Hlađenje kliznog ležaja pogona mlina

Radeljić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:304145

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

HLAĐENJE KLIZNOG LEŽAJA POGONA MLINA

ZAVRŠNI RAD

ANA RADELJIĆ

Mat. br. 743

Split, srpanj 2016.

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

HLAĐENJE KLIZNOG LEŽAJA POGONA MLINA

ZAVRŠNI RAD

ANA RADELJIĆ

Mat. br. 743

Split, srpanj 2016.

UNIVERSITY OF SPLIT

FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY

ACADEMIC UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

STUDY ORIENTATION: CHEMICAL ENGINEERING

COOLING OF THE PLAIN BEARING OF MILL DRIVE

BACHELOR THESIS

ANA RADELJIĆ

Parent number: 743

Split, July 2016.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

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

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo
Tema rada je prihvaćena na 4. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta održanoj dana 09. prosinca 2015. god.

Mentor: prof. dr. sc. Vanja Martinac
Pomoć pri izradi: dr. sc. Jelena Jakić

HLAĐENJE KLIZNOG LEŽAJA POGONA MLINA

Ana Radeljić, broj indeksa 743

Sažetak:
Svrha ovog rada je ispitati da li industrijski izmjenjivač topline s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi kugličnog mlina. Kroz cijevni snop od 44 bakrene cijevi vanjskog promjera 10 x 1 mm, duljine 404 mm, prolazi rashladna voda volumnog protoka 1 m^3/h, u dva prolaza. Oko cijevi u plaštu struji mineralno ulje volumnog protoka 8 L/min. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 6. Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u cijevima i u plaštu laminaran (Re < Re,kr). Do porasta promjene temperature ulja, Δt_U, od 5,5 ^oC, potrebna površina za izmjenu topline je manja u odnosu na raspoloživu površinu te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja. Porastom promjene temperature ulja, Δt_U, iznad 5,5 ^oC, potrebna površina za izmjenu topline raste u odnosu na raspoloživu površinu te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika ne zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja.

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

Rad sadrži: 85 stranica, 14 slika, 15 tablica, 3 priloga, 11 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Prof. dr. sc. Nenad Kuzmanić – predsjednik
2. Izv. prof. dr. sc. Miroslav Labor – član
3. Prof. dr. sc. Vanja Martinac – član-mentor

Datum obrane: 13. srpnja 2016.

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
Znanstveno polje: Chemical engineering
Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 04. (09. December 2015.).

Mentor: Vanja Martinac, PhD, full prof.
Technical assistance: Jelena Jakić, PhD

COOLING OF THE PLAIN BEARING OF MILL DRIVE

Ana Radeljić, index number 743

Abstract:
The purpose of this project is to examine whether the industrial shell and tube heat exchanger, 2-pass tube side, suits the process of cooling the mineral oil used to lubricate the plain bearing of a mill drive. The cooling water, amounting to 1 m^3 of hourly discharge, flows in two passageways through the pipe bundle which consists of 44 copper pipes with the outer diameter of 10 x 1 mm and the length of 404 mm. Mineral oil, with the discharge rate of 8 L/min, flows inside the shell and around the tube. The pipes are laid out in a triangular fashion and pitched 13 mm apart. There are 6 baffles inside the shell. The results of examination indicate the laminar flow inside the tubes and shell (Re < Re,c). Until the oil temperature, $\Delta t_{U,}$ rises by 5,5 ^oC the surface required to exchange the heat is smaller than the total available surface; a multi-tube exchanger possessing the aforementioned characteristics exhibits satisfactory rates of cooling the mineral oil. As the oil temperature, $\Delta t_{U,}$ rises upward of 5,5 ^oC the surface required to exchange heat also rises compared with available surface, while the multi-tube exchanger no longer fulfills the requirements for cooling the mineral oil.

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

Thesis contains: 85 pages, 14 figures, 15 tables, 3 supplements, 11 references
Original in: Croatian

Defence committee:

1. Nenad Kuzmanić – PhD, full prof. – chair person
2. Miroslav Labor – PhD, associate prof. – member
3. Vanja Martinac, PhD, full prof. – supervisor

Defence date: July 13 2016.

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposed 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 svibnja 2016.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vanji Martinac na pomoći i suradnji prilikom izrade završnog rada, te nesebičnoj prilici na suradnji.
Uz to, ogromne zahvale dosadašnjim kolegama i profesorima koji su mi pomogli percipirati samu problematiku rada kroz prethodne kolegije.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Treba dimenzionirati izmjenjivač topline u kojem će se ulje volumnog protoka 8 L/min, ohladiti sa 30 ^{o}C na 25,5 ^{o}C. Za hlađenje će služiti rashladna voda ulazne temperature 17 ^{o}C i volumnog protoka 1 m^{3}/h. Izmjenjivač topline bit će tipa cijevni snop u plaštu sa dva prolaza fluida. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm (slika 1). Broj pregrada u plaštu je 6. Rashladna voda protječe kroz snop od 44 bakrene cijevi, λCu = 386,12 W/(m K), vanjskog promjera 10 x 1 mm i duljine 404 mm, a ulje kroz plašt. Vanjski promjer plašta iznosi 114,3 x 3,6 mm.

Koliko se topline izmijeni u takvom izmjenjivaču?

Kolika je izlazna temperature vode?

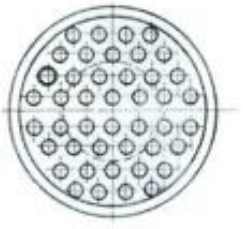
Koliki je stvarni koeficijent prolaza topline u tom izmjenjivaču?

Kolika je potrebna, a kolika raspoloživa površina izmjenjivača topline?

Pri radu tako dimenzioniranog i izvedenog izmjenjivača topline ustanovljeno je da dolazi do promjene temperatura ulaznih i izlaznih fluida, tj.

	Ulazna temperature ulja /^{o}C	Izlazna temperature ulja /^{o}C	Ulazna temperature vode /^{o}C
a)	36,5	31	21
b)	34	28	21

Da li navedeni izmjenjivač topline zadovoljava za novonastale uvjete?



Slika 1. Raspored cijevi u cijevnom snopu

SAŽETAK

Svrha ovog rada je ispitati da li industrijski izmjenjivač topline s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi kugličnog mlina. Kroz cijevni snop od 44 bakrene cijevi vanjskog promjera 10 x 1 mm, duljine 404 mm, prolazi rashladna voda volumnog protoka 1 m^3/h, u dva prolaza. Oko cijevi u plaštu struji mineralno ulje volumnog protoka 8 L/min. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 6. Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u cijevima i u plaštu laminaran (Re < Re,kr). Do porasta promjene temperature ulja, Δt_U, od 5,5 ^oC potrebna površina za izmjenu topline je manja u odnosu na raspoloživu površinu te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja. Porastom promjene temperature ulja, Δt_U, iznad 5,5 ^oC potrebna površina za izmjenu topline raste u odnosu na raspoloživu površinu te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika ne zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja.

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

SUMMARY

The purpose of this project is to examine whether the industrial shell and tube heat exchanger, 2-pass tube side, suits the process of cooling the mineral oil used to lubricate the plain bearing of a mill drive. The cooling water, amounting to 1 m^3 of hourly discharge, flows in two passageways through the pipe bundle which consists of 44 copper pipes with the outer diameter of 10 x 1 mm and the length of 404 mm. Mineral oil, with the discharge rate of 8 L/min, flows inside the shell and around the tube. The pipes are laid out in a triangular fashion and pitched 13 mm apart. There are 6 baffles inside the shell. The results of examination indicate the laminar flow inside the tubes and shell (Re < Re,c). Until the oil temperature, $\Delta t_{U,}$ rises by 5,5^{o}C, the surface required to exchange the heat is smaller than the total available surface; a multi-tube exchanger possessing the aforementioned characteristics exhibits satisfactory rates of cooling the mineral oil. As the oil temperature, $\Delta t_{U,}$ rises upward of 5,5^{o}C, the surface required to exchange heat also rises compared with available surface, while the multi-tube exchanger no longer fulfills the requirements for cooling the mineral oil.

