABIJE STRUJE .....	90
SLIKA 5.2 IZLAZNE TEMPERATURE JAČE STRUJE .....	91
SLIKA 5.3 IZMIJENJENI TOPLINSKI TOKOVI .....	91
SLIKA 5.4 ISKORISTIVOSTI TOPLINE .....	92
SLIKA 5.5 STUPNJEVI DJELOVANJA IZMJENJIVAČA TOPLINE .....	92
SLIKA 5.6 IZLAZNE TEMPERATURE SLABIJE STRUJE .....	93
SLIKA 5.7 IZLAZNE TEMPERATURE JAČE STRUJE .....	94
SLIKA 5.8 IZMIJENJENI TOPLINSKI TOKOVI .....	94
SLIKA 5.9 ISKORISTIVOSTI TOPLINE .....	95
SLIKA 5.10 STUPNJEVI DJELOVANJA IZMJENJIVAČA TOPLINE .....	95
SLIKA 5.11 IZMIJENJENI TOPLINSKI TOKOVI .....	96
SLIKA 5.12 ISKORISTIVOSTI TOPLINE .....	97
SLIKA 5.13 STUPNJEVI DJELOVANJA IZMJENJIVAČA TOPLINE .....	97
SLIKA 5.14 IZMIJENJENI TOPLINSKI TOKOVI .....	98
SLIKA 5.15 ISKORISTIVOSTI TOPLINE .....	99
SLIKA 5.16 STUPNJEVI DJELOVANJA IZMJENJIVAČA TOPLINE .....	99