

Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline sa snopom cijevi

Aničić, Vanesa

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:190:852012>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA IZMJENE TOPLINE U PROTUSMJERNOM
IZMJENJIVAČU TOPLINE SA SNOPOM CIJEVI**

Rijeka, rujan 2024.

Vanesa Aničić

0069086673

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA IZMJENE TOPLINE U PROTUSMJERNOM
IZMJENJIVAČU TOPLINE SA SNOPIOM CIJEVI**

Mentorica: Prof. dr. sc. Anica Trp

Rijeka, rujan 2024.

Vanesa Aničić

0069086673

Zavod: Zavod za termodinamiku i energetiku
Predmet: Tehnički izmjenjivači topline

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Vanesa Aničić (0069086673)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (1100)
Modul: Procesno i energetska strojarstvo (1117)
Zadatak: **ANALIZA IZMJENE TOPLINE U PROTUSMJERNOM IZMJENJIVAČU TOPLINE SA
SNOPIOM CIJEVI / ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IN A COUNTERFLOW
SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER**

Opis zadatka:

Potrebno je postaviti jednadžbe toplinske bilance i prolaza topline te opisati termodinamički proračun izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline sa snopom cijevi. Termodinamičke proračune je potrebno provesti za odabrane geometrijske karakteristike i radne parametre izmjenjivača topline sa snopom cijevi. Temeljem dobivenih rezultata proračuna potrebno je usporediti karakteristične fizikalne veličine i izvršiti analizu utjecaja odabranih geometrijskih i pogonskih parametara na proces izmjene topline. Rad mora obuhvatiti: uvod, osnove tehničkih izmjenjivača topline, opis fizikalnog problema izmjene topline, metode termodinamičkog proračuna, prikaz i analizu dobivenih rezultata, zaključak, popis oznaka, popis korištene literature te sažetak i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Anica Trp

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Izjava o izvornosti Diplomskog rada

Izjavljujem da sam rad pod naslovom „Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline sa snopom cijevi“ izradila samostalno, koristeći se navedenom literaturom i znanjem stečenim kroz prijediplomski i diplomski studij strojarstva te uz pomoć mentorice.

Rijeka, rujan 2024.

Vanesa Aničić

Zahvala

Ovim putem se želim zahvaliti mentorici prof. dr. sc. Anici Trp na ukazanom povjerenju, uloženom vremenu, trudu i mentoriranju kroz izradu ovog rada.

Hvala kolegama i kolegicama uz kojih je pet godina studija tako brzo prošlo. Veliko hvala obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju kroz čitavo trajanje ovog obrazovanja. Najveće hvala mom dečku koji mi je bio najveća potpora svih ovih godina.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Prijelaz topline.....	2
2.1. Osnovni oblici prijelaza topline	2
2.1.1. Prijelaz topline provođenjem	2
2.1.2. Prijelaz topline konvekcijom.....	6
2.1.3. Prijelaz topline zračenjem	10
2.2. Prolaz topline.....	13
3. Tehnički izmjenjivači topline	16
3.1. Rekuperativni izmjenjivači topline	17
3.1.1. Podjela rekuperatora prema smjeru strujanja fluida.....	17
3.1.2. Podjela rekuperatora prema vrsti izrade.....	22
3.2. Regenerativni izmjenjivači topline.....	27
3.3. Direktni izmjenjivači topline.....	29
4. Izmjena topline u protusmjernom izmjenjivaču topline sa snopom cijevi.....	30
4.1. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 217 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu	30
4.1.1. Termodinamički proračun protusmjernog cijevnog izmjenjivača topline bez pregrada.....	31
4.1.2. Termodinamički proračun protusmjernog cijevnog izmjenjivača topline s pregradama.....	35
4.1.3. Analiza rezultata.....	39
4.2. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 217 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu	42
4.2.1. Analiza rezultata.....	43
4.3. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 217 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu	46
4.3.1. Analiza rezultata.....	47

4.4.	Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 217 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu	50
4.4.1.	Analiza rezultata.....	51
4.5.	Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 271 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu	54
4.5.1.	Analiza rezultata.....	55
4.6.	Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 271 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu	58
4.6.1.	Analiza rezultata.....	59
4.7.	Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 271 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu	62
4.7.1.	Analiza rezultata.....	63
4.8.	Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 271 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu	66
4.8.1.	Analiza rezultata.....	67
4.9.	Usporedba izmjene topline u izmjenjivačima topline s različitim brojem cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu.....	70
4.9.1.	Usporedba izmjene topline u izmjenjivačima topline s 217 i 271 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu.....	70
4.9.2.	Usporedba izmjene topline u izmjenjivačima topline s 217 i 271 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu.....	84
5.	Zaključak.....	100
6.	Literatura	102
7.	Popis oznaka.....	103
8.	Popis slika	106
9.	Popis tablica	111
10.	Sažetak	113
11.	Summary	114

1. UVOD

Tehnički izmjenjivači topline su toplinski aparati u kojima se vrši izmjena topline između dva ili više fluida u cilju zagrijavanja ili ohlađivanja jednog fluida drugim. Zbog svoje jednostavnosti primjena im je široka. Široko se upotrebljavaju u postrojenjima centralnog grijanja i postrojenjima za pripremu potrošne tople vode, kao isparivači ili kondenzatori u sustavima rashladne tehnike, u termoenergetskim postrojenjima kao pregrijači pare, zagrijači vode, zagrijači zraka te u kemijskoj i prehrambenoj industriji.

U ovom je radu prikazana analiza izmjene topline u cijevnom protusmjernom izmjenjivaču topline sa snopom cijevi u bubnju. Izvršeni su proračuni za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu, za različite duljine izmjenjivača topline te za dvije standardne dimenzije cijevi u cijevnom snopu. Proračuni su provedeni za različite protoke rashladne vode. Također, izvršeni su proračuni za izmjenjivače topline bez pregrada i s pregradama u bubnju.

Rad je podijeljen u pet poglavlja. U drugom poglavlju dan je osvrt na osnovne oblike izmjene topline u cilju boljeg razumijevanja načela rada izmjenjivača topline. Kroz treće poglavlje dana je podjela izmjenjivača topline te su prikazane osnovne karakteristike svake skupine.

Četvrto poglavlje odnosi se na termodinamičke proračune izmjene topline. Dobiveni su rezultati potom analizirani te se izvršila njihova usporedba. Također, izvršena je usporedba rezultata s obzirom na broj cijevi u cijevnom snopu.

U petom poglavlju donosi se zaključak i osvrt na dobivene rezultate.

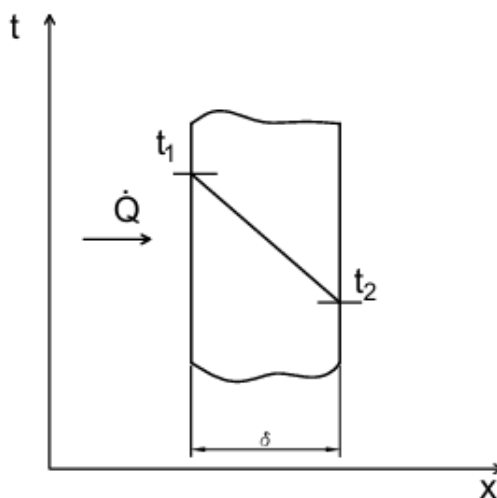
2. PRIJELAZ TOPLINE

2.1. Osnovni oblici prijelaza topline

Tehnički izmjenjivači topline su toplinski aparati u kojima fluidi izmjenjuju toplinsku energiju. Pri tome, jedan od fluida se zagrijava, a drugi hladi. Ta izmjena topline naziva se prijelaz topline. Osnovni oblici prijelaza topline su provođenje, konvekcija i zračenje. Za razliku od provođenja i konvekcije koji su vezani uz tvar, zračenje nije, što ima za posljedicu mogućnost da se između tijela koja izmjenjuju toplinu zračenjem mogu nalaziti područja s većom ili manjom temperaturom od tijela koja sudjeluju u izmjeni topline.

2.1.1. Prijelaz topline provođenjem

Provođenje topline jeste prijelaz topline kroz krutu stijenku. Toplina se prenosi provođenjem ako su površine nekog tijela na različitim temperaturama. Izmjena topline vrši se prijenosom kinetičke energije s jedne molekule na drugu. Molekule veće temperature imaju veću kinetičku energiju pa se prilikom sudara s hladnijim i sporijim molekulama one usporavaju, dok se sporije molekule ubrzavaju i griju. Ovim izmjenama impulsa nastoje se izjednačiti temperature i kinetičke energije molekula. Toplinski tok uvijek ide u smjeru temperaturnog pada.



Slika 2.1 Provođenje topline kroz krutu stijenku

Na slici 2.1 prikazano je stacionarno provođenje topline kroz krutu, ravnu stijenku. Ovakva izmjena topline opisuje se Fourierovim zakonom provođenja topline koji se izražava kao:

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

gdje je:

\dot{Q} – izmijenjeni toplinski tok [W]

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

δ – debljina stijenke [m]

F – površina izmjene topline [m²]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti (koeficijent provođenja topline) [W/mK]

Toplina izmijenjena u vremenu računa se kao umnožak toplinskog toka i vremena τ [s]:

$$Q = \dot{Q} \cdot \tau \text{ [J]} \quad (2.2)$$

Toplinski tok može se izraziti po jedinici površine. Tada se radi o gustoći toplinskog toka koja se računa kao:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{F} = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.3)$$

Toplinski otpor W računa se kao:

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

Specifični toplinski otpor:

$$w = W \cdot F = \frac{\delta}{\lambda} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (2.5)$$

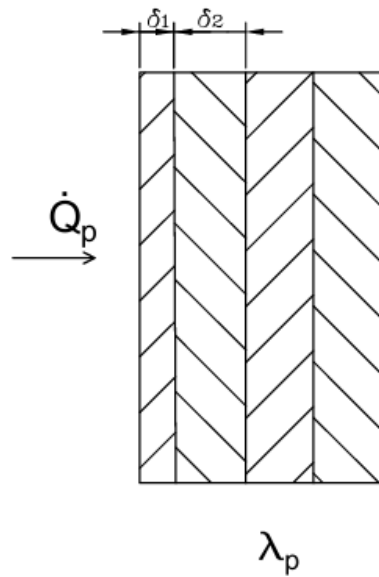
Koeficijent toplinskog otpora glasi:

$$\omega = \frac{W \cdot F}{\delta} = \frac{1}{\lambda} \text{ [mK/W]} \quad (2.6)$$

Toplinska vodljivost L recipročna je vrijednost toplinskog otpora i glasi:

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

Stijenka kroz koju se provodi toplina može biti sastavljena iz više slojeva od različitih materijala. S obzirom na smjer toplinskog toka u odnosu na slojeve, dijelimo ih na slučajeve kada toplinski tok ide poprečno na slojeve i kada toplinski tok ide uzduž slojeva.



Slika 2.2 Toplinski tok poprečno na slojeve stijenke

Ukoliko su slojevi stijenke poredani kao na slici 2.2, toplinski se otpori zbrajaju, čime se dobiva ukupni otpor W_p , na sljedeći način:

$$W_p = \sum_{i=1}^n W_i = \frac{\delta_1}{\lambda_1 \cdot F} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 \cdot F} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n \cdot F} = \frac{\delta_1 \cdot \omega_1 + \delta_2 \cdot \omega_2 + \dots + \delta_n \cdot \omega_n}{F} \text{ [K/W]} \quad (2.8)$$

Toplinski tok poprečno na slojeve \dot{Q}_p računa se kao:

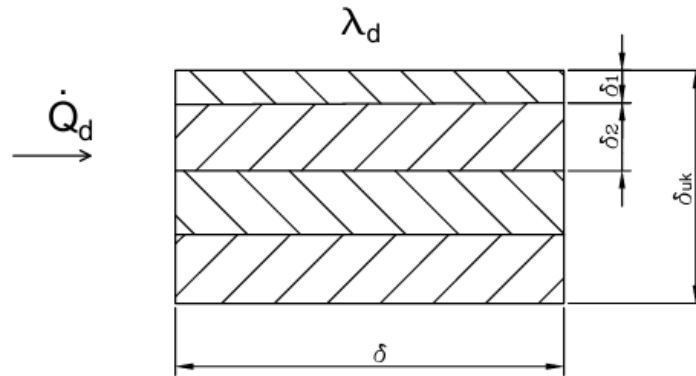
$$\dot{Q}_p = (t_1 - t_2) \cdot \frac{F}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (2.9)$$

Prosječni koeficijent toplinskog otpora glasi:

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

Prosječni koeficijent toplinske vodljivosti tada iznosi:

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



Slika 2.3 Toplinski tok uzduž slojeva stijenke

Ukoliko su slojevi poredani kao na slici 2.3, zbrajaju se toplinske vodljivosti:

$$L_d = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \cdot F_i}{\delta} \quad (2.12)$$

Prosječni koeficijent toplinske vodljivosti je tada:

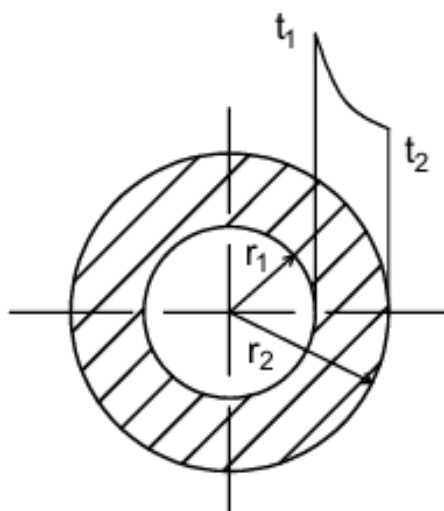
$$\lambda_d = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \quad (2.13)$$

Toplinski tok duž slojeva glasi:

$$\dot{Q}_d = \frac{\lambda_d \cdot (t_1 - t_2)}{\delta} \quad (2.14)$$

S obzirom na to da se kod toplinskog toka uzduž slojeva zbrajaju toplinske vodljivosti, može se zaključiti kako je prosječni koeficijent toplinske vodljivosti uzduž slojeva veći od prosječnog koeficijenta toplinske vodljivosti poprečno na slojeve:

$$\lambda_d > \lambda_p \quad (2.15)$$



Slika 2.4 Provođenje topline kroz stijenku cijevi

Ukoliko se toplina provodi kroz stijenku cijevi, kako je prikazano na slici 2.4, toplinski tok određuje se kao:

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \text{ [W]} \quad (2.16)$$

gdje je:

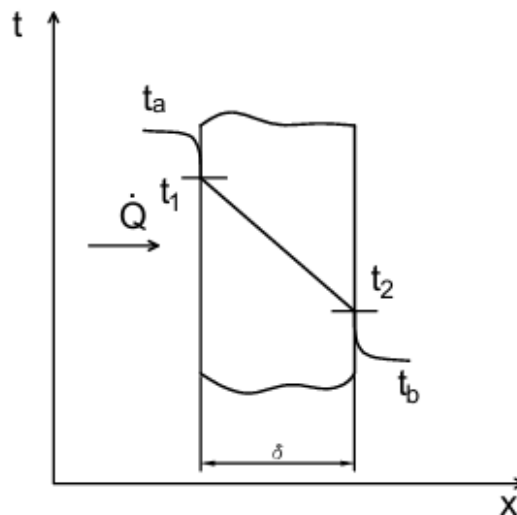
L – duljina cijevi [m]

r_1 – unutarnji polumjer cijevi [m]

r_2 – vanjski polumjer cijevi [m]

2.1.2. Prijelaz topline konvekcijom

Konvekcija je izmjena topline između fluida i krute stijenke. Izmjena topline odvija se u smjeru temperaturnog pada. Na slici 2.5 prikazana je izmjena topline konvekcijom gdje topliji fluid s lijeva predaje toplinu konvekcijom na stijenku. S desne strane, toplija stijenka predaje toplinu konvekcijom hladnijem fluidu.



Slika 2.5 Prijelaz topline konvekcijom

Ukoliko je strujanje fluida izazvano samom izmjenom topline, pri kontaktu fluida i stijenke različitih temperatura, čestice na toplijoj stijenci se griju čime im se gustoća smanjuje, što za posljedicu ima njihovo podizanje uvis. Tada se radi o slobodnoj ili prirodnoj konvekciji. U slučaju kada je strujanje nametnuto uvjetima izvana, kao što su pumpa ili ventilator, radi se o prisilnoj ili nametnutoj konvekciji koja ne ovisi o izmjeni topline.

Prijenos topline konvekcijom opisuje se kroz Oberbeckov matematički model koji uključuje diferencijalne jednadžbe strujanja i prijelaza topline i početne i rubne uvjete. Diferencijalne jednadžbe strujanja i prijelaza topline koje se postavljaju jesu jednadžba kontinuiteta (jednadžba očuvanja mase), Navier-Stokesove jednadžbe (jednadžbe očuvanja količine gibanja) i jednadžba očuvanja energije.

Oberbeckov matematički model može se rješavati analitičkim i numeričkim putem. Analitički pristup služi za jednostavnije geometrije i daje točno rješenje. Dobiveno rješenje je funkcija, to jest dobiva se rješenje varijabli u svim točkama domene. S druge strane, numerički pristup služi za složene geometrije, dobiva se približno točno rješenje te je to rješenje varijabli dobiveno samo u zadanim čvorovima domene. Rješavanjem navedenog matematičkog modela dobivaju se raspodjele brzina, tlakova i temperatura za dani problem.

Kako diferencijalne jednadžbe strujanja i izmjene topline nisu jednostavne za riješiti, primjenjuje se teorem sličnosti. Spoznaje stečene na postojećim uređajima mogu se primijeniti na nove izvedbe uređaja ako su rješenja diferencijalnih jednadžbi jednaka, te se diferencijalne jednadžbe prevode u bezdimenzijski oblik.

Toplinski tok izmijenjen konvekcijom definira se prema Newtonovoj jednadžbi prijelaza topline konvekcijom:

$$\dot{Q} = \alpha_a \cdot F \cdot (t_a - t_1) \text{ [W]} \quad (2.17)$$

to jest:

$$\dot{Q} = \alpha_b \cdot F \cdot (t_2 - t_b) \text{ [W]} \quad (2.18)$$

gdje je:

F – površina izmjene topline [m^2]

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

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

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

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

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

Izmijenjena toplina računa se kao umnožak toplinskog toka i vremena τ [s]:

$$Q = \dot{Q} \cdot \tau \text{ [J]} \quad (2.19)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom ovisi o načinu strujanja fluida i o fizikalnim svojstvima fluida. Koeficijent prijelaza topline konvekcijom nije direktno sadržan u diferencijalnim jednadžbama strujanja i prijelaza topline, ali je ovisan o fizikalnim veličinama o kojima ovise i rješenja diferencijalnih jednadžbi.

Eksperimentalnim putem određeni su izrazi za proračun bezdimenzijske značajke koja sadrži koeficijent prijelaza topline konvekcijom, za različite uvjete prijenosa topline i strujanja. Tako se ta Nusseltova značajka definira kao:

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

za ploče, gdje je l [m] duljina ploče, dok je za cijevi promjera d [m] izraz sljedeći:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (2.21)$$

Ova značajka u svim tim izrazima ovisi o tri bezdimenzijske veličine, koje su redom: Prandtlova, Reynoldsova i Grashofova značajka.

Prandtlova značajka računa se kao:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} \quad (2.22)$$

gdje je:

ν – kinematički viskozitet [m^2/s]

a – koeficijent temperaturne vodljivosti [m^2/s]

η – dinamička viskoznost [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

c – specifični toplinski kapacitet [J/kgK]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

Reynoldsova značajka definira se kao:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (2.23)$$

ukoliko se topline izmjenjuje konvekcijom sa stijenkom ploče, to jest

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (2.24)$$

ukoliko se topline izmjenjuje konvekcijom sa stijenkom cijevi, gdje je w [m/s] brzina strujanja fluida.

Grashofova značajka računa se kao:

$$\text{Gr} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \cdot \frac{g_x \cdot l^3}{\nu^2} \quad (2.25)$$

ukoliko se topline izmjenjuje konvekcijom sa stijenkom ploče, to jest

$$\text{Gr} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \cdot \frac{g_x \cdot d^3}{\nu^2} \quad (2.26)$$

ukoliko se topline izmjenjuje konvekcijom sa stijenkom cijevi, gdje je:

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

g_x – gravitacijsko ubrzanje [m/s^2]

Za izrazito prisilno strujanje Nusseltova značajka ovisi samo o Prandtlovoj i Reynoldsovoj značajci, zbog toga što se sile uzgona mogu zanemariti s obzirom da sile tromosti prevladavaju.

$$\text{Nu} = \text{Nu}(\text{Pr}, \text{Re}) \quad (2.27)$$

Kod čiste slobodne konvekcije zanemaruje se Reynoldsova značajka jer je brzina strujanja jednaka nuli.

$$Nu = Nu(Pr, Gr) \quad (2.28)$$

Kod prisilnog, turbulentnog strujanja fluida u cijevi, Nusseltova značajka računa se prema izrazu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = 0,0039 \cdot Pr \cdot \frac{Re^{3/4}}{1 + A \cdot Re^{-1/8} \cdot (Pr - 1)} \quad (2.29)$$

gdje je koeficijent A za kapljevine s $Pr > 1$ jednak $A = 1,5 \cdot Pr^{-1/8}$, dok je za plinove $A = 1,74$.

Kod laminarnog strujanja fluida u cijevi, Nusseltova značajka računa se prema izrazu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = 3,65 + 0,08 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \quad (2.30)$$

Ukoliko se radi o cijevima koje nisu kružnog poprečnog presjeka, potrebno je promjer cijevi zamijeniti s ekvivalentnim (hidrauličkim) promjerom, koji se računa kao:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot F}{O} \quad (2.31)$$

gdje je:

F – površina poprečnog presjeka cijevi [m^2]

O – opseg koji oplakuje struja [m]

Za izmjenjivač topline sa snopom cijevi u bubnju, ekvivalentni promjer je:

$$d_{ek} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} \quad (2.32)$$

gdje je:

D_u – unutarnji promjer bubnja [m]

n – broj cijevi u cijevnom snopu

d_v – vanjski promjer cijevi u cijevnom snopu [m]

2.1.3. Prijelaz topline zračenjem

Izmjena topline zračenjem je izmjena topline putem elektromagnetskih valova između stijenki koje nisu u međusobnom dodiru. Između tih stijenki može biti područje više ili niže temperaturne razine no što su stijenke koje izmjenjuju toplinu. Zračenje, za razliku od provođenja i konvekcije, nije vezano uz tvar.

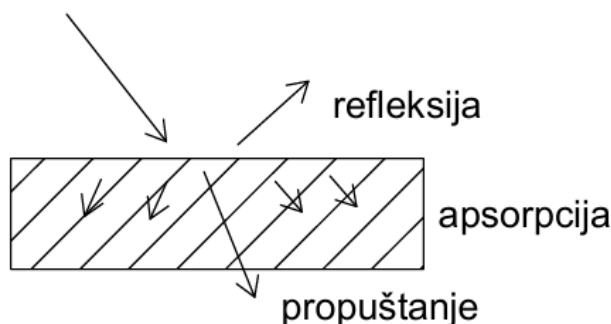
Elektromagnetno zračenje okarakterizirano je valnom duljinom λ [m], frekvencijom f [s^{-1}] i brzinom svjetlosti c [m/s], pri čemu vrijedi:

$$\lambda \cdot f = c \text{ [m/s]} \quad (2.33)$$

Brzina svjetlosti i valna duljina mijenjaju se ovisno o prolasku zračenja kroz razne medije, dok frekvencija ostaje ista.

Temperaturno zračenje jednoznačno je određeno temperaturom te ovisi i o karakteristikama površine koja zrači.

Ozračeno tijelo na koje dolazi energija zračenja, dijelom će tu energiju reflektirati od ozračene površine, apsorbirati pri prolazu kroz tijelo, a dio će se propustiti kroz samo tijelo. Na slici 2.5 prikazana je refleksija, apsorpcija i propusnost energije zračenja ozračenog tijela.



Slika 2.6 Energija zračenja koja pristiže na ozračeno tijelo

Pri čemu vrijedi:

$$r + a + d = 1 \quad (2.34)$$

gdje je:

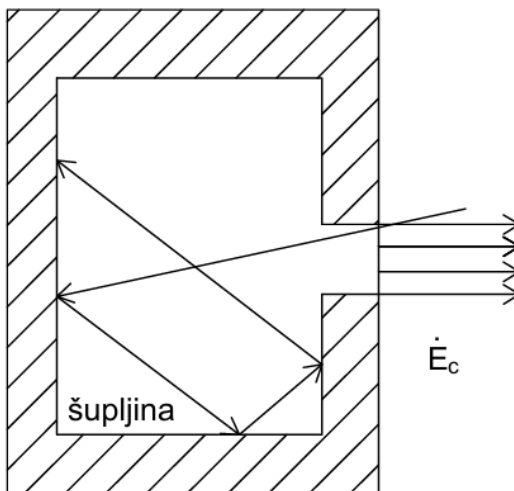
r – koeficijent refleksije

a – koeficijent apsorpcije

d – koeficijent propuštanja

Ako je tijelo apsorbiralo svu energiju te vrijedi da je $a = 1$, $r = 0$ i $d = 0$, govorimo o crnom tijelu. Kod takvog tijela emitirana energija jednaka je dozračenju. Kako je takvo tijelo teoretske naravi te se u prirodi dio energije ne apsorbira već se reflektira ili propušta, takva realna tijela nazivamo sivim tijelima.

Efekt crnog tijela, to jest efekt skoro potpune apsorpcije dozračene energije može se postići eksperimentalnim crnim tijelom kakvo je prikazano na slici 2.7. Šupljina čije se stijenke održavaju na jednolikoj temperaturi mora biti čim veća, a otvor čim manji. Zraka koja uđe kroz otvor u šupljinu dijelom se apsorbira na suprotnoj stijenci, dok se dijelom više puta reflektira o stijenke šupljine, čime se postiže gotovo potpuna apsorpcija dozračene energije.



Slika 2.7 Zračenje iz šupljine

Iz malog otvora pri tome izlazi zračenje koje ima svojstva crnog zračenja.

Odzračena energija crnog tijela opisuje se Stefan-Boltzmannovim zakonom koji glasi:

$$\dot{E}_c = \sigma \cdot T^4 \quad (2.35)$$

gdje je:

\dot{E}_c – odzračena energija crnog tijela [W/m^2]

σ – univerzalna konstanta zračenja [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]

T – termodinamička temperatura [K]

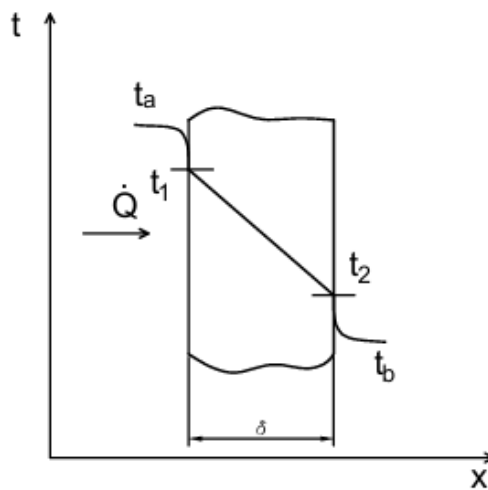
Ovaj se izraz za praktične proračune transformira kako slijedi:

$$\dot{E}_c = C_c \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (2.36)$$

gdje je C_c konstanta zračenja crnog tijela koja ima vrijednost $C_c = 5,667 \frac{\text{W}}{\text{m}^2(100\text{K})^4}$.

2.2. Prolaz topline

Prolaz topline je izmjena topline između dva fluida koja su odijeljena krutom stijenkom. Kao takav, prolaz topline sastoji se od dva osnovna oblika izmjene topline, a to su konvekcija i provođenje. Na slici 2.8 prikazana je izmjena topline prolazom topline kroz ravnu stijenku. Toplina se konvekcijom predaje od toplijeg fluida na površinu stijenke s lijeve strane. Provođenjem se toplina prenosi kroz stijenku, zatim se toplina konvekcijom predaje s desne površine stijenke hladnijem fluidu.



Slika 2.8 Prolaz topline

Toplinski tok koji se izmjenjuje prolazom topline jednak je:

$$\dot{Q} = F \cdot k \cdot (t_a - t_b) \text{ [W]} \quad (2.37)$$

gdje je:

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

$(t_a - t_b)$ – razlika temperatura dvaju fluida [K , $^{\circ}\text{C}$]

F – površina izmjene topline [m^2]

Ukupni toplinski otpor u ovakvom je slučaju suma svih toplinskih otpora, to jest otpora prijelazu topline konvekcijom s fluida na lijevu stranu stijenke, otpora provođenju topline kroz samu stijenku te otpora prijelazu topline konvekcijom s desne strane stijenke na fluid. Ukupni toplinski otpor tada iznosi:

$$W = \frac{1}{F} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b} \right) [\text{K/W}] \quad (2.38)$$

Ako se provođenje topline, kao dio mehanizma izmjene topline prolazom topline, odvija kroz višeslojnu stijenku, ukupni toplinski otpor bit će:

$$W = \frac{1}{F} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b} \right) [\text{K/W}] \quad (2.39)$$

Koristeći se ovim relacijama, izmijenjeni toplinski tok može se računati i kao:

$$\dot{Q} = \frac{(t_a - t_b)}{W} [\text{W}] \quad (2.40)$$

Usporedimo li izraz (2.37) i (2.40) dobiva se kako je:

$$k = \frac{1}{F \cdot W} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.41)$$

U ovaj izraz može se uvrstiti izraz (2.39) za ukupni toplinski otpor, čime se dobiva konačan izraz za koeficijent prolaza topline ukoliko je stijenka sastavljena iz više slojeva:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b} \right)} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.42)$$

Navedeni izraz vrijedi prilikom prolaza topline kroz ravnu stijenku. Ukoliko se radi o prolazu topline kroz stijenku cijevi, kao na slici 2.9, izraz za izmijenjeni toplinski tok je:

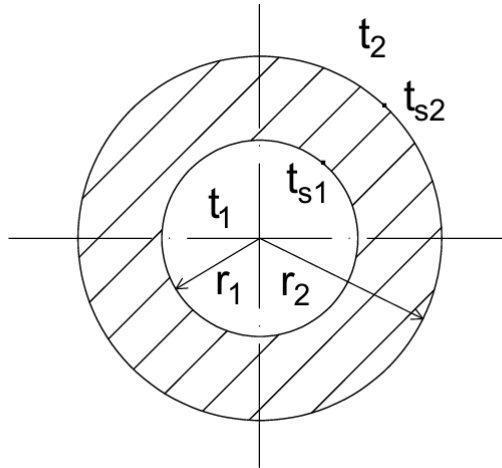
$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \cdot \alpha_2}} \cdot (t_1 - t_2) [\text{W}] \quad (2.43)$$

gdje je:

L – duljina cijevi [m]

r_1 – unutarnji polumjer cijevi [m]

r_2 – vanjski polumjer cijevi [m]



Slika 2.9 Prolaz topline kroz stijenku cijevi

Toplina se izmjenjuje konvekcijom s fluida s unutarnje strane cijevi na stijenku cijevi, zatim se provođenjem izmjenjuje kroz stijenku cijevi te na posljatku konvekcijom s vanjske stijenke cijevi na okolni fluid.

Ukoliko je stijenka sastavljena od više slojeva, tada je koeficijent prolaza topline jednak:

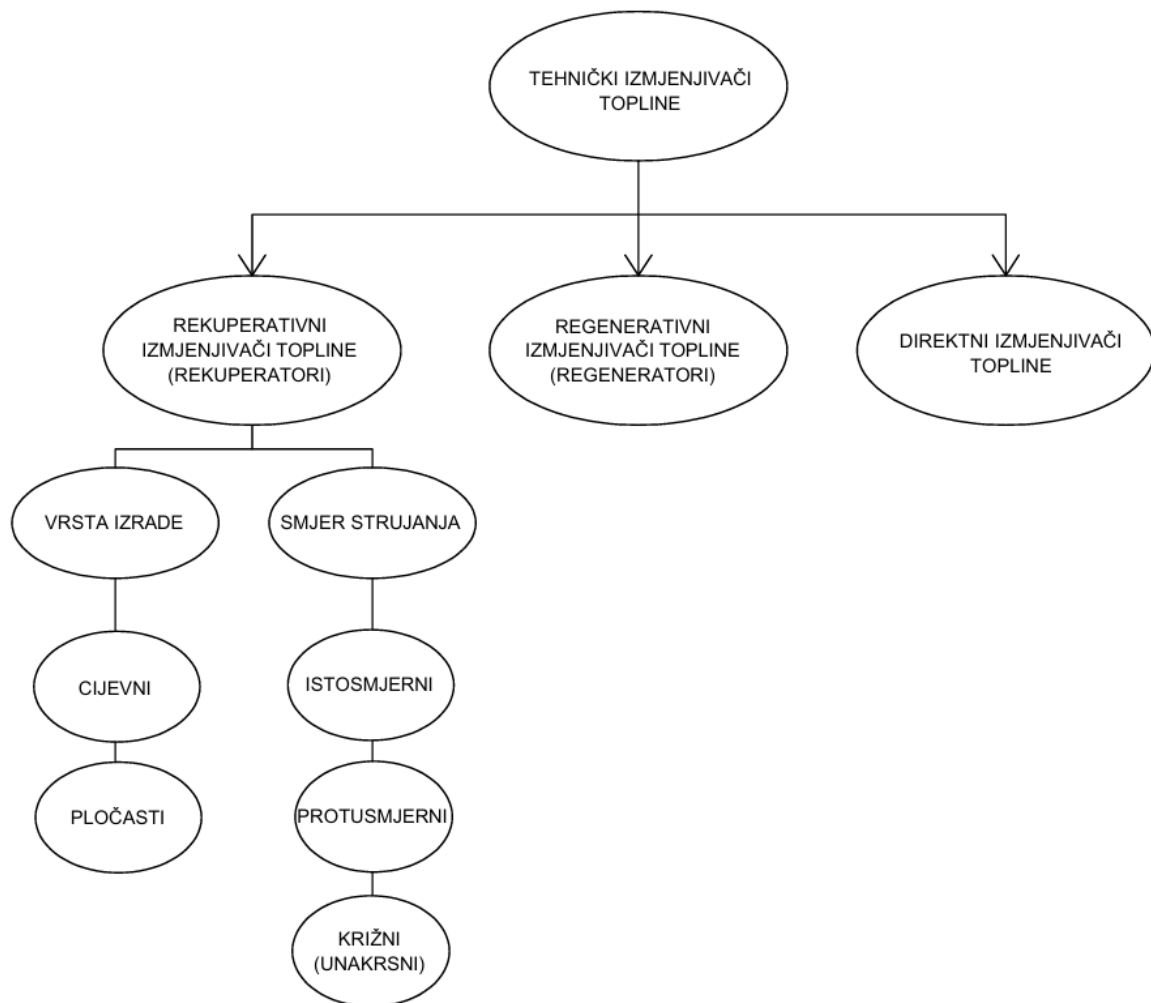
$$r \cdot k = \frac{1}{\frac{1}{r_u \cdot \alpha_u} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{r_v \cdot \alpha_v}} \quad (2.44)$$

gdje se indeks u odnosi na unutarnju stranu cijevi, a indeks v na vanjsku stranu cijevi.

Kod proračuna koeficijenta prolaza topline mjerodavan je onaj polumjer gdje je slabiji prijelaz topline, pa je tako: $r = r_u$ za $\alpha_u < \alpha_v$ te $r = r_v$ za $\alpha_v < \alpha_u$.

3. TEHNIČKI IZMJENJIVAČI TOPLINE

Tehnički izmjenjivači topline dijele se na rekuperativne izmjenjivače topline (rekuperatore), regenerativne izmjenjivače topline (regeneratore) i direktne izmjenjivače topline. Prema vrsti razdjelne stijenke, to jest prema izradi, rekuperativni izmjenjivači topline dijele se na cijevne i pločaste. Cijevni rekuperatori mogu biti s i bez pregrada. S obzirom na smjer strujanja fluida, rekuperatori mogu biti istosmjerni, protusmjerni i unakrsni (križni). Na slici 3.1 prikazana je glavna podjela izmjenjivača topline.



Slika 3.1 Podjela tehničkih izmjenjivača topline

3.1. Rekuperativni izmjenjivači topline

Kod rekuperativnih izmjenjivača topline, fluidi različitih temperatura koji struje unutar izmjenjivača topline odvojeni su krutom stijenkom. Izmjena topline vrši se prolazom topline, što uključuje izmjenu topline konvekcijom s fluida na površinu stijenke, provođenje kroz stijenku te izmjenu topline konvekcijom s površine stijenke na fluid. Ovisno o smjeru strujanja fluida, dijele se na istosmjerne, protusmjerne i unakrsne ili križne. Ovisno o vrsti izrade dijele se na cijevne i pločaste.

