

Hlađenje kliznog ležaja rotacijske peći za proizvodnju portland cementa

Gulišija, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:485091>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-22**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

**HLADENJE KLIZNOG LEŽAJA ROTACIJSKE PEĆI ZA
PROIZVODNJU PORTLAND CEMENTA**

ZAVRŠNI RAD

MARIO GULIŠIJA

Mat. br. 970

Split, listopad 2018.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: KEMIJSKO INŽENJERSTVO

HLAĐENJE KLIZNOG LEŽAJA ROTACIJSKE PEĆI ZA
PROIZVODNJU PORTLAND CEMENTA
ZAVRŠNI RAD

MARIO GULIŠIJA

Mat. br. 970

Split, listopad 2018.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
ACADEMIC UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL
TECHNOLOGY
STUDY ORIENTATION: CHEMICAL ENGINEERING

COOLING OF THE PLAIN BEARING OF ROTARY KILN FOR
PORTLAND CEMENT PRODUCTION

BACHELOR THESIS

MARIO GULIŠIJA

Parent number: 970

Split, October 2018.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Preddiplomski studij kemije tehnologije

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 3. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta održanoj dana 29. studenog 2017. god.

Mentor: prof. dr. sc. Vanja Martinac

Pomoć pri izradi: dr. sc. Jelena Jakić

HLAĐENJE KLIZNOG LEŽAJA ROTACIJSKE PEĆI ZA PROIZVODNJU PORTLAND CEMENTA Mario Gulišija, broj indeksa 970

Sažetak:

Završni rad predstavlja proračun višecijevnog izmjenjivača topline s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći za proizvodnju portland cementa na ulaznom bloku, tj. na strani ulaza materijala. Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline, duljine cijevi 690 i/ili 404 mm kako bi se isti mogli primijeniti za hlađenje mineralnog ulja od 40 °C, uz $\Delta t = 5$ °C, koje u prostor plašta dostrujava volumnim protokom od 10 L/min. Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature 28 °C. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{kr}$), dok je strujanje vode u cijevima pri svim ispitivanim protocima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$). Potrebna površina za izmjenu topline je manja u odnosu na raspoloživu površinu te ispitivani višecijevni izmjenjivači navedenih karakteristika zadovoljavaju za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.

Ključne riječi: klizni ležaj, cijevni izmjenjivač topline, koeficijent prolaza topline, površina prijenosa topline

Rad sadrži: 54 stranice, 10 slika, 10 tablica, 12 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Izv. prof. dr. sc. Miroslav Labor – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Pero Dabić, član
3. Prof. dr. sc. Vanja Martinac – član-mentor

Datum obrane: 1.10.2018.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta, Split, Ruđera Boškovića 35.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology
Academic undergraduate study of chemical technology

Scientific area: Technical sciences

Scientific field: Chemical engineering

Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 03. (November 29th 2017.).

Mentor: Ph. D. Vanja Martinac, full prof.

Technical assistance: Ph. D. Jelena Jakić

COOLING OF THE PLAIN BEARING OF ROTARY KILN FOR PORTLAND CEMENT PRODUCTION

Mario Gulišija, parent number 970

Abstract:

The purpose of this project is to estimate multipiped heat exchanger with bundle of pipes, 2-pass tube side, in purpose of cooling the mineral oil used to lubricate the plain bearing of rotary kiln for production portland cement, on side where material enters. The final purpose of this project is to examine the characteristics of industrial multipiped heat exchangers, length of pipes 690 and/or 404 mm, so that can be used for cooling mineral oil from 40 °C with $\Delta t = 5$ °C, which in space of shell comes with volume flow of 10 L/min. Through bundle of pipes, in 2 passages, comes in cooling water with temperature of 28 °C. The pipes are laid out in a triangular fashion and pitched 13 mm apart with 9 baffles inside the shell. The results of examination indicate the laminar flow inside the shell ($Re < Re_{cr}$), in the tubes, at all examined flows, is in the transitional area ($2300 < Re < 10\ 000$). The required surface to exchange heat is lower compared to available surface and tested multi-tube exchanger with all his characteristics satisfies for cooling down the bearing of rotary kiln.

Keywords: plain bearing, shell and tube heat exchanger, overall heat transfer coefficient, heat transfer surface area

Thesis contains: 54 pages, 10 figures, 10 tables, 12 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Ph. D. Miroslav Labor –associate prof. – chair person
2. Ph. D. Pero Dabić – full prof. – member
3. Ph. D. Vanja Martinac, full prof. – supervisor

Defence date: September 1st 2018.

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology, Split, Ruđera Boškovića 35.

Završni rad je izrađen u Zavodu za termodinamiku, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Vanje Martinac tijekom rujna 2018.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vanji Martinac na prilici za suradnju te na nesebičnoj pomoći prilikom izrade ovog završnog rada.

Također, zahvaljujem se svim kolegama i dosadašnjim profesorima koji su mi pomogli na savladavanju znanja iz prethodnih kolegija koji su mi uvelike pomogli za nastanak ovog rada.

Mario Gulišija

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Protusmjerni izmjenjivač topline, tipa 1-2, izveden je kao bubanj unutarnjeg promjera 107 mm, unutar kojeg je smješten cijevni snop od 44 bakrene cijevi, $\lambda_c = 386,12 \text{ W/(m K)}$, vanjskog promjera $10 \times 1 \text{ mm}$.

Duljina cijevi u cijevnom snopu iznosi:

- a) 690 mm,
- b) 404 mm.

U prostor oko cijevi dostrujava 10 L/min ulja temperature $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Ulje je potrebno ohladiti za $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Volumni protok rashladne vode iznosi:

- a) $1 \text{ m}^3/\text{h}$,
- b) $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$,
- c) $2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Raspored cijevi u cijevnom snopu, prikazan na slici, je u trokutu s korakom od 13 mm.



Broj pregrada u plaštu je 9. Kolika je potrebna, a kolika raspoloživa površina izmjenjivača topline?

Da li prikazani izmjenjivač topline zadovoljava za navedene uvjete toplog i hladnog fluida?

SAŽETAK

Završni rad predstavlja proračun višecijevnog izmjenjivača topline s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći za proizvodnju portland cementa na ulaznom bloku, tj. na strani ulaza materijala. Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline, duljine cijevi 690 i/ili 404 mm kako bi se isti mogli primijeniti za hlađenje mineralnog ulja od 40 °C, uz $\Delta t = 5$ °C, koje u prostor plašta dostrujava volumnim protokom od 10 L/min. Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature 28 °C. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{kr}$), dok je strujanje vode u cijevima pri svim ispitivanim protocima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$). Potrebna površina za izmjenu topline je manja u odnosu na raspoloživu površinu te ispitivani višecijevni izmjenjivači navedenih karakteristika zadovoljavaju za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.

Ključne riječi: klizni ležaj, cijevni izmjenjivač topline, koeficijent prolaza topline, površina prijenosa topline

SUMMARY

The purpose of this project is to estimate multipiped heat exchanger with bundle of pipes, 2-pass tube side, in purpose of cooling the mineral oil used to lubricate the plain bearing of rotary kiln for production portland cement, on side where material enters. The final purpose of this project is to examine the characteristics of industrial multipiped heat exchangers, length of pipes 690 and/or 404 mm, so that can be used for cooling mineral oil from 40 °C with $\Delta t = 5$ °C, which in space of shell comes with volume flow of 10 L/min. Through bundle of pipes, in 2 passages, comes in cooling water with temperature of 28 °C. The pipes are laid out in a triangular fashion and pitched 13 mm apart with 9 baffles inside the shell. The results of examination indicate the laminar flow inside the shell ($Re < Re_{cr}$), in the tubes, at all examined flows, is in the transitional area ($2300 < Re < 10\ 000$). The required surface to exchange heat is lower compared to available surface and tested multi-tube exchanger with all his characteristics satisfies for cooling down the bearing of rotary kiln.

Keywords: plain bearing, shell and tube heat exchanger, overall heat transfer coefficient, heat transfer surface area

SADRŽAJ

UVOD	1
1. OPĆI DIO	2
1.1. PROIZVODNJA PORTLAND CEMENTA	2
1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE.....	4
1.3. OSNOVNI TIPOVI REKUPERATORA	6
1.4. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJA FLUIDA	7
1.5. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE	8
1.6. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI	11
2. EKSPERIMENTALNI DIO	16
2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA	16
2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE	20
2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA	23
2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F	25
2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI ...	26
2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU	32
2.7. PRORAČUN UKUPNOG KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE.....	35
2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE	37
3. RASPRAVA	47
4. ZAKLJUČCI.....	50
5. LITERATURA	51
6. POPIS SIMBOLA	52

UVOD

Uloga svakog kemijskog inženjera jest vođenje tehnološkog procesa na što povoljniji način kako bi se spriječili nepotrebni gubici eksergije. Iz tog razloga potrebno je proračunati moguće gubitke, njihove uzroke, kako bi ih mogli na vrijeme spriječiti.