Keywords: plain bearing, shell and tube heat exchenger, 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 …… 7
1.4. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJA FLUIDA ……..… 9
1.5. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE …….. 10
1.6. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI …… 16
2. EKSPERIMENTALNI DIO ……..…… 21
2.1. OZNAČAVANJE TEMPERATURA STRUJA FLUIDA ……. 21
2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE …….. 24
2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA …… 26
2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F …….. 27
2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI … 29
2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU ……. 32
2.7. PRORAČUN UKUPNOG KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE ILI KOEFICIJENTA PROLAZA TOPLINE …… 35
2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE …. 36
2.9. PROMJENA TEMPERATURA ULAZNIH I IZLAZNIH FLUIDA …. 37
3. RASPRAVA ……..….. 56
4. ZAKLJUČCI ……..……..…... 59
5. LITERATURA ……..……. 60
6. POPIS SIMBOLA ……..…… 61
7. PRILOG ……...…… 64

UVOD

Uloga svakog kemijskog inženjera je vođenje energetskog procesa na što povoljniji način kako bi spriječili nepotrebne gubitke eksergije. Zbog toga je potrebno poznavati uzroke eksergetskih gubitaka i odrediti njihove vrijednosti.

Inženjeri će se susretati s raznim problemima poput određivanja optimalne veličine toplinskih uređaja, omogućavanja što kvalitetnijeg prijelaza topline mjerama koje ga potpomažu ili koče. Ponekad se kao zadatak javlja ocjenjivanje brzine ohlađivanja ili grijanja procesa ili pojedinog njegovog dijela. Da bi se udovoljilo tim i sličnim zahtjevima potrebno je dobro poznavanje svih oblika i zakona prostiranja topline.

Zadatak ovog završnog rada temeljen je na problemu koji se javlja, u različitim tehnološkim procesima, prilikom izvedbe fizikalne operacije mljevenja sirovine. Mljevenje sirovine je najvažnija operacija u procesu pripreme iste, a odvija se u odgovarajućem mlinu. To je prvenstveno prisutno u industrijama koje se bave proizvodnjom građevinskog materijala, cementa i sl. Naime, na dodirnim djelovima uređaja (kliznim ležajevima) dolazi do trenja. Takva mjesta zahvaćena su također i abrazijom materijala. Radi olakšavanja klizanja površina nalijeganja, te radi smanjivanja ili čak sprječavanja trošenja upotrebljavaju se različita maziva organske industrije (najvažnija maziva za ležaje su mineralna ulja) na čije toplinske vrijednosti treba paziti, kao i na toplinske vrijednosti materijala od kojeg je uređaj napravljen. Drugim riječima, energija uzrokovana klizanjem pretvara se u toplinu koja zagrijava ulje koje podmazuje ležaj, te je isti potrebno ohladiti.

Značajke kojima je jedan takav proces određen su Nusseltova, Reynoldsova, Grashofova i Prandtlova. Sve one sadrže pojedine koeficijente kojima su materijali opisani. U ovome radu ispitane su karakteristike izmjenjivača topline koji bi za zadane uvjete omogućio hlađenje ulja i pravilan rad kugličnog mlina.

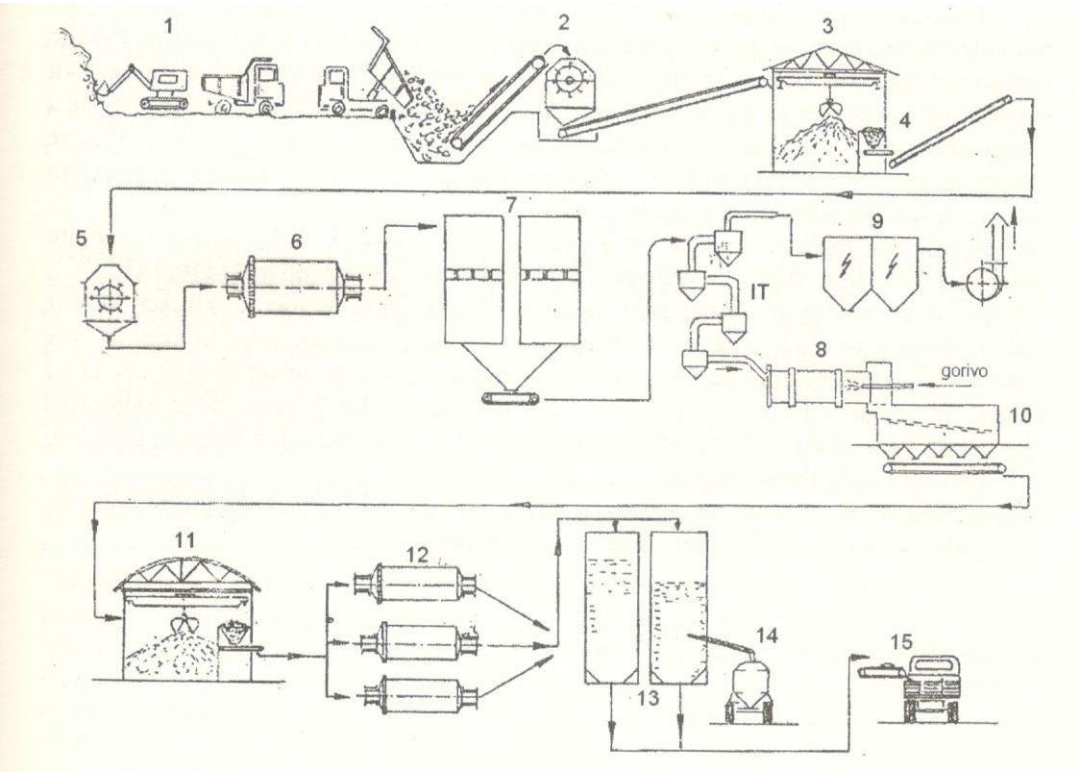
1. OPĆI DIO

1.1. PROIZVODNJA PORTLAND-CEMENTA

Cjeloviti tehnološki proces[1] proizvodnje Portland-cementa sagledava se kroz četiri podprocesa:

- priprema sirovine,
- proizvodnja Portland-cementnog klinkera,
- proizvodnja Portland-cementa,
- pakiranje i transport.

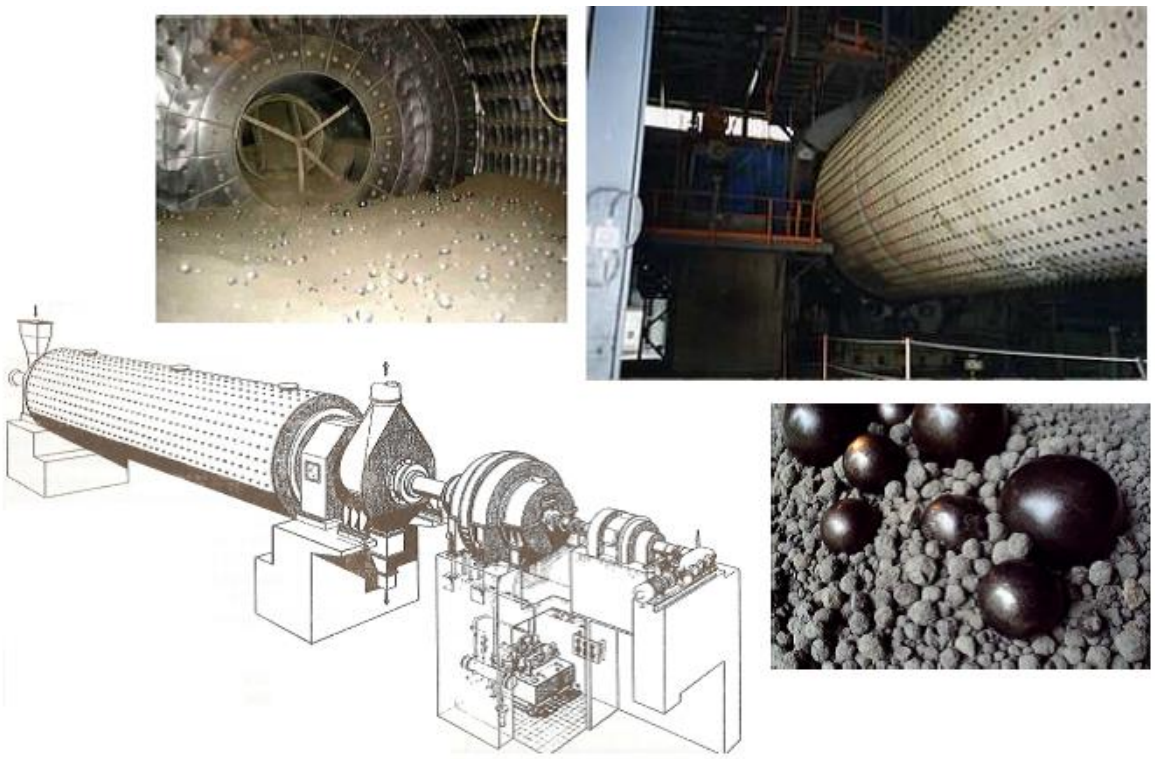
Shema procesa proizvodnje (suhi postupak) prikazana je na slici 1.