3.1.1. Podjela rekuperatora prema smjeru strujanja fluida

Rekuperativni izmjenjivači topline mogu biti istosmjerni, protusmjerni i unakrsni ili križni rekuperativni izmjenjivači topline.

Kod istosmjernih izmjenjivača topline struje između kojih se vrši izmjena topline su paralelne i teku u istom smjeru. Izmjena topline u takvom izmjenjivaču može se opisati jednadžbom toplinske bilance i jednadžbom prolaza topline.

Jednadžba toplinske bilance, to jest jednakost izmijenjenih toplinskih tokova 1 i 2, glasi:

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

Jednadžba prolaza topline glasi:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m \text{ [W]}\tag{3.2}$$

gdje je:

G_1 – maseni protok slabije struje [kg/s]

G_2 – maseni protok jače struje [kg/s]

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

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

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

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

t_2' – ulazna temperatura jače struje [$^{\circ}\text{C}$, K]

t_2'' – izlazna temperatura jače struje [$^{\circ}\text{C}$, K]

W_1 – toplinski kapacitet slabije struje [W/K]

W_2 – toplinski kapacitet jače struje [W/K]

k – koeficijent prolaza topline [W/m²K]

F_0 – površina izmjene topline [m²]

Δt_m – srednja logaritamska razlika temperatura [$^{\circ}\text{C}$, K], to jest srednja temperaturna razlika duž površine izmjene topline.

Zadani indeksi dodijeljeni su dogovorno, pa je tako slabija struja, to jest struja manjeg toplinskog kapaciteta W , označena indeksom 1, a jača struja, to jest struja većeg toplinskog kapaciteta W , indeksom 2. Ovakav način označavanja biti će važan kod primjene dijagrama za proračun izmjenjivača topline.

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se prema izrazu:

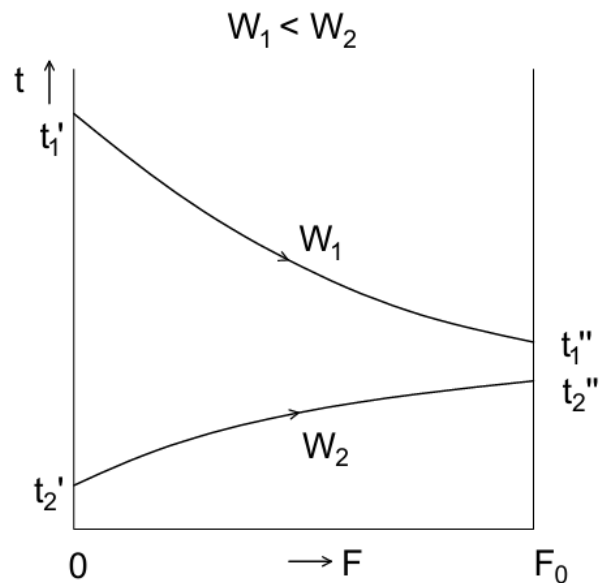
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \text{ [}^{\circ}\text{C, K]} \quad (3.3)$$

gdje je:

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

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

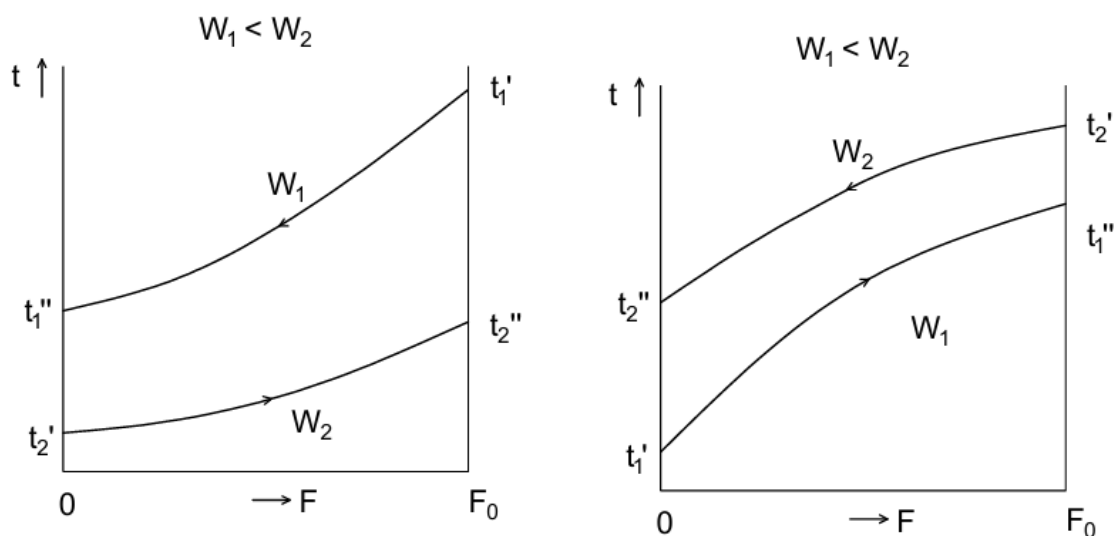
Temperaturne promjene unutar istosmjernog izmjenjivača topline mogu se prikazati u pripadajućem dijagramu, kao što je prikazano na slici 3.2. Krivulja promjene temperature struje slabijeg toplinskog kapaciteta W_1 je strmija jer joj se temperatura mijenja više nego jačoj struji. Sukladno tome, krivulja promjene temperature struje jačeg toplinskog kapaciteta W_2 je manje strma jer joj se temperatura manje mijenja. U prikazanom se slučaju struja slabijeg toplinskog kapaciteta W_1 hladi, dok se struja jačeg toplinskog kapaciteta W_2 grije.



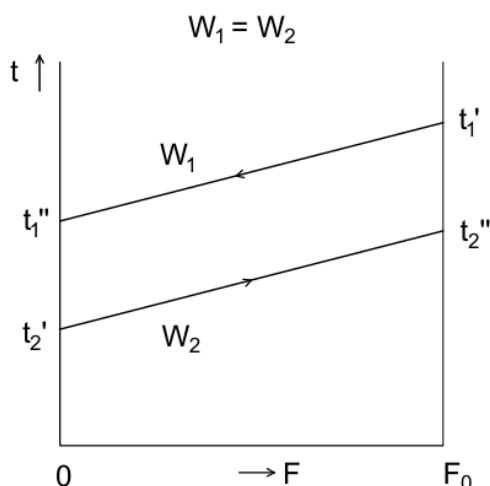
Slika 3.2 Temperaturne promjene u istosmjernom rekuperativnom izmjenjivaču topline

Kod istosmjernog toka izlazna temperatura toplijeg fluida je uvijek veća od izlazne temperature hladnijeg fluida.

Kod protusmjernog izmjenjivača topline, struje koje izmjenjuju toplinu su paralelne, no teku u suprotnim smjerovima. Razlikujemo slučajeve kada se hladi slabija struja W_1 i kada se hladi jača struja W_2 . Temperaturne promjene u ovim slučajevima prikazane su na slici 3.3. Na slici 3.4 prikazan je slučaj kada obje struje W_1 i W_2 imaju jednake toplinske kapacitete.



Slika 3.3 Temperaturne promjene u protusmjernom rekuperatoru kada se hlade slabija i jača struja

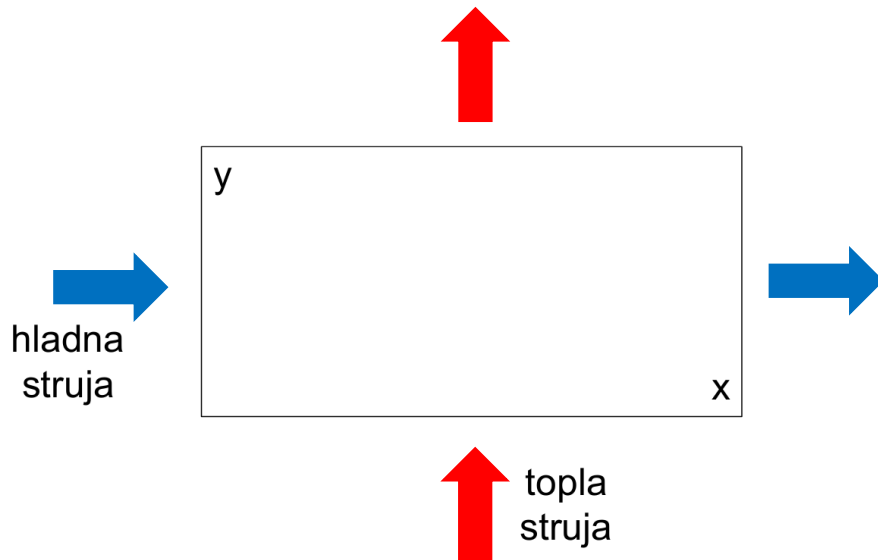


Slika 3.4 Temperaturne promjene u protusmjernom rekuperatoru kada obje struje imaju jednake toplinske kapacitete

Kod protusmjernog strujanja izlazna temperatura hladnijeg fluida može biti veća od izlazne temperature toplijeg fluida. Zbog te je činjenice protusmjerni tok povoljniji od istosmjernog. Za neke zadane pogonske uvjete, protusmjerni tok traži najmanju površinu izmjenjivača topline, dok istosmjerni traži najveću. Ovo je još jedan razlog zašto je protusmjerni tok povoljniji.

U slučaju kada struje koje izmjenjuju toplinu imaju takav tok da se međusobno križaju, riječ je o križnom ili unakrsnom rekuperatoru. Kod istosmjernog i protusmjernog rekuperatora temperature struja ovisne su o samo jednoj prostornoj koordinati, a temperature struja kod križnog rekuperatora funkcija su dviju prostornih koordinata x i y . Također, temperature na izlaznim rubovima izmjenjivača topline nisu konstantne, kao što je to slučaj kod istosmjernog i protusmjernog rekuperatora.

Tok struja u križnom rekuperatoru prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5 Tok strujanja kroz križni rekuperator

Iskoristivost topline ε je omjer stvarno postignute promjene temperature slabije struje $t_1' - t_1''$ naspram razlike ulaznih temperatura $t_1' - t_2'$ dovedenih struja. Iskoristivost topline ε parametar je pomoću kojega vršimo usporedbu izmjenjivača topline.

$$\varepsilon = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} \quad (3.4)$$

Najveću iskoristivost topline imaju protusmjerni rekuperatori, a najmanju istosmjerni rekuperatori.

U slučaju da je omjer toplinskih kapaciteta $\frac{W_1}{W_2} = 0$ iskoristivosti topline jednake su za protusmjerni, istosmjerni i križni rekuperator.

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline omjer je između toplinskog toka koji se stvarno izmjenjuje kod konačne površine F_0 i maksimalno mogućeg toplinskog toka koji bi se izmijenio u takvom izmjenjivaču kojemu bi njegova površina težila u beskonačnost $F_0 \rightarrow \infty$:

$$\eta = \frac{\dot{Q}(F_0)}{\dot{Q}(F_0 \rightarrow \infty)} \quad (3.5)$$

Stupanj djelovanja izmjenjivača topline ovisi o tipu rekuperatora, tako za protusmjerni i križni rekuperator vrijedi:

$$\eta = \frac{\dot{Q}(F_0)}{\dot{Q}(F_0 \rightarrow \infty)} = \frac{W_1 \cdot \phi \cdot (t_1' - t_2')}{W_1 \cdot (t_1' - t_2')} = \phi_{p,k} = \varepsilon_{p,k} \quad (3.6)$$

Za beskonačno veliku površinu istosmjernog izmjenjivača topline, uspostavila bi se zajednička izlazna temperatura obje struje t'' . Stupanj djelovanja je tada:

$$\eta = \frac{\dot{Q}(F_{oi})}{\dot{Q}(F_{oi} \rightarrow \infty)} = \frac{W_1 \cdot (t'_1 - t''_1)}{W_1 \cdot (t'_1 - t'')} = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t''} \quad (3.7)$$

Iz bilance topline može se odrediti izlazna temperatura t'' :

$$W_1 \cdot (t'_1 - t'') = W_2 \cdot (t'' - t'_2) \quad (3.8)$$

iz čega slijedi:

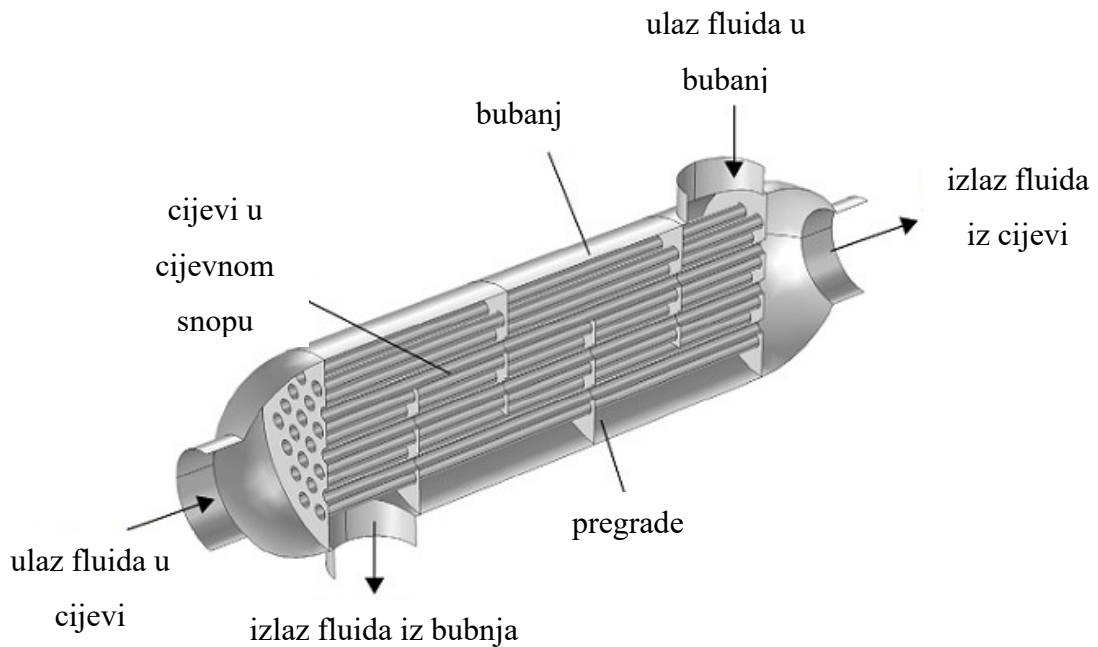
$$t'' = \frac{W_1 \cdot t'_1 + W_2 \cdot t'_2}{W_1 + W_2} \quad (3.9)$$

Stupanj djelovanja istosmjernog rekuperatora je tada:

$$\eta_i = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2} = \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \cdot \phi_i \quad (3.10)$$

3.1.2. Podjela rekuperatora prema vrsti izrade

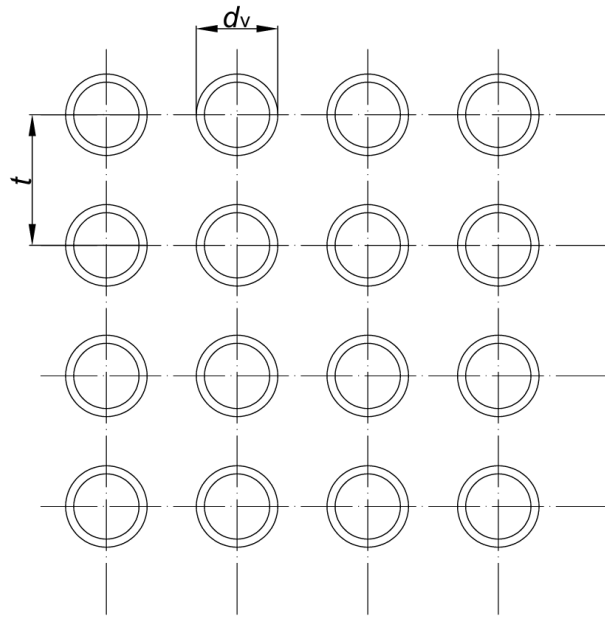
Prema vrsti razdjelne stijenke, to jest prema izradi, rekuperativni izmjenjivači topline dijele se na cijevne i pločaste. Kod cijevnih izmjenjivača topline, koji se sastoje od cijevnog snopa u bubnju, jedan fluid struji unutar cijevi u cijevnom snopu, a drugi oko cijevi. Izmjenjivači topline s cijevnim snopom sastavljeni su od tri osnovne cjeline, a to su vanjsko kućište izrađeno od čelika ili lijevanog željeza, unutarnjeg cijevnog snopa i komore za ulaz i izlaz fluida. Cijevni rekuperatori mogu biti u izvedbi s pregradama i bez pregrada u bubnju. Izgled cijevnog izmjenjivača topline s pregradama prikazan je na slici 3.6.



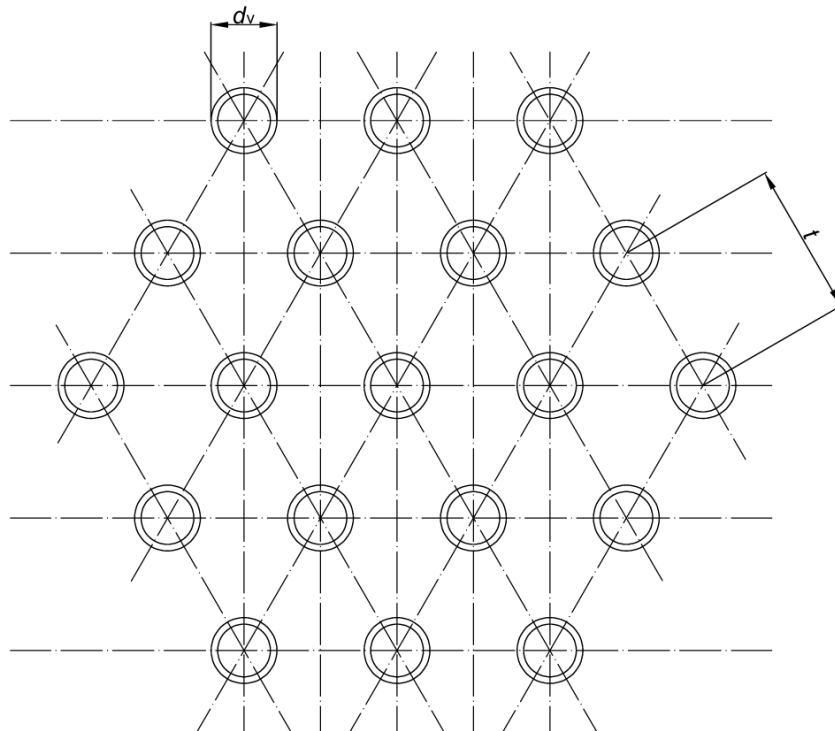
Slika 3.6 Cijevni izmjenjivač topline s pregradama [6]

Ako se radi o izmjenjivaču topline bez pregrada, fluid struji paralelno s osi cijevi, dok kod izmjenjivača topline s pregradama fluid struji naizmjenice uzdužno i poprečno u odnosu na os cijevi. Dodavanjem pregrada produžava se put strujanja fluida i postiže se turbulencija fluida, čime se pospješuje izmjena topline. U praksi se najčešće susreću segmentne pregrade, no mogu biti izvedene i u obliku kružnih prstenova ili kružnih ploča.

Cijevi se u bubnju mogu smjestiti paralelno ili šahovski. Raspored cijevi kod paralelnog smještaja prikazan je na slici 3.7. Šahovski raspored cijevi tvoren je tako da cijevi tvore pravilne šesterokute, kako je prikazano na slici 3.8.



Slika 3.7 Paralelni smještaj cijevi



Slika 3.8 Šahovski raspored cijevi

gdje t [m] predstavlja korak cijevi, a d_v [m] vanjski promjer cijevi.

Koliko će se cijevi moći smjestiti unutar bubnja kod šahovskog rasporeda, ovisi o broju upisanih šesterokuta m . Broj cijevi u dijagonali računa se kao:

$$n' = 2 \cdot m + 1 \tag{3.11}$$

Dok se ukupan broj cijevi računa kao:

$$n = 1 + 3 \cdot m + 3 \cdot m^2 \quad (3.12)$$

Kada je odabran broj cijevi, može se odrediti promjer samoga bubnja D [m]:

$$D = b + d_v + 2 \cdot e \quad (3.13)$$

gdje je:

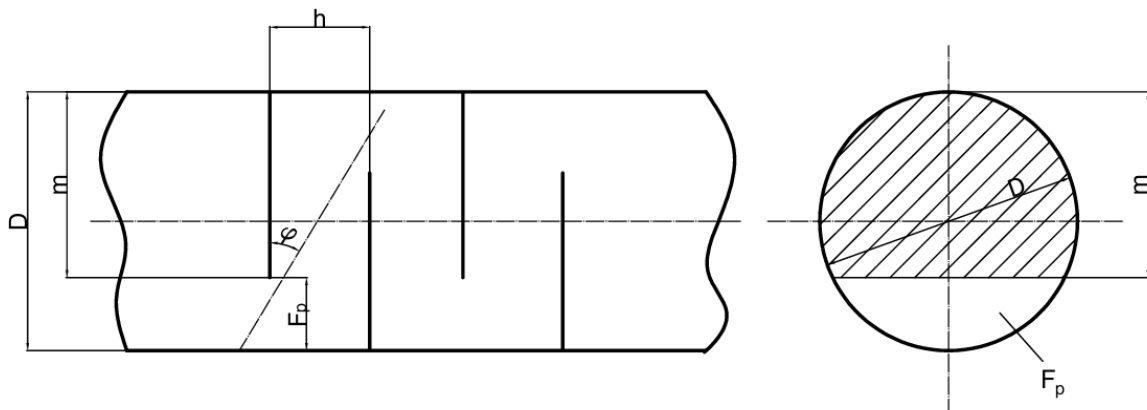
d_v – vanjski promjer cijevi [m]

b – duljina dijagonale šesterokuta [m] koja se računa izrazom:

$$b = (n' - 1) \cdot t \quad (3.14)$$

t – razmak između osi cijevi [m] koji se odabire u rasponu $t = (1,3...1,5) \cdot d_v$

e – udaljenost cijevi od kraja bubnja [m] koja se odabire kao $e > 6$ mm.



Slika 3.9 Segmentne pregrade

Proračun dimenzija segmentnih pregrada, kako su prikazane na slici 3.9, vrši se pomoću sljedećih izraza:

visina pregrada računa se kao:

$$m = (0,6...0,8) \cdot D \quad (3.15)$$

udaljenost pregrada:

$$h = \frac{F_p \cdot t}{D \cdot (t - d_v)} \quad (3.16)$$

gdje je F_p površina poprečnog presjeka kroz koji struji fluid [m²].

Kut strujanja fluida između dvije pregrade (kut strujanja fluida kroz plašt) φ određuje se kao:

$$\tan\varphi = \frac{h}{m} \quad (3.17)$$

Broj segmenata:

$$n_p = \frac{L}{h} + 1 \quad (3.18)$$

gdje je L duljina izmjenjivača [m].

Za prijelaz topline u plaštu sa segmentnim pregradama koristi se izraz:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{ek}}{\lambda} = K \cdot C \cdot \varepsilon \cdot Re^n \cdot Pr^{0,4} \quad (3.19)$$

Za šahovski raspored cijevi vrijedi da je $n = 0,6$ te $\varepsilon = 0,26$, dok se faktor C računa kao:

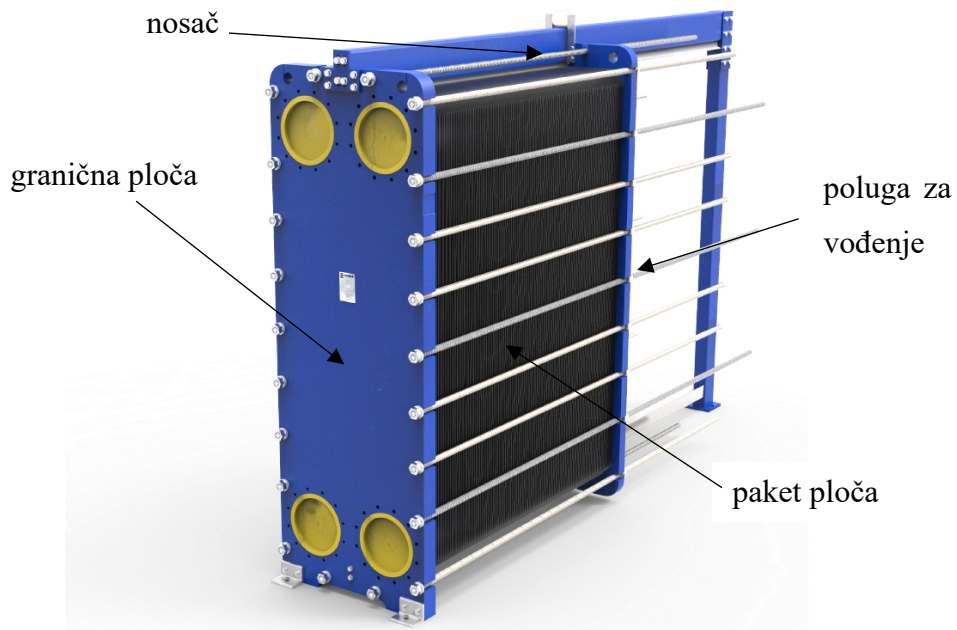
$$C = 1 + 0,1 \cdot \frac{t}{d_v} \quad (3.20)$$

Faktor K funkcija je kuta strujanja fluida kroz plašt φ te se određuje tablično za izračunatu vrijednost prema izrazu (3.17).

Pločasti izmjenjivači topline sastoje se od nosača, poluge za vođenje, paketa ploča i granične ploče. Ovi su izmjenjivači topline kompaktni, održavanje im je jednostavno, a glavna karakteristika im je velika površina izmjene topline u odnosu na mali volumen koji zauzimaju u prostoru, koja se sastoji od velikog broja tankih ploča sakupljenih u paket. Isti fluid struji kroz svaku drugu ploču. Na slici 3.10 prikazan je jedan takav pločasti izmjenjivač topline.

Fluid u pločastom izmjenjivaču topline može strujati u istom ili suprotnom smjeru kroz naredne kanale između ploča. Površina ploča može biti ravna, što je najjednostavnija izvedba, no pogodnija je orebrena izvedba koja pospješuje turbulentno strujanje fluida, čime je izmjena topline bolja. Orebrenja mogu biti različito profilirana, a ukoliko se ploče postavljaju jedna na drugu zakrenute za 180° , dodatno se poboljšava izmjena topline jer se tada profili orebrenja križaju.

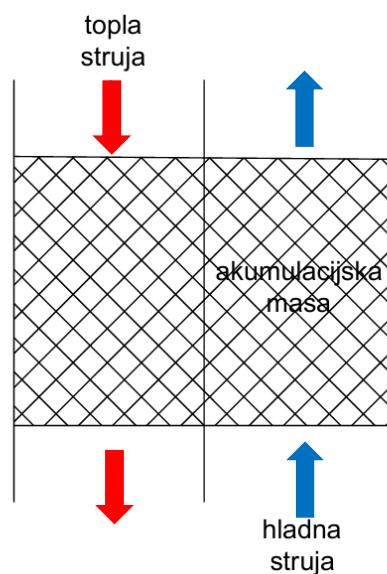
Za izradu ploča često se koristi aluminij i njegove legure, no najbolji materijal za izradu ploča je titan, koji je otporan na agresivne fluide i morsku vodu. Zbog svojih je kvaliteta titan i najskuplji materijal za izradu ploča.



Slika 3.10 Pločasti izmjenjivač topline [7]

3.2. Regenerativni izmjenjivači topline

Regenerativni izmjenjivači topline ili regeneratori su izmjenjivači kod kojih se toplina izmjenjuje između dva plina posredstvom krute mase. Kruta masa predstavlja akumulacijsku masu, dok su plinovi topla i hladna struja. Na slici 3.11 prikazan je uzdužni presjek regenerativnog izmjenjivača topline s ucrtanim smjerovima tople i hladne struje i akumulacijskom masom.



Slika 3.11 Regenerativni izmjenjivač topline

Kod regeneratora topla struja u nekom vremenskom periodu grije akumulacijsku masu koja ima veliki toplinski kapacitet. U sljedećem vremenskom periodu akumulacijska masa toplinu predaje na hladnu struju i pri tome ju zagrijava, a akumulacijska masa se hladi. Period u kojem topla struja predaje toplinu akumulacijskoj masi naziva se topli period, dok se period u kojem akumulacijska masa predaje toplinu hladnoj struji naziva hladni period. Ovakvo zagrijavanje i ohlađivanje akumulacijske mase ponavlja se opetovano u jednakim vremenskim intervalima.

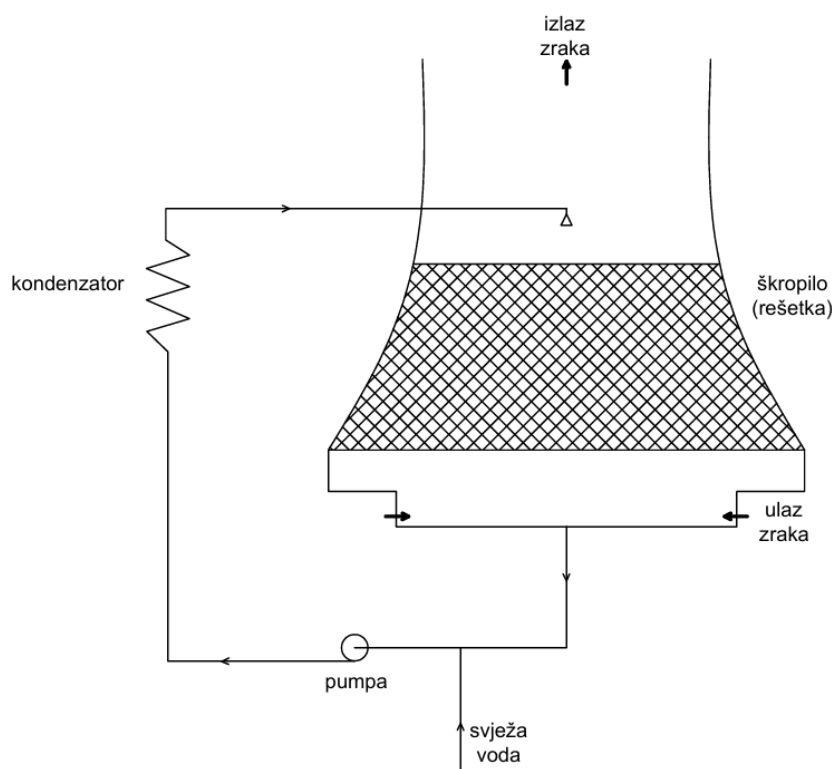
Akumulacijska masa može i rotirati čime se ostvaruje kontinuirani pogon sa samo jednim aparatom, dok bi za kontinuirani pogon kod mirujuće akumulacijske mase bila potrebna dva aparata s prekapčanjem vezana u spregu.

Za razliku od rekuperatora kod kojih su temperature struja funkcija samo prostornih koordinata, kod regeneratora one su funkcija, uz prostorne koordinate, i vremena. Regeneratore također razlikujemo po smjeru strujanja tople naspram hladne struje pa tako razlikujemo protusmjerni i istosmjerni regeneratori. Prema temperaturnom području rada razlikujemo visokotemperaturne regeneratore s primjenom u industriji čelika, srednjetemperaturne regeneratore koji se upotrebljavaju u rashladnoj tehnici i kao sušaći zraka i niskotemperaturne regeneratore koji se koriste za ukapljivanje plinova. Razlikuju se još i suhi i vlažni regeneratori. Kod suhog regeneratora izmjenjivač topline prenosi samo osjetnu toplinu, dok kod vlažnog izmjenjivač topline uz osjetnu toplinu prenosi i latentnu toplinu, to jest pojavljuje se i prijenos tvari u vidu ukapljivanja pare ukoliko temperatura akumulacijske mase za vrijeme grijanja bude niža od temperature rošenja parne faze. Ovakvo izdvajanje vlage ima pozitivan efekt kod ovlaživanja i razvlaživanja u sustavima klimatizacije, dok negativan utjecaj ima kod zagrijača zraka unutar generatora pare. Za zagrijavanje zraka za izgaranje u ložištu upotrebljavaju se dimni plinovi izgaranja. Dimni plinovi izgaranja koji su produkt izgaranja goriva unutar generatora pare u svom sastavu sadrže i sumporne okside. Ukoliko je temperatura stijenke komponenti kotla niža od temperature rosišta pare sumporne kiseline iz dimnih plinova, doći će do kondenzacije pare sumporne kiseline koja na metale djeluje nagrizajuće. Akumulacijska masa može biti higroskopna i nehigroskopna. Ukoliko se prijenos topline i tvari vrši isključivo na površini mase riječ je o nehigroskopnoj masi, a ukoliko postoji difuzija unutar mase riječ je o higroskopnoj masi.

3.3. Direktni izmjenjivači topline

Kod direktnih izmjenjivača topline, izmjena topline između dva fluida vrši se direktnim dodirnom strujom tih fluida u mješalisku. Primjenu ovakvih izmjenjivača topline često susrećemo u vidu rashladnih tornjeva. Na slici 3.12 prikazan je rashladni toranj s njegovim sastavnim dijelovima.

Princip rada je sljedeći: zagrijana voda kroz mlaznicu se raspršuje po toranjskoj ispuni (škropilo, rešetka). U protusmjernu struju zraka koji prolaskom kroz toranjsku ispunu na sebe prihvaća toplinu iz vode kao i dio vlage. Zrak se diže prema gore te izlazi u atmosferu, a ohlađena voda se spušta prema dolje i skuplja u sabirnim bazenima te se ponovno vraća u cirkulacijski krug. Kako dio vode ishlapi, potrebno je tu količinu vode nadomještavati svježom vodom.



Slika 3.12 Rashladni toranj

4. IZMJENA TOPLINE U PROTUSMJERNOM IZMJENJIVAČU TOPLINE SA SNOPIOM CIJEVI

Kroz naredna poglavlja bit će izvršen proračun cijevnog izmjenjivača topline sa snopom cijevi koji se upotrebljava za hlađenje mazivog ulja. Mazivo ulje zadane ulazne temperature 65°C prolazi kroz plašt bubnja i predaje toplinu cijevnom snopu kojim struji rashladna voda ulazne temperature 15°C i time se hladi. Proračuni su izvršeni za 217 i 271 cijev u cijevnom snopu, duljinu izmjenjivača topline od 4 m i 5,5 m te standardne dimenzije cijevi u cijevnom snopu NO20 i NO25. Protok mazivog ulja iznosi $30\text{ m}^3/\text{h}$. Proračuni su izvršeni za protoke rashladne vode od $13\text{ m}^3/\text{h}$, $26\text{ m}^3/\text{h}$, $39\text{ m}^3/\text{h}$, $52\text{ m}^3/\text{h}$ i $65\text{ m}^3/\text{h}$. U proračunu se razmatra šahovski raspored cijevi u cijevnom snopu te protusmjerno strujanje fluida. Također, razmatraju se slučajevi s i bez segmentnih pregrada u bubnju. U slučaju sa segmentnim pregradama potrebno je dimenzionirati pregrade. Potrebno je izračunati i odabrati promjer bubnja. Materijal izrade cijevi i bubnja je nehrđajući čelik.

U svim slučajevima potrebno je izračunati izlazne temperature mazivog ulja i rashladne vode, izmijenjene toplinske tokove i iskoristivosti topline te izvršiti usporedbe dobivenih rezultata.

4.1. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 217 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovom poglavlju izvršit će se proračun izmjene topline unutar izmjenjivača topline sa snopom cijevi za odabrane dimenzije te šahovski raspored cijevi u cijevnom snopu. Proračun će se izvršiti za izmjenjivač topline s i bez segmentnih pregrada. Smjer strujanja fluida u izmjenjivaču topline je protusmjernan. Protok mazivog ulja iznosi $30\text{ m}^3/\text{h}$.

Proračun će se prikazati za volumni protok rashladne vode $13\text{ m}^3/\text{h}$, dok će dobiveni rezultati za protoke rashladne vode $26\text{ m}^3/\text{h}$, $39\text{ m}^3/\text{h}$, $52\text{ m}^3/\text{h}$ i $65\text{ m}^3/\text{h}$ biti dani tablično.