Inženjeri će se susretati s raznim problemima kao što su određivanja kapaciteta pojedinih toplinskih uređaja, omogućivanje što kvalitetnijeg prijelaza topline s jednog tijela na drugo. Često se kao problematika javlja određivanje brzine hlađenja jednog dijela procesa te istovremeni prijenos topline i zagrijavanje drugog dijela istoimenog procesa. Stoga, potrebno je posjedovati prethodno stečena znanja i zakone koji važe za sam prijenos topline.

Zadana problematika ovog završnog rada se javlja pri tehnološkom procesu proizvodnje portland cementa u rotacijskoj peći. Tijekom rada rotacijske peći javljaju se toplinski gubici kroz zidove rotacijske peći koji ovise o temperaturi plašta peći i ambijenta u kojem je peć smještena. Stoga je potrebno osigurati hlađenje na kliznim ležajevima rotacijskih peći. Hlađenje se obavlja postavljanjem odgovarajućih izmjenjivača topline na ulaznom, srednjem i izlaznom bloku. U ovom radu ispitana su dva industrijska višecijevna izmjenjivača topline, tip 1-2, kako bi se utvrdilo dali isti za zadane uvjete imaju dovoljan kapacitet koji bi omogućio pravilan rad rotacijske peći.

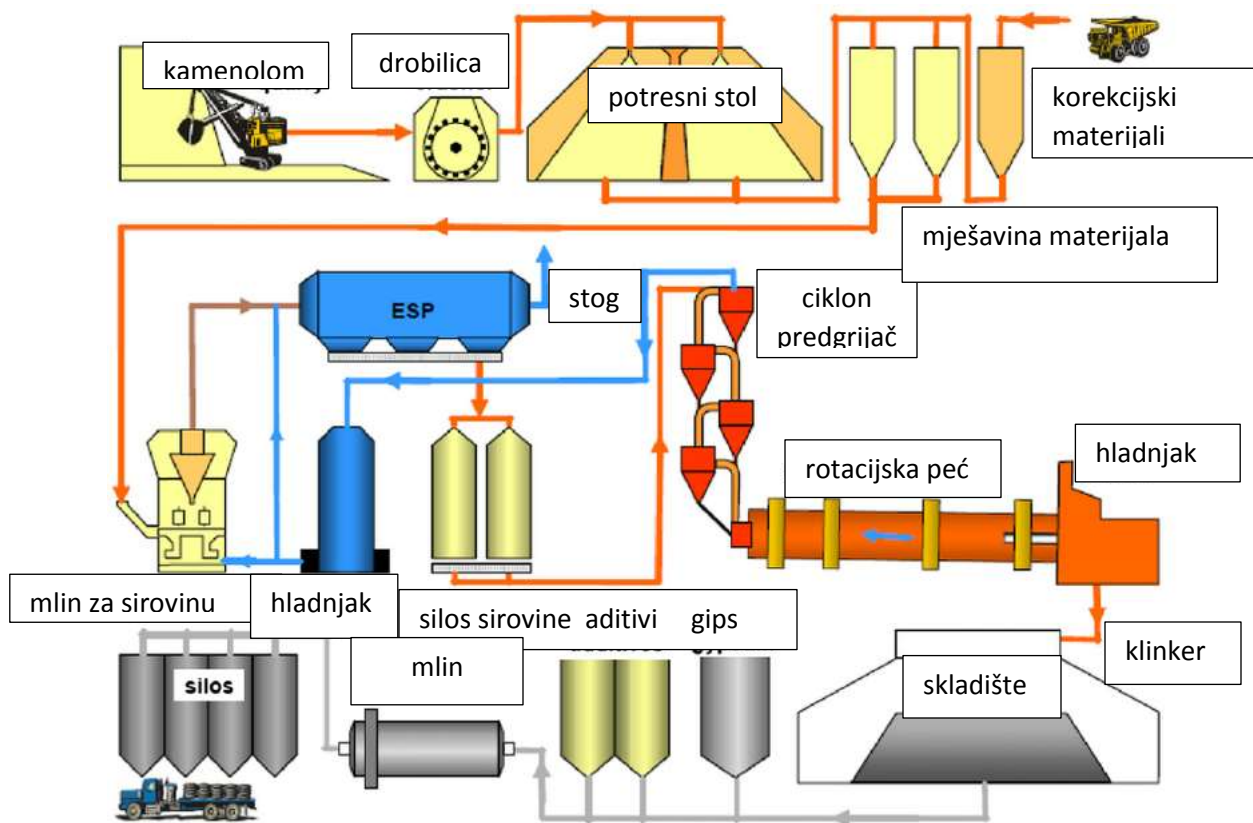
1. OPĆI DIO

1.1. PROIZVODNJA PORTLAND CEMENTA

Cjeloviti tehnološki proces¹ proizvodnje portland cementa sagledava se kroz četiri podprocesa:

- eksploatacija sirovine u rudniku i priprema sirovine,
- proizvodnja portland cementnog klinkera,
- proizvodnja portland cementa
- pakiranje i transport cementa.

Shema procesa² proizvodnje prikazana je na slici 1.



Slika 1. Tehnološka shema procesa proizvodnje portland cementa²

Sastavni dijelovi procesa su: kamenolom, primarna drobilica, hala sirovine, doziranje, sekundarna drobilica, mlin sirovine, silosi za homogenizaciju sirovine, peć klinkera, elektrootprašivač, hladnjak klinkera, hala klinkera, mlinovi cementa, silosi cementa, utovar i transport. Na slici 2 prikazana je rotacijska peć za proizvodnju portland cementa³.



Slika 2. Rotacijska peć u postrojenju za dobivanje cementa³

Rotacijska peć za proizvodnju portland cementa⁴ (Slika 3.) u osnovi je nesavršeni protusmjerni izmjenjivač topline. Pri prijelazu topline s plinova na materijal uz visoke temperaturne razlike, dio topline se nepovratno gubi kroz plašt peći, dok dio topline napušta peć sa klinkerom. Prijelaz topline u klasičnim pećima ostvaruje se 80% zračenjem i 20% konvekcijom.¹



Slika 3. Rotacijska peć – procesna jedinica za proizvodnju klinkera³

Na kliznim ležajevima rotacijske peći (Slika 4.) dolazi do trenja što uzrokuje zagrijavanje organskog maziva pa je potrebno taj isti aditiv ohladiti. U tu svrhu se koriste izmjenjivači topline različitih izvedbi i kapaciteta ovisno o krajnjoj namjeni



Slika 4. Klizni ležajevi rotacijske peći⁵

Podmazivanje uljem⁶ dolazi u obzir za sve brzohodne ležajeve s velikim površinskim tlakovima i višim temperaturama. Najsigurnije i najekonomičnije je optočno (cirkulacijsko) podmazivanje, koje udovoljava najvišim zahtjevima postavljenim na pogonsko važne ležaje. Sva mjesta za podmazivanje opskrbljuju se iz jedne uljne pumpe preko sustava cijevi. Ulje koje otječe, filtrira se, u određenim slučajevima hladi i sakuplja u zbirnike. Sakupljeno ulje se ponovno pumpa u sustav. Ulje koje cirkulira istodobno hladi ležaje.

1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline⁷⁻⁹ su uređaji za razmjenu toplinske energije između dva ili više fluida. U industrijskoj praksi toplina se u većini izmjenjivača topline izmjenjuje između dvije struje fluida.

Prema načinu izmjene topline mogu se podijeliti na:

- izmjenjivači topline s direktnim kontaktom fluida – u ovom slučaju topline se izmjenjuju direktnim kontaktom toplijeg i hladnijeg fluida, a nakon izmjene topline fluidi se relativno lako mogu odvojiti.

- izmjenjivače topline s indirektnim kontaktom fluida – toplina se najprije izmjenjuje između toplijeg fluida i čvrste površine za toplinsku izmjenu, a zatim između površine za toplinsku izmjenu i hladnijeg fluida.

Izmjenjivači topline imaju široku primjenu u velikom broju industrijskih postrojenja: koriste se u procesnoj i prerađivačkoj industriji, u instalacijama centralnog grijanja, klimatizaciji i rashladnim uređajima.

Vrsta i veličina izmjenjivača topline odabire se ovisno o vrsti fluida, njegovom agregatnom stanju, temperaturi, gustoći, viskoznosti, tlakovima, kemijskoj strukturi i mnogim drugim termodinamičkim svojstvima.

U industriji se najčešće koriste rekuperatori. Izmjena topline kod ovakvog tipa izmjenjivača ide tako da toplina s toplijeg fluida prijelazi na stijenku cijevi, potom kroz stijenku te prijelazom topline sa stijenke na hladniji fluid. Zajednički naziv za prethodno opisani prijenos topline je prolaz topline.