Slika 1. Shema procesa proizvodnje Portland-cementa, suhi postupak[1]

Oznake na Sl. 1: 1-kamenolom, 2-primarna drobilica, 3.hala sirovine, 4-doziranje, 5-sekundarna drobilica sirovine, 6-mlin sirovine, 7-silosi za homogenizaciju sirovine, 8-peć klinkera, 9-elektrootprašivač, 10-hladnjak klinkera, 11-hala klinkera, 12-mlinovi cementa, 13-silosi cementa, 14-utovar u cisterne, 15-utovar u vreće, IT-izmjenjivač topline.

Na slici 2 prikazan je kuglični mlin za mljevenje portlandskog cementa[2].



Slika 2. Kuglični mlin za mljevenje portlandskog cementa[2]

Tijekom rada kugličnog mlina na kliznim ležajevima, dolazi do trenja i do zagrijavanja mineralnog ulja koje podmazuje ležaj te je isti potrebno ohladiti. U tu svrhu koriste se izmjenjivači topline odgovarajuće izvedbe.

Podmazivanje uljem[3] dolazi u obzir za sve brzohodne ležaje 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 ponovo pumpa u sustav. Ulje koje cirkulira istodobno hladi ležaje.

1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline[4-7] su uređaji namijenjeni razmjeni 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:

- izmjenjivače 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.
  Ovakav način izmjene se u praksi najviše koristi pri izmjeni topline između plina i kapljevine (npr. hlađenje povratne rashladne vode hladnim zrakom u parnim termoelektranama).
- 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.
  U ovu grupu spadaju: rekuperatori, regeneratori i izmjenjivači topline s fluidiziranim slojem.

Izmjenjivači topline imaju široku primjenu u velikom broju industrijskih postrojenja: koriste se u procesnoj i prerađivačkoj industriji, u instalacijama centralnog grijanja, klimatizaciji, rashladnim uređajima.
Vrsta i veličina izmjenjivača topline se odabire ovisno o vrsti fluida, njegovom agregatnom stanju, temperaturi, gustoći, viskoznosti, tlakovima, kemijskoj strukturi i mnogim drugim termodinamičkim svojstvima.
U industrijskoj praksi se od svih izmjenjivača topline najviše koriste rekuperatori. U ovim uređajima su dva fluida, koji istovremeno stacionarno struje, razdvojena tankim zidom (metalni zid cijevi ili metalna ploča) kroz koji se izmjenjuje toplina. Izmjena topline između toplijeg i hladnijeg fluida ostvaruje se kombinacijom prijelaza topline s toplijeg fluida na stijenku, provođenjem topline kroz stijenku te prijelazom topline sa stijenke na hladniji fluid, što se zajedno naziva prolaz topline.

Dakle, pri prijenosu topline u izmjenjivaču mogu biti zastupljeni sljedeći mehamizmi prijelaza topline:

- konvekcija (s toplijeg fluida na stjenku, sa stjenke na hladniji fluid)
- kondukcija (provođenje)
- zračenje (radijacija).

U rekuperatorima nema pokretnih dijelova, niti dolazi do direktnog miješanja toplijeg i hladnijeg fluida. Po svojoj konstrukciji rekuperatori mogu biti cijevni, pločasti i s istaknutim (orebrenim) površinama.

Na slici 3 prikazan je jednostavni cijevni izmjenjivač, tzv. "cijev u cijev" izmjenjivač (a) te izmjenjivač s izmjenjivim pločama (b).[8]



(a) (b)

Slika 3. Cijevni izmjenjivač topline (a) i izmjenjivač topline s izmjenjivim pločama (b)[4]

Izmjenjivači topline tipa cijev u plaštu (engl. *shell and tube*) koji unutar svoga plašta sadrže snop cijevi s fluidom koji se hladi ili grije su najznačajniji predstavnici izmjenjivača topline. Koriste se u visokotlačnim procesima gdje uvjeti rada dosežu tlakove preko 30 bara i temperature iznad 250 °C. Parametri koje treba uzeti u obzir su duljina, debljina i promjer cijevi, razmještaj, naboranost i razmak cijevi te sama konstrukcija pregrada u plaštu. Plašt je izrađen od čeličnog lima. Cijevni registar (snop) je smješten u unutrašnjost izmjenjivača i izrađen je od čeličnih ili bakrenih cijevi koje su na krajevima uvaljane ili zavarene u cijevni zid. Na slici 4 prikazan je cijevni snop u fazi izrade cijevnog izmjenjivača topline.[9]

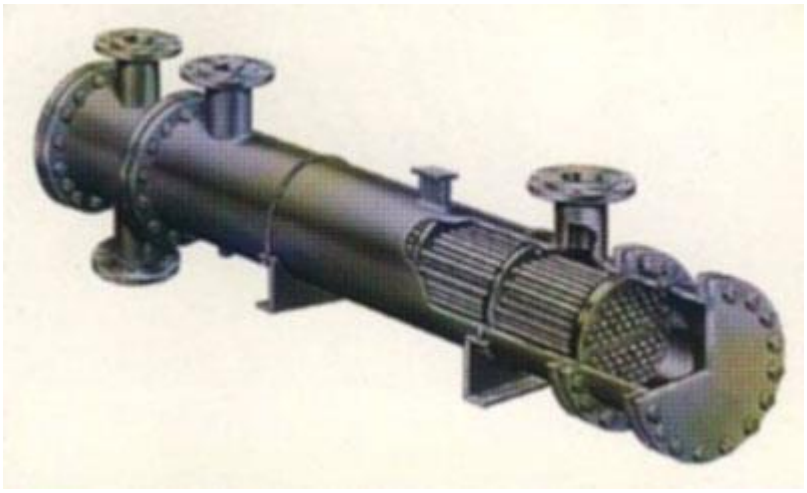


Slika 4. Cijevni snop u fazi izrade cijevnog izmjenjivača topline[9]

S obzirom na konstruktivnu izvedbu rekuperatori mogu biti različito izvedeni. Razlikuje se više tipova industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline:

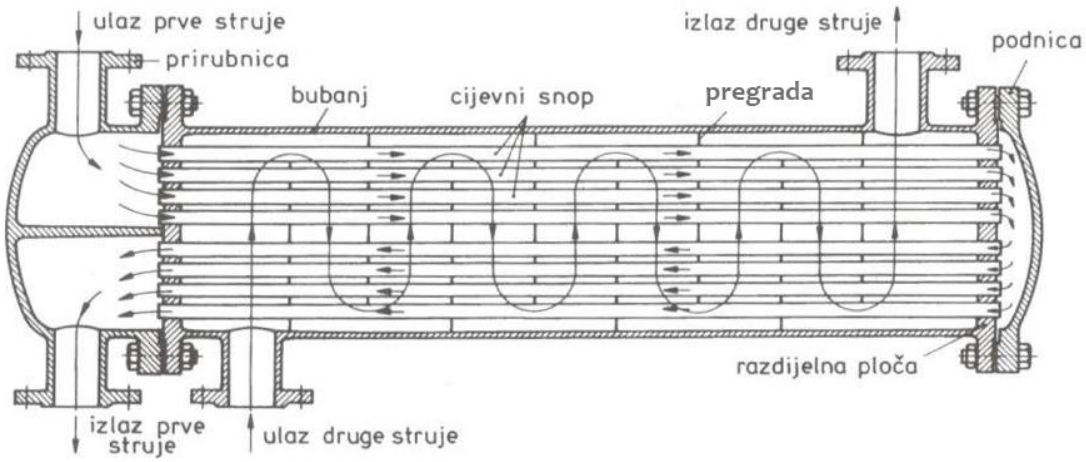
- izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi,
- U-cijevni izmjenjivači,
- izmjenjivači s plutajućom glavom,
- kotlasti izmjenjivači (rebojleri).