4.1.1. Termodinamički proračun protusmjernog cijevnog izmjenjivača topline bez pregrada

U ovom će se potpoglavljju provesti termodinamički proračun cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi u cijevnom snopu, duljine 4 m, nazivnog promjera cijevi u cijevnom snopu NO20 gdje je vanjski promjer cijevi d_v jednak 25 mm, a unutarnji promjer cijevi d_u je 21 mm, te za protok rashladne vode od 13 m³/h i mazivog ulja od 30 m³/h.

Kako je već napomenuto, oko cijevnog snopa struji mazivo ulje, dok unutar cijevi struji rashladna voda.

Jednadžba toplinske bilance glasi:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = W_2 \cdot (t_2'' - t_2') \quad (4.1)$$

Toplinski kapacitet mazivog ulja određuje se izrazom:

$$W_u = \dot{V}_u \cdot \rho_u \cdot c_u = \frac{30}{3600} \cdot 841,75 \cdot 2039 = 14302,74 \text{ W/K} = W_1 \quad (4.2)$$

Toplinski kapacitet rashladne vode određuje se izrazom:

$$W_w = \dot{V}_w \cdot \rho_w \cdot c_w = \frac{13}{3600} \cdot 998,5 \cdot 4192,25 = 15115,97 \text{ W/K} = W_2 \quad (4.3)$$

Za izračun toplinskih kapaciteta mazivog ulja i rashladne vode iz termodinamičkih tablica potrebno je očitati fizikalna svojstva. Iz termodinamičkih tablica očitana su fizikalna svojstva mazivog ulja za ulaznu temperaturu $t = 65^\circ\text{C}$. Specifični toplinski kapacitet c iznosi 2,039 kJ/kgK, gustoća ρ iznosi 841,75 kg/m³, dinamička viskoznost je $3,84173 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, dok je koeficijent toplinske vodljivosti λ jednak 0,14175 W/mK. Za ulaznu temperaturu rashladne vode $t_w = 15^\circ\text{C}$, očitana su sljedeća fizikalna svojstva. Specifični toplinski kapacitet c iznosi 4,19225 kJ/kgK, gustoća ρ iznosi 998,5 kg/m³, dinamička viskoznost je $1,1406 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, dok je koeficijent toplinske vodljivosti λ jednak 0,587 W/mK. Za nehrđajući čelik očitana je koeficijent toplinske vodljivost λ koji iznosi 55,824 W/mK.

Kako bi dobili koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode, računamo Reynoldsovu značajku:

$$\text{Re} = \frac{w_w \cdot d_u \cdot \rho_w}{\eta_w} = \frac{0,048 \cdot 0,021 \cdot 998,5}{1,1046 \cdot 10^{-3}} = 882,42 < 2300 \quad (4.4)$$

Za rashladnu vodu, iz jednadžbe kontinuiteta, određuje se brzina strujanja vode:

$$w_w = \frac{4 \cdot \dot{V}_w}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{4 \cdot \frac{13}{3600}}{0,021^2 \cdot \pi \cdot 217} = 0,048 \text{ m/s} \quad (4.5)$$

Iz očitanih fizikalnih svojstava računamo Prandtlovu značajku za rashladnu vodu:

$$\text{Pr} = \frac{\eta_w \cdot c_w}{\lambda_w} = \frac{1,1406 \cdot 10^{-3} \cdot 4192,25}{0,587} = 8,15 \quad (4.6)$$

S obzirom da je vrijednost Reynoldsove značajke manja od 2300, strujanje je laminarno pa se za izračun Nusseltove značajke koristi izraz za laminarno strujanje u cijevi:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= \frac{\alpha_w \cdot d_u}{\lambda_w} = 3,65 + 0,08 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \\ &= 3,65 + 0,08 \cdot 882,42^{0,5} \cdot 8,15^{\frac{1}{3}} = 8,43 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Iz čega slijedi koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode:

$$\alpha_w = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_w}{d_u} = \frac{8,43 \cdot 0,587}{0,021} = 235,64 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.8)$$

U slučaju protoka rashladne vode 13 m³/h i 26 m³/h kada smo u području laminarnog strujanja, za izračun Nusseltove značajke koristi se izraz naveden pod (4.7). Za protoke rashladne vode 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h strujanje je prema proračunu turbulentno, pa se Nusseltova značajka računa za prisilno, izobraženo, turbulentno strujanje u cijevi. Za protok rashladne vode 39 m³/h, Nusseltova značajka je:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= \frac{\alpha_w \cdot d_u}{\lambda_w} = 0,00398 \cdot \text{Pr} \cdot \frac{\text{Re}^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot \text{Pr}^{-\frac{1}{8}} \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{8}} \cdot (\text{Pr} - 1)} \\ &= 0,00398 \cdot 8,15 \cdot \frac{2647,26^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 8,15^{-\frac{1}{8}} \cdot 2647,26^{-\frac{1}{8}} \cdot (8,15 - 1)} \\ \text{Nu} &= 29,34 \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\text{Nu} = 29,34 \quad (4.10)$$

Pa je koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode:

$$\alpha_w = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_w}{d_u} = \frac{29,34 \cdot 0,587}{0,021} = 820,12 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.11)$$

Na strani mazivog ulja za proračun koeficijenta prijelaza topline potrebno je odrediti Reynoldsovu značajku:

$$\text{Re} = \frac{w_u \cdot d_{ekv} \cdot \rho_u}{\eta_u} = \frac{0,0528 \cdot 0,0334 \cdot 841,75}{3,84173 \cdot 10^{-3}} = 386,39 \quad (4.12)$$

Brzina strujanja mazivog ulja iznosi:

$$w_u = \frac{4 \cdot \dot{V}_u}{D_u^2 \cdot \pi \cdot n \cdot d_v^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot \frac{30}{3600}}{0,580^2 \cdot \pi \cdot 217 \cdot 0,025^2 \cdot \pi} = 0,0528 \text{ m/s} \quad (4.13)$$

Za proračun koeficijenta prijelaza topline biti će potreban ekvivalentni promjer, koji se određuje kao:

$$d_{ekv} = \frac{D_u^2 - n \cdot d_v^2}{D_u + n \cdot d_v} = \frac{0,580^2 - 217 \cdot 0,025^2}{0,580 + 217 \cdot 0,025} = 0,0334 \text{ m} \quad (4.14)$$

Na strani bubnja potrebno je najprije odrediti promjer bubnja prema izrazima navedenim u poglavlju 3.1.2:

$$t = 1,3 \cdot d_v = 1,3 \cdot 25 = 32,5 \text{ mm} \quad (4.15)$$

$$b = (n' - 1) \cdot t = (17 - 1) \cdot 32,5 = 520 \text{ mm} \quad (4.16)$$

$$e = 12 \text{ mm} \quad (4.17)$$

Slijedi promjer bubnja:

$$D = b + d_v + 2e = 520 + 25 + 2 \cdot 12 = 569 \text{ mm} \quad (4.18)$$

Iz standarda se odabire standardni promjer cijevi NO600, gdje je vanjski promjer cijevi $D_v = 600$ mm, a unutarnji $D_u = 580$ mm. Za odabrani promjer bubnja i zadanu duljinu izmjenjivača, potrebno je provjeriti je li omjer promjera i duljine izmjenjivača u tehnički preporučenom rasponu, koji iznosi $\frac{L}{D} = 5 \dots 10$ [3], pa tako slijedi:

$$\frac{L}{D} = \frac{4}{0,6} = 6,68 \quad (4.19)$$

što zadovoljava navedeni raspon.

Prandtlova značajka za mazivo ulje je:

$$Pr = \frac{\eta_u \cdot c_u}{\lambda_u} = \frac{3,84173 \cdot 10^{-3} \cdot 2039}{0,14175} = 55,26 \quad (4.20)$$

Za izračun koeficijenta prijelaza toplije koristi se izraz za strujanje u plaštu sa snopom cijevi. Nusseltova značajka se tada određuje prema izrazu:

$$Nu = \frac{\alpha_u \cdot d_{ekv}}{\lambda_u} = C \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.21)$$

gdje se koeficijent C računa prema izrazu:

$$C = 0,026 \cdot \frac{t}{d_v} - 0,006 = 0,026 \cdot \frac{32,5}{25} - 0,006 = 0,0278 \quad (4.22)$$

Pa je tako Nusseltova značajka:

$$Nu = \frac{\alpha_u \cdot d_{ekv}}{\lambda_u} = 0,0278 \cdot 386,39^{0,8} \cdot 55,26^{\frac{1}{3}} = 12,43 \quad (4.23)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani mazivog ulja:

$$\alpha_u = \frac{Nu \cdot \lambda_u}{d_{ekv}} = \frac{12,43 \cdot 0,14175}{0,0334} = 52,75 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.24)$$

Kako je $\alpha_u < \alpha_w$, promjer u izrazu (2.44) biti će na strani manjeg koeficijenta prijelaza topline, to jest $r = r_v$:

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{0,025}{2} = 0,0125 \text{ m} \quad (4.25)$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{0,021}{2} = 0,0105 \text{ m} \quad (4.26)$$

Koeficijent prolaza topline iznosi:

$$k = \frac{1}{\frac{r_v}{r_u \cdot \alpha_w} + \frac{r_v \cdot \ln \frac{r_v}{r_u} + 1}{\lambda_{\xi} r_u} + \frac{1}{\alpha_u}} = \frac{1}{\frac{0,0125}{0,0105 \cdot 235,64} + \frac{0,0125}{55,824} \ln \frac{0,0125}{0,0105} + \frac{1}{52,75}} = 41,58 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.27)$$

Površina izmjene topline iznosi:

$$F_0 = n \cdot d_v \cdot \pi \cdot L = 217 \cdot 0,025 \cdot \pi \cdot 4 = 68,17 \text{ m}^2 \quad (4.28)$$

Kako bi se mogli poslužiti dijagramom za protusmjerni izmjenjivač topline, potrebno je izračunati sljedeće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{41,58 \cdot 68,17}{14302,74} = 0,198 \quad (4.29)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{14302,74}{15115,97} = 0,946 \quad (4.30)$$

Pomoću ove dvije karakteristike, iz dijagrama za protusmjerni izmjenjivač topline očitana je vrijednost pogonske karakteristike $\phi_p = 0,166$.

Izlazna temperatura slabije struje određuje se sljedećim izrazom:

$$t_1'' = t_1' - \phi_p \cdot (t_1' - t_2') = 65 - 0,166 \cdot (65 - 15) = 56,7^\circ\text{C} \quad (4.31)$$

Izmijenjeni toplinski tok je:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 14302,74 \cdot (65 - 56,7) = 118715,7 \text{ W} \quad (4.32)$$

Izlazna temperatura jače struje je tada:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{118715,7}{15115,97} + 15 = 22,85^\circ\text{C} \quad (4.33)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura je jednaka:

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 56,7 - 15 = 41,7^\circ\text{C} \quad (4.34)$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 65 - 22,85 = 42,14^\circ\text{C} \quad (4.35)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{41,7 - 42,14}{\ln \frac{41,7}{42,14}} = 41,92^\circ\text{C} \quad (4.36)$$

Jednadžbom prolaza topline možemo provjeriti provedeni proračun:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 41,58 \cdot 68,17 \cdot 41,92 = 118835,2 \text{ W} \quad (4.37)$$

U slučaju protusmjernog izmjenjivača topline iskoristivost topline je jednaka toplinskom stupnju djelovanja tj. pogonskoj karakteristici:

$$\eta_p = \varepsilon_p = \phi_p = 0,166 \quad (4.38)$$

Prateći ovaj postupak izračunati su slučajevi kada je protok rashladne vode 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h za slučaj bez pregrada te su rezultati prikazani u tablici 1.

Tablica 1 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	22,85	56,7	118718,7	0,166
26	30	15	65	19,25	56	128724,66	0,18
39	30	15	65	17,99	55,5	135876	0,19
52	30	15	65	17,37	55	143027,4	0,2
65	30	15	65	16,94	54,75	149750,5	0,205

4.1.2. Termodinamički proračun protusmjernog cijevnog izmjenjivača topline s pregradama

U ovom poglavlju dimenzionirat će se segmentne pregrade te se izvršiti proračun izmjene topline u slučaju izmjenjivača topline s pregradama.

Koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode izračunat je u poglavlju 4.1.1 te iznosi $\alpha_w = 235,64 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Visina pregrada:

$$m = (0,6 \dots 0,8) \cdot D_u = 0,7 \cdot 0,58 = 0,406 \text{ m} \quad (4.39)$$

Površina slobodnog presjeka (površina kružnog isječka):

$$R_u = \frac{D_u}{2} = \frac{0,58}{2} = 0,29 \text{ m} \quad (4.40)$$

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{m - R_u}{R_u} = \frac{0,406 - 0,29}{0,29} = 0,4 \quad (4.41)$$

$$\theta = 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{m - R_u}{R_u}\right) = 2 \cdot \cos^{-1}(0,4) = 132,48^\circ \quad (4.42)$$

$$F_p = \frac{R_u^2}{2} \cdot \left(\frac{\theta \cdot \pi}{180} - \sin \theta\right) = \frac{0,29^2}{2} \cdot \left(\frac{132,48 \cdot \pi}{180} - \sin 132,48\right) = 0,0667 \text{ m}^2 \quad (4.43)$$

Udaljenost između pregrada:

$$h = \frac{F_p \cdot t}{D_u \cdot (t - d_v)} = \frac{0,0667 \cdot 0,0325}{0,58 \cdot (0,0325 - 0,025)} = 0,498 \text{ m} \quad (4.44)$$

Broj pregrada:

$$n_p = \frac{L}{h} + 1 = \frac{4}{0,498} + 1 = 9,03 \quad (4.45)$$

Usvaja se prvi veći cijeli broj, dakle usvaja se broj pregrada $n_p = 10$.

Stvarna udaljenost između pregrada, za usvojeni broj pregrada je:

$$h = \frac{L}{n_p - 1} = \frac{4}{10 - 1} = 0,44 \text{ m} \quad (4.46)$$

Nadalje, računati će se koeficijent prijelaza topline na strani bubnja. Najprije određujemo prosječnu brzinu medija u bubnju kao aritmetičku sredinu najveće i najmanje brzine mazivog ulja.

Reynoldsova značajka računa se kao:

$$Re = \frac{w_{sr} \cdot d_{ekv} \cdot \rho_u}{\eta_u} = \frac{0,089 \cdot 0,0334 \cdot 841,75}{3,84173 \cdot 10^{-3}} = 651,32 \quad (4.47)$$

Za izračun Reynoldsove značajke potrebno je izračunati srednju brzinu strujanja u bubnju.

Najveća brzina mazivog ulja je:

$$w_{\max} = \frac{\dot{V}_u}{F_p} = \frac{\frac{30}{3600}}{0,0667} = 0,125 \text{ m/s} \quad (4.48)$$

Najmanja brzina mazivog ulja je:

$$w_{\min} = \frac{4 \cdot \dot{V}_u}{D_u^2 \cdot \pi - n \cdot d_v^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot \frac{30}{3600}}{0,580^2 \cdot \pi - 217 \cdot 0,025^2 \cdot \pi} = 0,0528 \text{ m/s} \quad (4.49)$$

Prosječna brzina mazivog ulja je:

$$w_{sr} = \frac{w_{\max} + w_{\min}}{2} = \frac{0,125 + 0,0528}{2} = 0,089 \text{ m/s} \quad (4.50)$$

Prandtlova značajka izračunata je izrazom (4.20) i iznosi $Pr = 55,26$.

Nusseltova značajka računa se pomoću izraza:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_u \cdot d_{ekv}}{\lambda_u} = K \cdot C \cdot \varepsilon \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (4.51)$$

Za šahovski raspored cijevi koeficijenti n i ε iznose: $n = 0,6$ i $\varepsilon = 0,26$.

Koeficijent K ovisan je o kutu kojim fluid struji kroz plašt φ ($K = f(\varphi)$) te se određuje interpolacijom iz tablica. Kut strujanja fluida u plaštu φ određuje se prema izrazu (3.17) te iznosi:

$$\tan \varphi = \frac{h}{m} \quad (4.52)$$

iz čega slijedi:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{h}{m} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0,44}{0,406} \right) = 47,3^\circ \quad (4.53)$$

Interpoliramo:

$$K_{47,3} = K_{40} + \frac{47,3 - 40}{50 - 40} \cdot (K_{50} - K_{40}) = 0,78 + \frac{47,3 - 40}{50 - 40} \cdot (0,88 - 0,78) \quad (4.54)$$

$$K_{47,3} = 0,85 \quad (4.55)$$

Koeficijent C računa se prema izrazu (3.20) te iznosi:

$$C = 1 + 0,1 \cdot \frac{t}{d_v} = 1 + 0,1 \cdot \frac{32,5}{25} = 1,13 \quad (4.56)$$

Nusseltova značajka je tada:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_u \cdot d_{ekv}}{\lambda_u} = K \cdot C \cdot \varepsilon \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (4.57)$$

$$\text{Nu} = 0,85 \cdot 1,13 \cdot 0,26 \cdot 651,32^{0,6} \cdot 55,26^{0,4} = 60,63 \quad (4.58)$$

Koeficijent prijelaza topline α_u je tada:

$$\alpha_u = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_u}{d_{ekv}} = \frac{60,63 \cdot 0,14175}{0,0334} = 257,31 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.59)$$

Kako je $\alpha_u > \alpha_w$, to jest $\alpha_v > \alpha_u$, promjer u izrazu (2.44) biti će na strani manjeg koeficijenta prijelaza topline, to jest $r = r_u$:

$$r_v = \frac{d_v}{2} = \frac{0,025}{2} = 0,0125 \text{ m} \quad (4.60)$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} = \frac{0,021}{2} = 0,0105 \text{ m} \quad (4.61)$$

Koeficijent prolaza topline iznosi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{r_u}{\lambda_\xi} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{r_u}{r_v \cdot \alpha_u}} = \frac{1}{\frac{1}{235,64} + \frac{0,0105}{55,824} \ln \frac{0,0125}{0,0105} + \frac{0,0105}{0,0125 \cdot 257,31}} = 132,61 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.62)$$

Koeficijent toplinske vodljivost za nehrđajući čelik je $\lambda_\xi = 55,824 \text{ W/mK}$.

Površina izmjene topline:

$$F_0 = n \cdot d_v \cdot \pi \cdot L = 217 \cdot 0,025 \cdot \pi \cdot 4 = 68,17 \text{ m}^2 \quad (4.63)$$

Kako bi se mogli poslužiti dijagramom za protusmjerni izmjenjivač topline, potrebno je izračunati sljedeće funkcije:

$$\frac{k \cdot F_0}{W_1} = \frac{132,61 \cdot 68,17}{14302,74} = 0,63 \quad (4.64)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{14302,74}{15115,97} = 0,946 \quad (4.65)$$

Pomoću ove dvije karakteristike, iz dijagrama za protusmjerni izmjenjivač topline očitana je vrijednost pogonske karakteristike $\phi_p = 0,39$.

Izlazna temperatura slabije struje određuje se sljedećim izrazom:

$$t_1'' = t_1' - \phi_p \cdot (t_1' - t_2') = 65 - 0,39 \cdot (65 - 15) = 45,5^\circ\text{C} \quad (4.66)$$

Izmjenjeni tolinjski tok je:

$$\dot{Q} = W_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 14302,74 \cdot (65 - 45,5) = 278903,43 \text{ W} \quad (4.67)$$

Izlazna temperatura jače struje je tada:

$$t_2'' = \frac{\dot{Q}}{W_2} + t_2' = \frac{278903,43}{15115,97} + 15 = 33,45^\circ\text{C} \quad (4.68)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura je jednaka:

$$\Delta t' = t_1'' - t_2' = 45,5 - 15 = 30,5^\circ\text{C} \quad (4.69)$$

$$\Delta t'' = t_1' - t_2'' = 65 - 33,45 = 31,55^\circ\text{C} \quad (4.70)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{30,5 - 31,55}{\ln \frac{30,5}{31,55}} = 31,02^\circ\text{C} \quad (4.71)$$

Jednadžbom prolaza topline možemo provjeriti provedeni proračun:

$$\dot{Q} = k \cdot F_0 \cdot \Delta t_m = 132,61 \cdot 68,17 \cdot 31,02 = 280421,51 \text{ W} \quad (4.72)$$

U slučaju protusmjernog izmjenjivača topline iskoristivost topline je jednaka stupnju djelovanja izmjenjivača topline tj. pogonskoj karakteristici:

$$\eta_p = \varepsilon_p = \phi_p = 0,39 \quad (4.73)$$

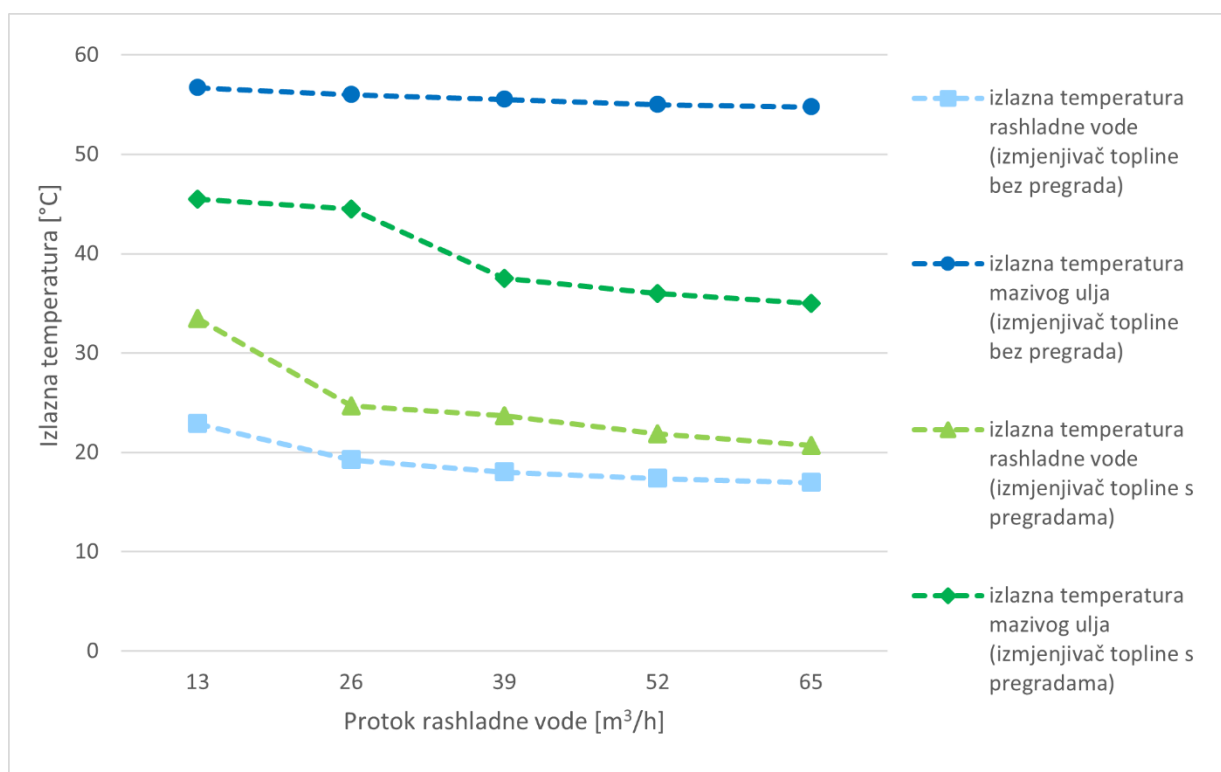
Prateći ovaj postupak izračunati su slučajevi kada je protok rashladne vode $26 \text{ m}^3/\text{h}$, $39 \text{ m}^3/\text{h}$, $52 \text{ m}^3/\text{h}$ i $65 \text{ m}^3/\text{h}$ za slučaj s pregradama te su rezultati prikazani u tablici 2.

Tablica 2 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	33,45	45,5	278903,43	0,39
26	30	15	65	24,69	44,5	293206,17	0,41
39	30	15	65	23,67	37,5	393325,4	0,55
52	30	15	65	21,86	36	414779,46	0,58
65	30	15	65	20,68	35	429082,2	0,6

4.1.3. Analiza rezultata

Za izmjenjivač topline duljine 4 m s 217 cijevi u cijevnom snopu, promjera cijevi NO20, dobiveni su rezultati prikazani grafički. Na slici 4.1 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura slabije i jače struje, to jest mazivog ulja koji predstavlja slabiju struju te rashladne vode koja je u ovom slučaju jača struja, o volumnom protoku rashladne vode.

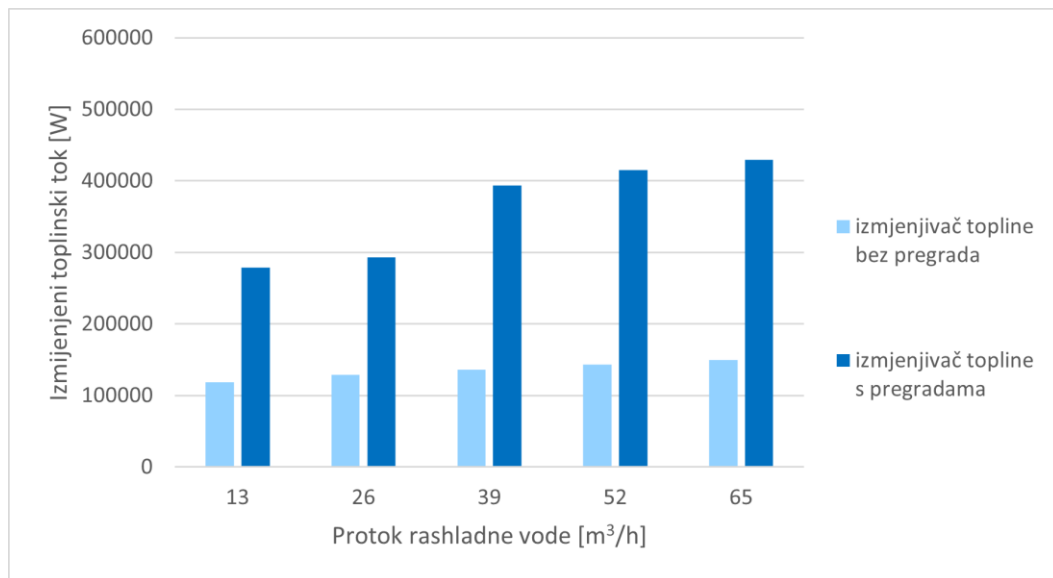


Slika 4.1 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 4 m

Za izmjenjivač topline s 217 cijevi u cijevnom snopu, promjera cijevi NO20, duljine izmjenjivača 4 m, na slici 4.1 prikazane su izlazne temperature jače i slabije struje za izmjenjivač topline bez i s pregradama, u ovisnosti o volumnim protocima rashladne vode. Plavom bojom prikazane su izlazne temperature rashladne vode i mazivog ulja u slučaju izmjenjivača topline bez pregrada, dok su zelenom bojom prikazane izlazne temperature rashladne vode i mazivog ulja u slučaju izmjenjivača topline s pregradama. Vrijednosti izlaznih temperatura rashladne vode za izmjenjivač topline bez pregrada za zadane protoke označene su svijetlo plavim kvadratićem, izlazne temperature mazivog ulja za izmjenjivač bez pregrada označene su tamno plavim krugom, izlazne temperature rashladne vode za izmjenjivač topline s pregradama označene su svijetlo zelenim trokutićem, dok su izlazne temperature mazivog ulja za izmjenjivač topline s pregradama označene tamno zelenim rombom.

Vidljivo je da se u slučaju izmjenjivača topline s pregradama postižu niže temperature slabije struje, to jest ohlađivanje mazivog ulja je veće, a time je i izmjena topline povoljnija. Također se uočava kako je ohlađivanje mazivog ulja najveće za protok rashladne vode od 65 m³/h.

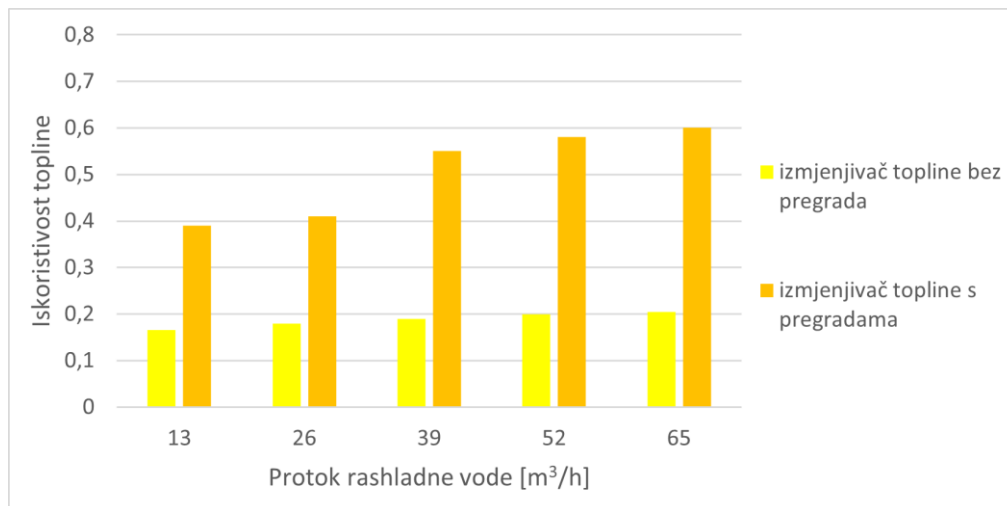
Na slici 4.2 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} u ovisnosti o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline bez i s pregradama.



Slika 4.2 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m

Može se uočiti kako vrijednost izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} raste za veći protok rashladne vode. U slučaju izmjenjivača topline s pregradama, izmijenjeni toplinski tok višestruko je veći nego u slučaju izmjenjivača topline bez pregrada te je također veći za protok rashladne vode od 65 m³/h i mazivog ulja od 30 m³/h. Iz slike je vidljivo kako postavljanje pregrada u bubanj izmjenjivača topline više utječe na izmijenjeni toplinski tok nego povećanje protoka rashladne vode.

Na slici 4.3 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline o volumnom protoku rashladne vode. Vidljivo je kako iskoristivost topline raste s povećanjem volumnog protoka rashladne vode. Također, vidljivo je kako je iskoristivost topline višestruko povećana umetanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline.



Slika 4.3 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m

Iskoristivost topline izmjenjivača topline naglo raste dodavanjem pregrada u bubanj te povećanjem protoka rashladne vode. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline povećavamo put strujanja fluida te turbulenciju strujanja fluida, čime je prijelaz topline bolji.

4.2. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 217 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu

Ukoliko razmotrimo slučaj izmjenjivača topline kao u poglavlju 4.1 no duljinu izmjenjivača povećamo s 4 m na 5,5 m, dobiti ćemo rezultate prikazane u tablicama 3 i 4. Razmatrao se slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama.

Površina izmjene topline povećati će se, pa će sukladno tome i iskoristivost topline biti veća za zadane protoke nego u slučaju izmjenjivača topline duljine 4 m.

Proračun izmjenjivača topline izveden je kako je opisano u potpoglavljju 4.1.1 i 4.1.2.

Tablica 3 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	25,17	54,25	153754,5	0,215
26	30	15	65	20,44	53,5	164481,5	0,23
39	30	15	65	19,18	51,75	189511,31	0,265
52	30	15	65	18,19	51,5	193086,99	0,27
65	30	15	65	17,6	51,25	196662,7	0,275

Tablica 4 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

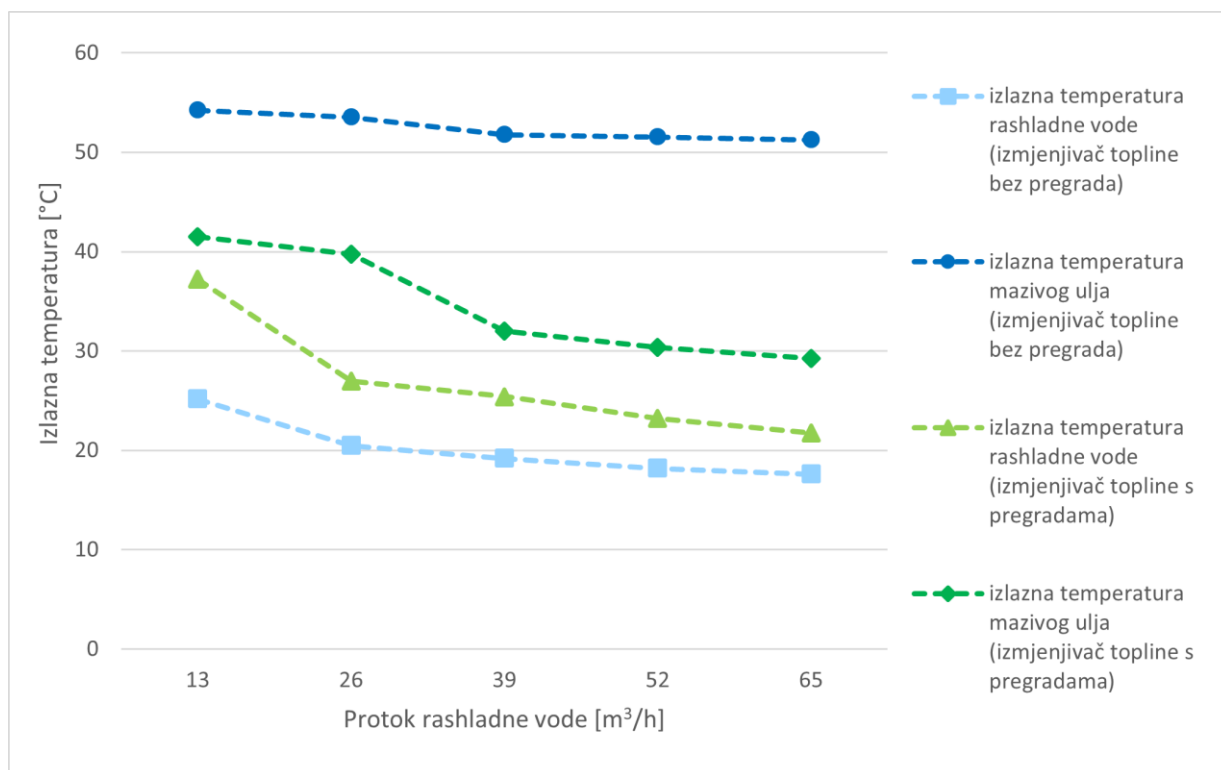
protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	37,24	41,5	336114,4	0,47
26	30	15	65	26,95	39,75	361144,19	0,505
39	30	15	65	25,41	32	471990,42	0,66
52	30	15	65	23,19	30,35	495589,94	0,693
65	30	15	65	21,77	29,25	511322,96	0,715

4.2.1. Analiza rezultata

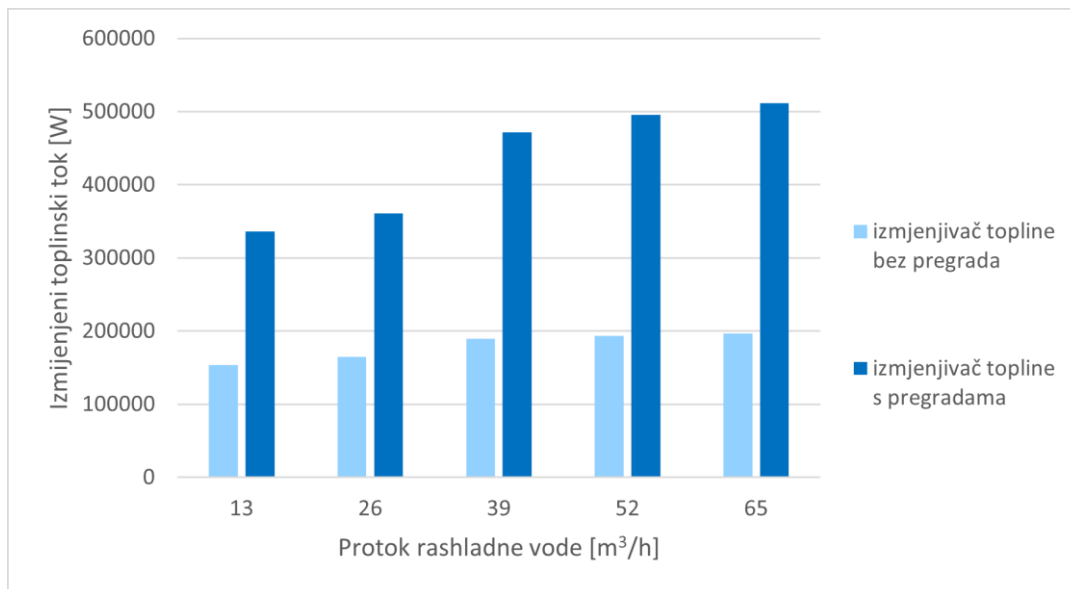
U ovom potpoglavlju bit će dane grafičke usporedbe rezultata dobivenih proračunom za izmjenjivač topline duljine 5,5 m, s 217 cijevi u cijevnom snopu, promjera cijevi u cijevnom snopu NO20.