U izmjenjivaču topline mogu biti zastupljena tri mehanizma prijenosa topline:

- konvekcija (s toplijeg fluida na stijenku, sa stijenke na hladniji fluid)
- kondukcija (provođenje topline)
- zračenje (radijacija)

Razlikuje se više tipova višecijevnih izmjenjivača topline, koji se primjenjuju ovisno o industrijskoj namjeni:

- izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi (Slika 5)¹⁰
- U-cijevni izmjenjivači (Slika 6)¹¹
- izmjenjivači s plutajućom glavom
- kotlasti izmjenjivači (rebojleri)



Slika 5. Izmjenjivač topline sa cijevnim snopom¹⁰

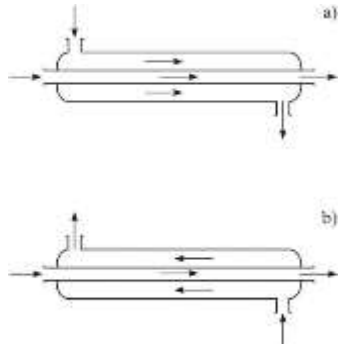


Slika 6. U-cijevni izmjenjivač¹¹

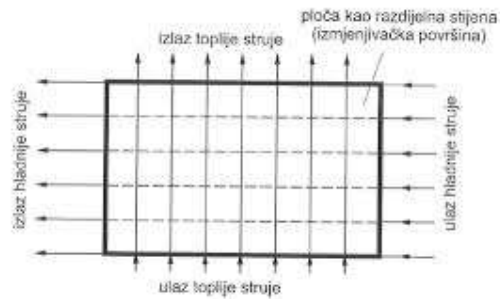
1.3. OSNOVNI TIPOVI REKUPERATORA

Podjela rekuperatora ovisi o odnosu strujanja dvaju fluida pa shodno tome se dijele na:

- istosmjerne (struje teku u istom smjeru, Slika 7a)
- protusmjerne (struje teku u suprotnim smjerovima, Slika 7 b)
- unakrsne (struje fluida su unakrsne, Slika 8.)



Slika 7. Istosmjerni (a) i protusmjerni (b) izmjenjivač topline tipa cijev u cijev⁷



Slika 8. Unakrsni tip rekuperatora⁷

1.4. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJE FLUIDA

Radi lakšeg proračuna kada se radi o izmjenjivaču topline koristi se vrijednost toplinskog kapaciteta koji se računa prema sljedećem izrazu:

$$C = Q_m \cdot c_p \quad (1)$$

gdje je:

C - toplinski kapacitet pojedine struje fluida, W/K

Q_m – maseni protok fluida, kg/s

c_p – specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, J/(kg K)

Prema konvenciji uzeto je da se slabijoj struji fluida (ona koja ima manju vrijednost C) pripisuje indeks 1, a jačoj struji fluida indeks 2.

Sukladno tome, vrijedi omjer:

$$0 \leq \frac{C_1}{C_2} = \frac{Q_{m,1} \cdot c_{p1}}{Q_{m,2} \cdot c_{p2}} \leq 1 \quad (2)$$

Za ulazne temperature fluida se koristi oznaka apostrof ', a za izlazne temperature fluida dvostruki apostrof ''.

1.5. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Izmijenjeni toplinski tok u rekuperatoru^{7,8} funkcija je više varijabli:

$$\Phi = f(k, A_o, t_1', t_1'', t_2', t_2'', C_1, C_2) \quad (3)$$

gdje je:

Φ – toplinski tok, W

k – koeficijent prolaza topline, W/(m² K)

A_o – ukupna površina prijenosa topline, m²

C_1 – toplinski kapacitet (vodena vrijednost) slabije struje, W/K

C_2 – toplinski kapacitet (vodena vrijednost) jače struje, W/K

t_1' – ulazna temperature slabije struje, °C

t_1'' – izlazna temperature slabije struje, °C

t_2' – ulazna temperature jače struje, °C

t_2'' – izlazna temperature jače struje, °C.

Koeficijent prolaza topline (ili ukupni koeficijent prijenosa topline) je jako bitna veličina pri proračunu izmjenjivača topline. Koeficijent prolaza ovisi o više faktora kao što su: koeficijenti prijelaza topline s jedne i druge strane razdjelne stijenke, geometriji te toplinskoj provodnosti.

Ukupni koeficijent prijenosa topline se u praksi računa na sljedeći način:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_i \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}} \quad (4)$$

gdje je:

k – ukupni koeficijent prijenosa topline, W/(m² K)

α_o – koeficijent prijenosa topline na vanjskoj stjenki cijevi, W/(m² K)

α_i – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj stjenki cijevi, W/(m² K)

r_i i r_o – otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja unutarnje i vanjske stijenke cijevi,
(m² K)/W

r_c – otpor prijenosu topline stijenke cijevi, (m² K)/W

Pošto je u proračunu bitno uzeti temperaturnu ovisnost za fizikalna svojstva fluida, ista se očitavaju iz toplinskih tablica¹² pri srednjoj aritmetičkoj temperaturi promatrane struje fluida, odnosno:

$$t_m = \frac{t' + t''}{2} \quad (5)$$

gdje je:

t_m – aritmetička sredina temperature promatrane struje fluida, °C

t' i t'' – ulazne i izlazne temperature struje fluida, °C

Srednja logaritamska razlika temperatura se računa iz relacije:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (6)$$

gdje je:

ΔT_1 – razlika temperatura "hladnog" i "toplog" fluida na jednoj strani izmjenjivača, indeks 1 odnosi se na veću temperaturnu razliku

ΔT_2 – razlika temperatura ‘‘hladnog’’ i ‘‘toplog’’ fluida na drugoj strani izmjenjivača, indeks 2 odnosi se na manju temperaturnu razliku.

Za protusmjerni tok fluida slijedi:

$$\Delta T_1 = T_{t1} - T_{h2} = t_1' - t_2''$$

$$\Delta T_2 = T_{t2} - T_{h1} = t_1'' - t_2'$$

Kod višecijevnih izmjenjivača, gdje ima više prolaza kroz cijevi i/ili plašt, pristup je kompliciraniji jer dolazi do ‘‘križanja’’ temperatura. Stoga se vrši korekcija srednje logaritamske razlike temperatura na način da se pomnoži s korekcijskim faktorom F koji se izračunava koristeći sljedeće korelacije:

$$F = \left[\frac{(R^2 + 1)^{1/2}}{R - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - P_n}{1 - R \cdot P_n} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{2}{P_n} \right) - 1 - R + (R^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{P_n} \right) - 1 - R - (R^2 + 1)^{1/2}} \right]} \quad (7)$$

gdje je:

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}} \quad (8)$$

U jednadžbi (8) n predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt.

Parametar P je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} \quad (9)$$

Parametar R je jednak omjeru kapacitivnih brzina $\frac{c_H}{c_T} = \frac{(T_{T1} - T_{T2})}{(T_{H2} - T_{H1})}$.

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} \quad (10)$$

U svakom slučaju, potrebno je izračunati sam faktor koji ne smije biti manji od 0,75. Ako je faktor uistinu manji tada je potrebno pokušati s izmjenjivačem s više prolaza.

Stoga, korigirana srednja logaritamska razlika temperature će biti:

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F \quad (11)$$

Osnovna jednačba za račun izmjenjivača topline je:

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (12)$$

odnosno, ako se ima cijevni izmjenjivač gdje je potrebno izračunati faktor F,

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_{m, kor} \quad (13)$$

gdje je:

Φ – toplinski tok, kJ/h

k – ukupni koeficijent prijenosa topline, kJ/(m² h K)

A – površina prijenosa topline, m²

ΔT_m – srednja logaritamska razlika temperatura između “toplog” i “hladnog” fluida, K

$\Delta T_{m, kor}$ – korigirana srednja logaritamska razlika temperatura između “toplog” i “hladnog” fluida, K.

1.6. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI

Za koeficijent prijenosa topline^{7,8} na stijenkama cijevi kada ne dolazi do promjene faza za laminarno strujanje (Reynoldsova značajka mora biti manja od 2300) koristi se Sieder-Tateova jednačba:

$$Nu = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 1,86 \cdot \left(Pe \cdot \frac{d_i}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (14)$$

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (15)$$

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d_i \cdot \rho}{\mu} = \frac{q_m \cdot d_i}{\mu} \quad (16)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (17)$$

gdje je:

Nu – Nusseltova značajka

α_i – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj strani cijevi, kJ/(h m² K)

d_i – unutarnji promjer cijevi, m

λ – toplinska vodljivost fluida, kJ/(m K)

Pe – Pecletova značajka

Re – Reynoldsova značajka

Pr – Prandtlova značajka

L – duljina cijevi, m

c_p – toplinski kapacitet fluida, kJ/(kg K)

μ – viskoznost fluida, Pa s

μ_s – viskoznost fluida pri temperaturi stijenske, Pa s

ω – brzina fluida u cijevi, m/s

q_m – masena brzina fluida u cijevi, kg/(m² h)

Osim laminarnog strujanja, postoji još turbulentno strujanje te prijelazno područje strujanja.