Na slici 5 prikazan je presjek dijela cijevnog izmjenjivača topline[10] s učvršćenim snopom cijevi.



Slika 5. Cijevni izmjenjivač topline s učvršćenim snopom cijevi[10]

Shematski prikaz izmjenjivača[4] s učvršćenim snopom cijevi, tipa 1-2, prikazan je na slici 6.



Slika 6. Kombinirani rekuperativni toplinski uređaj[4]

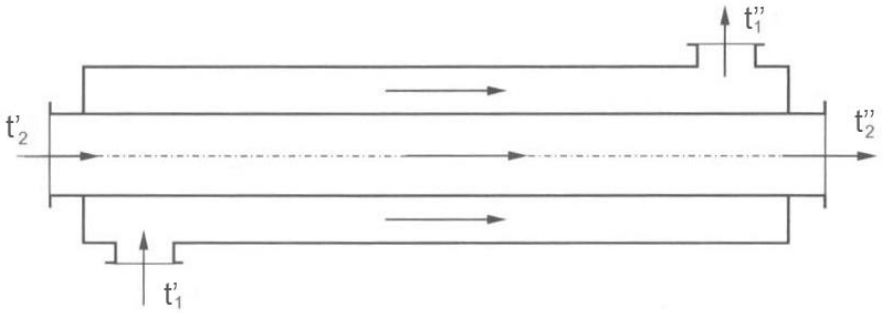
Prikazani uređaj (slika 5 i 6) sastoji se iz snopa cijevi koji je umetnut u bubanj (plašt). Kroz cijevi struji jedna struja (npr. hladnija), koja se prolaskom kroz rekuperator zagrijava, a u prostoru oko cijevi struji toplija struja koja se hladi prolaskom kroz rekuperator. Razdijelne stijenke ili površine kojima se prenosi toplina su cijevne stjenke.

1.3. OSNOVNI TIPOVI REKUPERATORA

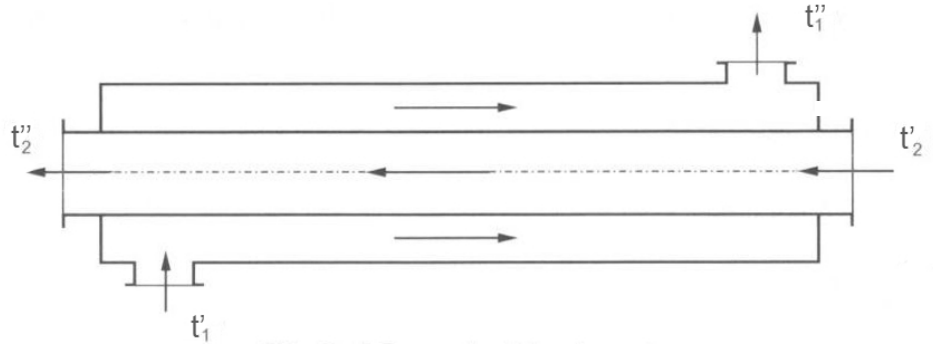
Osnovni su tipovi rekuperatora oni kod kojih svaka od struja prolazi samo jedanput kroz promatrani rekuperator.[4]

Podjela rekuperatora ovisi o međusobnom strujanju fluida kroz rekuperator te se shodno tome dijele na:

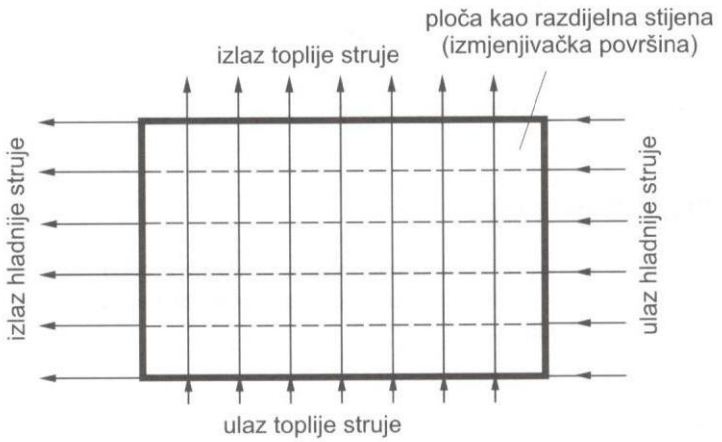
- istosmjerne – obe struje fluida su međusobno paralelne i teku u istom smjeru (slika 7),
- protusmjerne – obe struje fluida su međusobno paralelne, ali teku u suprotnim smjerovima (slika 8) i
- križne (unakrsne) – struje fluida se međusobno križaju (slika 9).



Slika 7. Istosmjerni tip rekuperatora[4]



Slika 8. Protusmjerni tip rekuperatora[4]



Slika 9. Unakrsni tip rekuperatora[4]

1.4. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJA FLUIDA

Zbog prikladnijeg načina proračuna izmjenjivača topline pojedine struje fluida identificiraju se prema vrijednosti toplinskog kapaciteta (vodene vrijednosti), C, koja se računa prema izrazu:

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

gdje je:

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

Q_m – maseni protok pojedine struje fluida, kg/s

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

Prema dogovoru (konvenciji) slabija struja fluida je ona koja ima manju vrijednost toplinskog kapaciteta C i njoj se pridružuje indeks 1, tj.

$$C_1 = Q_{m,1} \cdot c_{p1} \quad (2)$$

Jača struja, kojoj se pridružuje indeks 2, je ona koja ima veću vrijednost toplinskog kapaciteta, tj.

$$C_2 = Q_{m,2} \cdot c_{p2} \quad (3)$$

Prema tome vrijedi omjer:

$$0 \leq \frac{C_1}{C_2} = \frac{Q_{m,1} \cdot c_{p1}}{Q_{m,2} \cdot c_{p2}} \leq 1 \quad (4)$$

Za oznake ulazne temperature pojedine struje upotrebljava se apostrof ´, dok se za oznaku izlazne temperature pojedine struje upotrebljava apostrof ´´.

Dakle, oznake ulaznih i izlaznih temperature pojedinih struja fluida su:

t_1' – ulazna temperature slabije struje,

t_1'' – izlazna temperature slabije struje,

t_2' – ulazna temperature jače struje,

t_2'' – izlazna temperature jače struje.

1.5. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Izmijenjeni toplinski tok u rekuperatoru[4,6] funkcija je sljedećih varijabli:

$$\Phi = \mathrm{f}\,(k, A_o, t_1', t_1'', t_2', t_2'', C_1, C_2) \qquad (5)$$

gdje je:

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

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

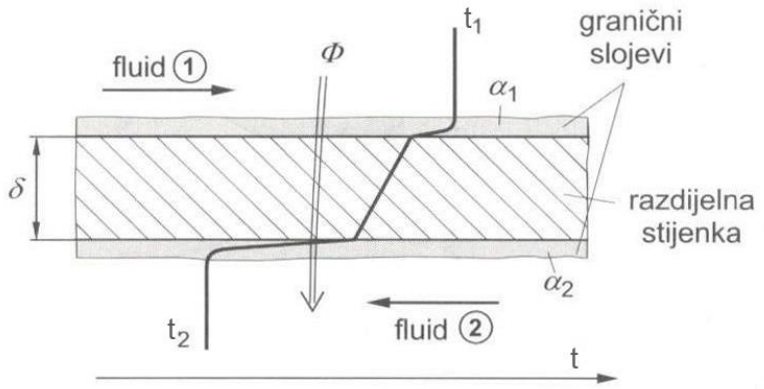
A_o – ukupna površina prijenosa topline, m^2

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

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

Ostale veličine imaju prije navedeno značenje.