U nastavku su prikazani grafovi usporedbe izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode, izmijenjenih toplinskih tokova i iskoristivosti topline o volumnim protocima rashladne vode, za izmjenjivač topline bez i s pregradama.

Na slici 4.4 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama o volumnim protocima rashladne vode koji iznose 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h. Vidljivo je da se u slučaju izmjenjivača topline s pregradama postižu niže temperature slabije struje, to jest ohlađivanje mazivog ulja je veće, a time je i izmjena topline povoljnija. Također se uočava kako je ohlađivanje mazivog ulja najveće za protok rashladne vode od 65 m³/h.

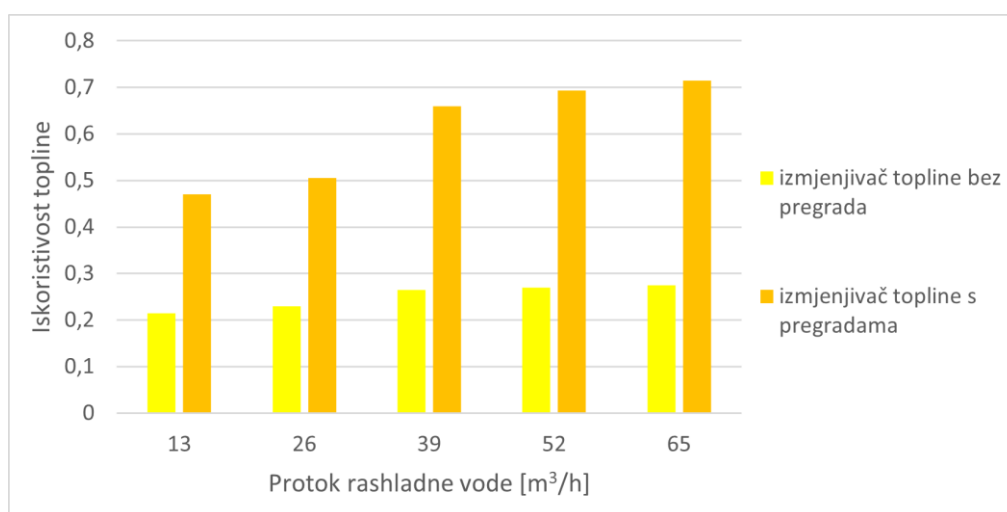


Slika 4.4 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 5,5 m



Slika 4.5 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Sa slike 4.5 može se uočiti kako vrijednost izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} raste za veći protok rashladne vode. U slučaju izmjenjivača topline s pregradama, izmijenjeni toplinski tok višestruko je veći nego u slučaju izmjenjivača topline bez pregrada. Izmijenjeni toplinski tok najveći je za volumni protok rashladne vode od 65 m³/h. Uočavamo kako dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline, izmijenjeni toplinski tok više raste no što raste povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.6 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Na slici 4.6 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline o volumnom protoku rashladne vode. Vidljivo je kako iskoristivost topline raste s povećanjem volumnog protoka rashladne vode. Također, vidljivo je kako je iskoristivost topline višestruko povećana umetanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline.

Za izmjenjivač topline s pregradama u bubnju, iskoristivost topline brže raste povećanjem protoka rashladne vode nego li je to slučaj za izmjenjivač topline bez pregrada u bubnju. Također, može se primijetiti kako umetanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline brže raste nego što raste s povećanjem protoka rashladne vode.

4.3. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 217 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovom potpoglavlju biti će prikazani rezultati proračuna izmjenjivača topline s 217 cijevi u cijevnom snopu, duljine 4 m, promjera cijevi u cijevnom snopu NO25. U tablicama 5 i 6 prikazani su dobiveni rezultati. Rezultati su dobiveni prateći postupak prikazan u potpoglavlju 4.1.1 i 4.1.2.

Tablica 5 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h /h bez pregrada

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	22,33	56,25	119546,8	0,168
26	30	15	65	18,95	55,75	130268,54	0,182
39	30	15	65	17,71	55,3	134003,6	0,196
52	30	15	65	17,25	54,7	145876	0,22
65	30	15	65	16,83	53,65	153721,46	0,23

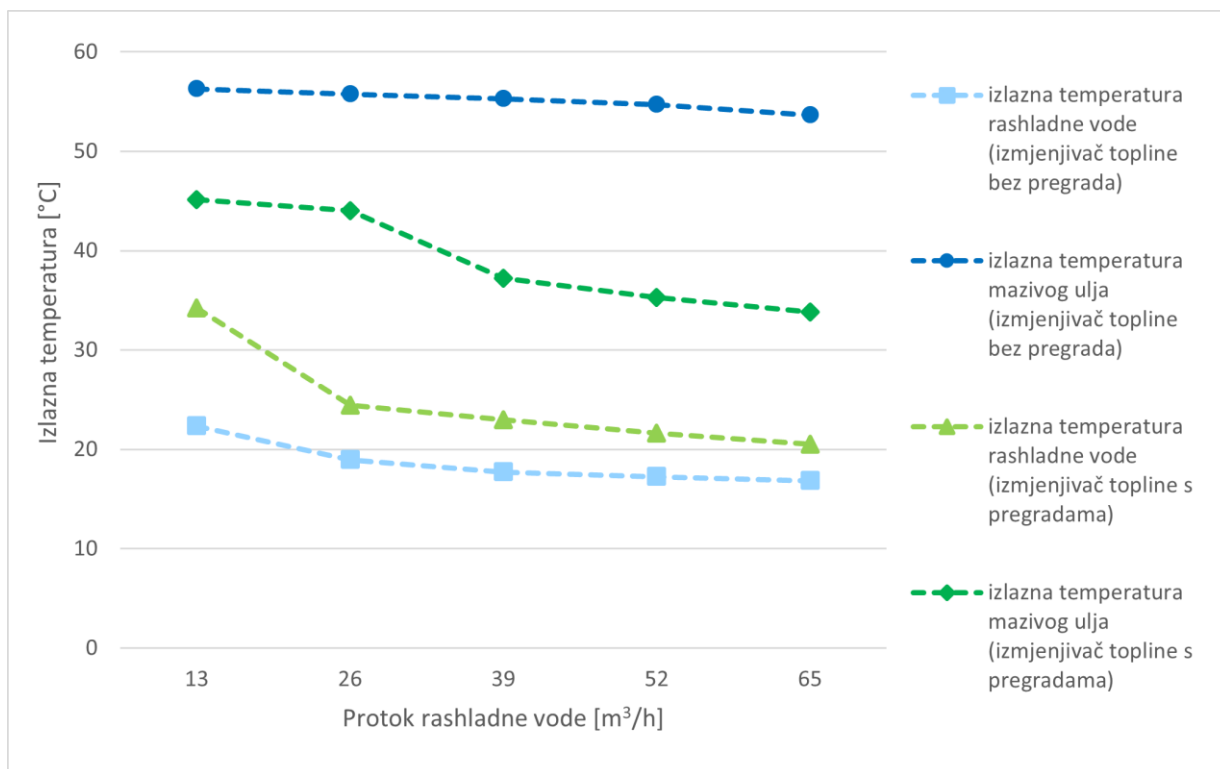
Tablica 6 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	34,21	45,15	279327,7	0,395
26	30	15	65	24,44	44,05	305339,7	0,421
39	30	15	65	23	37,2	407508,9	0,56
52	30	15	65	21,62	35,3	440476,7	0,586
65	30	15	65	20,49	33,82	454779,5	0,62

4.3.1. Analiza rezultata

Usporedba izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode, izmijenjenog toplinskog toka i iskoristivosti topline o protoku rashladne vode dana je u nastavku. Razmatrao se slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama.

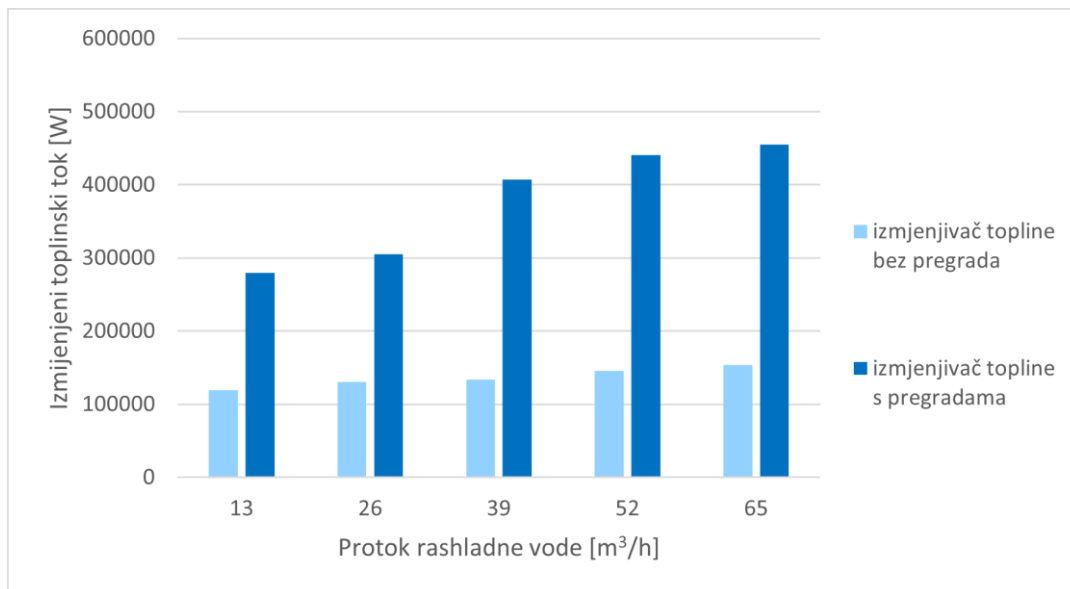
Na slici 4.7 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama o volumnim protocima rashladne vode koji iznose 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.



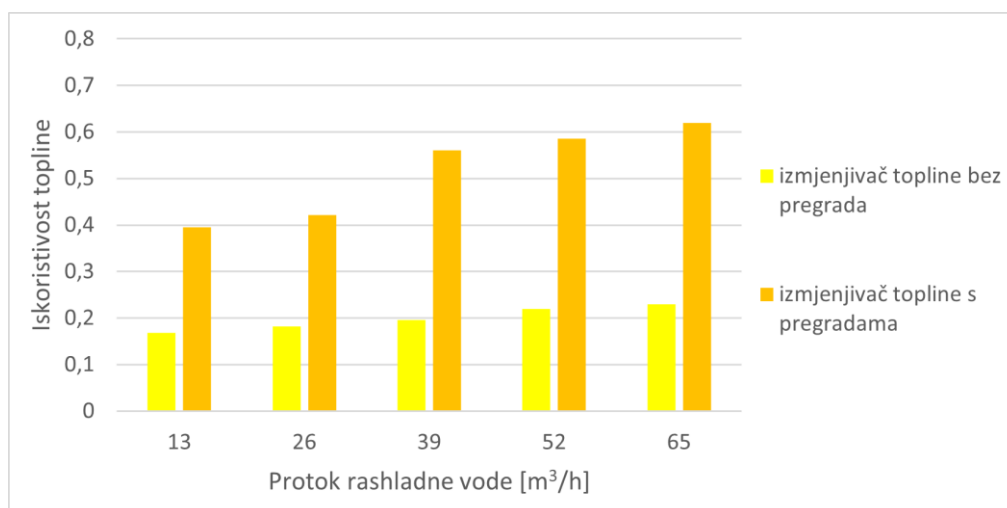
Slika 4.7 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 4 m

Iz slike uočavamo kako je slučaj izmjenjivača topline s pregradama povoljniji jer se postižu niže temperature mazivog ulja. Također, povoljniji je slučaj s većim protokom rashladne vode dok se najveće ohlađenje mazivog ulja postiže za protok rashladne vode od 65 m³/h. Uočeno je kako se dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline postižu niže temperature mazivog ulja nego što se postižu samo povećanjem protoka rashladne vode.

Na slici 4.8 dana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka za izmjenjivač topline bez i s pregradama, o volumnom protoku rashladne vode. Ponovno uočavamo kako je izmijenjeni toplinski tok najveći za protok rashladne vode od 65 m³/h. Izmijenjeni toplinski tok značajno više raste dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline no što raste povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.8 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m



Slika 4.9 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m

Na slici 4.9 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline o volumnom protoku rashladne vode. Vidljivo je kako iskoristivost topline raste s povećanjem volumnog protoka rashladne vode. Također, vidljivo je kako je iskoristivost topline višestruko povećana umetanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline. Povećanje iskoristivosti topline bilježi nagliji porast povećanjem protoka rashladne vode za izmjenjivač topline s pregradama u bubnju nego li je to slučaj za izmjenjivač topline bez pregrada u bubnju. Također, uočavamo kako se dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline postiže veći rast iskoristivosti topline no što se postiže povećanjem protoka

rashladne vode. Najveću iskoristivost topline dobivamo za izmjenjivač topline s pregradama i protok vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.4. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 217 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu

Proračun za slučaj izmjenjivača topline duljine 5,5 m, s 217 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu, izvršen je prateći postupak razrađen u potpoglavlju 4.1.1 i 4.1.2. Rezultati za navedeni slučaj, za izmjenjivač topline bez i s pregradama te za različite protoke rashladne vode, prikazani su u tablicama 7 i 8.

Tablica 7 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$, $26 \text{ m}^3/\text{h}$, $39 \text{ m}^3/\text{h}$, $52 \text{ m}^3/\text{h}$ i $65 \text{ m}^3/\text{h}$ bez pregrada

protok rashladne vode \dot{V}_w [m^3/h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m^3/h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [$^{\circ}\text{C}$] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [$^{\circ}\text{C}$] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [$^{\circ}\text{C}$] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [$^{\circ}\text{C}$] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	24,6	53,4	163027,4	0,22
26	30	15	65	20,18	53,05	176615	0,248
39	30	15	65	18,55	50,75	190905,8	0,272
52	30	15	65	17,96	49,8	198784,3	0,276
65	30	15	65	17,4	48,7	201644,8	0,284

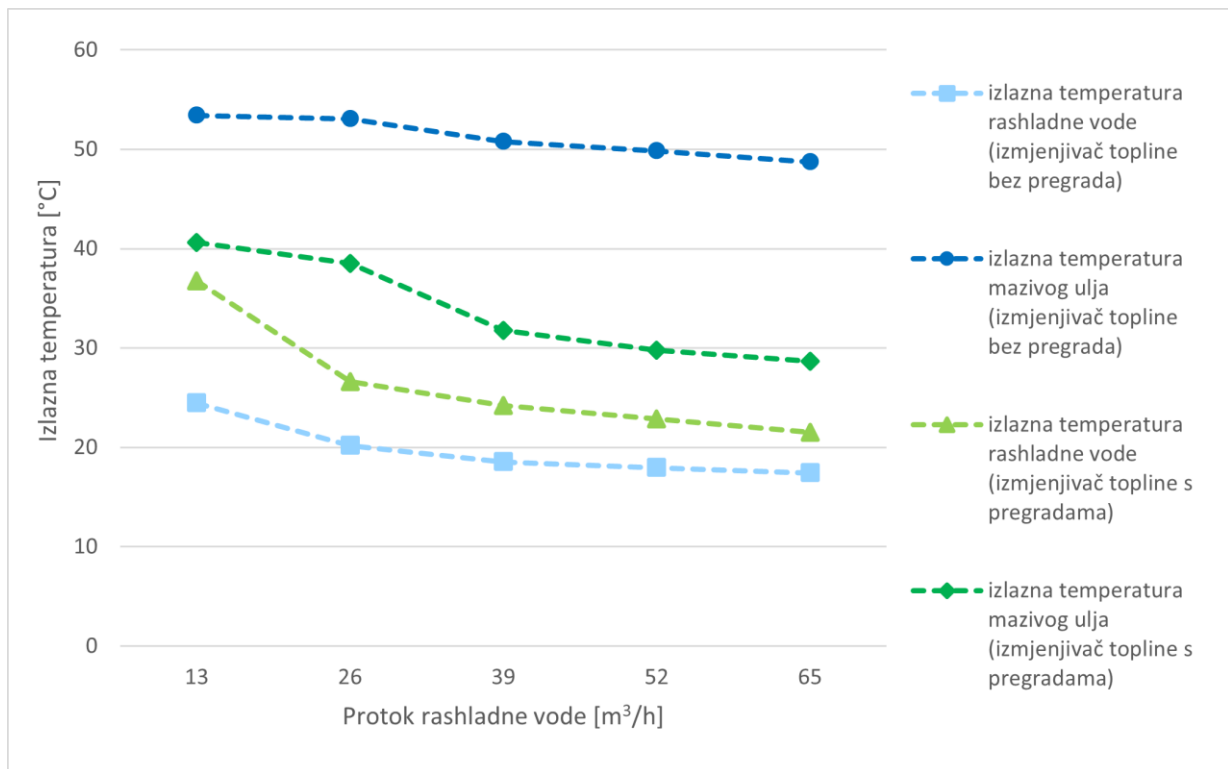
Tablica 8 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	36,76	40,6	358963	0,476
26	30	15	65	26,59	38,5	381129,1	0,538
39	30	15	65	24,2	31,75	485446,9	0,67
52	30	15	65	22,87	29,75	505566,1	0,702
65	30	15	65	21,5	38,65	521299,1	0,734

4.4.1. Analiza rezultata

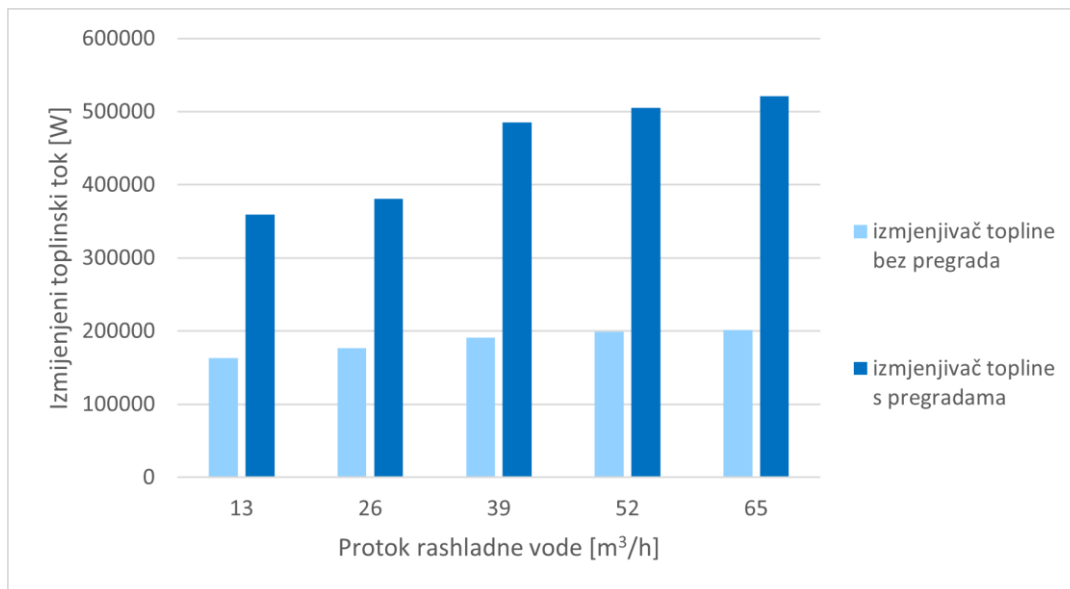
Za slučaj izmjenjivača topline opisanog u poglavlju 4.4, rezultati će se usporediti. Uspoređujemo ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode, izmijenjenog toplinskog toka te iskoristivosti topline za izmjenjivač topline bez i s pregradama o volumnom protoku rashladne vode koji iznosi redom 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.

Na slici 4.10 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama o volumnim protocima rashladne vode koji iznose 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.



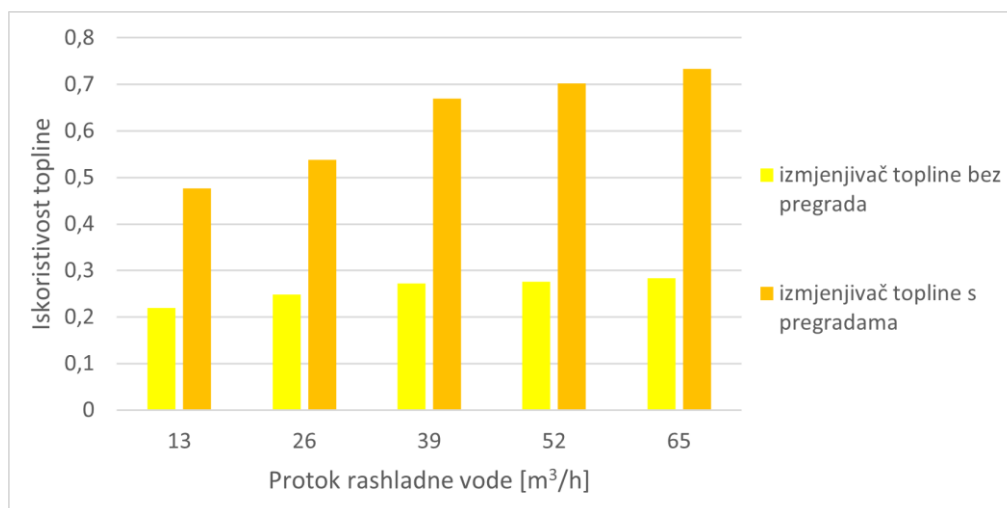
Slika 4.10 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Iz gornje slike uočavamo kako se najniža temperatura mazivog ulja, to jest najveće ohlađenje mazivog ulja, postiže za volumni protok rashladne vode od 65 m³/h i to za izmjenjivač topline s pregradama. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline postižu se značajno niže temperature mazivog ulja no što se postižu povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.11 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Na slici 4.11 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka za izmjenjivač topline bez i s pregradama, u ovisnosti o volumnom protoku rashladne vode. Iz slike se uočava kako je izmijenjeni toplinski tok najveći za protok rashladne vode 65 m³/h te za izmjenjivač topline s pregradama. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.12 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Slikom 4.12 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline duljine 5,5 m s 217 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, promjera cijevi NO25. Iz slike je vidljivo kako je iskoristivost topline najveća za slučaj izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama i protok rashladne vode 65 m³/h. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.

4.5. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 271 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovim poglavljima izvršit će se analiza izmjene topline unutar izmjenjivača topline sa snopom cijevi za 271 cijev u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 4 m i promjera cijevi u cijevnom snopu NO20 te šahovski raspored cijevi u cijevnom snopu. Analiza će se izvršiti za izmjenjivač topline bez i sa segmentnim pregradama. Smjer strujanja fluida u izmjenjivaču topline je protusmjernan. Protok mazivog ulja iznosi 30 m³/h.

Rezultati dobiveni proračunom kako je navedeno u potpoglavljju 4.1.1 i 4.1.2 za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h dani su u tablicama 9 i 10, za izmjenjivač topline bez i s pregradama.

Tablica 9 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	23,75	55,75	132300,3	0,185
26	30	15	65	19,85	54,75	147719,83	0,205
39	30	15	65	18,55	53,75	160905,8	0,225
52	30	15	65	17,78	53,25	168057,2	0,235
65	30	15	65	17,27	53	171632,88	0,24

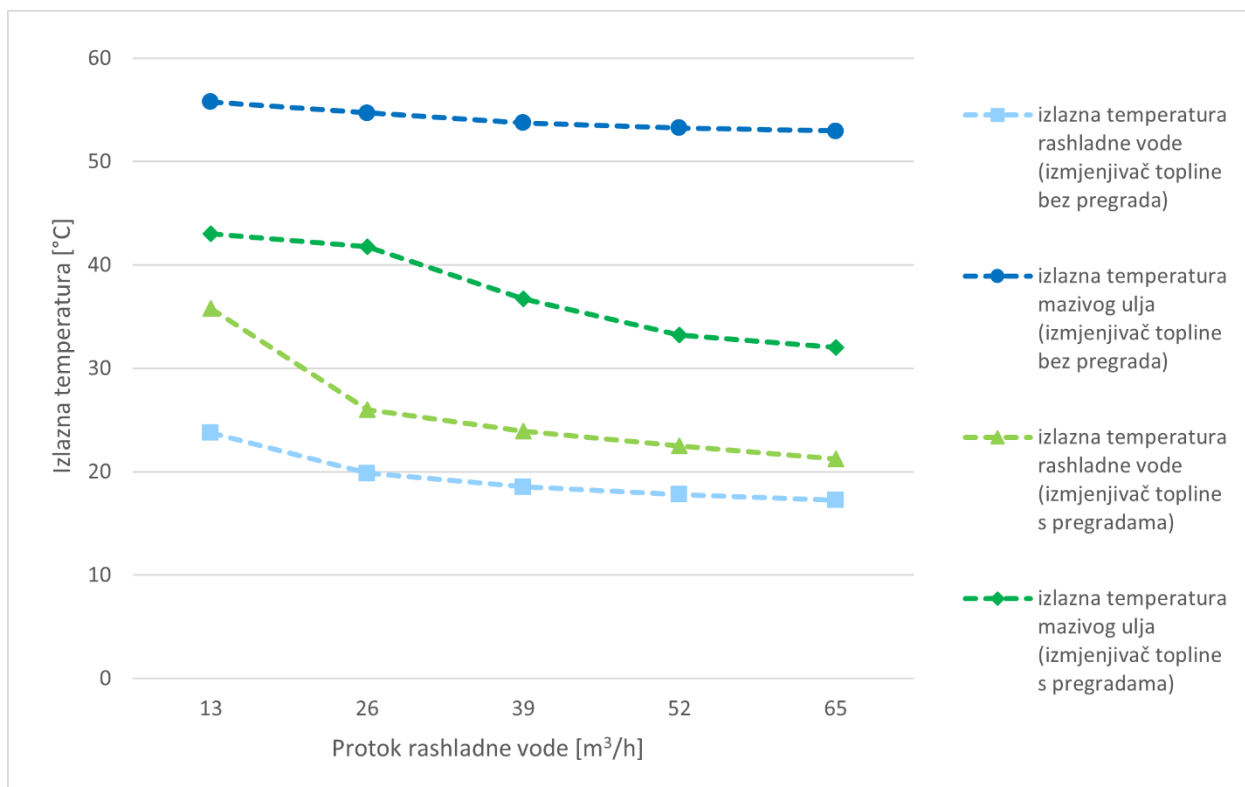
Tablica 10 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	35,81	43	314660,28	0,44
26	30	15	65	25,99	41,75	332538,71	0,465
39	30	15	65	23,91	36,75	404052,4	0,575
52	30	15	65	22,51	33,25	454111,9	0,635
65	30	15	65	21,24	32	471990,42	0,66

4.5.1. Analiza rezultata

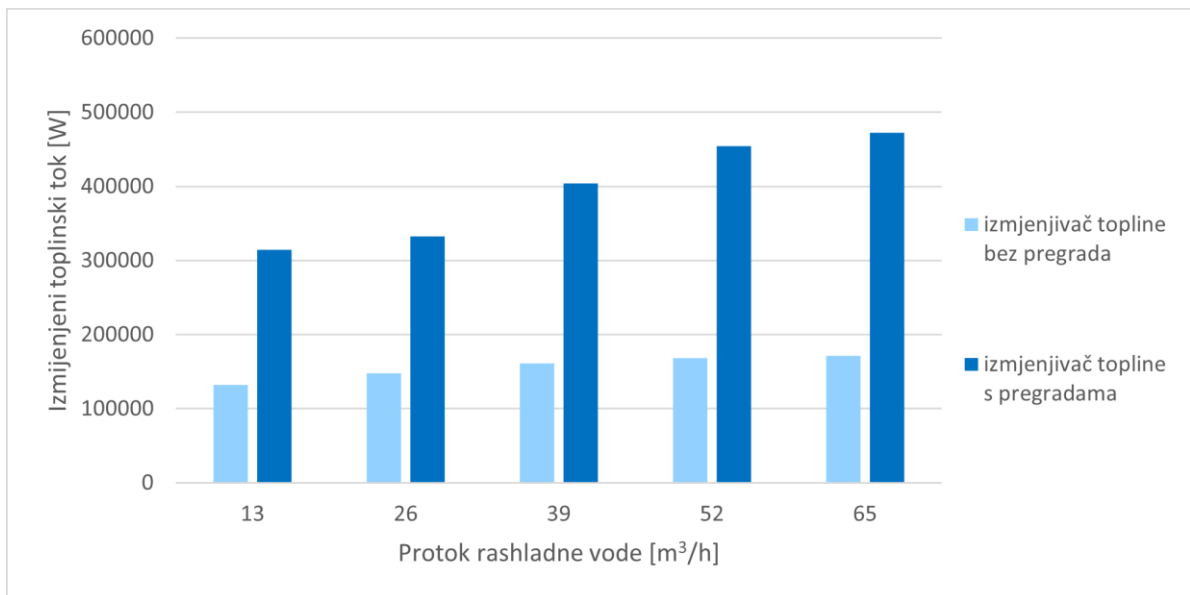
Uspoređujemo ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode, izmijenjenog toplinskog toka te iskoristivosti topline za izmjenjivač topline bez i s pregradama o volumnom protoku rashladne vode koji iznosi redom 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.

Na slici 4.13 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama o volumnim protocima rashladne vode koji iznose 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.



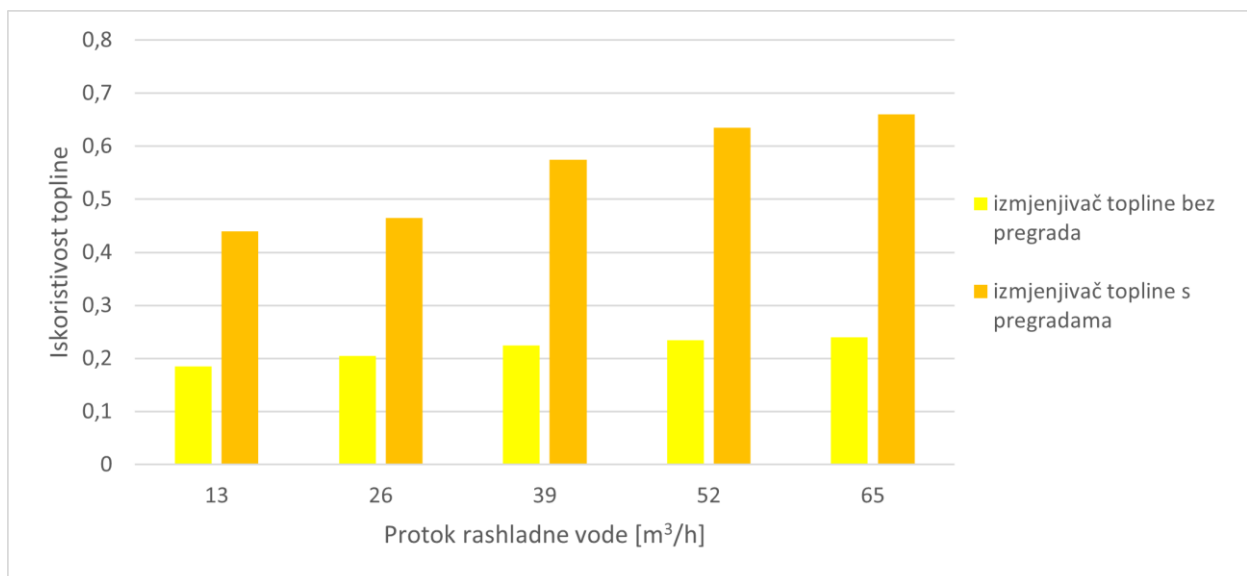
Slika 4.13 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 4 m

Iz gornje slike uočavamo kako se najniža temperatura mazivog ulja, to jest najveće ohlađenje mazivog ulja, postiže za volumni protok rashladne vode od 65 m³/h i to za izmjenjivač topline s pregradama. Vidljivo je kako dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline postizemo značajno nižu temperaturu mazivog ulja nego što postizemo povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.14 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m

Na slici 4.14 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka za izmjenjivač topline bez i s pregradama, u ovisnosti o volumnom protoku rashladne vode. Iz slike se uočava kako je izmijenjeni toplinski tok najveći za protok rashladne vode 65 m³/h te za izmjenjivač topline s pregradama. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.15 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m

Slikom 4.15 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline duljine 4 m s 271 cijevi promjera cijevi NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu. Iz slike je vidljivo kako je iskoristivost topline najveća za slučaj izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama i protok rashladne vode 65 m³/h. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.

4.6. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 271 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu

Ukoliko razmotrimo slučaj izmjenjivača topline kao u poglavlju 4.5 no duljinu izmjenjivača topline povećamo s 4 m na 5,5 m, dobiti ćemo rezultate prikazane u tablicama 11 i 12. Razmatrao se slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama.

Površina izmjene topline povećati će se, pa će sukladno tome i iskoristivost topline biti veća za zadane protoke nego u slučaju izmjenjivača topline duljine 4 m.

Tablica 11 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ϵ_p
13	30	15	65	26,59	52,75	175208,57	0,245
26	30	15	65	21,32	51,65	190941,58	0,267
39	30	15	65	19,65	50,25	210965,4	0,295
52	30	15	65	18,63	49,65	219547,1	0,307
65	30	15	65	17,95	49,4	223122,7	0,312

Tablica 12 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

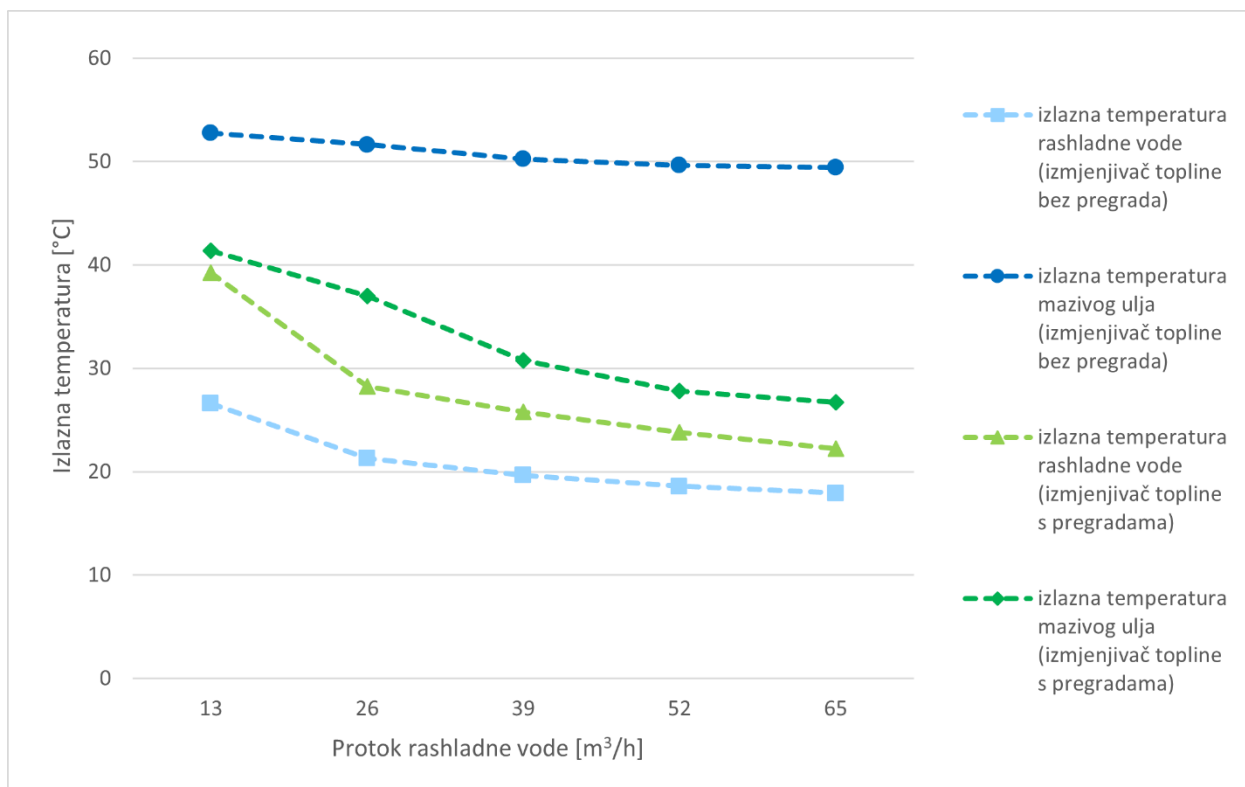
protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	39,25	41,4	368295,56	0,515
26	30	15	65	28,24	37	400476,72	0,56
39	30	15	65	25,8	30,75	489868,8	0,685
52	30	15	65	23,79	27,8	532061,9	0,744
65	30	15	65	22,25	26,7	547794,9	0,766

4.6.1. Analiza rezultata

U ovom potpoglavlju izvršit će se analiza rezultata dobivenih proračunom. Proračun je prikazan u potpoglavljima 4.1.1 i 4.1.2.