Za turbulentno strujanje u cijevima (Reynoldsa značajka je veća od 10 000) prethodni izraz se preoblikuje i glasi:

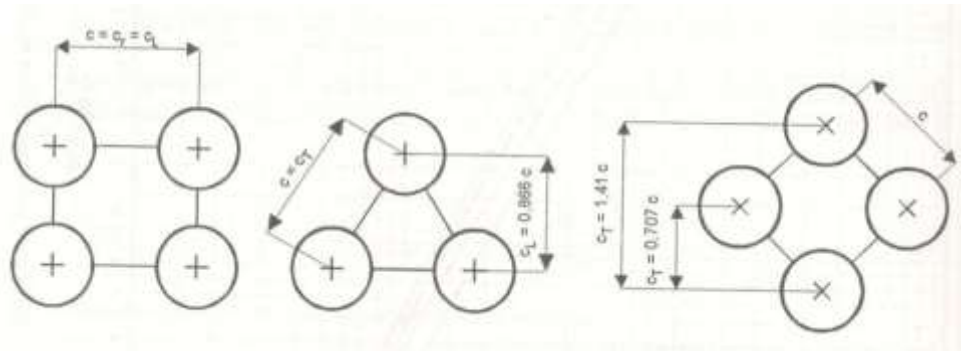
$$\text{Nu} = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 0,027 \cdot (\text{Re})^{0,8} \cdot (\text{Pr})^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (18)$$

Za prijelazno područje strujanje Re mora biti veći od 2300, a manji od 10 000 pa se koristi Hausenova jednadžba:

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (Re^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right]}{Re} \cdot Pr^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (19)$$

Cijevi u cijevnom snopu (Slika 9.) mogu biti različitog rasporeda, pa ovisno o izvedbi razlikuje se⁸:

- raspored u obliku trokuta
- kvadratni raspored
- rotirani kvadratni raspored



Slika 9. Raspored i korak cijevi u cijevnom snopu⁸

Ovisno o tome kakav je raspored, računa se ekvivalentni promjer prije određivši uzdužni c_L i poprečni korak c_T .

Ekvivalentni promjer za kvadratni i rotirani kvadratni raspored cijevi u cijevnom snopu računa se po istom izrazu:

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(c^2 - \frac{d_o^2 \cdot \pi}{4}\right)}{d_o \cdot \pi} \quad (20)$$

Za raspored cijevi u trokutu jednažba glasi:

$$d_e = \frac{1,1 \cdot (c^2 - 0,917 \cdot d_o^2)}{d_o} \quad (21)$$

Masena brzina fluida u plaštu računa se pomoću izraza:

$$q_m = \frac{Q_m}{A_s} \quad (22)$$

gdje je:

Q_m – maseni protok fluida, kg/h

A_s – slobodna površina presjeka cijevnog snopa, m²

Površina presjeka se računa iz izraza:

$$A_s = \frac{d_{pl} \cdot l_{pr}(c - d_o)}{c} \quad (23)$$

gdje je:

d_{pl} – unutarnji promjer plašta, m

l_{pr} – razmak između pregrada u plaštu, m

c – korak cijevi, m

d_o – vanjski promjer cijevi, m.

Koeficijent prijenosa topline za strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu računa se prema izrazu⁹:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_i}{\lambda} = C \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^m \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (24)$$

Za šahovski raspored cijevi i laminarno strujanje fluida $C = 0,56$, $n = 0,50$ i $m = 0,36$.

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline⁹ za snop od N redova u pravcu strujanja je:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot \alpha_o \cdot N_1 + 0,7 \cdot \alpha_o \cdot N_2 + \alpha_o \cdot [N - (N_1 + N_2)]}{N} \quad (25)$$

gdje je:

N_1 – broj cijevi u prvom redu

N_2 – broj cijevi u drugom redu

N – ukupan broj cijevi.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA

Identifikacija pojedine struje fluida vrši se prema kriteriju vrijednosti toplinskog kapaciteta (vodene vrijednosti), C.

Toplija struja (fluid) – ulje koje dotiče volumnom brzinom $Q_{v,U} = 10 \frac{\text{L}}{\text{min}}$.

Temperatura ulja na ulazu u plašt izmjenjivača, $t' = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Razlika temperature ulja na ulazu i izlazu iz izmjenjivača iznosi, $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta t = t' - t''$$

Temperature ulja na izlazu iz plašta, $t'' = t' - \Delta t = 40 - 5 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

Fizikalna svojstva ulja¹² uzimaju se za srednju temperaturu ulja izračunatu prema izrazu (5):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{40 + 35}{2} = 37,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Obzirom da se temperatura $37,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ne nalazi u tablicama¹², potrebno je obaviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i $40 \text{ }^\circ\text{C}$ koje se nalaze u tablicama.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Fizikalna svojstva mineralnog ulja pri srednjoj temperaturi $37,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Fizikalna svojstva mineralnog ulja	$t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$
	37,5
$\rho_U / \text{ kg/m}^3$	860
$c_{p,U} / \text{ J/(kg K)}$	1924
$\lambda_U / \text{ W/(m K)}$	0,143
$\nu_U / \text{ m}^2/\text{s}$	$8,82 \cdot 10^{-6}$
* $\mu_U / \text{ (N s)/m}^2$	$7579 \cdot 10^{-6}$

* $\mu_U = \nu_U \cdot \rho_U$

Hladnija struja (fluid) – voda koja dotječe u cijevi volumnom brzinom:

a) $Q_{v,V} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

b) $Q_{v,V} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

c) $Q_{v,V} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

Temperatura vode na ulazu u cijevi izmjenjivača iznosi 28 °C.

Fizikalna svojstva vode uzimaju se za poznatu ulaznu temperature vode 28 °C.

Obzirom da se temperatura 28 °C ne nalazi u tablicama¹², potrebno je obaviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 °C koje se nalaze u tablicama.

Fizikalna svojstva vode, nakon izvršene interpolacije, pri 28 °C dana su u tablici 2.

Tablica 2. Fizikalna svojstva rashladne vode pri 28 °C

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_V / ^\circ\text{C}$
	28
$\rho_V / \text{kg/m}^3$	995,6
$c_{p,V} / \text{J}/(\text{kg K})$	4180
$\lambda_V / \text{W}/(\text{m K})$	0,610
$\nu_V / \text{m}^2/\text{s}$	$0,869 \cdot 10^{-6}$
* $\mu_V / (\text{N s})/\text{m}^2$	$865 \cdot 10^{-6}$

* $\mu_V = \nu_V \cdot \rho_V$

Slabija struja je ona koja ima manju vrijednost toplinskog kapaciteta i njoj se pridružuje indeks 1.

Jača struja je ona koja ima veću vrijednost toplinskog kapaciteta i njoj se pridružuje indeks 2.

Toplinski kapacitet ulja:

$$C_U = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$

$$C_U = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{60} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1924 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_U = 276 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 276 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja:

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = 0,143 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Toplinski kapacitet vode, uz volumni protok $Q_{v,V} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

$$C_V = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_V = \frac{1}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1156 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 1156 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = 0,277 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Toplinski kapacitet vode, uz volumni protok $Q_{v,V} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

$$C_V = \frac{1,5}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1734 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 1734 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = 0,415 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Toplinski kapacitet vode, uz volumni protok $Q_{v,V} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

$$C_V = \frac{2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 2312 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 2312 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = 0,553 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Toplinski kapacitet struje ulja, C_U , je manji od toplinskog kapaciteta struje vode C_V , tj. $C_U < C_V$, te stoga ulju pripada značenje slabije struje i oznaka 1, a vodi pripada značenje jače struje i oznaka 2.

Shodno tome oznake su sljedeće:

$$C_U = C_1$$

$$C_V = C_2$$

t_1' – ulazna temperatura ulja

t_1'' – izlazna temperatura ulja

t_2' – ulazna temperatura vode

t_2'' – izlazna temperatura vode

Povećanjem volumnog protoka vode (jača struja), mijenjat će se njena izlazna temperatura, dok njena ulazna temperatura ostaje konstantna (28 °C).

Ulazna i izlazna temperature slabije struje (mineralno ulje) te volumni protok (10 L/min) mineralnog ulja ostaju konstantni.