Koeficijent prolaza topline (ili ukupni koeficijent prijenosa topline) bitna je veličina pri proračunu rekuperatora. Ta veličina sadrži sve relevantne toplinske otpore na relaciji izmjene topline fluid-stijenka-fluid, a koji upravo i postoje kod rekuperatora, što je vidljivo iz slike 10.



Slika 10. Prolaz topline kroz razdijelnu stijenku rekuperatora[4]

Koeficijent prolaza topline ovisi o koeficijentima prijelaza topline s jedne i druge strane razdijelne stijenke, njenoj geometriji i njenoj toplinskoj provodnosti.

Ukupni koeficijent prijenosa topline[6], u praksi, se računa prema jednadžbi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_i \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}} \qquad (6)$$

gdje je:

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

α_o – koeficijent prijenosa topline na vanjskoj stjenki cijevi, W/(m^2 K)

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

r_i i r_o – otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja unutarnje i vanjske stijenke cijevi, (m^2 K)/W

r_c – otpor prijenosu topline stijenke cijevi ili recipročna vrijednost toplinske vodljivosti materijala, od kojeg je načinjena cijev, pomnožena s debljinom stijenke, (m^2 K)/W

Da bi se koeficijenti prijenosa topline i otpori sveli na istu površinu prijenosa topline, α_i i r_i množe se omjerom vanjske i unutarnje površine cijevi $\frac{A_o}{A_i}$.

U izvedenoj jednadžbi za koeficijent polaza topline, kao i toplinske kapacitete pojedinih struja javljaju se i fizikalna svojstva struja, a koja su naravno temperaturno ovisna.

Kako bi se navedena temperaturna ovisnost uzela u obzir, fizikalna svojstva fluida uzimaju se iz toplinskih tablica za temperature t_m koja odgovara aritmetičkoj sredini ulazne i izlazne temperature promatrane struje, tj.

$$t_m = \frac{t' + t''}{2} \qquad (7)$$

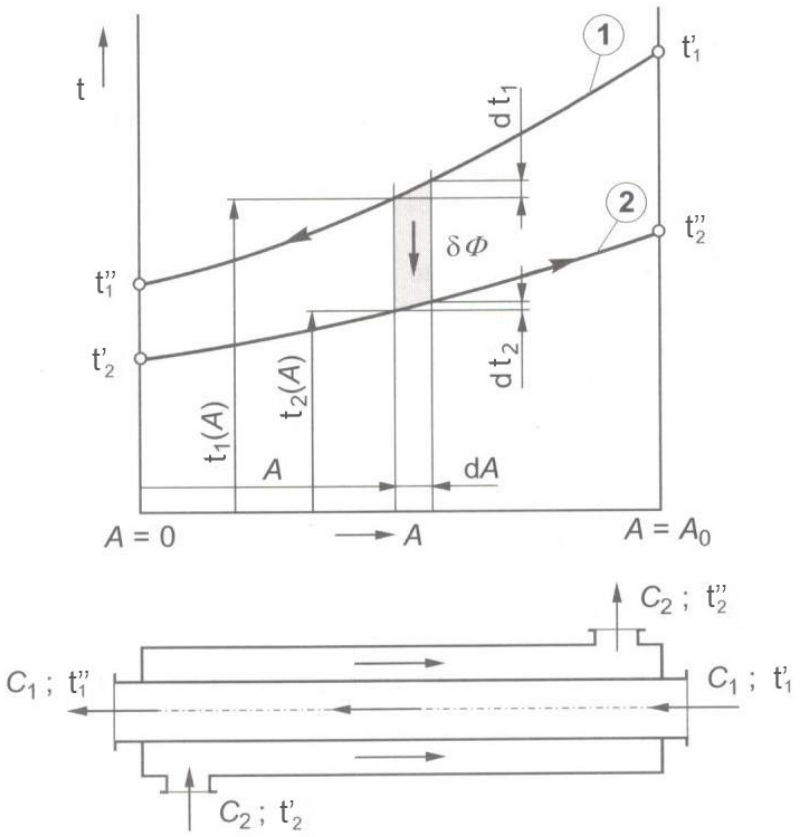
gdje je:

t_m – aritmetička sredina temperature promatrane struje, ^oC

t' – ulazna temperature struje fluida, ^oC

t'' – izlazna temperature struje fluida, ^oC.

Skica protusmjernog rekuperatora[4], tipa "cijev u cijevi" i tok temperature jedne i druge struje prikazana je na slici 11.



Slika 11. Temperaturni tok struja uzduž protusmjernog izmjenjivača[4]

Srednja logaritamska razlika temperatura definirana je izrazom:

$$\Delta T_{\mathrm{m}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \tag{8}$$

ΔT_1 i ΔT_2 su razlike temperatura "hladnog" i "toplog" fluida na jednoj i na drugoj strani izmjenjivača, indeks 1 odnosi se na veću razliku, a indeks 2 na manju razliku.

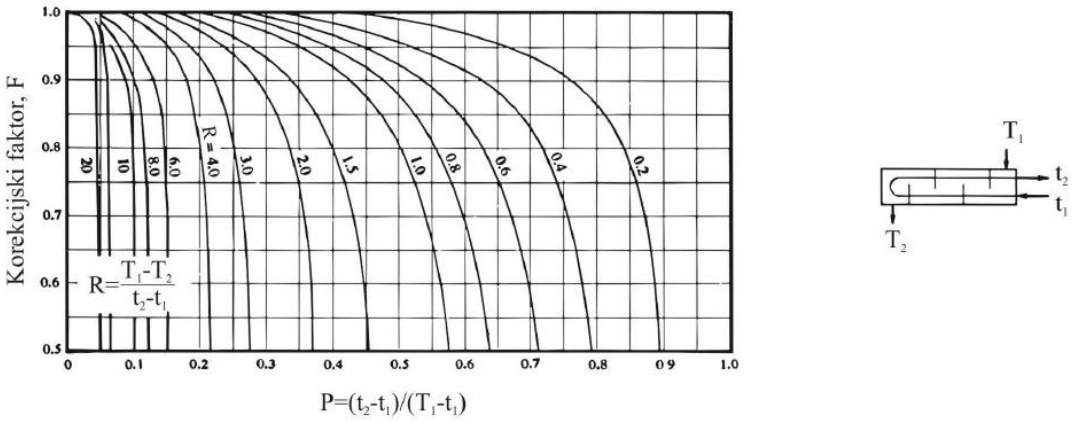
Za protusmjerni tok fluida prikazan na slici 11, slijedi:

$\Delta T_1 = T\mathrm{t}_1 - T\mathrm{h}_2 = t_1' - t_2''$

$\Delta T_2 = T\mathrm{t}_2 - T\mathrm{h}_1 = t_1'' - t_2'$

Izraz (8) vrijedi za izmjenjivače topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i kroz cijevi. Međutim, najčešće se izmjenjivači konstruiraju tako da ima više prolaza kroz cijevi i/ili plašt. Cijevni izmjenjivači topline karakteriziraju se i označavaju prema TEMA standardima (***T**ubular **E**xanger **M**anufactures **A**ssociation,* New York 1978.).

Kod cijevnih izmjenjivača dolazi do križanja temperature, tj. u jednom dijelu cijevi i plašta "hladni" fluid ima višu temperature od "toplog" fluida. U takvim se slučajevima ΔT_m izračunan izrazom (8) korigira množenjem s faktorom F iz odgovarajućeg dijagrama F = f (P, R) (slika 12)[6],



Slika 12. Dijagram ovisnosti[6] F = f (P, R) za protusmjerni izmjenjivač tipa 1-2

ili se izračunava koristeći sljedeće korelacije:

$$F = \left[\frac{(R^2+1)^{1/2}}{R-1}\right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1-P_n}{1-R\cdot P_n}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{P_n}\right)-1-R+(R^2+1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{P_n}\right)-1-R-(R^2+1)^{\frac{1}{2}}}\right]} \qquad (9)$$

gdje je:

$$P_n = \frac{1-\left(\frac{R\cdot P-1}{P-1}\right)^{1/n}}{R-\left(\frac{R\cdot P-1}{P-1}\right)^{1/n}} \qquad (10)$$

U jednadžbi (10) n predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt.