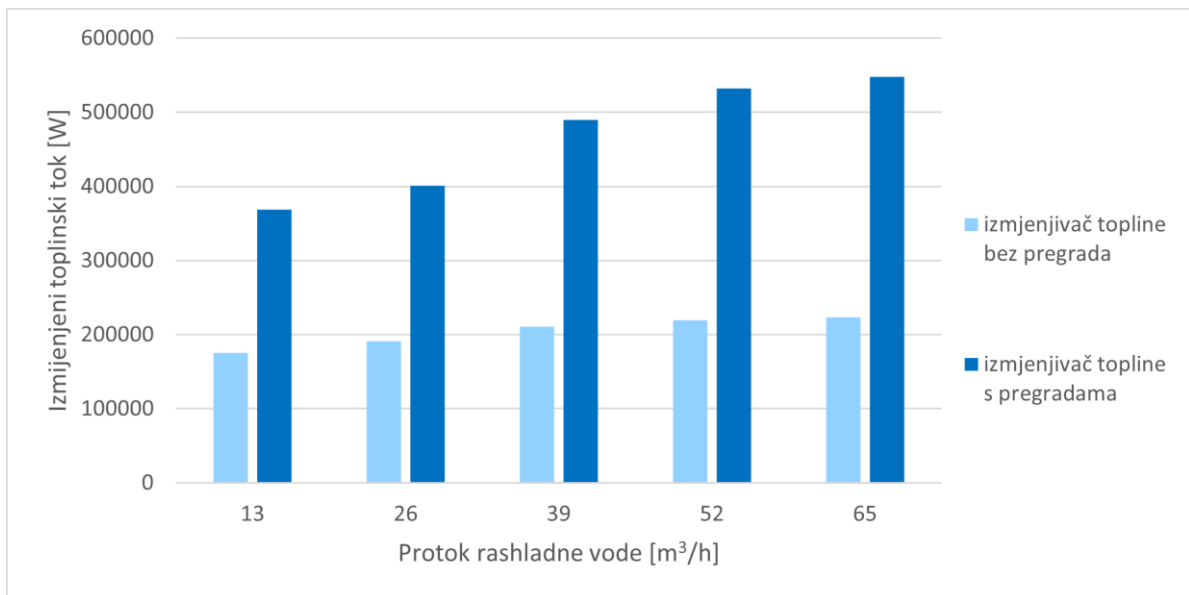
Za izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, promjera cijevi NO20, duljine izmjenjivača topline 5,5 m, na slici 4.16 prikazane su izlazne temperature jače i slabije struje za izmjenjivač topline bez i s pregradama, u ovisnosti o volumnim protocima rashladne vode. Vidljivo je da se u slučaju izmjenjivača topline s pregradama postižu niže temperature slabije struje, to jest ohlađivanje mazivog ulja je veće, a time je i izmjena topline povoljnija. Također se uočava kako je ohlađivanje mazivog ulja najveće za protok rashladne vode od 65 m³/h.

Na slici 4.16 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama o volumnim protocima rashladne vode koji iznose 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.



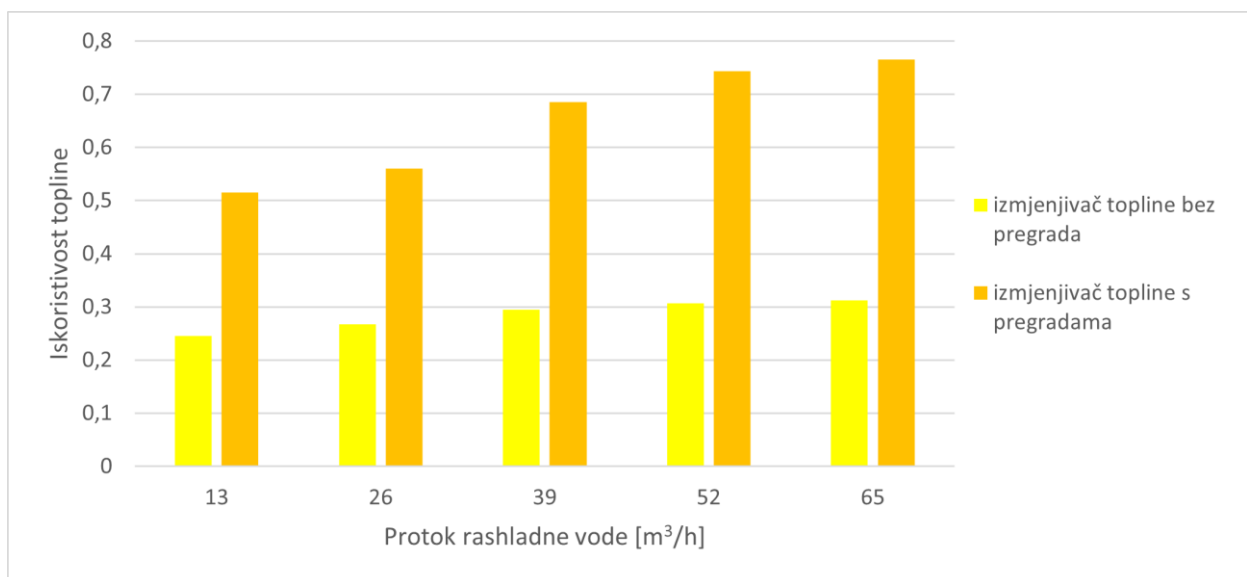
Slika 4.16 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Iz gornje slike uočavamo kako se najniža temperatura mazivog ulja, to jest najveće ohlađenje mazivog ulja, postiže za volumni protok rashladne vode od 65 m³/h i to za izmjenjivač topline s pregradama. Vidljivo je kako dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline postizemo značajno nižu temperaturu mazivog ulja nego što postizemo povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.17 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 5,5 m

Na slici 4.17 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} u ovisnosti o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline bez i s pregradama. Iz slike se uočava kako je izmijenjeni toplinski tok najveći za protok rashladne vode 65 m³/h te za izmjenjivač topline s pregradama. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.18 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Na slici 4.18 prikazana je ovisnost iskoristivost topline o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline bez i s pregradama. Iz slike je vidljivo kako je iskoristivost topline najveća za slučaj izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama i protok rashladne vode 65 m³/h. Iskoristivost topline izmjenjivača topline značajno se povećava dodavanjem segmentnih pregrada u bubanj izmjenjivača topline. Za zadani protok rashladne vode, iskoristivost topline za izmjenjivač topline s pregradama u bubnju gotovo je dvostruko veća, a za veće protoke rashladne vode i više, od iskoristivosti topline za izmjenjivač topline bez pregrada u bubnju.

4.7. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 4 m s 271 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovom potpoglavlju biti će prikazani rezultati proračuna izmjenjivača topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 4 m, promjera cijevi u cijevnom snopu NO25. U tablicama 13 i 14 prikazani su dobiveni rezultati.

Tablica 13 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada

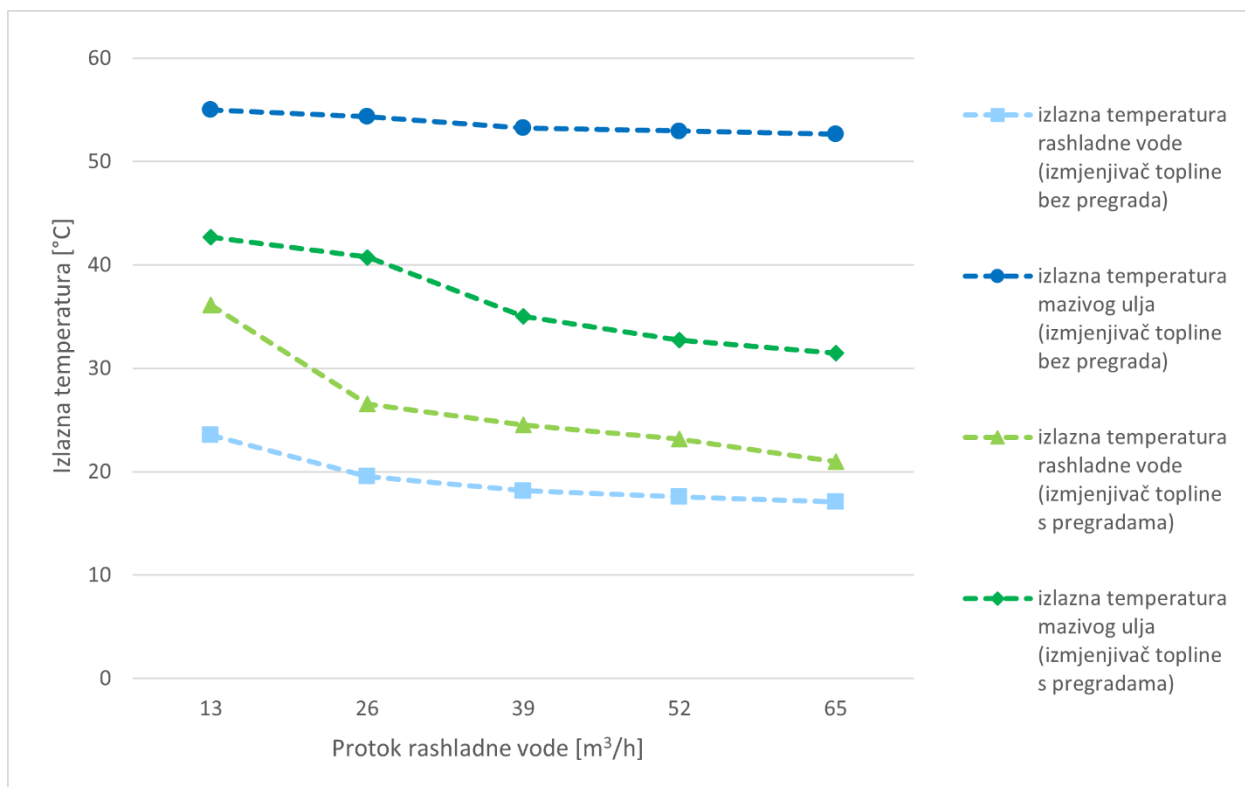
protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	23,52	55	141724,7	0,191
26	30	15	65	19,57	54,35	150021,4	0,21
39	30	15	65	18,15	53,26	158027,4	0,226
52	30	15	65	17,6	53	177330,1	0,24
65	30	15	65	17,11	52,65	189475,6	0,248

Tablica 14 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	36,15	42,7	324648,4	0,446
26	30	15	65	26,53	40,75	358235,97	0,481
39	30	15	65	24,55	35,05	422550,6	0,572
52	30	15	65	23,16	32,75	472657,9	0,655
65	30	15	65	20,96	31,5	490536,3	0,674

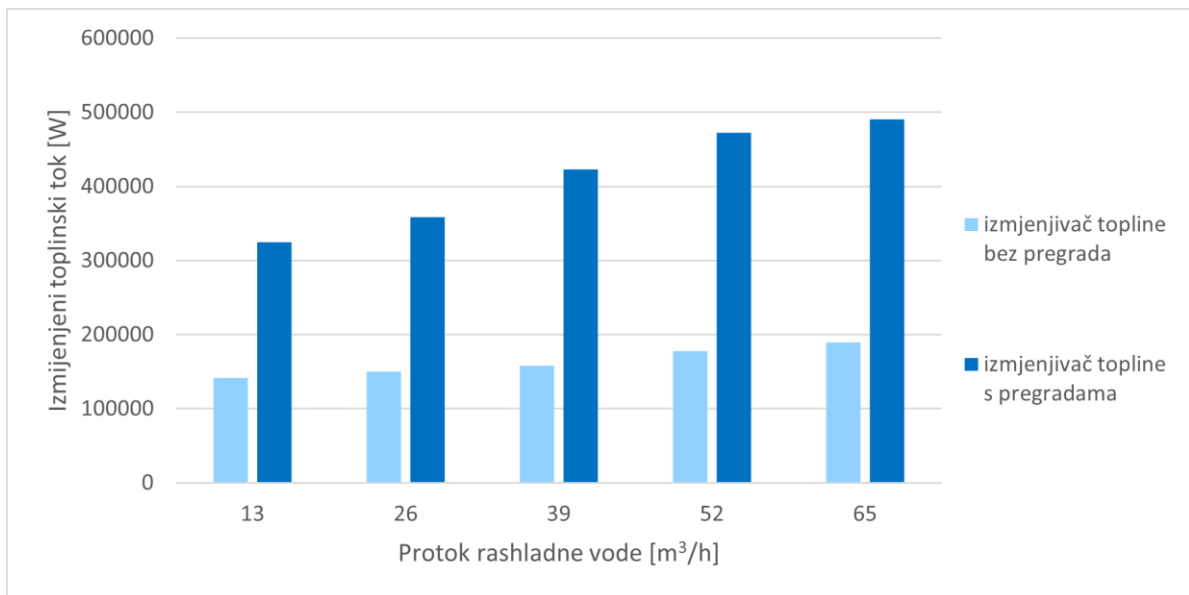
4.7.1. Analiza rezultata

U ovom potpoglavlju analizirati će se rezultati dobiveni proračunom opisanim u poglavlju 4.1.1 i 4.1.2 za izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, promjera cijevi NO25, duljine izmjenjivača topline 4 m te bez i s pregradama u bubnju.



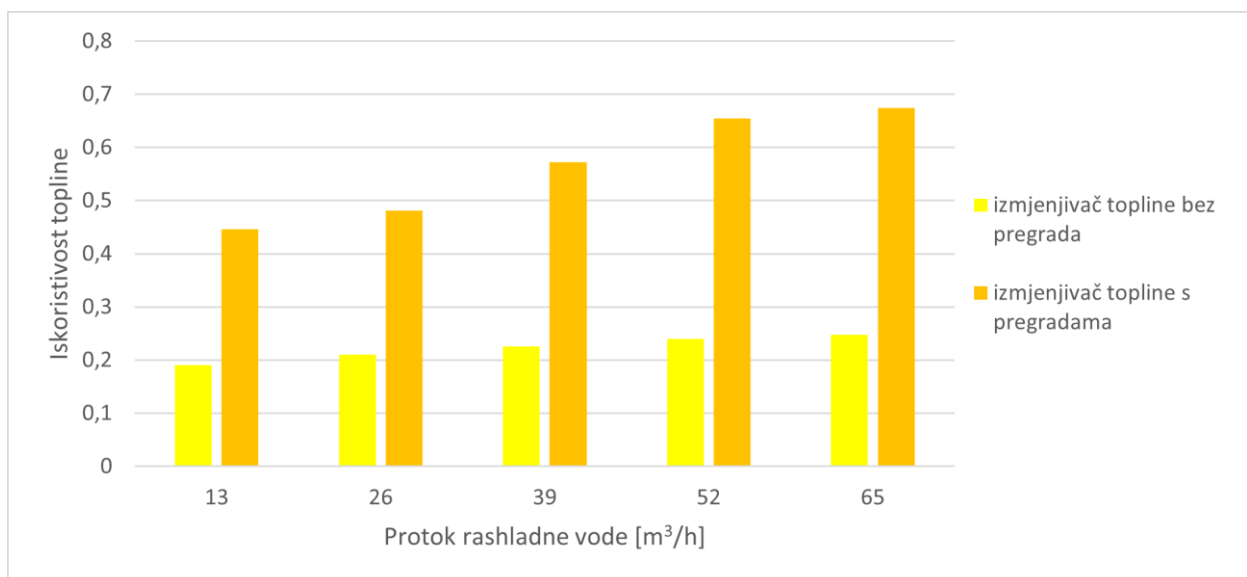
Slika 4.19 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 4 m

Na slici 4.19 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura mazivog ulja i rashladne vode u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama o volumnim protocima rashladne vode koji iznose 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h. Vidljivo je da se u slučaju izmjenjivača topline s pregradama postižu niže temperature slabije struje, to jest ohlađivanje mazivog ulja je veće, a time je i izmjena topline povoljnija. Također se uočava kako je ohlađivanje mazivog ulja najveće za protok rashladne vode od 65 m³/h.



Slika 4.20 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 4 m

Na slici 4.20 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline bez i s pregradama. Iz slike se uočava kako je izmijenjeni toplinski tok najveći za protok rashladne vode 65 m³/h te za izmjenjivač topline s pregradama. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.21 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m

Na slici 4.21 prikazana je ovisnost iskoristivost topline o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline bez i s pregradama. Iz slike je vidljivo kako je iskoristivost topline najveća za slučaj izmjenjivača topline s segmentnim pregradama i protok rashladne vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.

4.8. Analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline duljine 5,5 m s 271 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu

Rezultati dobiveni proračunom za izmjenjivač topline duljine 5,5 m s 271 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, promjera cijevi NO25, za slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama, navedeni su u tablicama 15 i 16.

Tablica 15 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$, $26 \text{ m}^3/\text{h}$, $39 \text{ m}^3/\text{h}$, $52 \text{ m}^3/\text{h}$ i $65 \text{ m}^3/\text{h}$ bez pregrada

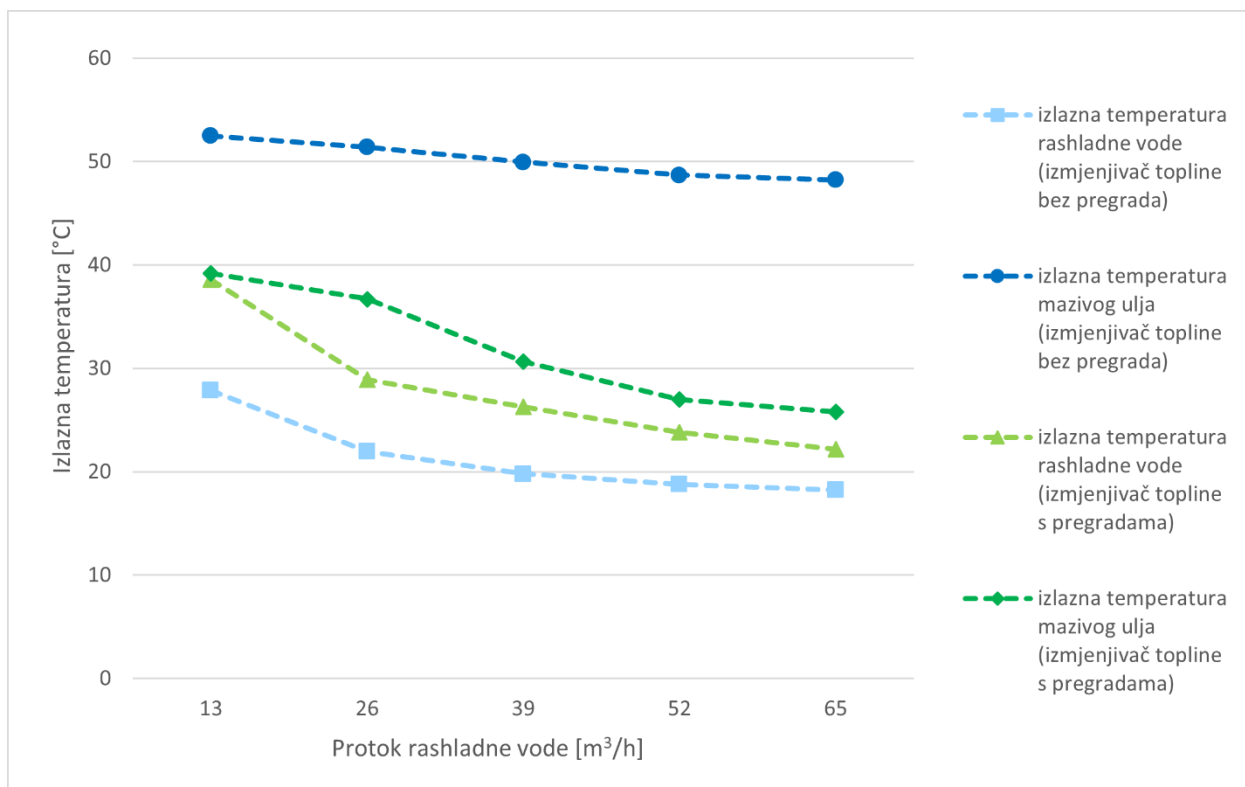
protok rashladne vode \dot{V}_w [m^3/h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m^3/h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [$^{\circ}\text{C}$] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [$^{\circ}\text{C}$] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [$^{\circ}\text{C}$] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [$^{\circ}\text{C}$] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	27,88	52,5	184481,5	0,25
26	30	15	65	21,96	51,4	200214,5	0,272
39	30	15	65	19,82	49,95	226650,8	0,299
52	30	15	65	18,78	48,7	234529,2	0,32
65	30	15	65	18,21	48,2	258104,9	0,339

Tablica 16 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama

protok rashladne vode \dot{V}_w [m ³ /h]	protok mazivog ulja \dot{V}_u [m ³ /h]	ulazna temperatura jače struje t_2' [°C] (rashladna voda)	ulazna temperatura slabije struje t_1' [°C] (mazivo ulje)	izlazna temperatura jače struje t_2'' [°C] (rashladna voda)	izlazna temperatura slabije struje t_1'' [°C] (mazivo ulje)	izmijenjeni toplinski tok \dot{Q} [W]	iskoristivost topline ε_p
13	30	15	65	38,6	39,2	384719,9	0,52
26	30	15	65	28,92	36,7	420464,8	0,576
39	30	15	65	26,26	30,65	519785,4	0,69
52	30	15	65	23,82	27	554898,6	0,762
65	30	15	65	22,2	25,8	592061,9	0,776

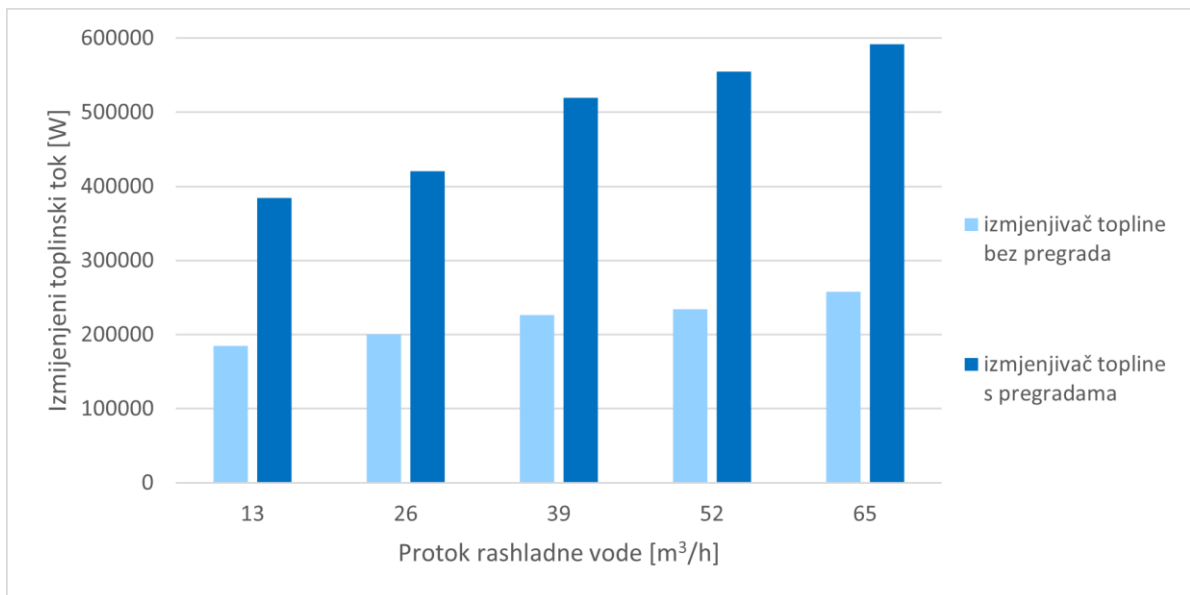
4.8.1. Analiza rezultata

Rezultati dobiveni proračunima u ovom će se potpoglavlju grafički prikazati. Razmatra se slučaj izmjenjivača topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, promjera cijevi u cijevnom snopu NO25, duljine izmjenjivača 5,5 m. Razmatraju se slučajevi bez i s pregradama.



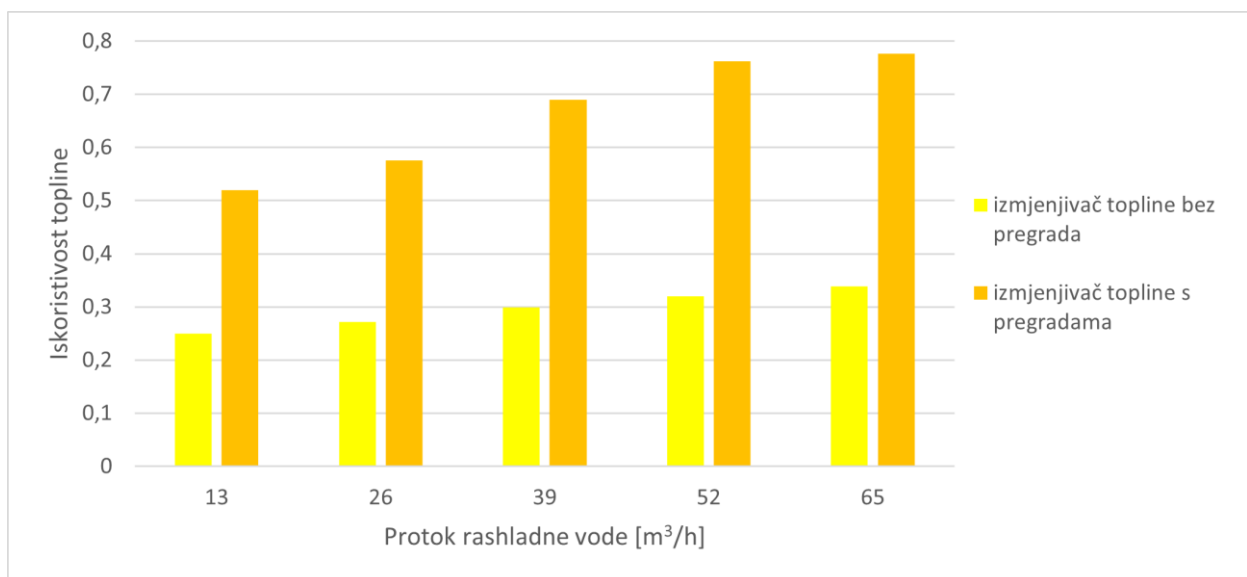
Slika 4.22 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Na slici 4.22 prikazane su izlazne temperature jače i slabije struje za izmjenjivač topline bez i s pregradama, u ovisnosti o volumnim protocima rashladne vode. Vidljivo je da se u slučaju izmjenjivača topline s pregradama postižu niže temperature slabije struje, to jest ohlađivanje mazivog ulja je veće, a time je i izmjena topline povoljnija. Također se uočava kako je ohlađivanje mazivog ulja najveće za protok rashladne vode od 65 m³/h.



Slika 4.23 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 5,5 m

Na slici 4.23 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline bez i s pregradama. Iz slike se uočava kako je izmijenjeni toplinski tok najveći za protok rashladne vode 65 m³/h te za izmjenjivač topline s pregradama. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode.



Slika 4.24 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m

Na slici 4.24 prikazana je ovisnost iskoristivost topline o volumnom protoku rashladne vode za izmjenjivač topline bez i s pregradama. Iz slike je vidljivo kako je iskoristivost topline najveća za slučaj izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama i protok rashladne vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline značajnije se povećava no što se povećava povećanjem protoka rashladne vode

4.9. Usporedba izmjene topline u izmjenjivačima topline s različitim brojem cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu

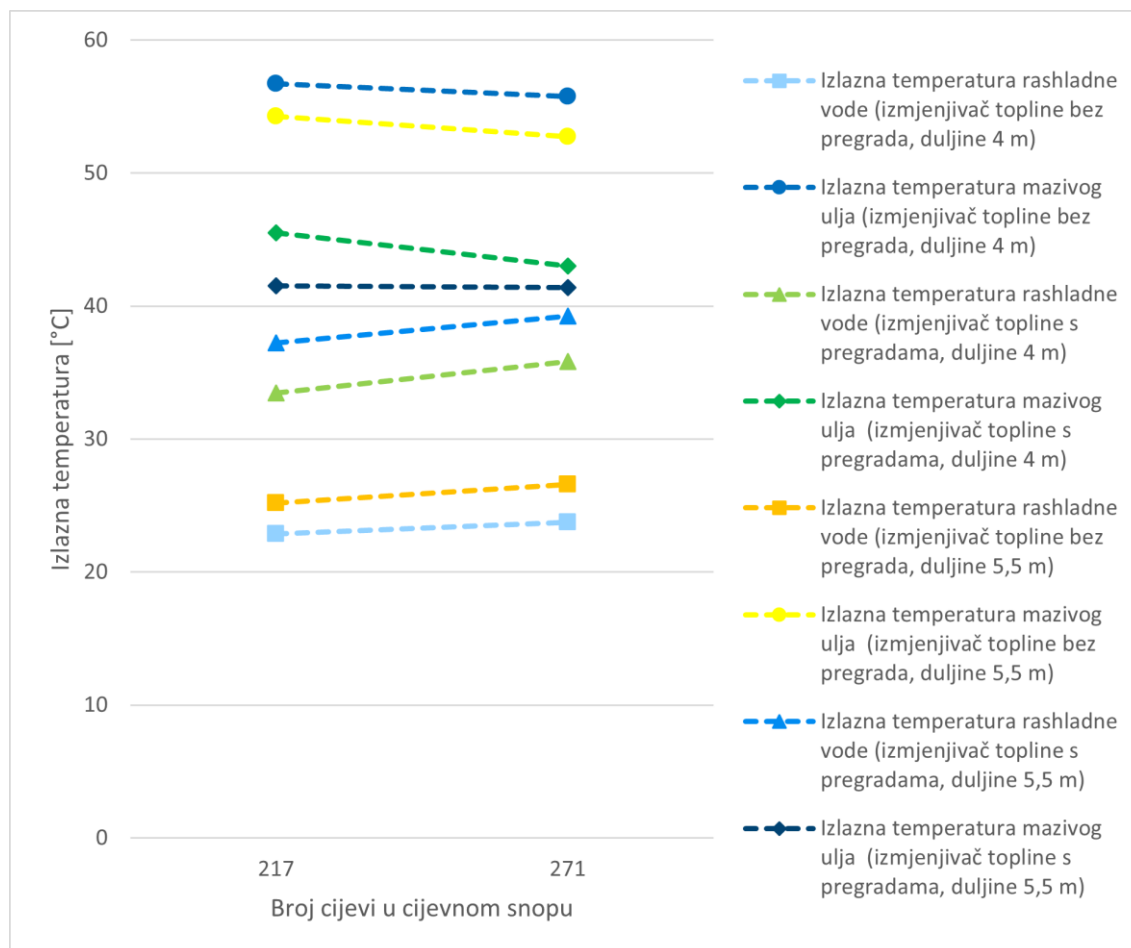
U ovom poglavlju analizirat će se dobiveni rezultati. Izvršit će se usporedba izlaznih temperatura obiju struja, izmijenjenih toplinskih tokova te iskoristivosti topline u ovisnosti o broju cijevi u cijevnom snopu, duljini izmjenjivača topline te promjeru cijevi u cijevnom snopu. Razmatrat će se slučajevi izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju.

4.9.1. Usporedba izmjene topline u izmjenjivačima topline s 217 i 271 cijevi promjera NO20 u unutrašnjem cijevnom snopu

U nastavku će se grafički prikazati ovisnosti izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja, izmijenjenih toplinskih tokova te iskoristivosti topline o broju cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, duljini izmjenjivača topline i promjeru cijevi u cijevnom snopu.

U ovom potpoglavlju analizirat će se dobiveni rezultati za izmjenjivače topline s 217 i 271 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m i promjer cijevi u cijevnom snopu NO20.

Na slici 4.25 prikazana je usporedba izlaznih temperatura obiju struja ovisno o broju cijevi u cijevnom snopu te ovisno o duljini izmjenjivača topline. Promatra se slučaj za volumni protok rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$, duljine izmjenjivača 4 m i 5,5 m te promjer cijevi u cijevnom snopu NO20.

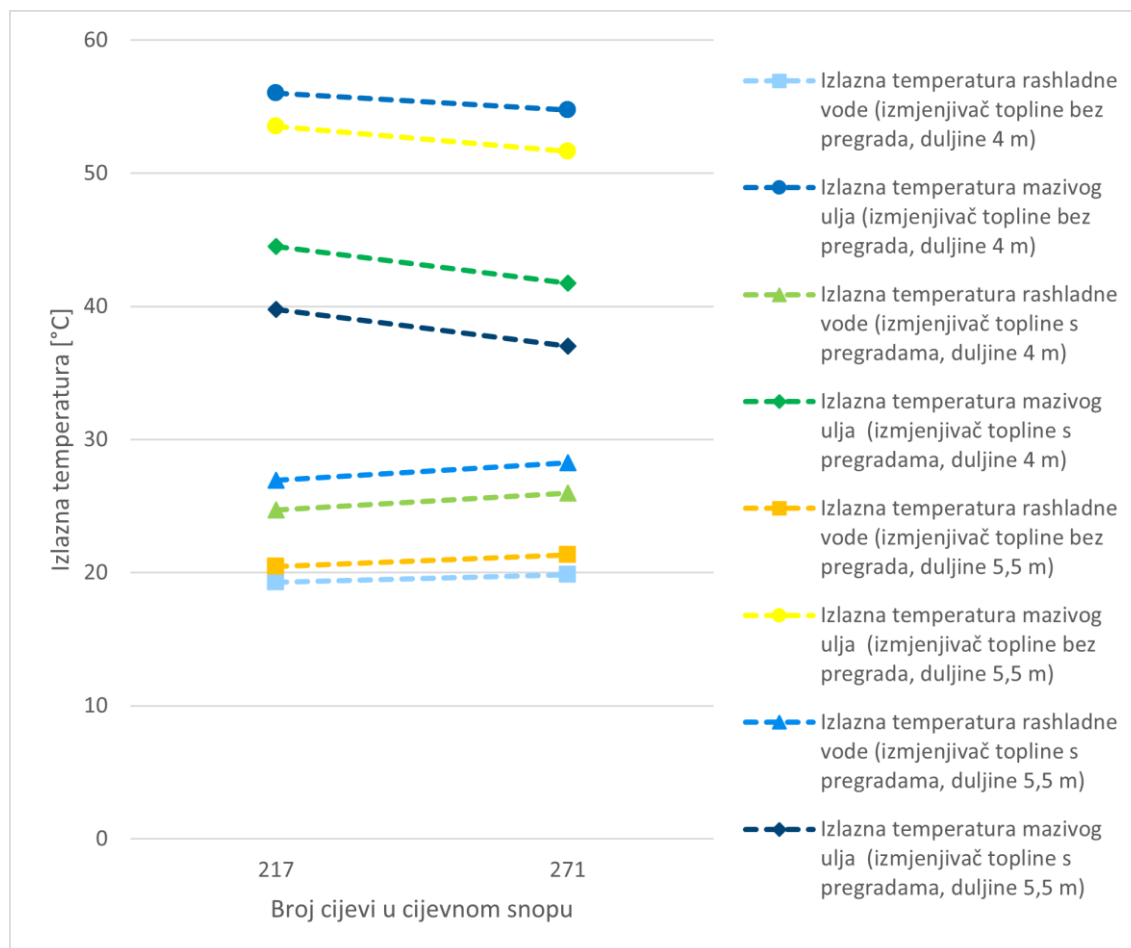


Slika 4.25 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h

Svijetlo plavim kvadratićem i narančastim kvadratićem označene su izlazne temperature rashladne vode za izmjenjivač topline bez pregrada, duljine 4 m i 5,5 m. Tamno plavim i žutim kružićem označene su izlazne temperature mazivog ulja za izmjenjivač topline bez pregrada, duljine 4 m i 5,5 m. Svijetlo zelenim i plavim trokutićem označene su izlazne temperature rashladne vode za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 4 m i 5,5 m. Tamno zelenim i tamno plavim rombom označene su izlazne temperature mazivog ulja za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 4 m i 5,5 m.