2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE

Izmijenjena toplina (toplinski tok) u izmjenjivaču može se izračunati iz ohlađivanja ($t_1' - t_1''$) prve struje ili iz zagrijavanja ($t_2'' - t_2'$) druge struje, pa je:

$$\phi = \dot{Q} = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = k \cdot A \cdot \Delta T_{m, kor}$$

Izmijenjeni toplinski tok:

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 276 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 5 \text{ K} = 1380 \text{ W}$$

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Toplina koju daje ulje prima rashladna voda u cijevima izmjenjivača.

$$\phi_V = \dot{Q}_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = C_2 \cdot \Delta t_V = 1380 \text{ W}$$

Prirast temperature hladne vode, uz volumni protok $Q_{v,V} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$:

$$\Delta t_V = \frac{\dot{Q}_V}{C_2} = \frac{1380 \text{ W}}{1156 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 1,19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_V = (t_2'' - 21) = 1,19 \text{ }^\circ\text{C}$$

Izlazna temperature vode:

$$t_2'' = \Delta t_V + 21 = 1,19 + 21 = 22,19 \text{ }^\circ\text{C}$$

Prirast temperature hladne vode, uz volumni protok $Q_{v,v} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$:

$$\Delta t_v = \frac{\dot{Q}_v}{C_2} = \frac{1380 \text{ W}}{1734 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 0,80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_v = (t_2'' - 28) = 0,80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Izlazna temperature vode:

$$t_2'' = \Delta t_v + 28 = 0,80 + 28 = 28,80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Prirast temperature hladne vode, uz volumni protok $Q_{v,v} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$:

$$\Delta t_v = \frac{\dot{Q}_v}{C_2} = \frac{1380 \text{ W}}{2312 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 0,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_v = (t_2'' - 28) = 0,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Izlazna temperature vode:

$$t_2'' = \Delta t_v + 28 = 0,59 + 28 = 28,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Povećavanjem volumnog protoka rashladne vode u cijevima izmjenjivača, za istu vrijednost temperature ulazne vode, dolazi do smanjenja izlazne temperature vode.

Ulazne i izlazne karakteristike toplog (ulje) i hladnog (voda) fluida prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Ulazne i izlazne karakteristike toplog (ulje) i hladnog (voda) fluida

$Q_{v,U}$ L/min	10		
$Q_{m,U}$ kg/s	0,143		
$t_1' / ^\circ\text{C}$	40		
$t_1'' / ^\circ\text{C}$	35		
$Q_{v,v}$ m^3/h	1	1,5	2
$Q_{m,v}$ kg/s	0,277	0,415	0,553
$t_2' / ^\circ\text{C}$	28		
$t_2'' / ^\circ\text{C}$	29,19	28,80	28,59
$C_U = C_1$ W/K	276		
$C_V = C_2$ W/K	1156	1734	2312

Fizikalna svojstva vode, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperature vode koja se određuje prema jednadžbi (5).

Srednja temperature vode, uz volumni protok $Q_{v,v} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$:

$$t_{m,v} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{28 + 29,19}{2} = 28,60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja temperature vode, uz volumni protok $Q_{v,v} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$:

$$t_{m,v} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{28 + 28,80}{2} = 28,40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja temperature vode, uz volumni protok $Q_{v,v} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$:

$$t_{m,v} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{28 + 28,59}{2} = 28,29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Obzirom da se temperature 28,60; 28,40 i 28,29 °C, ne nalaze u tablicama¹², potrebno je obaviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 °C koje se nalaze u tablicama.

Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva vode na srednjim temperaturama, nakon izvršene interpolacije, prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Fizikalna svojstva vode u funkciji temperature vode

Fizikalna svojstva vode	$t_{m,v} / ^\circ\text{C}$		
	28,60	28,40	28,29
$\rho_V / \text{kg/m}^3$	995,42	995,48	995,51
$c_{p,v} / \text{J/(kg K)}$	4180	4180	4180
$\lambda_V / \text{W/(m K)}$	0,610	0,610	0,610
$\nu_V / \text{m}^2/\text{s}$	$0,859 \cdot 10^{-6}$	$0,862 \cdot 10^{-6}$	$0,864 \cdot 10^{-6}$
* $\mu_V / (\text{N s})/\text{m}^2$	$855 \cdot 10^{-6}$	$858 \cdot 10^{-6}$	$860 \cdot 10^{-6}$

* $\mu_V = \nu_V \cdot \rho_V$

2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA

Srednja logaritamska razlika temperature računa se iz jednažbe (6), tj.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$), slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 40 - 29,19 = 10,81 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 35 - 28 = 7 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{10,81 - 7}{\ln\left(\frac{10,81}{7}\right)} = 8,77 \text{ K}$$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$), slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 40 - 28,80 = 11,20 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 7 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{11,20 - 7}{\ln\left(\frac{11,20}{7}\right)} = 8,94 \text{ K}$$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$), slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 40 - 28,59 = 11,41 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 7 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{11,41 - 7}{\ln\left(\frac{11,41}{7}\right)} = 9,03 \text{ K}$$

Ulazne karakteristike mineralnog ulja i vode te dobivene srednje logaritamske razlike temperatura prikazane su u tablici 5.

Tablica 5. Ulazne karakteristike mineralnog ulja i vode i dobivene srednje logaritamske razlike temperatura

mineralno ulje	voda		
	$Q_{v,v} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q_{v,v} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q_{v,v} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$
$Q_{v,u} = 10$ L/min			
$t_1' = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2' = 28 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2' = 28 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2' = 28 \text{ }^\circ\text{C}$
$t_1'' = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2'' = 29,19 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2'' = 28,80 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2'' = 28,59 \text{ }^\circ\text{C}$
$\Delta T_m / \text{K}$	8,77	8,94	9,03

2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F

Faktor korekcije, F, računa se iz jednačbe (7):

$$F = \left[\frac{(R^2 + 1)^{1/2}}{R - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - P_n}{1 - R \cdot P_n} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{2}{P_n} \right) - 1 - R + (R^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{P_n} \right) - 1 - R - (R^2 + 1)^{1/2}} \right]}$$

Parametri P_n , P i R računaju se iz jednačbi (8) – (10):

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t'_1 - t''_1}{t''_2 - t'_2} = \frac{40 - 35}{29,19 - 28} = 4,20$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t'_2} = \frac{29,19 - 28}{40 - 28} = 0,1$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,20 \cdot 0,1 - 1}{0,1 - 1} \right)^{1/1}}{4,20 - \left(\frac{4,20 \cdot 0,1 - 1}{0,1 - 1} \right)^{1/1}} = \frac{0,36}{3,56} = 0,1011$$

$$F = \left[\frac{(4,20^2 + 1)^{1/2}}{4,20 - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - 0,1011}{1 - 4,20 \cdot 0,1011} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{2}{0,1011} \right) - 1 - 4,20 + (4,20^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,1011} \right) - 1 - 4,20 - (4,20^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,988$$

Korigirana srednja logaritamska temperature fluida računa se iz jednadžbe (11), tj.

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F = 8,77 \cdot 0,988 = 8,66 \text{ K}$$

U tablici 6 prikazane su postignute vrijednosti parametara R, P, P_n, faktora korekcije F te korigirane srednje logaritamske temperature fluida $\Delta T_{m, kor}$.

Tablica 6. Vrijednosti parametara R, P, P_n, faktora korekcije F te korigirane srednje logaritamske temperature fluida $\Delta T_{m, kor}$

parametri	$Q_{v,v} / (\text{m}^3/\text{h})$		
	1	1,5	2
R	4,20	6,25	8,47
P	0,1	0,07	0,07
P _n	0,1011	0,07	0,07
F	0,988	0,991	0,982
$\Delta T_m / \text{K}$	8,77	8,94	9,03
$\Delta T_{m, kor} / \text{K}$	8,66	8,86	8,87

2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI

Cijevi su vanjskog promjera $d_o = 10 \text{ mm}$, debljine $\delta = 1 \text{ mm}$ i dužine $L = 690 \text{ mm}$.

Unutarnji promjer cijevi:

$$d_i = 10 - 2 \cdot 1 = 8 \text{ mm}$$

Poprečna površina presjeka cijevi:

$$a_c = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} = \frac{8^2 \cdot \pi}{4} = 50,24 \text{ mm}^2 = 50,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Ukupna poprečna površina presjeka cijevi:

$$A_c = a_c \cdot N_c = 50,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 44 = 0,00221 \text{ m}^2$$

gdje je N_c ukupan broj cijevi u cijevnom snopu.

Masena brzina fluida (rashladna voda) u cijevi za slučaj a):

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,42 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

gdje je:

N_{prolaz} – broj prolaza fluida kroz cijevi

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{995,42 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{855 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 2339$$

$$Re > Re_{kr}$$

$$2339 > 2300 \text{ prijelazno područje strujanja } 2300 < Re < 10\,000$$

Za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima tada se koristi jednačba (19), tj.