Parametar P je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$\mathrm{P} = \frac{T_{\mathrm{h},2} - T_{\mathrm{h},1}}{T_{\mathrm{t},1} - T_{\mathrm{h},1}} \tag{11}$$

Parametar R je jednak omjeru kapacitivnih brzina $\frac{C_{\mathrm{H}}}{C_{\mathrm{T}}} = \frac{(T_{\mathrm{T}1} - T_{\mathrm{T}2})}{(T_{\mathrm{H}2} - T_{\mathrm{H}1})}$.

$$\mathrm{R} = \frac{T_{\mathrm{t},1} - T_{\mathrm{t},2}}{T_{\mathrm{h},2} - T_{\mathrm{h},1}} \tag{12}$$

Korekcijski faktor ne smije biti manji od 0,75. Ukoliko se dobije faktor manji od 0,75 treba pokušati s izmjenjivačem s više prolaza kroz plašt dok se ne dobije zadovoljavajuća vrijednost korekcijskog faktora.

Korigirana sredanja logaritamska razlika temperature će biti:

$$\Delta T_{\mathrm{m,\,kor}} = \Delta T_{\mathrm{m}} \cdot \mathrm{F} \tag{13}$$

Dakle, za iste razlike temperature na ulazu i izlazu iz izmjenjivača (ΔT_1 i ΔT_2) pokretačka sila procesa ΔT_{m} će biti manja za faktor korekcije F.

Osnovna jednadžba za proračun izmjenjivača topline glasi:

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_{\mathrm{m}} \tag{14}$$

odnosno

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_{\mathrm{m,\,kor}} \tag{15}$$

gdje je:

Φ – toplinski tok (toplina prenesena u izmjenjivaču), kJ/h

k – ukupni koeficijent prijenosa topline, kJ/(m^2 h K)

A – površina prijenosa topline, m^2

ΔT_{m} – srednja logaritamska razlika temperatura između "toplog" i "hladnog" fluida, K

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

1.6. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI

Za koeficijent prijenosa topline[6] na stijenku cijevi kada ne dolazi do promjene faze najčešće se upotrebljava za laminarno strujanje fluida u vodoravnim i okomitim cijevima (Re < 2300) Sieder-Tateova korelacija (odstupanja su ± 12%):

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_\mathrm{i} \cdot d_\mathrm{i}}{\lambda} = 1{,}86 \cdot \left(\mathrm{Pe} \cdot \frac{d_\mathrm{i}}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_\mathrm{s}}\right)^{0{,}14} \tag{16}$$

$$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} \tag{17}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_\mathrm{i} \cdot \rho}{\mu} = \frac{q_\mathrm{m} \cdot d_\mathrm{i}}{\mu} \tag{18}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_\mathrm{p}}{\lambda} \tag{19}$$

gdje je:

Nu – Nusseltova značajka

α_i – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj strani cijevi, kJ/(h m^2 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 stijenke, Pa s

ω – brzina fluida u cijevi, m/s

q_m – masena brzina fluida u cijevi, kg/(m^2 h)

Za turbulentno strujanje u vodoravnim i okomitim cijevima (Re > 10 000) Sieder-Tateova korelacija glasi (odstupanja su +15% do –10%):

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 0{,}027 \cdot (\mathrm{Re})^{0,8} \cdot (\mathrm{Pr})^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \qquad (20)$$

Za prijelazno područje strujanja 2300 < Re < 10 000 može se primijeniti korelacija Hausena:

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0{,}166 \cdot \left(\mathrm{Re}^{2/3} - 125\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right]}{\mathrm{Re}} \cdot \mathrm{Pr}^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \qquad (21)$$

Sve veličine u izrazu (21) imaju prije navedeno značenje.

Koeficijent prijenosa topline na stijenku cijevi sa strane plašta za turbulentno područje strujanja u standardnim cijevnim izmjenjivačima s pregradama može se izračunati iz korelacije:

$$\frac{\alpha_o \cdot d_e}{\lambda} = 0{,}027 \cdot \mathrm{Re}^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \qquad (22)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{q_m \cdot d_e}{\mu} \qquad (23)$$

gdje je:

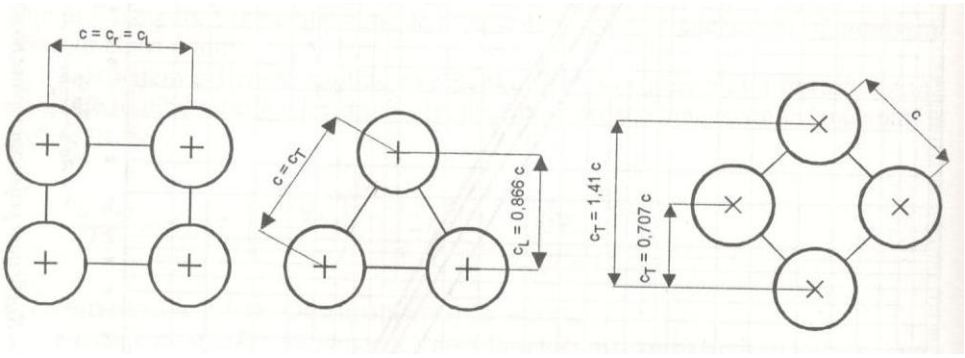
α_o– koeficijent prijenosa topline na stijenku cijevi u plaštu, kJ/(h m^2 K)

d_e – ekvivalentni promjer plašta, m.

Cijevi u cijevnom snopu izmjenjivača obično se ugrađuju prema jednom od ova tri rasporeda:

- raspored u trokutu
- kvadratni raspored i
- rotirani kvadratni raspored.

Duljina stranice trokuta ili kvadrata, koje čine tri ili četiri susjedne cijevi, naziva se korak cijevi. Prilikom proračuna koji put se upotrebljavaju i takozvani uzdužni korak c_L i poprečni korak c_T. Raspored i korak cijevi u cjevnom snopu[6] prikazani su na slici 13.



Slika 13. Raspored i korak cijevi u cjevnom snopu[6]

Ekvivalentni promjer cijevi za kvadratni i rotirani kvadratni raspored računa se iz izraza:

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(c^2 - \frac{d_o^2 \cdot \pi}{4}\right)}{d_o \cdot \pi} \tag{24}$$

Za raspored cijevi u trokutu ekvivalentni promjer računa se prema izrazu:

$$d_e = \frac{1{,}1 \cdot (c^2 - 0{,}917 \cdot d_o^2)}{d_o} \tag{25}$$

Masena brzina fluida u plaštu računa se iz:

$$q_{\mathrm{m}} = \frac{Q_{\mathrm{m}}}{A_{\mathrm{s}}} \tag{26}$$

gdje je:

Q_{m} – maseni protok fluida, kg/h

A_{s} – slobodna površina presjeka cijevnog snopa, m^2, koja se računa iz:

$$A_{\mathrm{s}} = \frac{d_{\mathrm{pl}} \cdot l_{\mathrm{pr}}(\mathrm{c} - d_{\mathrm{o}})}{\mathrm{c}} \tag{27}$$

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.

Strujanje zraka, plinova i drugih fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu čest je slučaj iz prakse. Koeficijent prijenosa topline za ovaj slučaj dan je jednadžbom[7]:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_{\mathrm{o}} \cdot d_{\mathrm{i}}}{\lambda} = \mathrm{C} \cdot (\mathrm{Re})^{\mathrm{n}} \cdot (\mathrm{Pr})^{\mathrm{m}} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr_s}}\right)^{0,25} \tag{28}$$

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

Koeficijent prijenosa topline α_{o} prema jednadžbi (28) važi za treći i iduće redove u snopu cijevi.[7] Razlog tomu je nedovoljno razvijeno strujanje i prijenos topline kod prvog i drugog reda. Eksperimentalnim istraživanjima došlo se do korekcijskih faktora za prvi ε_{I} i drugi $\varepsilon_{\mathrm{II}}$ red cijevi u šahovskom rasporedu, tj. $\varepsilon_{\mathrm{I}} = 0,6$, a $\varepsilon_{\mathrm{II}} = 0,7$.