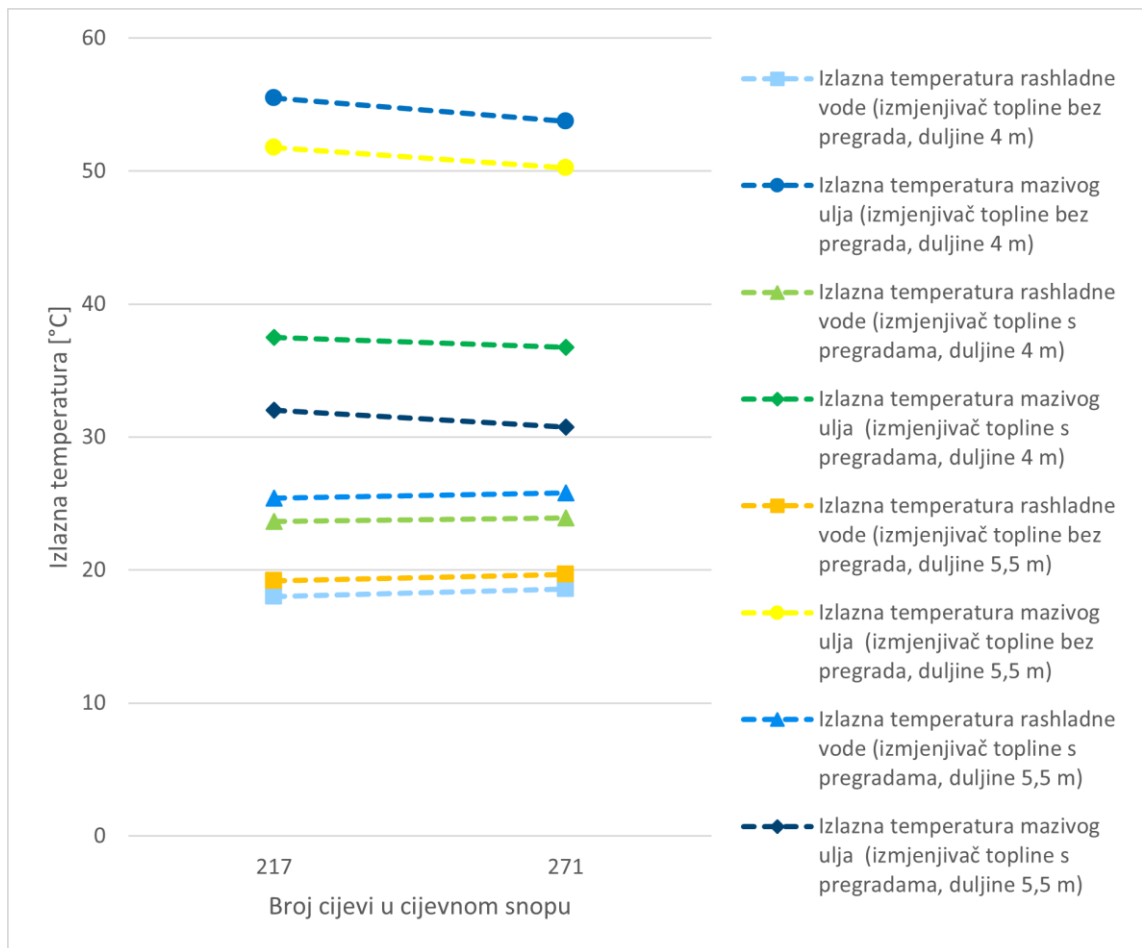
Vidljivo je kako kod protoka rashladne vode 13 m³/h povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu dobivamo nešto nižu izlaznu temperaturu mazivog ulja, tj. slabije struje. Povećanjem duljine izmjenjivača topline dobivaju se niže izlazne temperature mazivog ulja. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu blago manje utječe na smanjenje izlazne temperature mazivog ulja no što utječe povećanje duljine izmjenjivača topline.

Na slikama 4.26 – 4.29 prikazane su ovisnosti izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja o broju cijevi u cijevnom snopu te o duljini izmjenjivača topline za protoke rashladne vode 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.



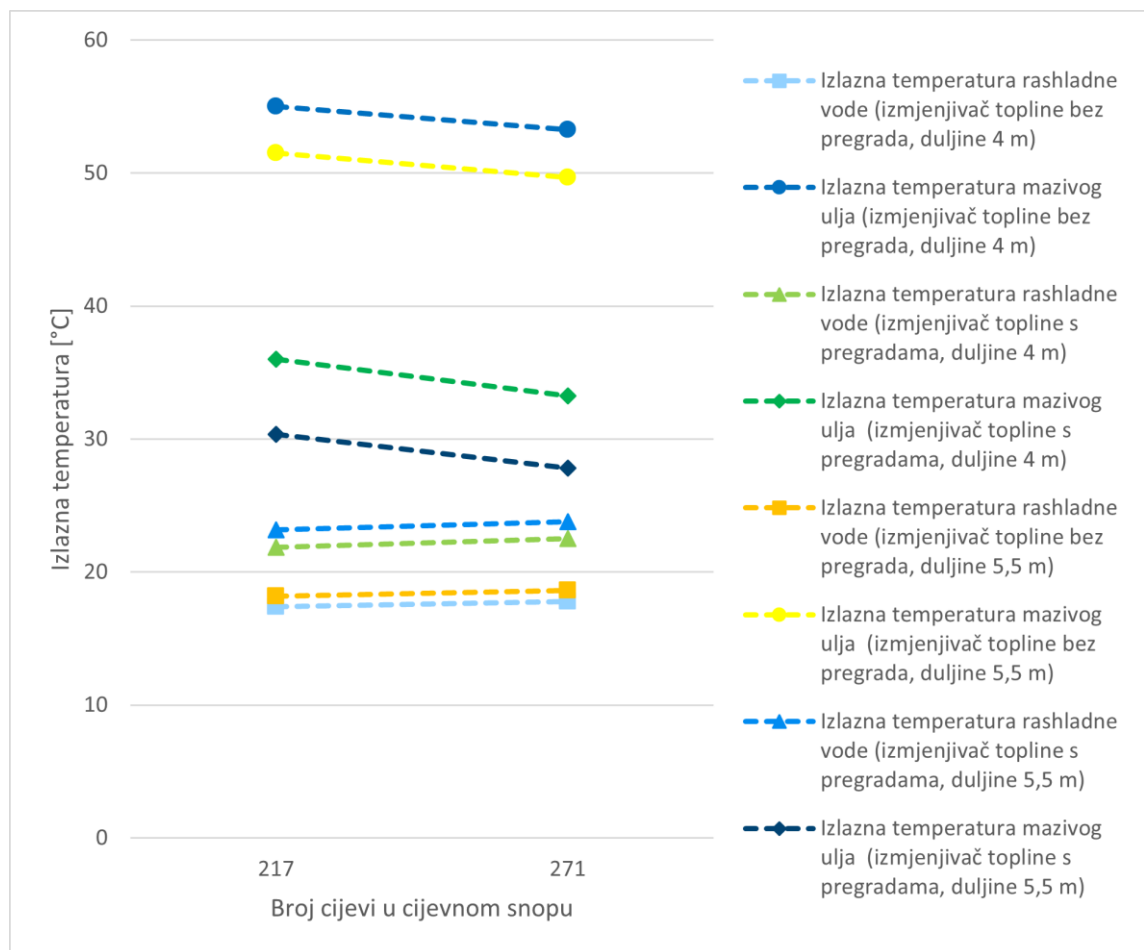
Slika 4.26 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h

Iz gornje slike je vidljivo kako se najniža temperatura mazivog ulja za protok rashladne vode od 26 m³/h postiže za izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za slučaj izmjenjivača topline s pregradama. Povećanjem duljine izmjenjivača topline dobivaju se niže izlazne temperature mazivog ulja. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu blago manje utječe na smanjenje izlazne temperature mazivog ulja no što utječe povećanje duljine izmjenjivača topline.



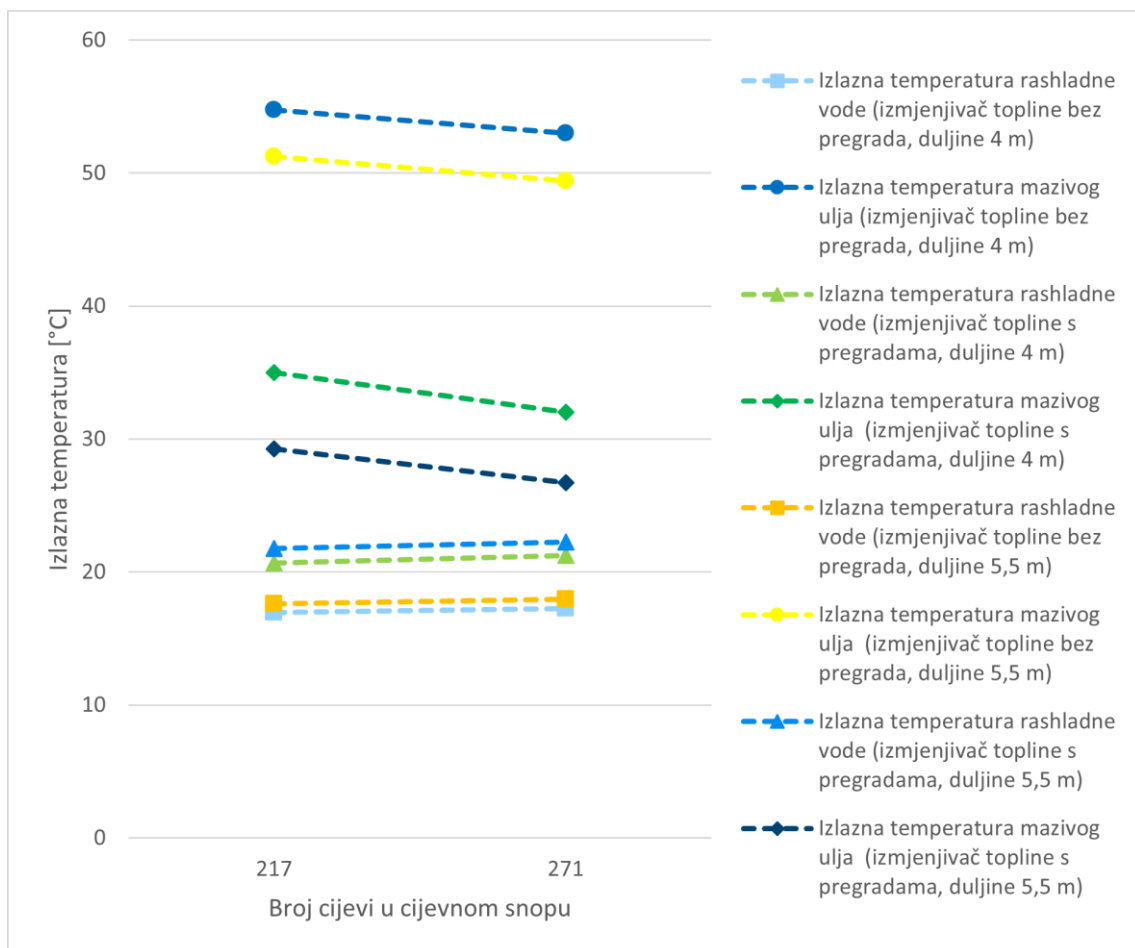
Slika 4.27 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h

Na slici 4.27 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja o broju cijevi u cijevnom snopu te za duljine izmjenjivača topline od 4 m i 5,5 m. Vidljivo je kako kod protoka rashladne vode 39 m³/h povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu dobivamo nešto nižu izlaznu temperaturu mazivog ulja, tj. slabije struje. Povećanjem duljine izmjenjivača topline dobivaju se niže izlazne temperature mazivog ulja. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu blago manje utječe na smanjenje izlazne temperature mazivog ulja no što utječe povećanje duljine izmjenjivača topline.



Slika 4.28 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h

U slučaju protoka rashladne vode od 52 m³/h, kao na slici 4.28, najveće ohlađenje mazivog ulja postiže se za izmjenjivač topline s 271 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m s pregradama u bubnju. Povećanjem duljine izmjenjivača topline dobivaju se niže izlazne temperature mazivog ulja. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu blago manje utječe na smanjenje izlazne temperature mazivog ulja no što utječe povećanje duljine izmjenjivača topline.



Slika 4.29 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h

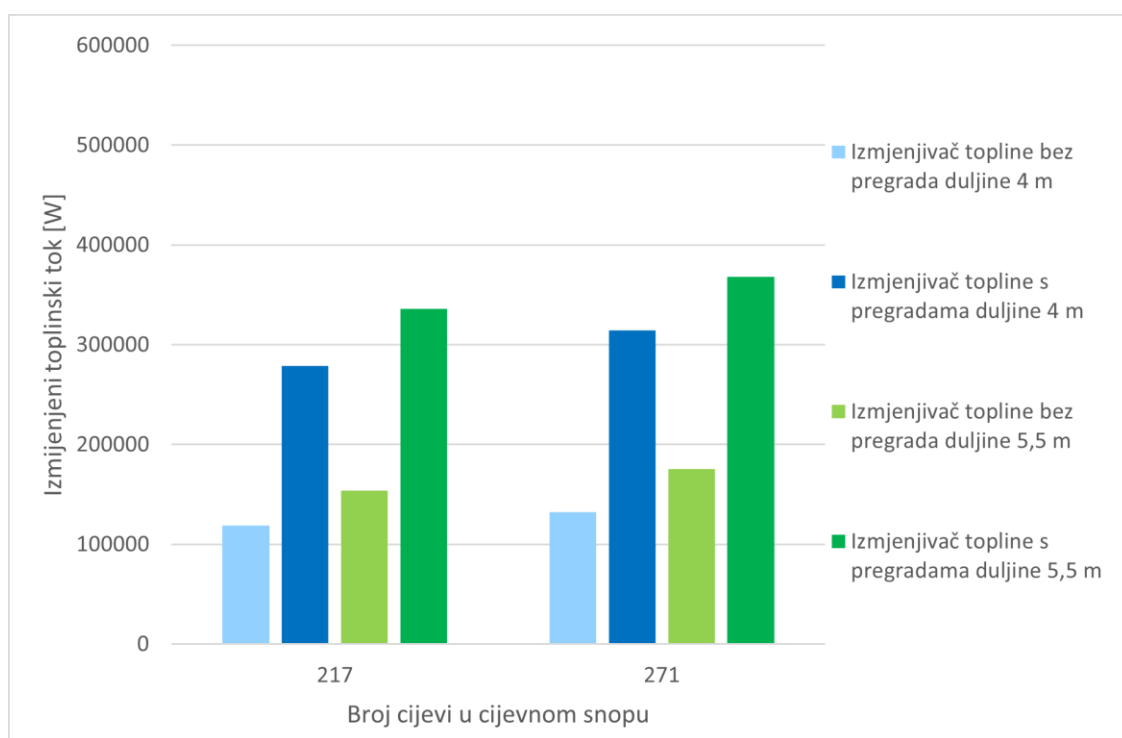
Na slici 4.29 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja o broju cijevi u cijevnom snopu te za duljine izmjenjivača topline od 4 m i 5,5 m. Vidljivo je kako kod protoka rashladne vode 65 m³/h povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu dobivamo nešto nižu izlaznu temperaturu mazivog ulja, tj. slabije struje. Povećanjem duljine izmjenjivača topline dobivaju se niže izlazne temperature mazivog ulja. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu blago manje utječe na smanjenje izlazne temperature mazivog ulja no što utječe povećanje duljine izmjenjivača topline.

Iz slika je vidljivo kako povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu dobivamo niže izlazne temperature slabije struje, tj. mazivog ulja. Povećanjem duljine izmjenjivača također dobivamo niže izlazne temperature mazivog ulja. U odnosu na izmjenjivač topline bez pregrada, izmjenjivač topline s pregradama u bubnju postiže veće ohlađenje mazivog ulja što je povoljniji slučaj. U slučaju protoka rashladne vode 65 m³/h, za izmjenjivač topline bez pregrada, duljine 4 m, promjera cijevi NO20, za 271 cijevi u cijevnom snopu, izlazna temperatura mazivog ulja smanjila se za oko

18 % u odnosu na ulaznu temperaturu mazivog ulja od $t = 65^{\circ}\text{C}$. U slučaju protoka rashladne vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$, za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 4 m, promjera cijevi NO20, za 271 cijevi u cijevnom snopu, izlazna temperatura mazivog ulja smanjila se za oko 51% u odnosu na ulaznu temperaturu mazivog ulja od $t = 65^{\circ}\text{C}$.

U slučaju protoka rashladne vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$, za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 5,5 m, promjera cijevi NO20, za 271 cijevi u cijevnom snopu, izlazna temperatura mazivog ulja smanjila se za oko 59% u odnosu na ulaznu temperaturu mazivog ulja od $t = 65^{\circ}\text{C}$.

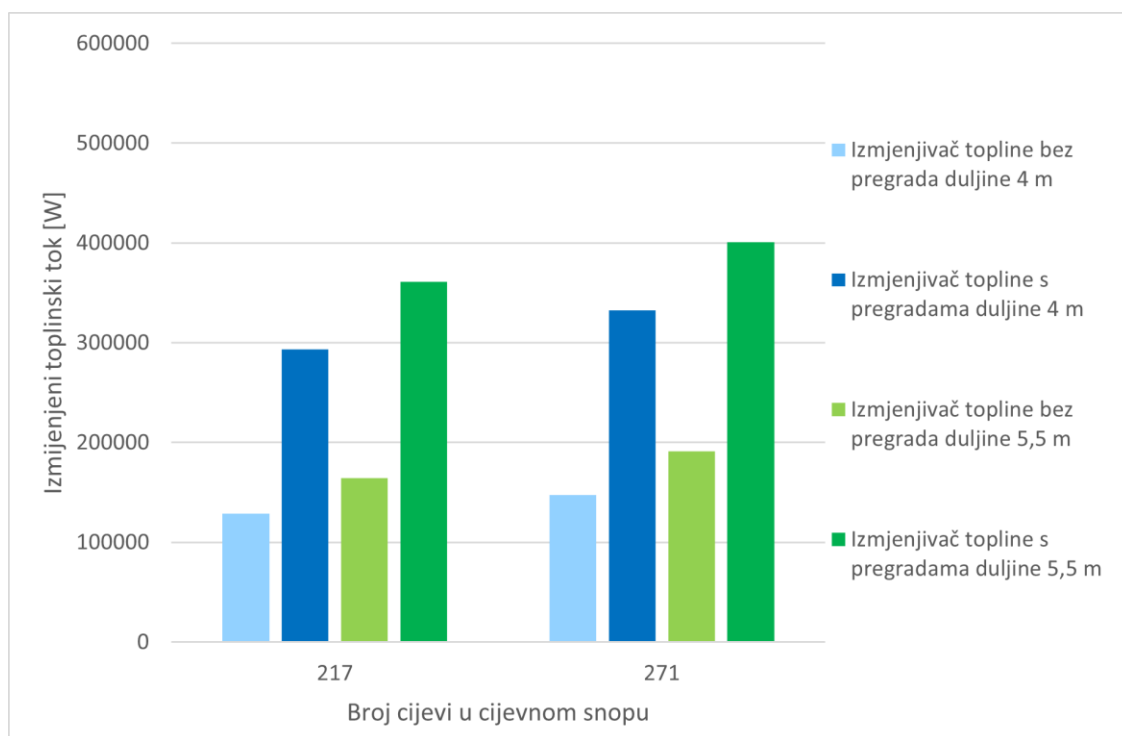
Na slikama 4.30 – 4.34 prikazane su ovisnosti izmijenjenih toplinskih tokova o broju cijevi u cijevnom snopu te duljini izmjenjivača topline za promjer cijevi u cijevnom snopu NO20 za različite protoke rashladne vode.



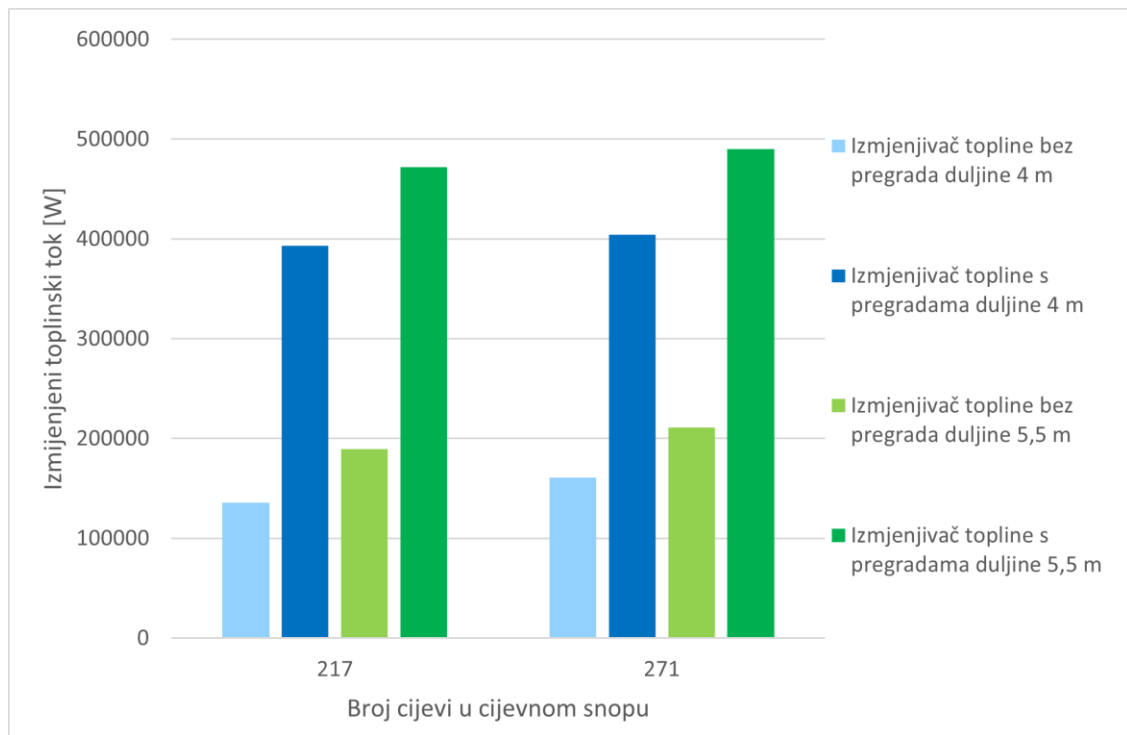
Slika 4.30 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$

Na slici 4.30 prikazana je ovisnost izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, promjera cijevi NO20 duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, za slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama, za protok rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$.

Najveći izmijenjeni toplinski tok postiže se za izmjenjivač topline s pregradama s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 5,5 m. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline povećava se izmijenjeni toplinski tok. Također, povećanjem duljine izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok također raste. Povećanjem duljine izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok blago više raste nego povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu.

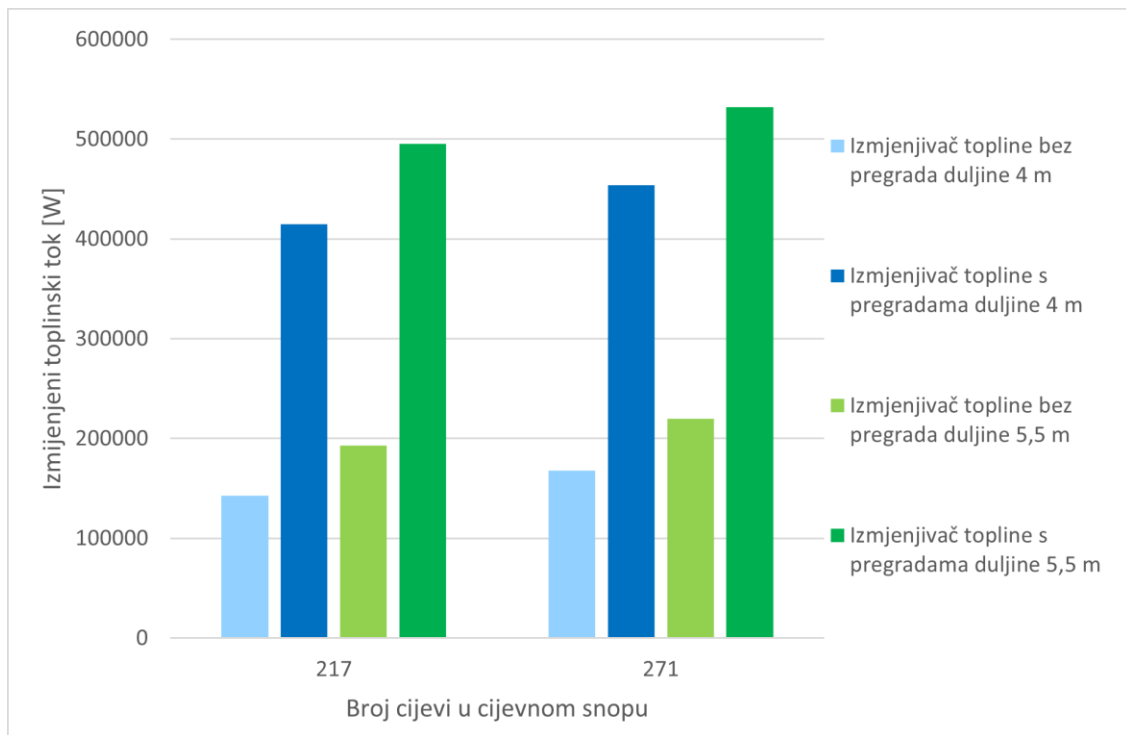


Slika 4.31 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $26 \text{ m}^3/\text{h}$

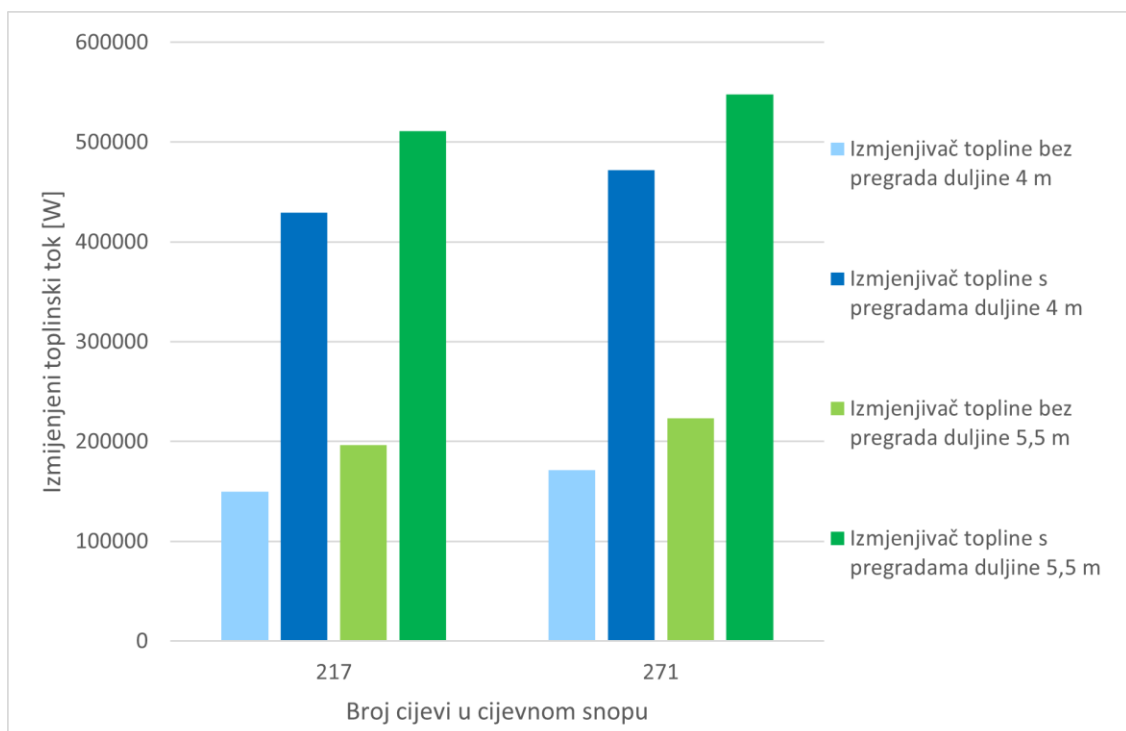


Slika 4.32 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h

U slučaju protoka rashladne vode od 39 m³/h kao na slici 4.32, najveći izmijenjeni toplinski tok postiže se za izmjenjivač topline s pregradama, s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 5,5 m. Izmijenjeni toplinski tok veći je za izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu duljine 5,5 m, s pregradama u bubnju, nego li je za izmjenjivač topline s 217 cijevi u cijevnom snopu duljine 5,5 m, također s pregradama u bubnju.



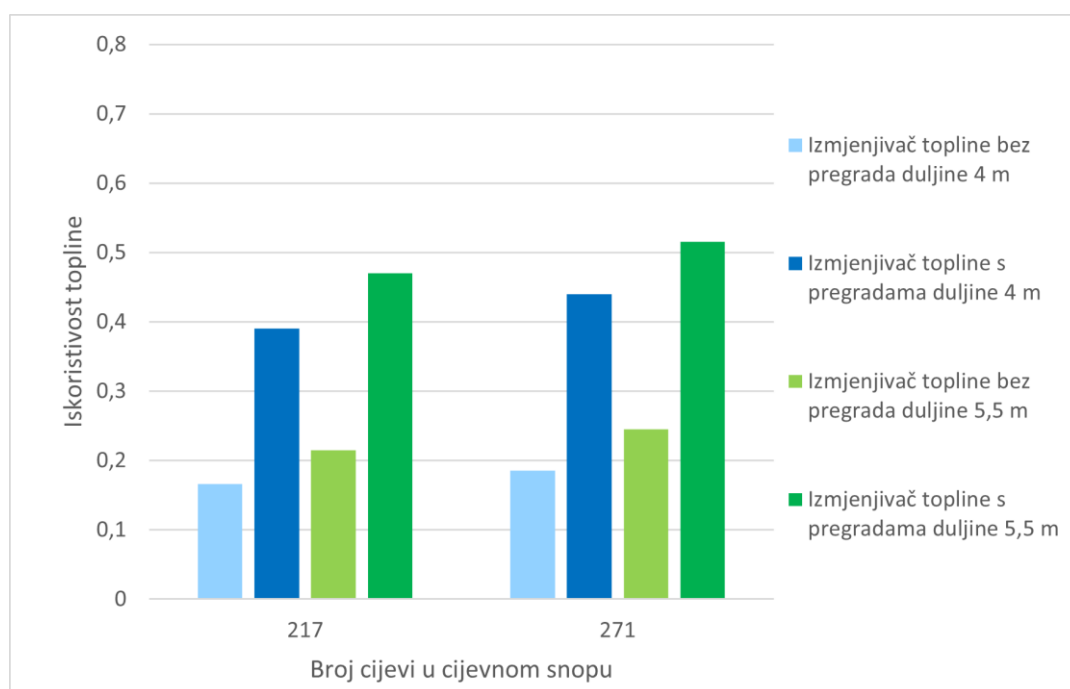
Slika 4.33 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h



Slika 4.34 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h

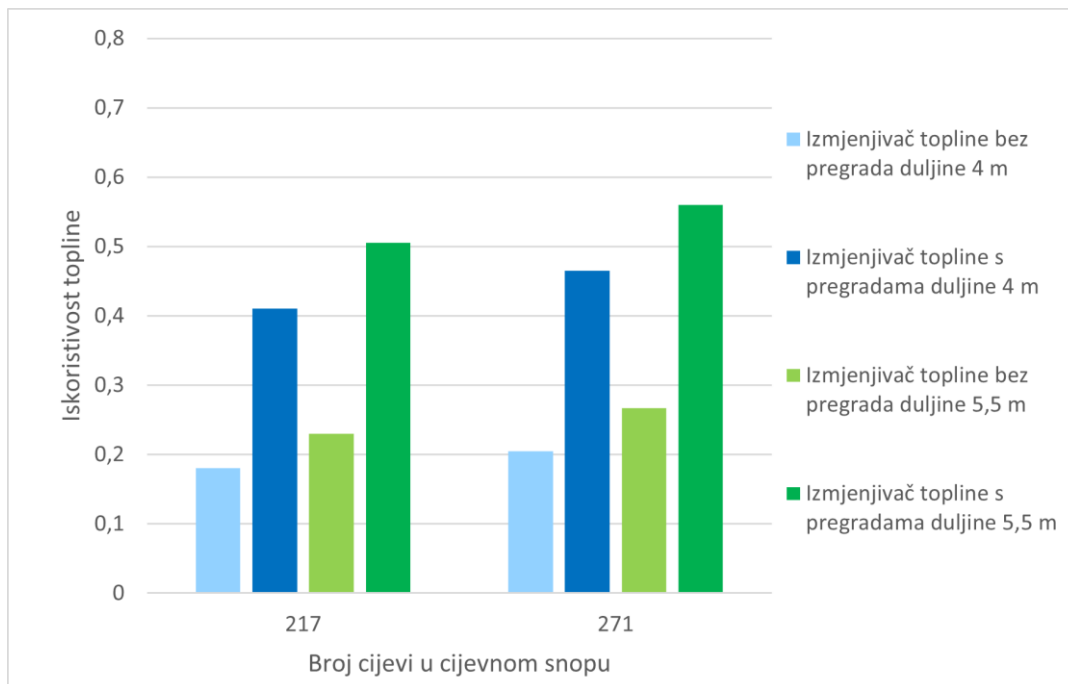
Iz slika je vidljivo kako za sve protoke rashladne vode najveći izmijenjeni toplinski tok postizemo za izmjenjivač topline s pregradama u bubnju, s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 5,5 m. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline, izmijenjeni toplinski tok se višestruko povećava. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu također povećava izmijenjeni toplinski tok.

Za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h usporedba iskoristivosti topline o broju cijevi u bubnju i duljini izmjenjivača topline, za slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju prikazana je na slikama 4.35 – 4.39.



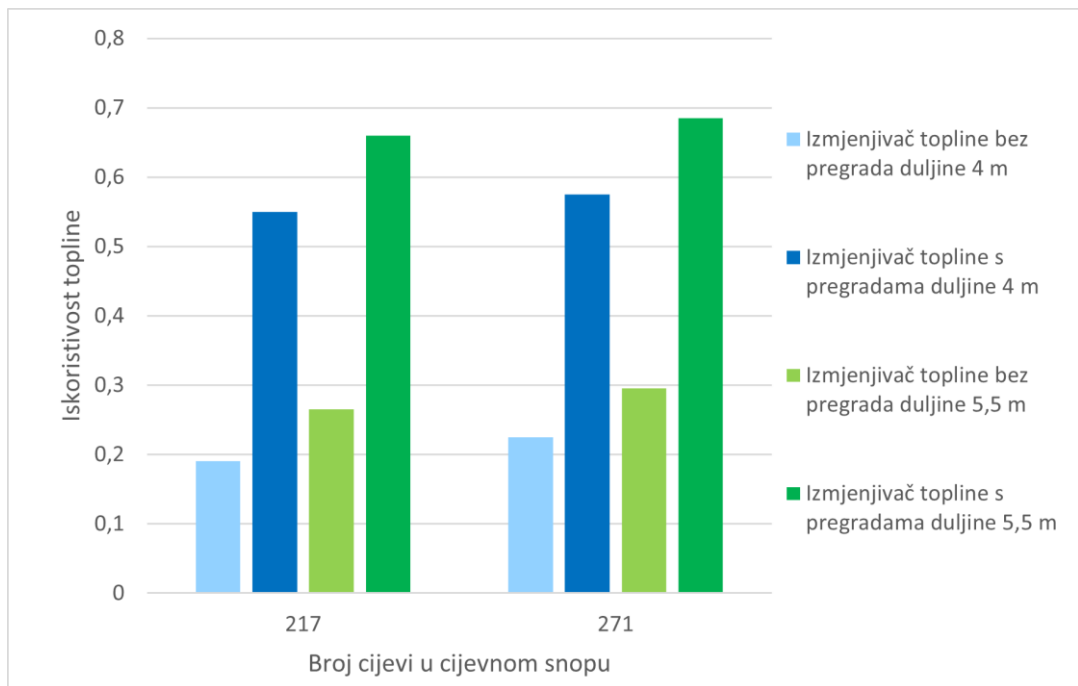
Slika 4.35 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h

Slikom 4.35 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m te za slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju, za protok rashladne vode 13 m³/h. Najveću iskoristivost topline postiže se za izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 5,5 m.