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (Re^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right]}{Re} \cdot Pr^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} = 1$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{855 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2} \cdot 4180 \frac{J}{kg K}}{0,610 \frac{W}{m K}} = 5,86$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{J}{kg K} \cdot 250 \frac{kg}{s m^2}} = \frac{0,166 \cdot (2339^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{690}\right)^{2/3}\right]}{2339} \cdot 5,86^{-\frac{2}{3}}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{J}{kg K} \cdot 250 \frac{kg}{s m^2}} = 0,001200$$

$$\alpha_i = 0,001200 \cdot 4180 \frac{J}{kg K} \cdot 250 \frac{kg}{s m^2} = 1254 \frac{W}{m^2 K}$$

Masena brzina fluida (rashladna voda) u cijevi za slučaj b):

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,48 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{995,48 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$\text{Re} = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{858 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 3496$$

$\text{Re} > \text{Re}_{\text{kr}}$

$$3496 > 2300$$

prijelazno područje strujanja $2300 < \text{Re} < 10\,000$

Za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima koristi se jednačba (19), tj.

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (\text{Re}^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right]}{\text{Re}} \cdot \text{Pr}^{-2/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} = 1$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{858 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,610 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,88$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3496^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{690}\right)^{2/3}\right]}{3496} \cdot 6,82^{-2/3}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,001462$$

$$\alpha_i = 0,001462 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 2292 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Masena brzina fluida (rashladna voda) u cijevi za slučaj c):

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{pr}}{A_c} = \frac{2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{995,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{m}}{860 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 4660$$

$Re > Re_{kr}$

$$4660 > 2300$$

prijelazno područje $2300 < Re < 10\,000$

Za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima koristi se jednačba (19), tj.

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (Re^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right]}{Re} \cdot Pr^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} = 1$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{860 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,610 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,89$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (4660^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{690} \right)^{2/3} \right]}{4660} \cdot 5,89^{-\frac{2}{3}}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,001768$$

$$\alpha_i = 0,001768 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 3702 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

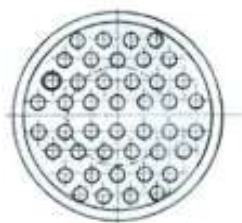
U tablici 7 prikazane su postignute vrijednosti Re značajke I koeficijenta prijenosa topline u cijevi, α_i , o protočnim karakteristikama fluida (vode) u cijevima izmjenjivača (2 prolaza fluida kroz cijevi).

Tablica 7. Vrijednosti Re značajke I koeficijenta prijenosa topline u cijevi o protočnim karakteristikama fluida u cijevima

Re	2339	3496	4660
	prijelazno područje (2300 < Re < 10 000)		
$Q_{m,v}$ kg/s	0,276	0,415	0,553
$q_{m,v}$ kg/(s m ²)	250	375	501
ω_c m/s	0,25	0,38	0,50
α_i W/(m ² K)	1254	2292	3702

2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU

Raspored cijevi u cijevnom snopu, prikazan na slici 10, je u trokutu s korakom od 13 mm.



Slika 10. Raspored cijevi u cijevnom snopu 1-2 tipa izmjenjivača

Korak cijevi, $c = 13 \text{ mm}$

Ukupan broj cijevi, $N_c = 44$

Broj cijevi u prvom redu, $N_1 = 7$

Broj cijevi u drugom redu, $N_2 = 6$

Duljina cijevi, $L = 690 \text{ mm}$

Unutarnji promjer plašta, $d_{pl} = 107 \text{ mm}$

Vanjski promjer cijevi, $d_o = 10 \text{ mm}$

Broj pregrada u plaštu $N_{pr} = 9$

Razmak između pregrada u plaštu, l_{pr} , iznosi:

$$l_{pr} = \frac{L}{N_{pr}} = \frac{690}{9} = 70,67 \text{ mm}$$

Za raspored cijevi u trokutu, ekvivalentni promjer cijevi, d_e , se računa iz jednačbe (21):

$$d_e = \frac{1,1 \cdot (c^2 - 0,917 \cdot d_o^2)}{d_o} = \frac{1,1 \cdot (13^2 - 0,917 \cdot 10^2)}{10} = 8,503 \text{ mm}$$

$$d_e = 0,008503 \text{ m}$$

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa računa se iz jednačbe (23):

$$A_s = \frac{d_{pl} \cdot l_{pr} \cdot (c - d_o)}{c} = \frac{107 \cdot 70,67 \cdot (13 - 10)}{13} = 1745 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 0,00174 \text{ m}^2$$

Masena brzina fluida u plaštu (ulja) računa se iz jednadžbe (22):

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{60 \text{ s}} \cdot 860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,00174 \text{ m}^2} = 82,37 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{82,37 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{7579 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 92,41$$

$Re < Re_{kr}$

$92,41 < 2300$ laminarno strujanje u plaštu

Koeficijent prijenosa topline za laminarno strujanje fluida I šahovski raspored cijevi u plaštu računa se iz jednadžbe (24), gdje je $C = 0,56$, $n = 0,50$ I $m = 0,36$.

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_e}{\lambda} = C \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^m \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} = 0,56 \cdot (Re)^{0,50} \cdot (Pr)^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25}$$

$$\left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} = 1$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{7579 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1924 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 102$$

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (92,41)^{0,50} \cdot (102)^{0,36} = 28,45$$

$$\alpha_o = \frac{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 28,45}{0,008503 \text{ m}} = 478 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Koeficijent prijenosa topline α_o izračunat iz jednadžbe (36) važi za treći I iduće redove u snopu cijevi.

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline za snop od N redova u pravcu strujanja računa se iz jednadžbe (25), tj.

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot \alpha_o \cdot N_1 + 0,7 \cdot \alpha_o \cdot N_2 + \alpha_o \cdot [N - (N_1 + N_2)]}{N}$$

Iz slike 10 je vidljivo da je broj cijevi u prvom redu $N_1 = 7$, a broj cijevi u drugom redu $N_2 = 6$. Uvrštavanjem brojčanih vrijednosti u jednadžbu (25) slijedi:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 478 \cdot 7 + 0,7 \cdot 478 \cdot 6 + 478 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44} = 428 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

2.7. PRORAČUN UKUPNOG KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE

Ukupni koeficijent prijenosa topline (koeficijent prolaza topline) računa se prema jednadžbi (4), tj.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_i \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}}$$

Otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja vanjske, r_o I unutarnje, r_i stijenke cijevi su zanemareni.

Jednadžba tada prelazi u sljedeći oblik

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}}$$

Uzevši u obzir jednadžbu za raspoloživu vanjsku površinu cijevi za izmjenu topline

$$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c$$

te jednadžbu za raspoloživu unutarnju površinu cijevi za izmjenu topline

$$A_i = \pi \cdot d_i \cdot L \cdot N_c$$

slijedi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{d_o}{d_i}}$$

Cijevi su bakrene, $\lambda_c = 386,12 \text{ W/(m K)}$.

Ukupni koeficijent prijenosa topline za $\alpha_i = 1254 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{428} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1254} \cdot \frac{10}{8}}$$

$$k = 299,77 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za $\alpha_i = 2292 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{428} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2292} \cdot \frac{10}{8}} = 347 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za $\alpha_1 = 3702 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{428} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{3702} \cdot \frac{10}{8}} = 374 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE

Potrebna površina za prijenos topline računa se iz jednadžbe (13):

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_{\text{m, kor}}$$

Za slučaj a) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\text{m, kor}}} = \frac{1380 \text{ W}}{299,77 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 8,66 \text{ K}} = 0,532 \text{ m}^2$$

Za slučaj b) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\text{m, kor}}} = \frac{1380 \text{ W}}{347 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 8,86 \text{ K}} = 0,449 \text{ m}^2$$

Za slučaj c) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\text{m, kor}}} = \frac{1380 \text{ W}}{374 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 8,87 \text{ K}} = 0,416 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline iznosi:

$$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c = \pi \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,690 \text{ m} \cdot 44 = 0,953 \text{ m}^2$$

U tablici 8 dane su dobivene vrijednosti za protusmjerni izmjenjivač topline, cijevni snop u plaštu, tip 1-2.