Prema tome, srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline[7] za snop od N redova u pravcu strujanja je:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0{,}6 \cdot \alpha_o \cdot N_1 + 0{,}7 \cdot \alpha_o \cdot N_2 + \alpha_o \cdot [N - (N_1 + N_2)]}{N} \quad (29)$$

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. OZNAČAVANJE TEMPERATURA STRUJA FLUIDA

Zbog prikladnijeg načina proračuna izmjenjivača topline potrebno je pojedinu struju fluida identificirati prema kriteriju vrijednosti njenog toplinskog kapaciteta, odnosno vodene vrijednosti, C.

Toplija struja (fluid) – ulje koje dotiče volumnom brzinom $Q_{\mathrm{v,U}} = 8\ \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{min}}$.

Temperatura ulja na ulazu u plašt izmjenjivača iznosi t_{U1} = 30 °C.

Temperature ulja na izlazu iz plašta iznosi t_{U2} = 25,5 °C.

Fizikalna svojstva ulja očitavaju se iz tablica[11] pri srednjoj temperaturi ulja izračunatoj prema jednadžbi (7):

$$t_{\mathrm{m,U}} = \frac{t' + t''}{2} = \quad \frac{30 + 25{,}5}{2} = 27{,}75\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

U tablicama[11] se nalaze vrijednosti 20 i 40 °C te je, stoga, potrebno izvršiti interpolaciju unutar navedenih vrijednosti.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti za fizikalne karakteristike mineralnog ulja pri temperaturi 27,75 °C prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Fizikalna svojstva mineralnog ulja pri srednjoj temperature 27,75 °C

Fizikalna svojstva mineralnog ulja	$t_{\mathrm{m,U}}$ / °C
	27,75
ρ_{U} / kg/m^3	866
$c_{\mathrm{p,U}}$ / J/(kg K)	1883
λ_{U} / W/(m K)	0,144
ν_{U} / m^2/s	$12{,}26 \cdot 10^{-6}$
* μ_{U} / (N s)/m^2	$10617 \cdot 10^{-6}$

* $\mu_{\mathrm{U}} = \nu_{\mathrm{U}} \cdot \rho_{\mathrm{U}}$

Hladnija struja (fluid) – voda koja dotječe u cijevi volumnom brzinom, $Q_{\mathrm{v,V}} = 1\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$

Temperatura vode na ulazu u cijevi izmjenjivača iznosi t_{V1} =17 $^{\mathrm{o}}$C.

Fizikalna svojstva hladne vode uzimaju se za poznatu ulaznu temperature hladne vode 17 $^{\mathrm{o}}$C.

Obzirom da se temperatura 17 $^{\mathrm{o}}$C ne nalazi u tablicama[11], potrebno je izvršiti interpolaciju unutar intervala 0 i 20 $^{\mathrm{o}}$C koji se nalazi u tablicama.

Fizikalne karakteristike vode, nakon izvršene interpolacije, pri 17 $^{\mathrm{o}}$C prikazane su u tablici 2:

Tablica 2. Fizikalna svojstva vode pri temperaturi 17 $^{\mathrm{o}}$C

Fizikalna svojstva vode	$t_{\mathrm{m,V}}$ / $^{\mathrm{o}}$C
	17
ρ_{V} / kg/m^3	998,3
$c_{\mathrm{p,V}}$ / J/(kg K)	4188
λ_{V} / W/(m K)	0,592
ν_{V} / m^2/s	$1{,}127 \cdot 10^{-6}$
* μ_{V} / (N s)/m^2	$1125 \cdot 10^{-6}$

* $\mu_{\mathrm{V}} = \nu_{\mathrm{V}} \cdot \rho_{\mathrm{V}}$

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:

$$C_{\mathrm{U}} = Q_{\mathrm{v,U}} \cdot \rho_{\mathrm{U}} \cdot c_{\mathrm{p,U}}$$

$$C_{\mathrm{U}} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 866 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 1883 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}$$

$$C_{\mathrm{U}} = 217\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s\,K}} = 217\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

Maseni protok ulja:

$$Q_{\mathrm{m,U}} = Q_{\mathrm{v,U}} \cdot \rho_{\mathrm{U}} = 0{,}115\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

Toplinski kapacitet vode,

$$C_{\mathrm{V}} = Q_{\mathrm{v,V}} \cdot \rho_{\mathrm{V}} \cdot c_{\mathrm{p,V}}$$

$$C_{\mathrm{V}} = \frac{1}{3600}\ \frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}}\ \cdot\ 998{,}3\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}} \cdot\ 4188\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}$$

$$C_{\mathrm{V}} = 1161\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s\,K}} = 1161\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

Maseni protok vode:

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

Budući da je toplinski kapacitet struje ulja, C_{U}, manji od toplinskog kapaciteta struje vode C_{V}, tj. $C_{\mathrm{U}} < C_{\mathrm{V}}$, (217 W/K < 1161 W/K), ulju pripada značenje slabije struje i oznaka 1, a vodi pripada značenje jače struje i oznaka 2.

Indentifikacija struja i oznake su sljedeće:

$C_{\mathrm{U}} = C_1$

$C_{\mathrm{V}} = C_2$

$t_{\mathrm{U1}} = t_1'$ – ulazna temperatura ulja

$t_{\mathrm{U2}} = t_1''$ – izlazna temperatura ulja

$t_{\mathrm{V1}} = t_2'$ – ulazna temperatura vode

$t_{\mathrm{V2}} = t_2''$ – izlazna temperatura vode

2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE

Izmijenjena toplina u jedinici vremena, tj. toplinski tok u izmjenjivaču može se izračunati iz ohlađivanja ($t_1' - t_1''$) slabije (toplije) struje ili iz zagrijavanja ($t_2'' - t_2'$) jače (hladnije) struje, pa je:

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

Izmijenjeni toplinski tok će biti:

$$\phi_{\mathrm{U}} = \dot{Q}_{\mathrm{U}} = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 217\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}} \cdot (30 - 25{,}5)\ \mathrm{K} = \ 978\ \mathrm{W}$$

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_{\mathrm{U}} = t_1' - t_1'' = 30 - 25{,}5 = \ 4{,}5\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Toplina koju daje ulje prima rashladna voda koja struji kroz cijevi izmjenjivača.

$$\phi_{\mathrm{V}} = \dot{Q}_{\mathrm{V}} = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = C_2 \cdot \Delta t_{\mathrm{V}} = \ 978\ \mathrm{W}$$

Prirast temperature hladne vode će biti:

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{V}}}{C_2} = \frac{978\ \mathrm{W}}{1161\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}} = 0{,}84\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = (t_2'' - 17) = 0{,}84\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Izlazna temperature vode:

$$t_2'' = \Delta t_{\mathrm{V}} + 17 = 0{,}84 + 17 = 17{,}84\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

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

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

$Q_{v,U}$ L/min	8
$Q_{m,U}$ kg/s	0,115
t_1' / ^oC	33
t_1'' / ^oC	26,5
$Q_{v,V}$ m^3/h	1
$Q_{m,V}$ kg/s	0,277
t_2' / ^oC	17
t_2'' / ^oC	17,84
$C_U = C_1$ W/K	209
$C_V = C_2$ W/K	1161

Fizikalna svojstva vode, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperature vode koja se određuje prema jednadžbi (7).

Srednja temperature vode iznosi:

$$t_{m,V} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{17 + 17{,}84}{2} = 17{,}42\ ^oC$$

Obzirom da se temperatura 17,42 ^{o}C, ne nalazi u tablicama[11], izvršena je interpolacija unutar vrijednosti 0 i 20 ^{o}C koje se nalaze u tablicama.

Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi, nakon izvršene interpolacije, prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperature 17,42 ^{o}C

Fizikalna svojstva vode	$t_{m,V}$ / ^{o}C
	17,42
ρ_V / kg/m^3	998,258
$c_{p,V}$ / J/(kg K)	4187
λ_V / W/(m K)	0,592
ν_V / m^2/s	1,11·10^{-6}
* μ_V / (N s)/m^2	1108·10^{-6}

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

2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA

Srednja logaritamska razlika temperature računa se iz jednažbe (8), 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 ($Q_{v,U}$ = 8 L/min; $Q_{v,V}$ = 1 m^3/h), slijedi:

$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 30 - 17{,}84 = 12{,}16$ K

$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 25{,}5 - 17 = 8{,}5$ K

$$\Delta T_m = \frac{12{,}16 - 8{,}5}{\ln\left(\frac{12{,}16}{8{,}5}\right)} = 10{,}22 \text{ K}$$

Ulazne karakteristike mineralnog ulja i vode i dobivena srednja logaritamska razlika temperature prikazane su u tablici 5.