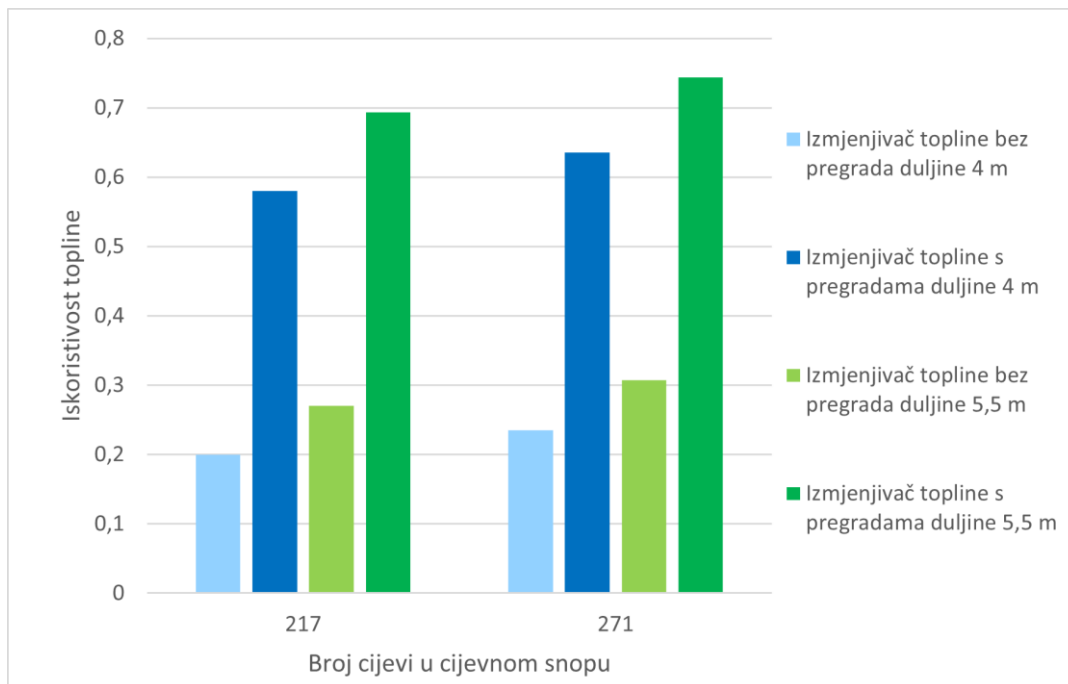
Slika 4.36 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h

Sa slika je vidljivo kako se najveća iskoristivost topline postiže za izmjenjivač topline s 271 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m. Također, povećanjem duljine izmjenjivača topline iskoristivost topline također raste. Povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu iskoristivost topline nešto manje raste nego povećanjem duljine izmjenjivača topline.



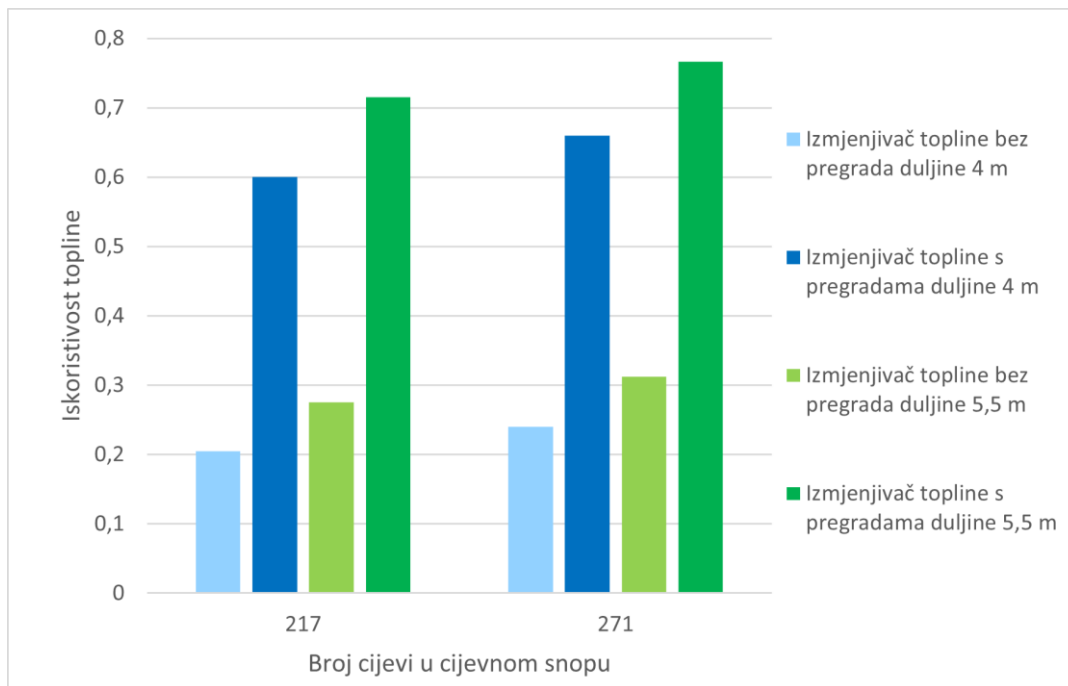
Slika 4.37 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h

U slučaju protoka rashladne vode 39 m³/h, kao na slici 4.37, najveću iskoristivost topline ima izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, s pregradama u bubnju te duljine 5,5 m.



Slika 4.38 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h

Slikom 4.38 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m te za slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju, za protok rashladne vode 52 m³/h. Sa slika je vidljivo kako se najveća iskoristivost topline postiže za izmjenjivač topline s 271 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m. Također, povećanjem duljine izmjenjivača topline iskoristivost topline također raste. Povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu iskoristivost topline nešto manje raste nego povećanjem duljine izmjenjivača topline



Slika 4.39 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode od 65 m³/h

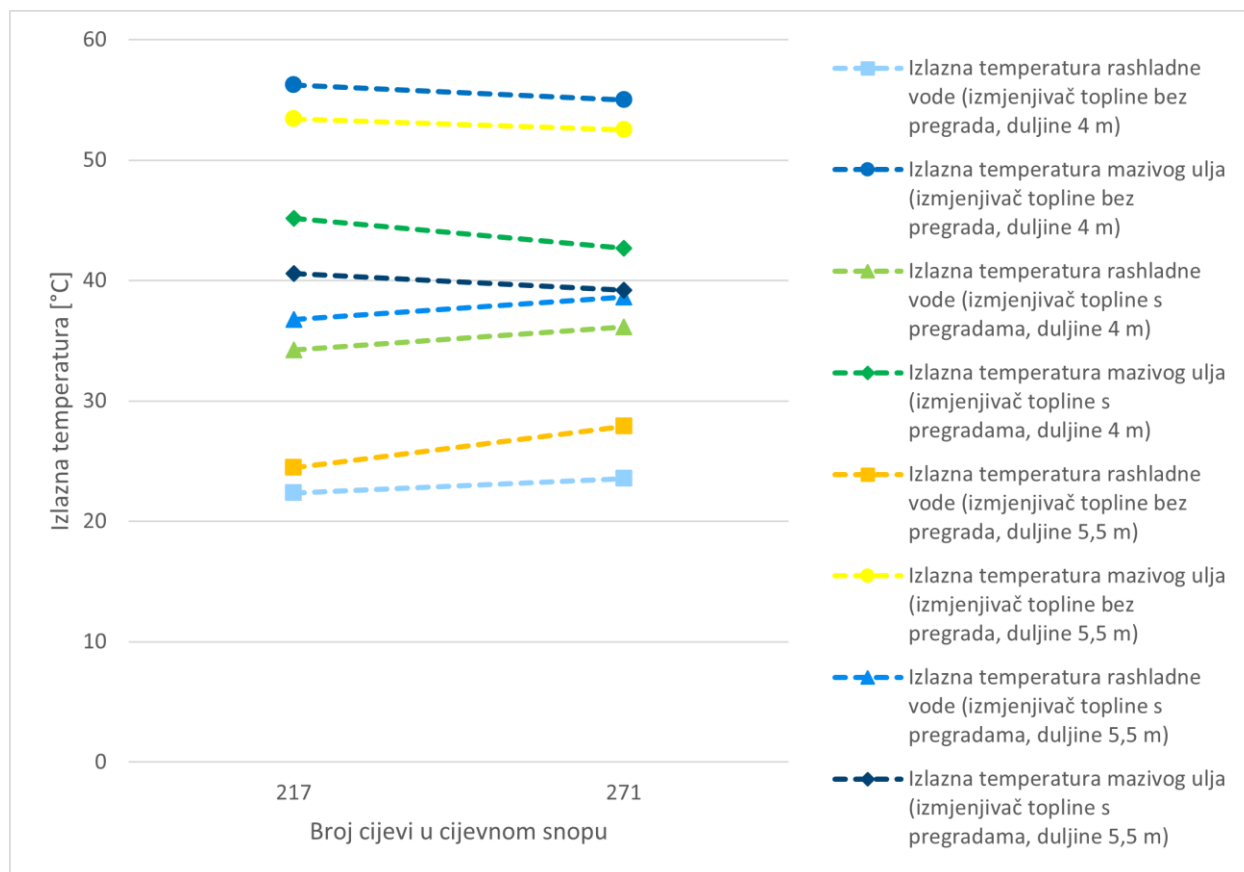
Najveća iskoristivost topline postiže se za protusmjerni izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 5,5 m, promjera cijevi u cijevnom snopu NO20 te protok rashladne vode od 65 m³/h, za izmjenjivač topline s pregradama u bubnju. Za ovaj slučaj iskoristivost topline iznosi 76,6%, izmijenjeni toplinski tok 547794,9 W dok je izlazna temperatura slabije struje 26,7°C.

Iz prikazanih slika može se zaključiti kako na povećanje iskoristivosti topline najviše utječe umetanje pregrada u bubanj izmjenjivača topline. Povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu iskoristivost topline nešto manje raste nego povećanjem duljine izmjenjivača topline.

4.9.2. Usporedba izmjene topline u izmjenjivačima topline s 217 i 271 cijevi promjera NO25 u unutrašnjem cijevnom snopu

U ovom potpoglavlju analizirat će se dobiveni rezultati za izmjenjivače topline s 217 i 271 cijevi u unutrašnjem cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m i promjer cijevi u cijevnom snopu NO25.

Na slici 4.40 prikazana je usporedba izlaznih temperatura obiju struja ovisno o broju cijevi u cijevnom snopu te ovisno o duljini izmjenjivača topline. Promatra se slučaj za volumni protok rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$, duljine izmjenjivača 4 m i 5,5 m te promjer cijevi u snopu NO25.

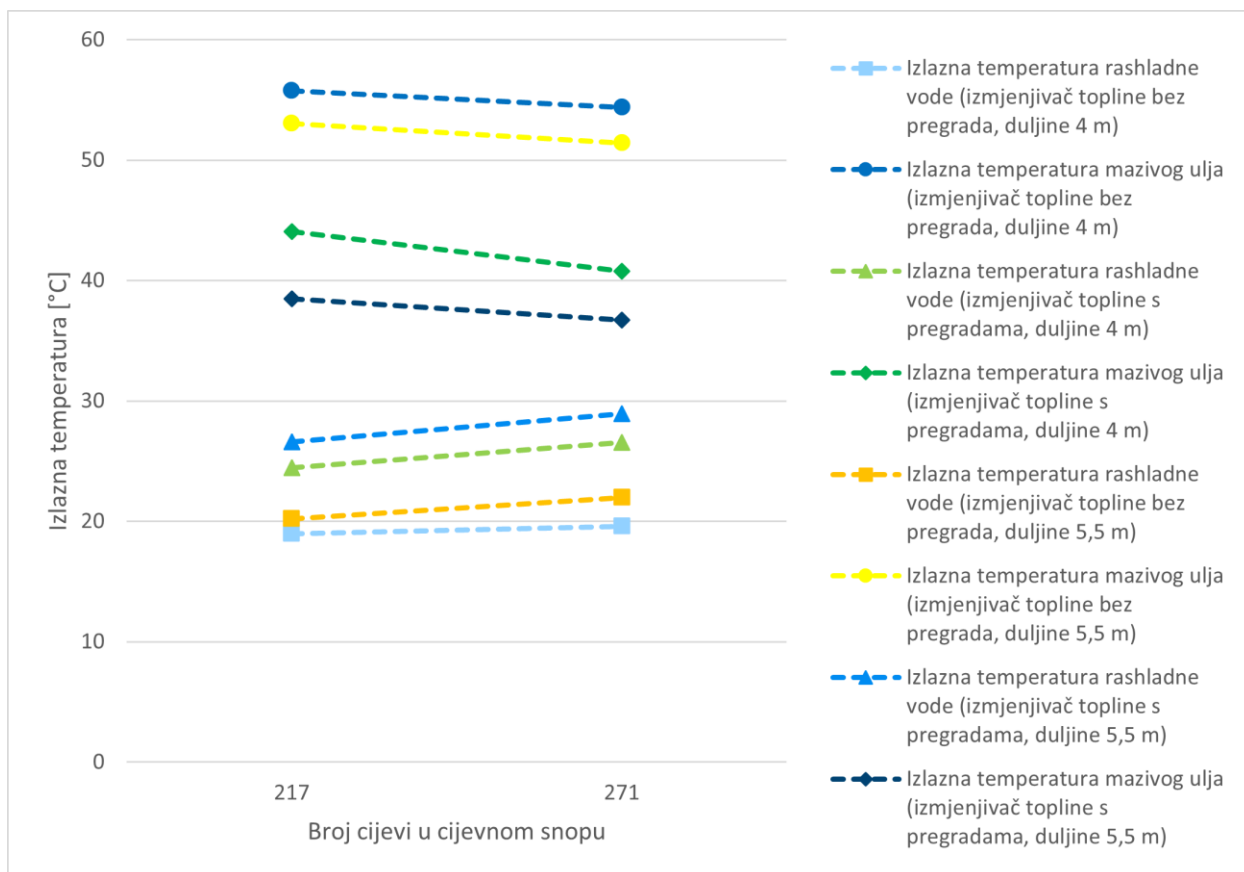


Slika 4.40 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$

Svijetlo plavim kvadratićem i narančastim kvadratićem označene su izlazne temperature rashladne vode za izmjenjivač topline bez pregrada, duljine 4 m i 5,5 m. Tamno plavim i žutim kružićem označene su izlazne temperature mazivog ulja za izmjenjivač topline bez pregrada, duljine 4 m i 5,5 m. Svijetlo zelenim i plavim trokutićem označene su izlazne temperature rashladne vode za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 4 m i 5,5 m. Tamno zelenim i tamno plavim rombom označene su izlazne temperature mazivog ulja za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 4 m i 5,5 m.

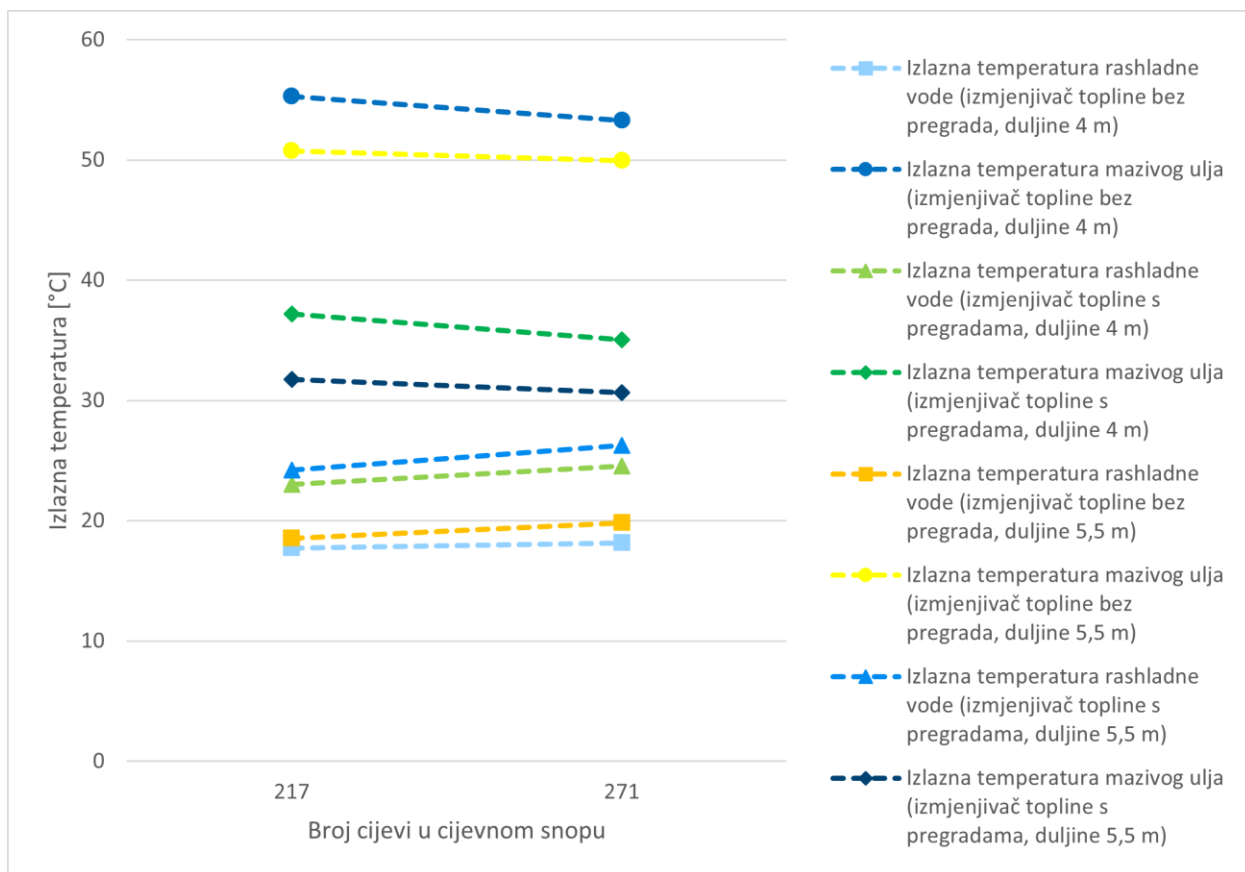
Povećanjem duljine izmjenjivača topline dobivaju se niže izlazne temperature mazivog ulja. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu blago manje utječe na smanjenje izlazne temperature mazivog ulja no što utječe povećanje duljine izmjenjivača topline.

Na slikama 4.41 – 4.44 prikazane su ovisnosti izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja o broju cijevi u cijevnom snopu te o duljini izmjenjivača topline za protoke rashladne vode 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h.



Slika 4.41 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h

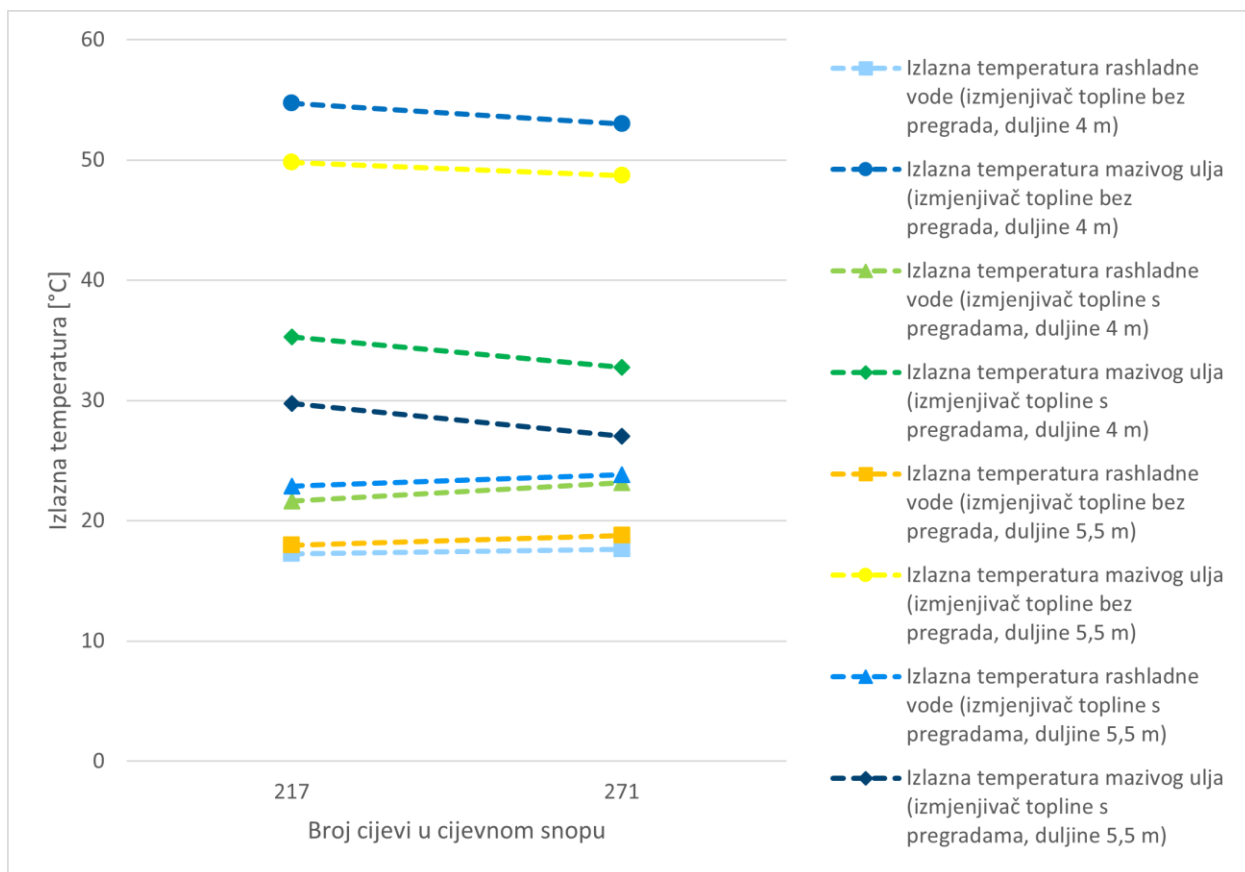
Na slici 4.41 dana je ovisnost izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja za protok rashladne vode 26 m³/h. Najveće ohlađenje mazivog ulja postiže se za 271 cijev u cijevnom snopu te duljinu izmjenjivača topline 5,5 m.



Slika 4.42 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $39 \text{ m}^3/\text{h}$

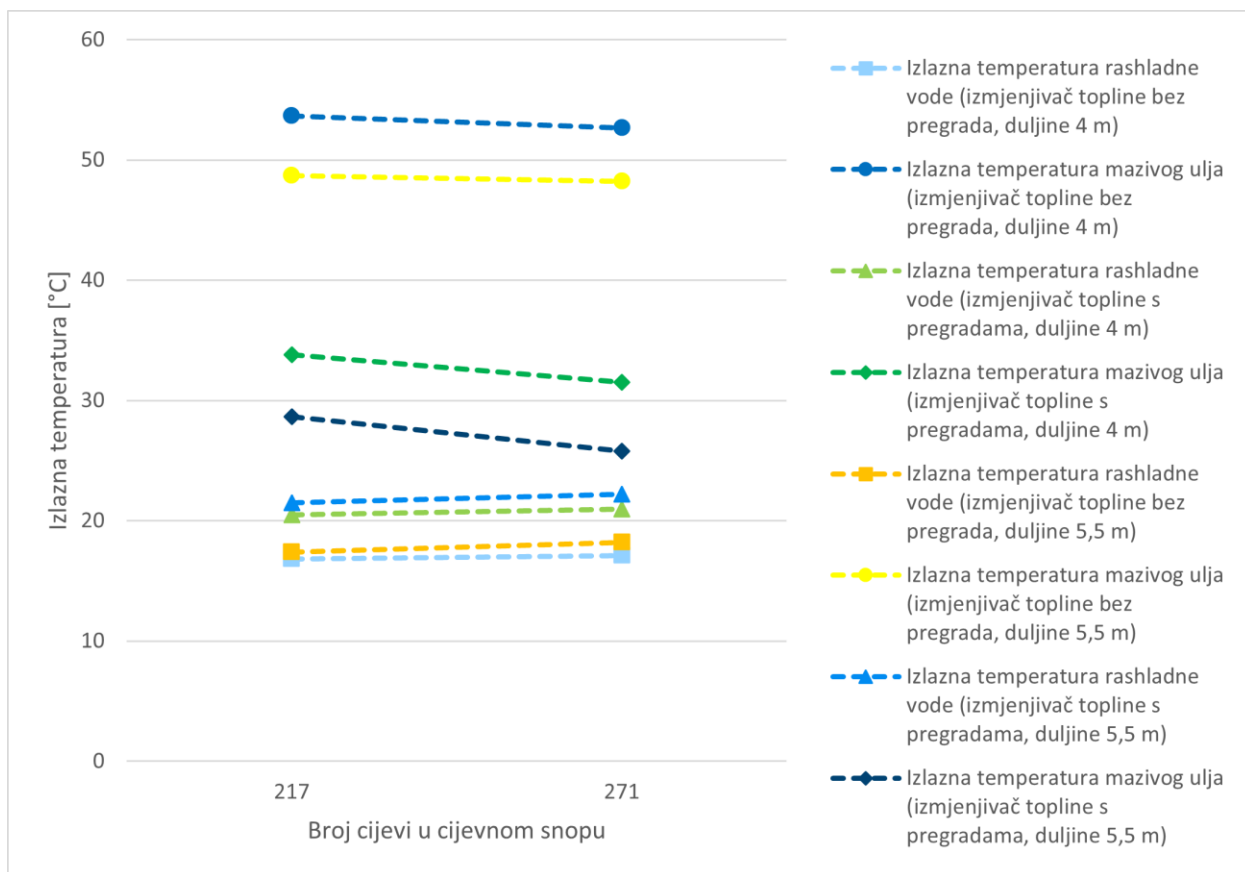
Slikom 4.42 dana je ovisnost izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja za izmjenjivač topline bez i s pregradama, duljine 4 m i 5,5 m te s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, za protok rashladne vode $39 \text{ m}^3/\text{h}$.

Iz prikazanih je slika vidljivo kako dodavanjem pregrada i povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu s 217 na 271, dobivamo nižu izlaznu temperaturu slabije struje tj. mazivog ulja. Najniža temperatura mazivog ulja postiže se za izmjenjivač topline s pregradama i 271 cijevi u cijevnom snopu te duljine izmjenjivača topline 5,5 m. Povećanjem duljine izmjenjivača topline dobivaju se niže izlazne temperature mazivog ulja. Povećanje broja cijevi u cijevnom snopu blago manje utječe na smanjenje izlazne temperature mazivog ulja no što utječe povećanje duljine izmjenjivača topline.



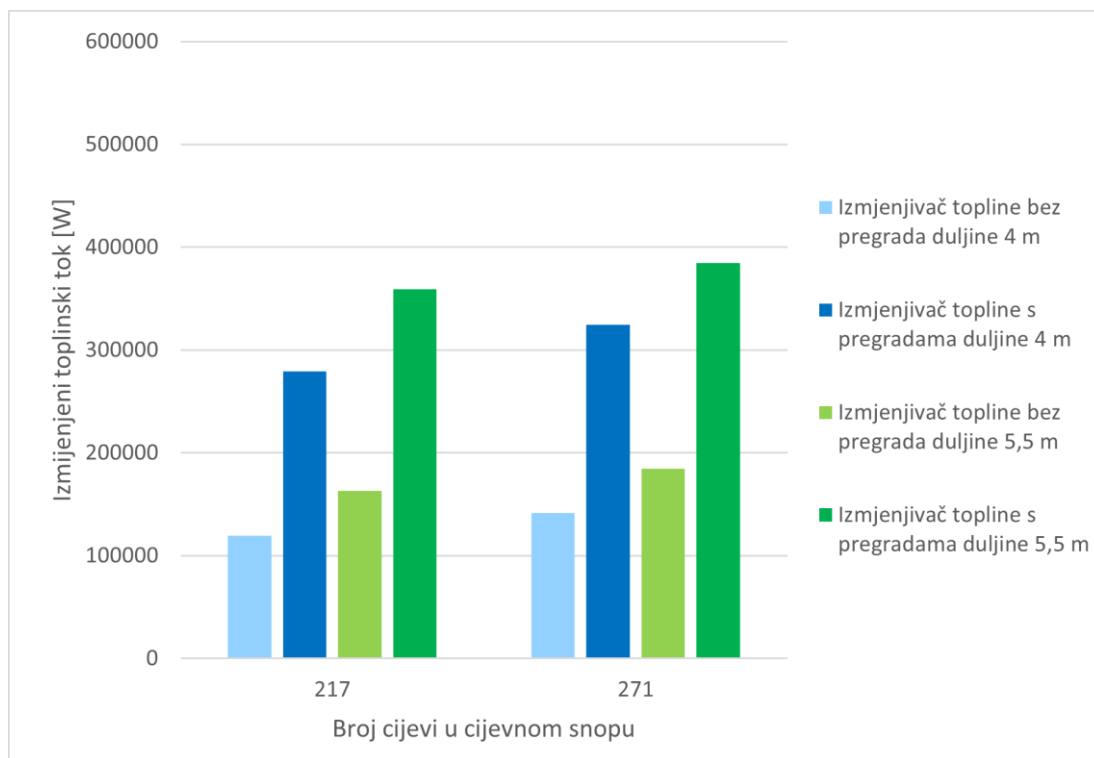
Slika 4.43 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $52 \text{ m}^3/\text{h}$

Slikom 4.43 prikazana je ovisnost izlaznih temperatura rashladne vode i mazivog ulja za izmjenjivač topline s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, za slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju te za duljinu izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, za protok rashladne vode $52 \text{ m}^3/\text{h}$. Najniža temperatura mazivog ulja postiže se za izmjenjivač topline s pregradama i 271 cijevi u cijevnom snopu te duljine izmjenjivača topline 5,5 m.



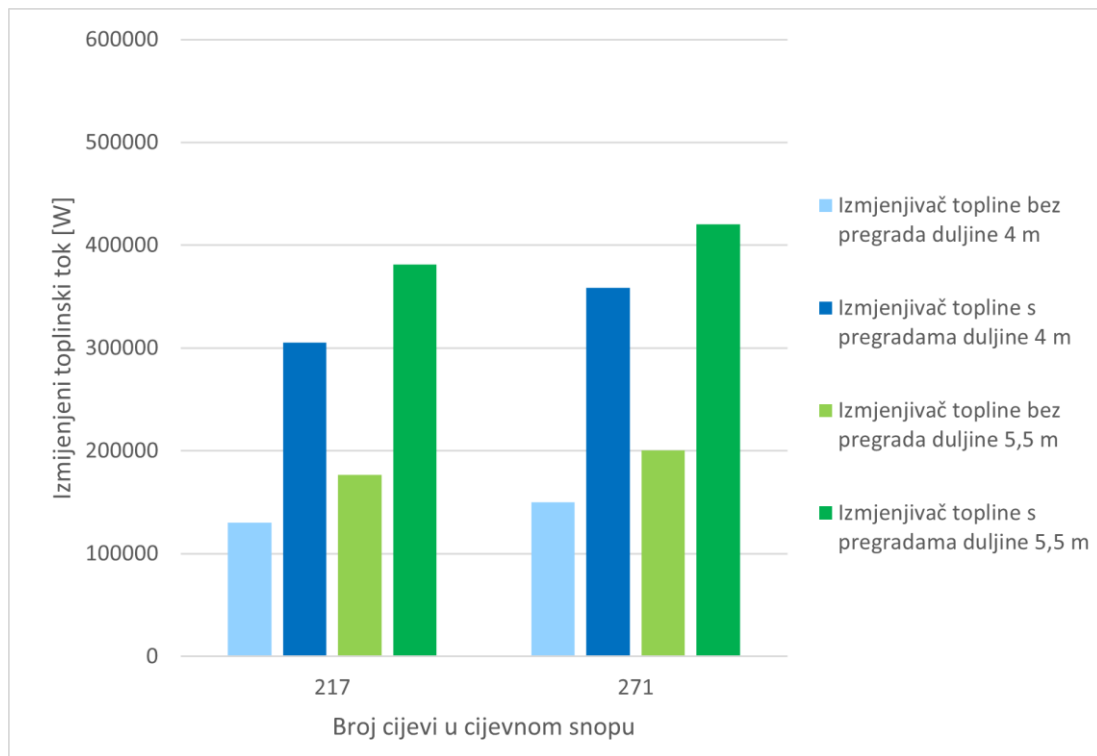
Slika 4.44 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$

Nadalje, usporediti ćemo izmijenjene toplinske tokove u ovisnosti o broju cijevi u cijevnom snopu te duljini izmjenjivača topline. Promatramo slučajeve za protoke rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$, $26 \text{ m}^3/\text{h}$, $39 \text{ m}^3/\text{h}$, $52 \text{ m}^3/\text{h}$ i $65 \text{ m}^3/\text{h}$ te promjer cijevi u cijevnom snopu NO25. Duljine izmjenjivača topline su 4 m i 5,5 m za slučajeve izmjenjivača topline bez i s pregradama. Izmijenjeni toplinski tokovi u navedenim slučajevima prikazani su na slikama 4.45 – 4.49.



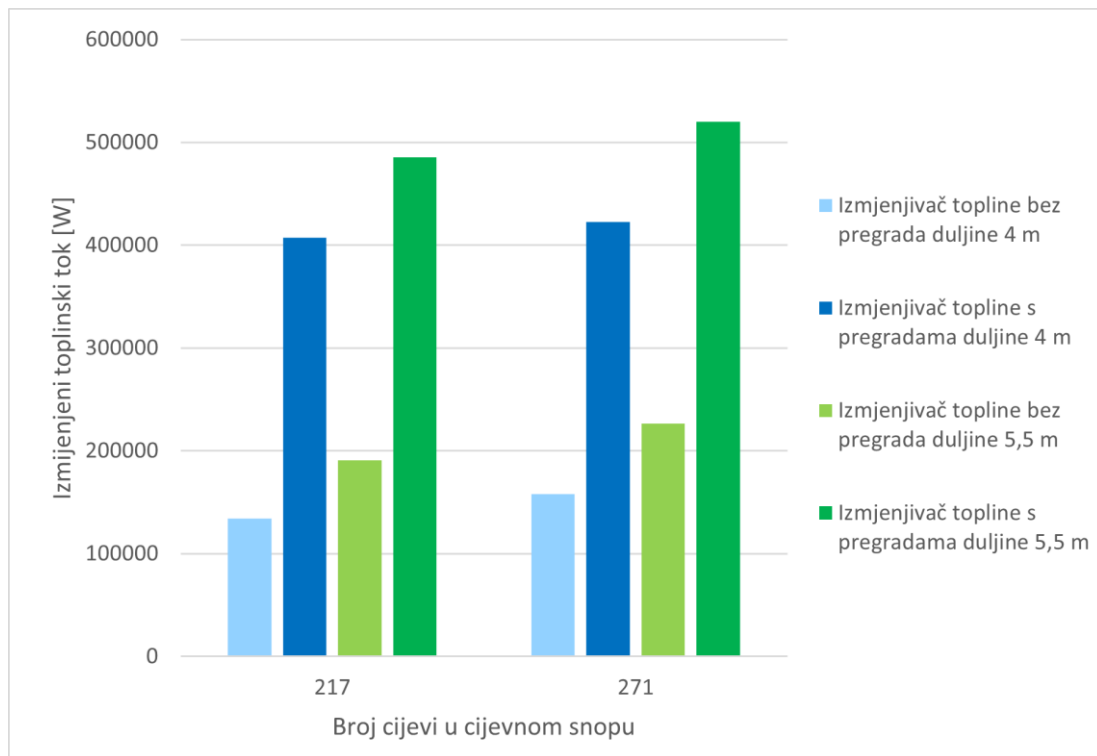
Slika 4.45 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$

Na slici 4.45 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o broju cijevi u cijevnom snopu i duljini izmjenjivača topline, za slučajeve izmjenjivača topline bez i s pregradama, za protok rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$. Svijetlo plavom bojom prikazan je izmijenjeni toplinski tok za izmjenjivač topline bez pregrada, duljine 4 m. Tamno plavom bojom prikazan je izmijenjeni toplinski tok za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 4 m. Svijetlo zelenom bojom prikazan je izmijenjeni toplinski tok za izmjenjivač topline bez pregrada, duljine 5,5 m. Tamno zelenom bojom prikazan je izmijenjeni toplinski tok za izmjenjivač topline s pregradama, duljine 5,5 m.