Tablica 8. Tablične vrijednosti za protusmjerni 1-2 tip cijevnog izmjenjivača (dva prolaza fluida (rashladna voda) kroz cijevi I jednim prolazom fluida (mineralno ulje) kroz plašt

$Q_{v,U}$ L/min	10		
$Q_{m,U}$ kg/s	0,143		
$t_1' / ^\circ\text{C}$	40		
$t_1'' / ^\circ\text{C}$	35		
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	428		
$Q_{y,v}$ m ³ /h	1	1,5	2
$Q_{m,v}$ kg/s	0,276	0,415	0,553
$t_2' / ^\circ\text{C}$	28		
$t_2'' / ^\circ\text{C}$	29,19	28,80	28,59
α_i W/(m ² K)	1254	2292	3702
k W/(m ² K)	299,77	347	374
$\Delta T_{m,kor}$ K	8,66	8,86	8,87
A m ²	0,532	0,449	0,416
A_o m ²	0,953		
L m	0,690		

Ukoliko je duljina cijevi u cijevnom snopu 404 mm raspoloživa površina prijenosa topline iznosila bi:

$$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c = \pi \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,404 \text{ m} \cdot 44 = 0,558 \text{ m}^2$$

Promijenom duljine cijevi u cijevnom snopu mijenja se koeficijent prijelaza topline u cijevima, tj. na 39train vode.

d) Za protok rashladne vode 1 m³/h slijedi

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (\text{Re}^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right]}{\text{Re}} \cdot \text{Pr}^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} = 1$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{855 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,610 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,86$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (2339^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{404} \right)^{2/3} \right]}{2339} \cdot 5,86^{-\frac{2}{3}}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,001199$$

$$\alpha_i = 0,001199 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 1253 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

e) Za protok rashladne vode 1,5 m³/h slijedi

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (\text{Re}^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right]}{\text{Re}} \cdot \text{Pr}^{-2/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} = 1$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{858 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,610 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,88$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3496^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{404}\right)^{2/3}\right]}{3496} \cdot 6,82^{-2/3}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,001493$$

$$\alpha_i = 0,001493 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 2340 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

f) Za protok rashladne vode 2 m³/h slijedi

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (\text{Re}^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right]}{\text{Re}} \cdot \text{Pr}^{-2/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} = 1$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{860 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,610 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,89$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (4660^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{404}\right)^{2/3}\right]}{4660} \cdot 5,89^{-2/3}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,001805$$

$$\alpha_i = 0,001805 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 501 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 3780 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

U tablici 9 prikazane su postignute vrijednosti Re značajke I koeficijenta prijenosa topline u cijevi, α_i , o protočnim karakteristikama fluida (vode) u cijevima izmjenjivača duljine 404 mm (2 prolaza fluida kroz cijevi).

Tablica 9. Vrijednosti Re značajke I koeficijenta prijenosa topline u cijevima o protočnim karakteristikama fluida u cijevima, za duljinu cijevi $L = 404$ mm

Re	2339	3496	4660
	prijelazno područje ($2300 < Re < 10\ 000$)		
$Q_{m,v}$ kg/s	0,276	0,415	0,553
$q_{m,v}$ kg/(s m ²)	250	375	501
ω_c m/s	0,25	0,38	0,50
α_i W/(m ² K)	1253	2340	3780

Pri proračunu koeficijenta prijenosa topline u plaštu promjena duljine cijevi na $L = 404$ mm utječe na razmak između pregrada u plaštu, l_{pr} , koji sada iznosi:

$$l_{pr} = \frac{L}{N_{pr}} = \frac{404}{9} = 44,89 \text{ mm}$$

Za raspored cijevi u trokutu, ekvivalentni promjer cijevi, d_e , ostaje:

$$d_e = 0,008503 \text{ m}$$

Smanjenje razmaka između pregrada utječe na smanjenje slobodne površine presjeka cijevnog snopa koji iznosi:

$$A_s = \frac{d_{pl} \cdot l_{pr} \cdot (c - d_o)}{c} = \frac{107 \cdot 44,89 \cdot (13 - 10)}{13} = 1108 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 0,00111 \text{ m}^2$$

Masena brzina fluida u plaštu (ulja) sada iznosi:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,00111 \text{ m}^2} = 129 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{129 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{7579 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 145$$

$Re < Re_{kr}$

145 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

Strujanje fluida (ulja) u plaštu je laminarno pa koeficijent prijenosa topline iznosi:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_e}{\lambda} = C \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^m \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} = 0,56 \cdot (Re)^{0,50} \cdot (Pr)^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25}$$

$$\left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} = 1$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{7579 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1924 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 102$$

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (145)^{0,50} \cdot (102)^{0,36} = 35,64$$

$$\alpha_o = \frac{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 35,64}{0,008503 \text{ m}} = 599 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline za snop od N redova u pravcu strujanja iznosi

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot \alpha_o \cdot N_1 + 0,7 \cdot \alpha_o \cdot N_2 + \alpha_o \cdot [N - (N_1 + N_2)]}{N}$$

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 599 \cdot 7 + 0,7 \cdot 599 \cdot 6 + 599 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44} = 536 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za $\alpha_1 = 1253 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{536} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1253} \cdot \frac{10}{8}}$$

$$k = 349 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za $\alpha_1 = 2340 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{536} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2340} \cdot \frac{10}{8}} = 416 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za $\alpha_1 = 3780 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{536} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{3780} \cdot \frac{10}{8}} = 455 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Za slučaj d) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1380 \text{ W}}{349 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 8,66 \text{ K}} = 0,457 \text{ m}^2$$

Za slučaj e) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1380 \text{ W}}{416 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 8,86 \text{ K}} = 0,374 \text{ m}^2$$

Za slučaj f) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1380 \text{ W}}{455 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 8,87 \text{ K}} = 0,342 \text{ m}^2$$

U tablici 10 dane su dobivene vrijednosti za protusmjerni izmjenjivač topline cijevni snop u plaštu, tip 1-2.

Tablica 10. Tablične vrijednosti za protusmjerni 1-2 tip cijevnog izmjenjivača (dva prolaza fluida (rashladna voda) kroz cijevi duljine 404 mm I jednim prolazom fluida (mineralno ulje) kroz plašt

$Q_{v,U}$ L/min	10		
$Q_{m,U}$ kg/s	0,143		
$t_1' / ^\circ\text{C}$	40		
$t_1'' / ^\circ\text{C}$	35		
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	428		
$Q_{y,v}$ m ³ /h	1	1,5	2
$Q_{m,v}$ kg/s	0,276	0,415	0,553
$t_2' / ^\circ\text{C}$	28		
$t_2'' / ^\circ\text{C}$	29,19	28,80	28,59
α_i W/(m ² K)	1253	2340	3780
k W/(m ² K)	349	416	455
$\Delta T_{m,kor}$ K	8,66	8,86	8,87
A m ²	0,457	0,374	0,342
A_o m ²	0,558		
L m	0,404		

3. RASPRAVA

Završni rad predstavlja proračun višecijevnog izmjenjivača s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći za proizvodnju portland cementa na ulaznom bloku, tj. na strani ulaza materijala.

Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline, duljine cijevi 690 i/ili 404 mm kako bi se isti mogli primijeniti za hlađenje mineralnog ulja od 40 °C, uz $\Delta t = 5$ °C, koje dostrujava volumnim protokom 10 L/min u prostor plašta. Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature 28 °C.

Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm. Izmjenjivač je izveden u obliku bubnja s unutarnjim promjerom od 107 mm. Već spomenuti cijevni snop se sastoji od 44 bakrene cijevi vanjskog promjera 10 x 1 mm. Broj pregrada u plaštu je 9.

Iz rezultata dobivenih proračunom vidi se da je kapacitet struje ulja manji od kapaciteta struje vode i to za sva 3 zadana protoka ($C_U < C_V$). Iz te činjenice izvodi se zaključak da je ulje slabija struja pa mu pripada indeks 1, a voda jača struja pa joj se pridaje indeks 2.

Maseni protoka ulja u plaštu izmjenjivača iznosi $Q_{m,U} = 0,143$ kg/s, dok maseni protok vode u cijevima raste od $Q_{m,V} = 0,277$ kg/s, $Q_{m,V} = 0,415$ m/s do $Q_{m,V} = 0,553$ m/s.

Što se tiče toplinskog toka, on se može izračunati iz ohlađivanja toplije struje odnosno zagrijavanja hladnije struje. Vođeni tom pretpostavkom dolazi se do rezultata od 1380 W. Toplinu koju u jedinici vremena daje ulje, prima rashladna voda te se na osnovu toga može izračunati prirast temperature vode, odnosno temperature vode na izlazu iz cijevi (Tablica 3.). Vidljivo je da porastom masenog protoka vode opada izlazna temperatura vode.

Poznavajući temperature ulja i vode na ulazu i izlazu, može se izračunati srednja logaritamska razlika temperature, ΔT_m , kroz izmjenjivač (Tablica 5.). Budući se radi o višecijevnom 1-2 tipu izmjenjivača (engl. *Shell and Tube*) potrebno je izračunati korekcijskim faktorom F te korigirati vrijednost ΔT_m i odrediti $\Delta T_{m,kor}$ (Tablica 6.).

Sve fizikalne karakteristike ispitivanih fluida očitavaju se iz tablica¹² za srednju aritmetičku sredinu ulazne i izlazne temperature promatranog fluida (voda i/ili ulje) kako bi se uzela u obzir temperaturna ovisnost svojstava ispitivanih fluida.