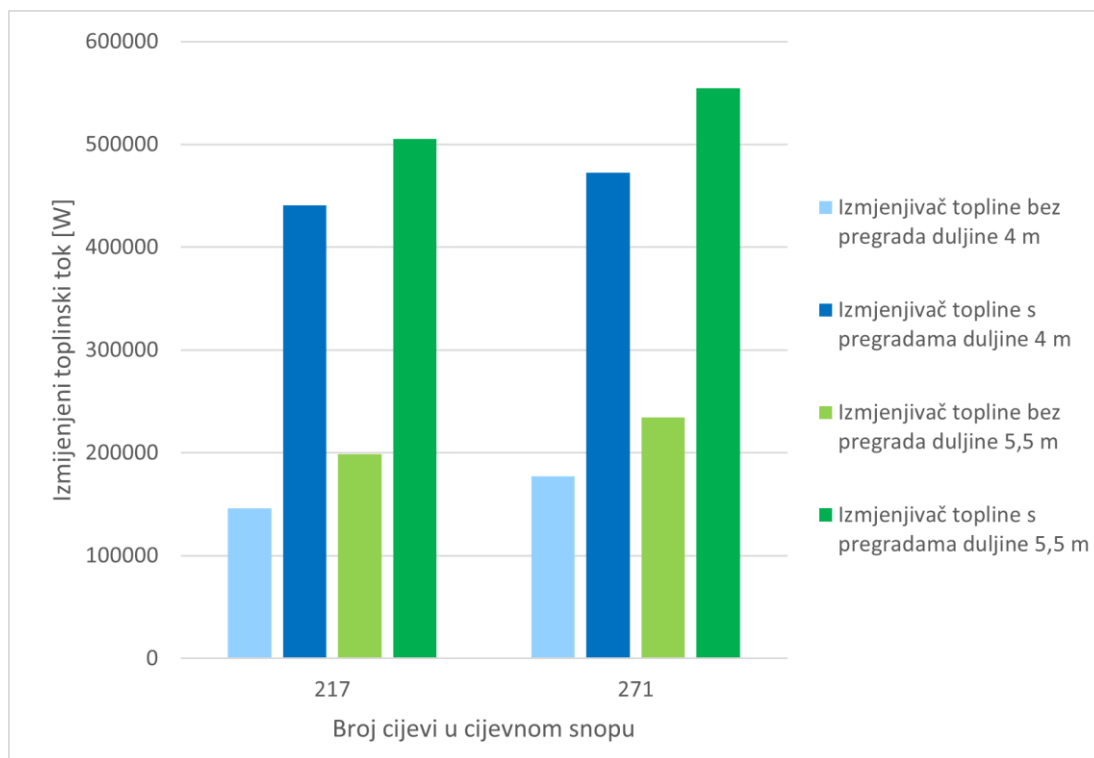
Slika 4.46 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $26 \text{ m}^3/\text{h}$

Slikom 4.46 dana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o broju cijevi u cijevnom snopu, za izmjenjivač topline bez i s pregradama u bubnju, duljine 4 m i 5,5 m, za protok rashladne vode $26 \text{ m}^3/\text{h}$. Izmijenjeni toplinski tok raste za izmjenjivač topline s pregradama. Povećanjem duljine izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok se također povećava.



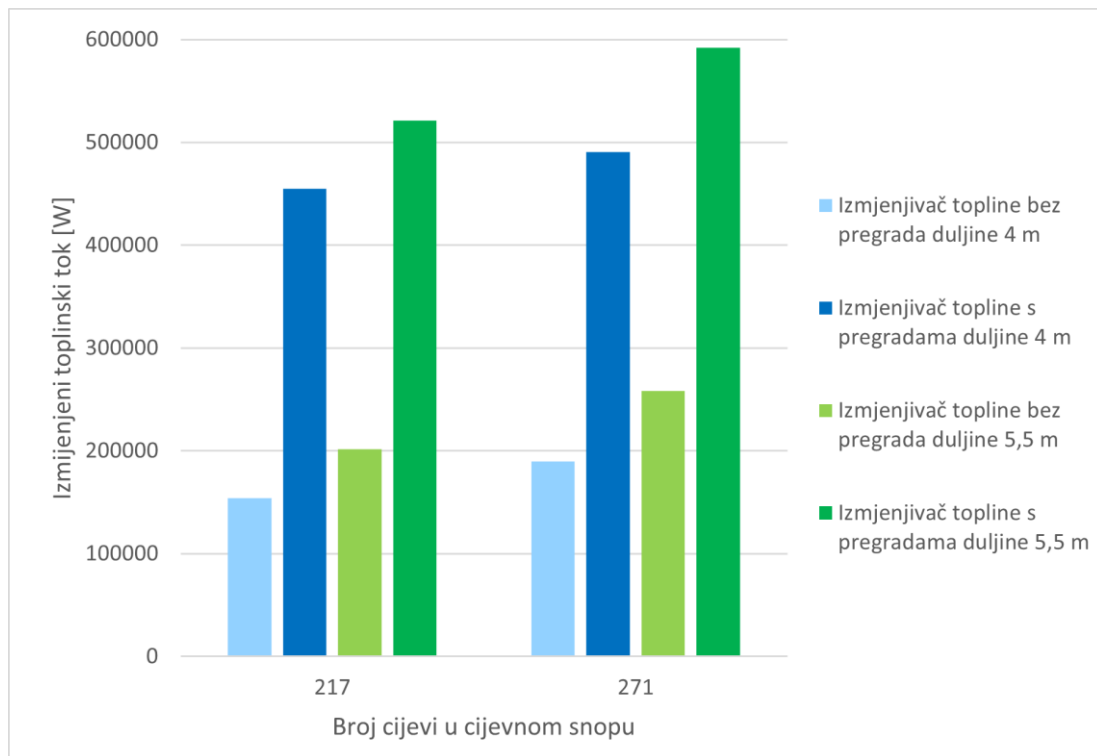
Slika 4.47 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $39 \text{ m}^3/\text{h}$

Povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu povećava se i izmijenjeni toplinski tok. Najveći izmijenjeni toplinski tok postiže se za izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, s pregradama u bubnju. Izmijenjeni toplinski tok raste za izmjenjivač topline s pregradama. Povećanjem duljine izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok se također povećava.



Slika 4.48 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $52 \text{ m}^3/\text{h}$

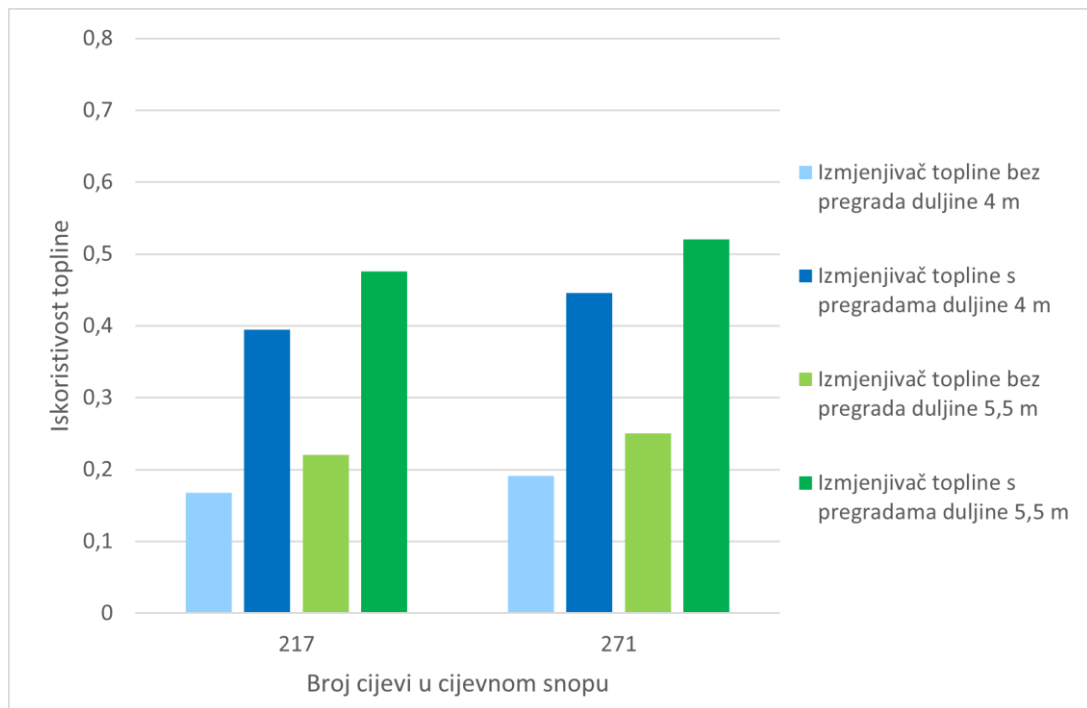
Na slici 4.48 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o broju cijevi u cijevnom snopu, za izmjenjivač topline bez i s pregradama u bubnju, duljine 4 m i 5,5 m, za protok rashladne vode $52 \text{ m}^3/\text{h}$. Izmijenjeni toplinski tok raste za izmjenjivač topline s pregradama. Povećanjem duljine izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok se također povećava.



Slika 4.49 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$

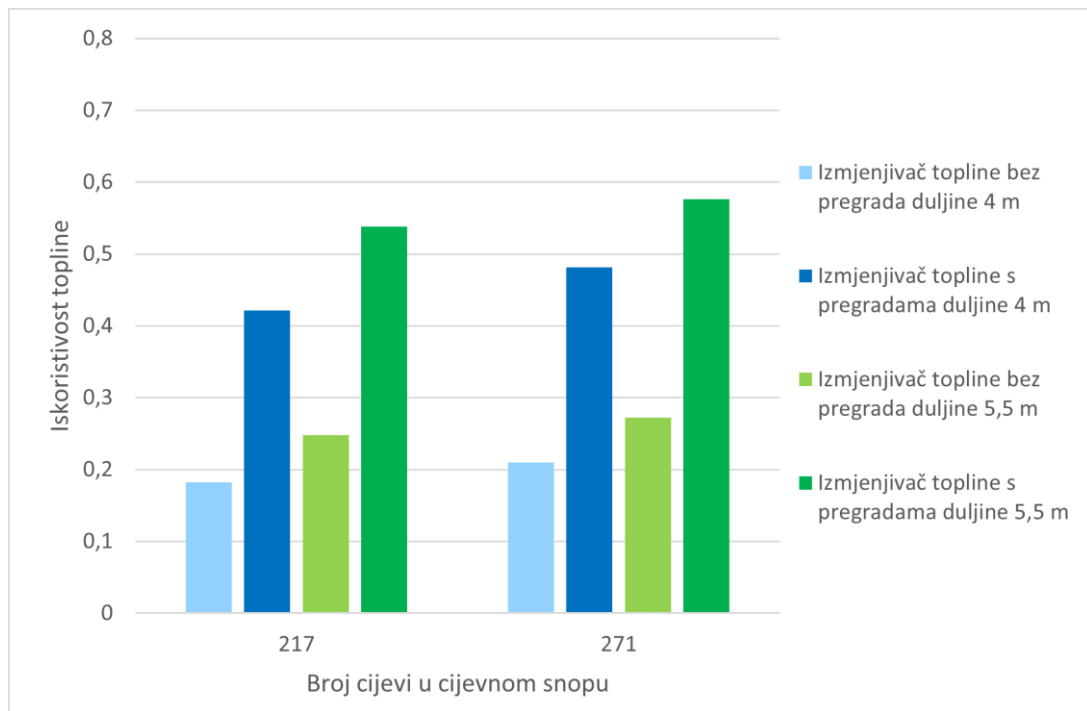
Na slici 4.49 prikazana je ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o broju cijevi u cijevnom snopu, za izmjenjivač topline bez i s pregradama u bubnju, duljine 4 m i 5,5 m, za protok rashladne vode $65 \text{ m}^3/\text{h}$. . Izmijenjeni toplinski tok raste za izmjenjivač topline s pregradama. Povećanjem duljine izmjenjivača topline izmijenjeni toplinski tok se također povećava.

Za protoke rashladne vode $13 \text{ m}^3/\text{h}$, $26 \text{ m}^3/\text{h}$, $39 \text{ m}^3/\text{h}$, $52 \text{ m}^3/\text{h}$ i $65 \text{ m}^3/\text{h}$ usporedba iskoristivosti topline o broju cijevi u bubnju i duljini izmjenjivača topline, za slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju prikazana je na slikama 4.50 – 4.54.



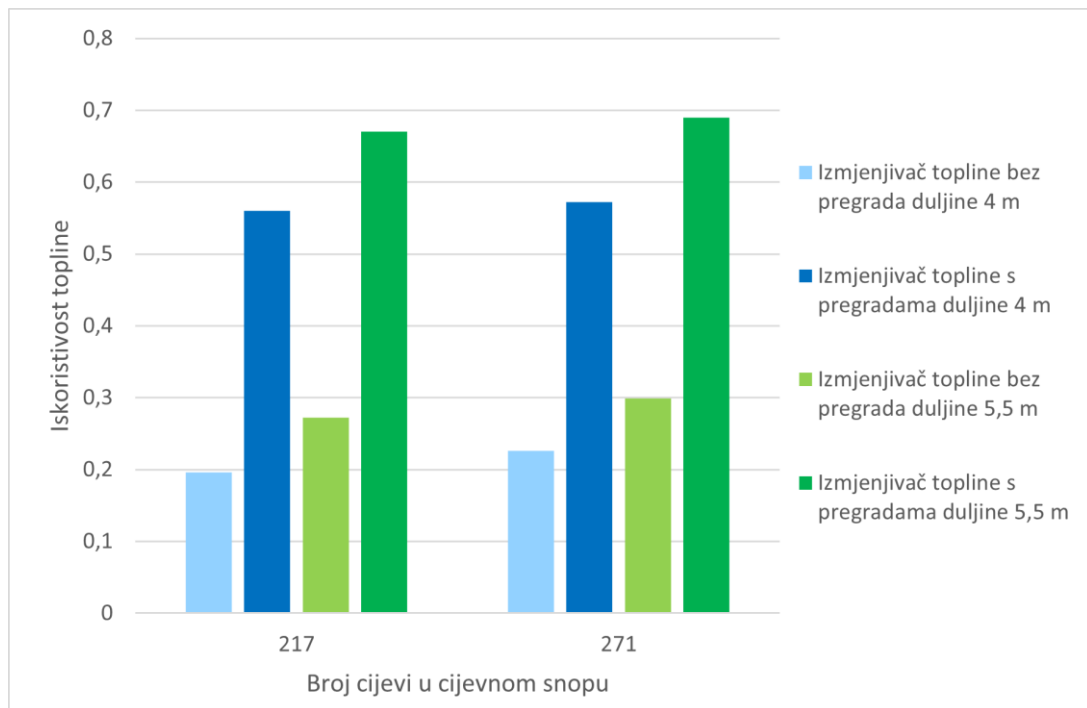
Slika 4.50 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h

Na slici 4.50 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline za izmjenjivač topline bez i s pregradama u bubnju, duljine 4 m i 5,5 m te s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, za protok rashladne vode 13 m³/h. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline raste. Povećanjem duljine izmjenjivača topline iskoristivost topline se također povećava. Pozitivan efekt na povećanje iskoristivosti topline ima i povećanje broja cijevi u cijevnom snopu.



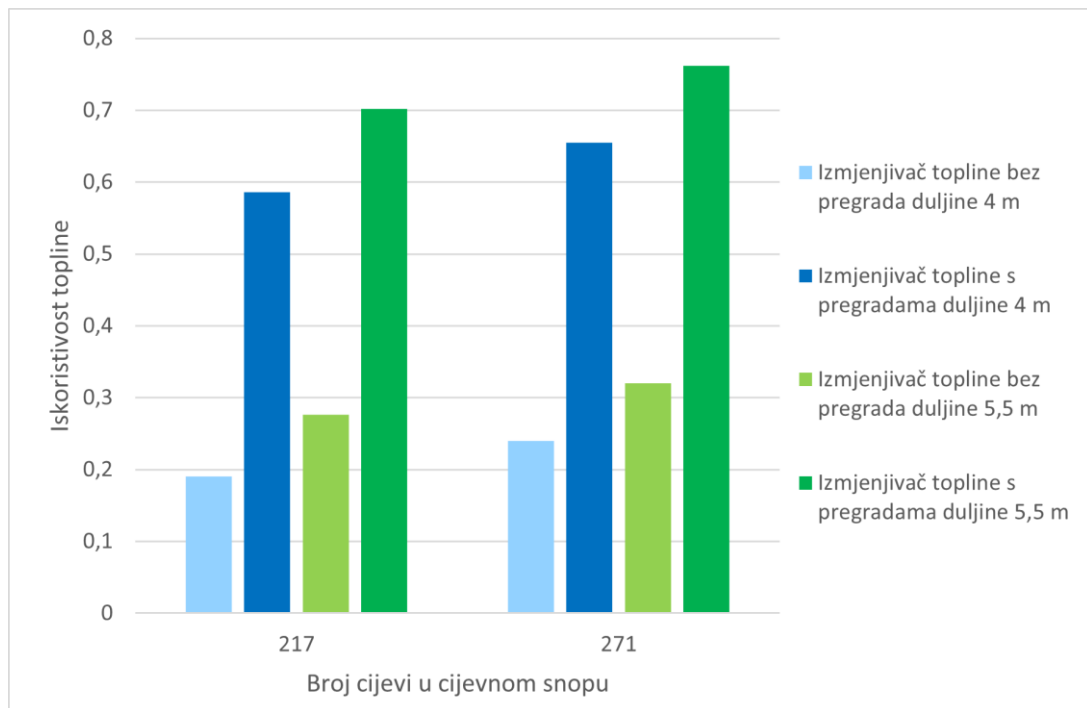
Slika 4.51 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h

Na slici 4.51 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline za izmjenjivač topline bez i s pregradama u bubnju, duljine 4 m i 5,5 m te s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, za protok rashladne vode 26 m³/h. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline raste. Povećanjem duljine izmjenjivača topline iskoristivost topline se također povećava kao i povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu.



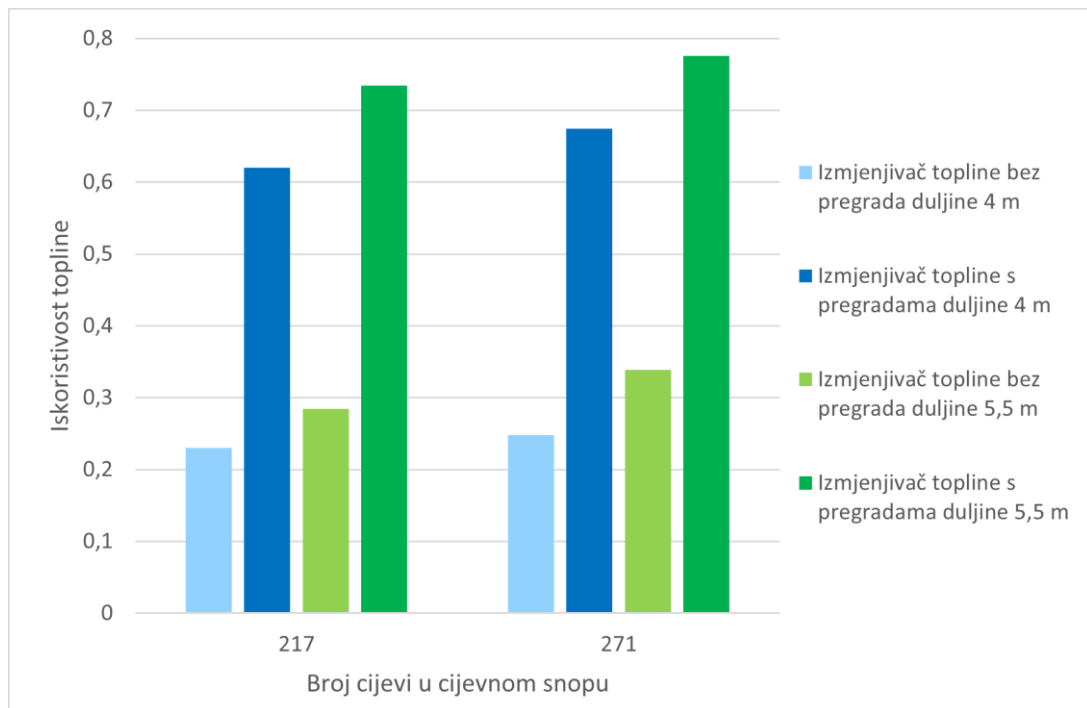
Slika 4.52 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h

Slikom 4.52 dana je usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju te za protok rashladne vode 39 m³/h. Najveću iskoristivost topline postiže izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, s pregradama u bubnju. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline raste. Povećanjem duljine izmjenjivača topline iskoristivost topline se također povećava kao i povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu.



Slika 4.53 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h

Na slici 4.53 prikazana je ovisnost iskoristivosti topline za izmjenjivač topline bez i s pregradama u bubnju, duljine 4 m i 5,5 m te s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, za protok rashladne vode 52 m³/h. Najveću iskoristivost topline postiže izmjenjivač topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, s pregradama u bubnju. Dodavanjem pregrada u bubanj izmjenjivača topline iskoristivost topline raste. Povećanjem duljine izmjenjivača topline iskoristivost topline se također povećava kao i povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu.



Slika 4.54 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h

Slikom 4.54 dana je usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s 217 i 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, u slučaju izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju te za protok rashladne vode 65 m³/h.

Iz prikazanih je dijagrama vidljivo kako iskoristivost topline raste za izmjenjivač topline s pregradama te raste za veći broj cijevi u cijevnom snopu. Također, iz pripadajućih slika može se primijetiti kako iskoristivost topline i izmijenjeni toplinski tok rastu za slučaj duljine izmjenjivača topline od 5,5 m, u odnosu na isti izmjenjivač topline duljine 4 m.

5. ZAKLJUČAK

U ovome je radu izvršena termodinamička analiza cijevnog izmjenjivača topline sa snopom cijevi u bubnju. Svrha ovog izmjenjivača topline jeste ohlađivanje mazivog ulja rashladnom vodom. Razmatrani su slučajevi za dva različita odabrana broja cijevi u cijevnom snopu sa šahovskim rasporedom cijevi, dva različita odabrana standardna promjera cijevi u cijevnom snopu, dvije odabrane duljine izmjenjivača topline te za pet različitih protoka rashladne vode. Analizirane su ovisnosti izmijenjenih toplinskih tokova, izlaznih temperatura slabije i jače struje te iskoristivosti topline za navedene parametre.

Na samom početku rada dan je kratki teoretski osvrt na osnovne oblike izmjene topline te podjela tehničkih izmjenjivača topline i karakteristike glavnih skupina izmjenjivača topline.

Nadalje, izvršio se analitički proračun izmjene topline za izmjenjivač topline sa snopom cijevi za zadane parametre te su rezultati proračuna prikazani tablično i grafički. Razmatrao se slučaj izmjenjivača topline bez i s pregradama u bubnju za različite duljine izmjenjivača, broj cijevi u cijevnom snopu te promjer cijevi u cijevnom snopu, kao i za različite protoke rashladne vode. Zaključeno je kako je najpovoljniji slučaj izmjenjivača topline s 271 cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 5,5 m, promjera cijevi u cijevnom snopu NO25 te protok rashladne vode 65 m³/h. Za navedeni izmjenjivač topline postiže se najveća iskoristivost topline, najveći izmijenjeni toplinski tok te najniža temperatura mazivog ulja.

Izvršena je i usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje, izmijenjenih toplinskih tokova i iskoristivosti topline za različite protoke rashladne vode te je zaključeno kako porastom protoka rashladne vode temperatura slabije struje opada, čime se povećava izmijenjeni toplinski tok te iskoristivost topline izmjenjivača topline. U radu je dan i grafički pregled rezultata proračuna.

Iz rezultata proračuna vidljivo je kako je iskoristivost topline veća za slučaj izmjenjivača topline s pregradama u bubnju nego li je slučaj za izmjenjivač topline bez pregrada u bubnju, zato što pregrade povećavaju turbulenciju fluida koji struji oko cijevnog snopa te time pospješuju izmjenu topline. Također, vidljiv je utjecaj promjera cijevi u cijevnom snopu na iskoristivost topline izmjenjivača topline. Povećanjem promjera cijevi u cijevnom snopu iskoristivost topline izmjenjivača topline raste. Povećanjem broja cijevi u cijevnom snopu postizemo niže temperature mazivog ulja, veći izmijenjeni toplinski tok te višu iskoristivost topline izmjenjivača topline. Na iskoristivost topline i izmijenjene toplinske tokove malo veći utjecaj ima duljina izmjenjivača topline nego broj cijevi u cijevnom snopu. Opisana analiza izmjene topline unutar izmjenjivača

topline prikazuje koji parametri više utječu na izmjenu topline u cijevnom izmjenjivaču topline te može pomoći u dimenzioniranju izmjenjivača topline.

6. LITERATURA

- [1] Trp, A.: nastavni materijali iz kolegija: „Tehnički izmjenjivači topline“, Tehnički fakultet, Rijeka 2022./2023.
- [2] Trp, A., Lenić K.: nastavni materijali iz kolegija: „Termodinamika 2“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2022./2023.
- [3] Edwards, J., E.: „Design and rating of shell and tube heat exchangers“, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2008.
- [4] Galović, A.: „Termodinamika II“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [5] Ražnjević, K.: „Termodinamičke tablice“, 2. dopunjeno izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1975.
- [6] S interneta, <https://www.comsol.com/blogs/how-model-shell-and-tube-heat-exchanger> (pristupljeno 29.07.2024.)
- [7] S interneta, <https://www.stollpche.com/advantages-and-disadvantages-of-a-plate-heat-exchanger> (pristupljeno 29.07.2024.)

7. POPIS OZNAKA

oznaka	mjerna jedinica	značenje
a	$[\text{m}^2/\text{s}]$	koeficijent temperaturne vodljivosti
a	/	koeficijent apsorpcije
b	$[\text{m}]$	duljina dijagonale šesterokuta
c	$[\text{J}/\text{kgK}]$	specifični toplinski kapacitet
c	$[\text{m}/\text{s}]$	brzina svjetlosti
C_c	$[\text{W}/\text{m}^2(100\text{K})^4]$	konstanta zračenja crnog tijela
d	$[\text{m}]$	promjer cijevi
D	$[\text{m}]$	promjer bubnja
d	/	koeficijent propuštanja
e	$[\text{m}]$	udaljenost cijevi od kraja bubnja
\dot{E}_c	$[\text{W}/\text{m}^2]$	odzračena energija crnog tijela
F	$[\text{m}^2]$	površina izmjene topline
f	$[\text{s}^{-1}]$	frekvencija
g	$[\text{m}/\text{s}^2]$	gravitacijsko ubrzanje
G	$[\text{kg}/\text{s}]$	maseni protok
Gr	/	Grashofova značajka
h	$[\text{m}]$	udaljenost pregrada
k	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	koeficijent prolaza topline
L	$[\text{W}/\text{K}]$	toplinska vodljivost
L	$[\text{m}]$	duljina cijevi
m	/	broj upisanih šesterokuta
m	$[\text{m}]$	visina pregrada
n	/	broj cijevi u cijevnom snopu

Nu	/	Nusseltova značajka
O	[m]	opseg koji oplakuje struja
Pr	/	Prandtlova značajka
Re	/	Reynoldsova značajka
t	[°C, K]	temperatura
t	[m]	korak cijevi
t'	[°C, K]	ulazna temperatura
t''	[°C, K]	izlazna temperatura
\dot{V}	[m ³ /h]	volumni protok
W	[K/W]	toplinski otpor
W	[W/K]	toplinski kapacitet
w	[m ² K/W]	specifični toplinski otpor
w	[m/s]	brzina strujanja fluida
α	[W/m ² K]	koeficijent prijelaza topline konvekcijom
δ	[m]	debljina stijenke
Δt_m	[°C, K]	srednja logaritamska razlika temperatura
ε	/	iskoristivost topline
η	[Pa·s]	dinamička viskoznost
η	/	stupanj djelovanja izmjenjivača topline
λ	[W/mK]	koeficijent toplinske vodljivosti (koeficijent provođenja topline)
λ	[m]	valna duljina
ν	[m ² /s]	kinematički viskozitet

σ	[W/m ² K ⁴]	univerzalna konstanta zračenja
τ	[s]	vrijeme
ρ	[kg/m ³]	gustoća
ω	[mK/W]	koeficijent toplinskog otpora

8. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1 Provođenje topline kroz krutu stijenku</i>	2
<i>Slika 2.2 Toplinski tok poprečno na slojeve stijenke</i>	4
<i>Slika 2.3 Toplinski tok uzduž slojeva stijenke</i>	5
<i>Slika 2.4 Provođenje topline kroz stijenku cijevi</i>	6
<i>Slika 2.5 Prijelaz topline konvekcijom</i>	7
<i>Slika 2.6 Energija zračenja koja pristiže na ozračeno tijelo</i>	11
<i>Slika 2.7 Zračenje iz šupljine</i>	12
<i>Slika 2.8 Prolaz topline</i>	13
<i>Slika 2.9 Prolaz topline kroz stijenku cijevi</i>	15
<i>Slika 3.1 Podjela tehničkih izmjenjivača topline</i>	16
<i>Slika 3.2 Temperaturne promjene u istosmjernom rekuperativnom izmjenjivaču topline</i>	19
<i>Slika 3.3 Temperaturne promjene u protusmjernom rekuperatoru kada se hlade slabija i jača struja</i>	19
<i>Slika 3.4 Temperaturne promjene u protusmjernom rekuperatoru kada obje struje imaju jednake toplinske kapacitete</i>	20
<i>Slika 3.5 Tok strujanja kroz križni rekuperator</i>	21
<i>Slika 3.6 Cijevni izmjenjivač topline s pregradama [6]</i>	23
<i>Slika 3.7 Paralelni smještaj cijevi</i>	24
<i>Slika 3.8 Šahovski raspored cijevi</i>	24
<i>Slika 3.9 Segmentne pregrade</i>	25
<i>Slika 3.10 Pločasti izmjenjivač topline [7]</i>	27
<i>Slika 3.11 Regenerativni izmjenjivač topline</i>	27
<i>Slika 3.12 Rashladni toranj</i>	29
<i>Slika 4.1 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 4 m</i>	40
<i>Slika 4.2 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m</i>	41
<i>Slika 4.3 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m</i>	42
<i>Slika 4.4 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 5,5 m</i>	44

<i>Slika 4.5 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.6 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.7 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 4.8 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 4.9 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 4.10 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 217 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 4.11 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 4.12 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 4.13 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>56</i>
<i>Slika 4.14 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 4.15 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 4.16 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO20, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 4.17 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 5,5 m.....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 4.18 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 4.19 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 4.20 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 4 m.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 4.21 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m.....</i>	<i>65</i>

<i>Slika 4.22 Usporedba izlaznih temperatura jače i slabije struje u izmjenjivaču topline s 271 cijevi promjera NO25, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 4.23 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka o protoku rashladne vode za izmjenjivač s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača 5,5 m.....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 4.24 Ovisnost iskoristivosti topline o protoku rashladne vode za izmjenjivač topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 5,5 m.....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 4.25 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h.....</i>	<i>71</i>
<i>Slika 4.26 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h.....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 4.27 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 4.28 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 4.29 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 4.30 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h.....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 4.31 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h.....</i>	<i>77</i>
<i>Slika 4.32 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 4.33 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h.....</i>	<i>79</i>

<i>Slika 4.34 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h.....</i>	<i>79</i>
<i>Slika 4.35 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h</i>	<i>80</i>
<i>Slika 4.36 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h</i>	<i>81</i>
<i>Slika 4.37 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h</i>	<i>82</i>
<i>Slika 4.38 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h</i>	<i>83</i>
<i>Slika 4.39 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h</i>	<i>84</i>
<i>Slika 4.40 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h.....</i>	<i>85</i>
<i>Slika 4.41 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 4.42 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h.....</i>	<i>87</i>
<i>Slika 4.43 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h.....</i>	<i>88</i>
<i>Slika 4.44 Usporedba izlaznih temperatura obiju struja za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h.....</i>	<i>89</i>

<i>Slika 4.45 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h.....</i>	<i>90</i>
<i>Slika 4.46 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h.....</i>	<i>91</i>
<i>Slika 4.47 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h.....</i>	<i>92</i>
<i>Slika 4.48 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h.....</i>	<i>93</i>
<i>Slika 4.49 Usporedba izmijenjenih toplinskih tokova za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h.....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 4.50 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 13 m³/h</i>	<i>95</i>
<i>Slika 4.51 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 26 m³/h</i>	<i>96</i>
<i>Slika 4.52 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 39 m³/h</i>	<i>97</i>
<i>Slika 4.53 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 52 m³/h</i>	<i>98</i>
<i>Slika 4.54 Usporedba iskoristivosti topline za izmjenjivač topline s različitim brojem cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline 4 m i 5,5 m, bez i s pregradama, za volumni protok rashladne vode 65 m³/h</i>	<i>99</i>

9. POPIS TABLICA

<i>Tablica 1 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 2 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>39</i>
<i>Tablica 3 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada.....</i>	<i>43</i>
<i>Tablica 4 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>43</i>
<i>Tablica 5 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h /h bez pregrada.....</i>	<i>46</i>
<i>Tablica 6 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>47</i>
<i>Tablica 7 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada.....</i>	<i>50</i>
<i>Tablica 8 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 217 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>51</i>
<i>Tablica 9 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada.....</i>	<i>54</i>
<i>Tablica 10 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 4 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>55</i>

<i>Tablica 11 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada.....</i>	<i>58</i>
<i>Tablica 12 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO20 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>59</i>
<i>Tablica 13 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada.....</i>	<i>62</i>
<i>Tablica 14 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 4 m za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>63</i>
<i>Tablica 15 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h bez pregrada.....</i>	<i>66</i>
<i>Tablica 16 Rezultati proračuna izmjene topline unutar cijevnog izmjenjivača topline s 271 cijevi promjera NO25 u cijevnom snopu, duljine 5,5 m, za protoke rashladne vode 13 m³/h, 26 m³/h, 39 m³/h, 52 m³/h i 65 m³/h s pregradama.....</i>	<i>67</i>

10. SAŽETAK

U ovom diplomskom radu provedena je termodinamička analiza izmjene topline u protusmjernom izmjenjivaču topline sa snopom cijevi. Razmatrani su slučajevi izmjenjivača topline bez i sa segmentnim pregradama u bubnju. Na početku rada dan je osvrt na osnovne oblike izmjene topline te na podjelu i glavne karakteristike svake grupe izmjenjivača topline. U nastavku rada dan je izračun izmjene topline u izmjenjivaču topline s dva odabrana broja cijevi u cijevnom snopu, dvije odabrane duljine izmjenjivača topline te dva odabrana promjera cijevi u cijevnom snopu. Proračun je izvršen za slučajeve izmjenjivača topline bez i sa segmentnim pregradama, za različite protoke rashladne vode. Izračunate su izlazne temperature obiju struja, izmijenjeni toplinski tokovi te iskoristivosti topline. Rezultati su zatim grafički prikazani te analizirani. Izvršila se usporedba izmjenjivača topline za različite brojeve cijevi u cijevnom snopu, duljine izmjenjivača topline, promjere cijevi u cijevnom snopu te protoke rashladne vode, sve za slučajeve izmjenjivača topline bez i sa segmentnim pregradama.

Ključne riječi: protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada, protusmjerni izmjenjivač topline s pregradama, izmijenjeni toplinski tok, iskoristivost topline

11. SUMMARY

In this graduate thesis, a thermodynamic analysis of heat transfer in a counterflow shell and tube heat exchanger is conducted. The cases of heat exchangers without and with segmental baffles in the shell are considered. The beginning of the work provides an overview of the basic forms of heat transfer and the classification and main characteristics of each group of heat exchangers. The continuation of the work presents the calculation of heat transfer in a heat exchanger for two chosen tube numbers in the tube bundle, two chosen lengths of the heat exchanger, and two chosen tube diameters in the tube bundle. The calculation was performed for cases of heat exchangers without and with segmental baffles, for different cooling water flow rates. The outlet temperatures of both streams, the exchanged heat fluxes, and the heat effectivenesses were calculated. The results are then graphically presented and analyzed. A comparison was made between heat exchangers for different tube numbers in the tube bundle, lengths of the heat exchanger, tube diameters in the tube bundle and cooling water flow rates, all for cases of heat exchangers without and with segmental baffles.

Key words: counterflow heat exchanger without baffles, counterflow heat exchanger with baffles, exchanged heat flux, heat effectiveness