Rezultati ispitivanja pokazuju da je pri masenom protoku u cijevnom snopu od $Q_{m,v} = 0,277$ kg/s režim strujanja u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$). Povećanjem masenog protoka vode na $Q_{m,v} = 0,415$ kg/s i $Q_{m,v} = 0,553$ kg/s u cijevima režim strujanja ostaje i dalje u prijelaznom području. Povećanjem masenog protoka vode dolazi do povećanja Re značajke. U tablici 7 prikazane su vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline u cijevi o protočnim karakteristikama fluida (voda) u cijevima. Iz tablice je vidljivo da Re značajka raste od 2339 na 3496 odnosno 4660. Porastom Re značajke raste i vrijednost koeficijenta prijelaza topline α_i na strani vode u cijevima, što doprinosi povećanju ukupnog koeficijenta prijelaza topline, k , te smanjenju potrebne površine, A , za izmjenu topline, što je vidljivo iz postignutih vrijednosti prikazanih u tablici 8. Potrebna površina, A , za izmjenu topline, smanjuje se od $A = 0,532$ m² pri masenom protoku $Q_{m,v} = 0,276$ kg/s; $A = 0,449$ m² pri masenom protoku $Q_{m,v} = 0,415$ kg/s do $A = 0,416$ m² pri masenom protoku $Q_{m,v} = 0,553$ kg/s. Raspoloživa površina za izmjenu topline za višecijevni izmjenjivač topline zadanih karakteristika iznosi $A_o = 0,953$ m².

Za računanje koeficijenta prijenosa topline, ali sada na strani ulja, za izračun je potrebno sagledati više faktora koji uključuju ukupan broj cijevi, broj cijevi u prvom redu, broj cijevi u drugom redu, duljinu cijevi, broj pregrada, unutarnji promjer plašta, vanjski promjer cijevi, raspored cijevi u plaštu i dr. Reynolds na strani ulja iznosi 92,41, tj. $Re < Re_{kr}$ ($92,41 < 2300$) pri čemu se dolazi do zaključka da u plaštu vlada laminarni režim strujanja.

Ukoliko je duljina cijevi u cijevnom snopu $L = 404$ mm raspoloživa površina prijenosa topline se smanjuje i iznosi $A_o = 0,558$ m².

Rezultati ispitivanja prikazani u Tablici 10. pokazuju da se smanjenjem duljine cijevi u cijevnom snopu na $L = 404$ mm smanjuje koeficijent prijelaza topline u cijevima u odnosu na vrijednosti postignute pri duljini cijevi $L = 690$ mm, tj. α_i na strani vode mijenja se od

$\alpha_i = 1253$, $\alpha_i = 2340$ do $\alpha_i = 3780$ sa porastom masenog protoka vode u cijevima. Ukupni koeficijent prijelaza topline raste, ali u manjem iznosu, kao i potrebna površina za izmjenu topline koja iznosi $A = 0,457 \text{ m}^2$ pri masenom protoku $Q_{m,v} = 0,276 \text{ kg/s}$; $A = 0,374 \text{ m}^2$ pri masenom protoku $Q_{m,v} = 0,415 \text{ kg/s}$ do $A = 0,342 \text{ m}^2$ pri masenom protoku $Q_{m,v} = 0,553 \text{ kg/s}$.

Dakle, ispitivani višecijevni izmjenjivači topline duljine cijevi 690 mm i/ili 404 mm zadovoljavaju za navedene uvjete toplog i hladnog fluida, te se mogu koristiti za hlađenje kliznih ležajeva na ulaznom bloku rotacijske peći za proizvodnju portland cementa.

4. ZAKLJUČCI

Na osnovu provedenog proračuna može se zaključiti:

- Za uvjete hlađenja mineralnog ulja od 40 na 35 °C koje dostrujava u prostor oko cijevi brzinom 10 L/min, sa rashladnom vodom koja u dva prolaza struji kroz cijevni snop ulazne temperature 28 °C, uz volumni protok 1 m³/h, 1,5 m³/h i 2 m³/h ispitivani višecijevni izmjenjivači topline duljine cijevi 690 mm i/ili 404 mm u potpunosti zadovoljavaju za hlađenje kliznih ležajeva na ulaznom bloku rotacijske peći za proizvodnju portland cementa.
- Potrebna površina za izmjenu topline je manja u odnosu na raspoloživu površinu te ispitivani višecijevni izmjenjivači navedenih karakteristika zadovoljavaju za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.
- Režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{kr}$), dok je strujanje vode u cijevima pri svim ispitivanim protocima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$).

5. LITERATURA

1. Z.Osmanović, J. Zelić, Proizvodnja portland cementa, Sveučilište u Tuzli, Lukavac, 2011., str. 5.–7., str.138.
2. Portland cement production
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-cement-production_fig1_263493837 (10.9.2018.)
3. Cementa, Rotacijska peć
<http://www.hr.yujebearing-machining.com/images/present1.png>
(14.9.2018.)
4. Rotary kiln cement plant
<https://www.shutterstock.com/image-photo/rotary-kiln-cement-plant-closeup-photo-274873487> (18.9.2018.)
5. Cement plants
<http://www.ashoka.cc/cement-plants.html> (18.9.2018.)
6. K. H. Decker, Elementi strojeva, 3.izdanje, Golden marketing, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.
7. A. Galović, Termodinamika 2, 5. Izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010, str. 192.–238.
8. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb 1994. str. 149.–200.
9. O. Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet Dubrovnik, 1994., str. 108.
10. <https://www.spf-europe.nl/wp-content/uploads/2015/08/DSCN0865-1.jpg>
(10.9.2018.)
11. <http://mit.com.hr/kontrolirana-fermentacija/cjevni-izmjenjivac-topline.php>
(10.9.2018.)
12. B. Kraut, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982, str. 230.

6. POPIS SIMBOLA

OZNAKE

A – površina prijenosa topline, m^2

A_c – ukupna poprečna površina presjeka cijevi, m^2

A_o – raspoloživa površina prijenosa topline, m^2

A_s – slobodna površina presjeka cijevnog snopa, m^2

a_c – poprečna površina presjeka cijevi, m^2

C – toplinski kapacitet (vodena vrijednost) struje fluida, W/K

C_1 – toplinski kapacitet (vodena vrijednost) slabije struje, W/K

C_2 – toplinski kapacitet (vodena vrijednost) jače struje, W/K

c – korak cijevi, m

c_p – specifični toplinski kapacitet pojedine struje fluida pri konstantnom tlaku, J/(kg K)

d_e – ekvivalentni promjer plašta, m

d_i – unutarnji promjer cijevi, m

d_o – vanjski promjer cijevi, m.

d_{pl} – unutarnji promjer plašta, m

F – korekcijski faktor

k – ukupni koeficijent prijenosa topline (koeficijent prolaza topline), W/(m^2 K)

L – duljina cijevi, m

l_{pr} – razmak između pregrada u plaštu, m

N – ukupan broj cijevi

N_c – ukupan broj cijevi u cijevnom snopu

N_{pr} – broj pregrada u plaštu

N_{prolaz} – broj prolaza fluida kroz cijevi

Nu – Nusseltova značajka

N_1 – broj cijevi u prvom redu cijevnog snopa

N_2 – broj cijevi u drugom redu cijevnog snopa

P – toplinska efikasnost hladnog fluida

Pe – Pecletova značajka

Pr – Prandtlova značajka

Q_m – maseni protok fluida, kg/s

q_m – masena brzina fluida u cijevi, kg/(s m²)

R – omjer kapacitivnih brzina

Re – Reynoldsova značajka

r_c – otpor prijenosu topline stijenke cijevi, (m² K)/W

r_i i r_o – otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja unutarnje i vanjske stijenke cijevi,
(m² K)/W

ΔT_m – srednja logaritamska razlika temperatura između „toplog“ i „hladnog“ fluida, K

$\Delta T_{m,kor}$ – korigirana srednja logaritamska razlika temperatura između „toplog“ i „hladnog“
fluida, K

t' – ulazna temperature struje fluida, °C

t'' – izlazna temperature struje fluida, °C.

t_1' – ulazna temperature slabije struje, °C

t_1'' – izlazna temperature slabije struje, °C

t_2' – ulazna temperature jače struje, °C

t_2'' – izlazna temperature jače struje., °C

t_m – aritmetička sredina temperature promatrane struje, °C

Grčka slova

α_i – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj strani cijevi, $W/(m^2 K)$

α_o – koeficijent prijenosa topline na stijenku cijevi u plaštu, $W/(m^2 K)$

$\alpha_{o,sr}$ – srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline za snop od N redova u pravcu strujanja, $W/(m^2 K)$

δ – debljina cijevi, mm

λ – toplinska vodljivost fluida, $kJ/(m K)$

μ - dinamička viskoznost fluida, Pa s

μ_s – dinamička viskoznost fluida pri temperature stijenke, Pa s

ν – kinematička viskoznost fluida, m^2/s

ρ – gustoća fluida, kg/m^3

Φ – toplinski tok (toplina prenesena u izmjenjivaču), W

ω - brzina fluida u cijevi, m/s