Tablica 5. Ulazne karakteristike mineralnog ulja i vode i dobivena srednja logaritamska razlika temperature

mineralno ulje	voda
$Q_{v,U}$ = 8 L/min	$Q_{v,V}$ = 1 m^3/ h
t_1' = 30 °C	t_2' = 17 °C
t_1'' = 25,5 °C	t_2'' = 17,84 °C
ΔT_m / K	10,22

2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F

Korekcijski faktor, F, računa se iz jednadžbe (9):

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

Parametri R i P računaju se iz jednadžbi (11) i (12), a Pn iz jednadžbe (10):

$$R = \frac{T_{t,1}-T_{t,2}}{T_{h,2}-T_{h,1}} = \frac{t_1'-t_1''}{t_2''-t_2'} = \frac{30-25{,}5}{17{,}84-17} = 5{,}36$$

$$P = \frac{T_{h,2}-T_{h,1}}{T_{t,1}-T_{h,1}} = \frac{t_2''-t_2'}{t_1'-t_2'} = \frac{17{,}84-17}{30-17}$$

$$P = 0{,}065$$

Broj prolaza kroz plašt, n = 1.

$$P_n = \frac{1-\left(\frac{R\cdot P-1}{P-1}\right)^{1/n}}{R-\left(\frac{R\cdot P-1}{P-1}\right)^{1/n}} = \frac{1-\left(\frac{5{,}36\cdot 0{,}065-1}{0{,}065-1}\right)^{1/1}}{5{,}36-\left(\frac{5{,}36\cdot 0{,}065-1}{0{,}1065-1}\right)^{1/1}} = 0{,}064999$$

$$F = \left[\frac{(5{,}36^2+1)^{1/2}}{5{,}36-1}\right]\cdot\frac{\ln\left(\frac{1-0{,}064999}{1-5{,}36\cdot 0{,}064999}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0{,}064999}\right)-1-5{,}36+(5{,}36^2+1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0{,}064999}\right)-1-5{,}36-(5{,}36^2+1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0{,}994$$

Korigirana srednja logaritamska temperature fluida računa se iz jednadžbe (13), tj.

$\Delta T_{m,\,kor} = \Delta T_m \cdot F = 10{,}22 \cdot 0{,}994 = 10{,}2$ K

U tablici 6 prikazane su postignute vrijednosti parametara R, P, P_n, faktora korekcije F te korigirana srednja logaritamska temperatura fluida $\Delta T_{m,kor}$.

Tablica 6. Vrijednosti parametara R, P, P_n, faktora korekcije F te korigirana srednja logaritamska temperatura fluida $\Delta T_{m,kor}$.

parametri	$Q_{v,U}$ = 8 L/min
	$Q_{v,V}$ = 1 m^3/h
R	5,36
P	0,065
P_n	0,064999
F	0,978
ΔT_m / K	10,22
$\Delta T_{m,kor}$ / K	10,2

2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI

Cijevi su vanjskog promjera d_o = 10 mm, debljine δ = 1 mm i duljine L = 404 mm.

Unutarnji promjer cijevi:

$d_i = 10 - 2 \cdot 1 = 8$ 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.

Maseni protok vode u cijevi:

$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V$

$$Q_{m,V} = \frac{1}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 998{,}258 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0{,}277 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Masena brzina fluida (vode) u cijevi:

$$q_{\mathrm{m,V}} = \frac{Q_{\mathrm{v,V}} \cdot \mathrm{N_{prolaz}}}{A_{\mathrm{c}}} = \frac{\frac{1}{3600}\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}} \cdot 998{,}258\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}} \cdot 2}{0{,}00221\ \mathrm{m^2}} = 251\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m^2}}$$

gdje je $\mathrm{N_{prolaz}}$ – broj prolaza fluida (vode) kroz cijevi = 2

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_{\mathrm{c}} = \frac{q_{\mathrm{m,V}}}{\rho_{\mathrm{V}}} = \frac{251\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m^2}}}{998{,}258\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}} = 0{,}25\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega_c \cdot \mathrm{d_i} \cdot \rho_V}{\mu_{\mathrm{V}}} = \frac{q_{\mathrm{m,V}} \cdot \mathrm{d_i}}{\mu_{\mathrm{V}}} = \frac{251\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m^2}} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{1108 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\ s}}{\mathrm{m^2}}} = 1812$$

Re < Re,kr

1812 < 2300 laminarno strujanje u cijevima

Za izračunavanje Nusselta koristi se Sieder-Tateova korelacija (16)

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_{\mathrm{i}} \cdot d_{\mathrm{i}}}{\lambda} = 1{,}86 \cdot \left(\mathrm{Pe} \cdot \frac{d_{\mathrm{i}}}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{\mathrm{s}}}\right)^{0{,}14}$$

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_{\mathrm{p}}}{\lambda} = \frac{1108 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\ s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 4187\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}}{0{,}592\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\ K}}} = 7{,}84$$

$$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} = 1812 \cdot 7{,}84 = 14206$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_\mathrm{i} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{0{,}592\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 1{,}86 \cdot \left(14206 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{404 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}\right)^{\frac{1}{3}} = 12{,}19$$

$$\alpha_\mathrm{i} = \frac{0{,}592\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}} \cdot 12{,}19}{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}} = 902\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

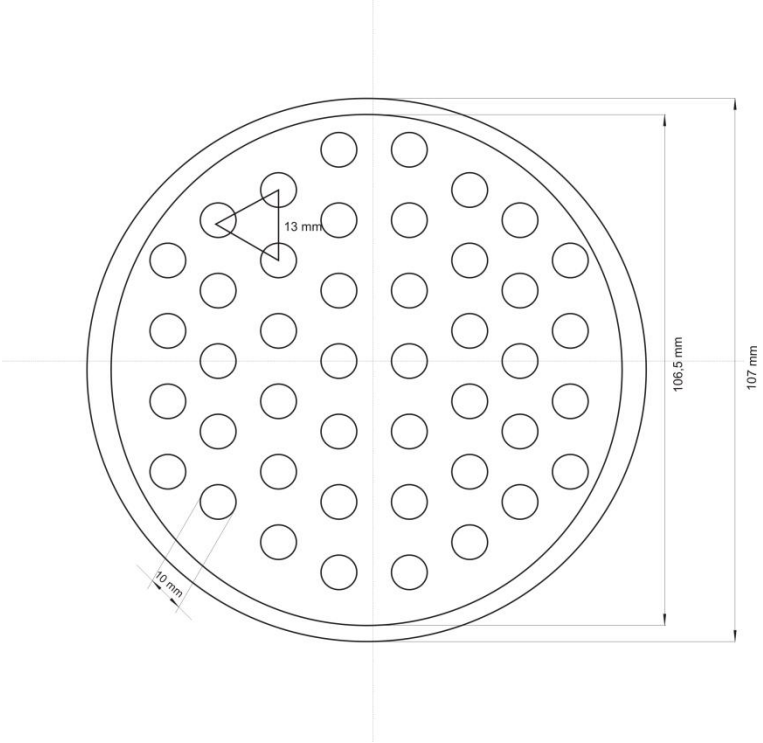
U tablici 7 prikazane su postignute vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline u cijevi, α_i, o protočnim karakteristikama vode u cijevima izmjenjivača (2 prolaza fluida kroz cijevi).

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

Re	1812
	laminarno područje (Re < 2300)
$Q_{\mathrm{m,V}}$ kg/s	0,277
$q_{\mathrm{m,V}}$ kg/(s m^2)	251
ω_c m/s	0,25
α_i W/(m^2 K)	902

2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU

Raspored cijevi u cijevnom snopu, prikazan je na slici 14.



Slika 14. Raspored cijevi u cijevnom snopu 1-2 tipa izmjenjivača

Podaci koji se mogu očitati sa slike 14 su sljedeći:

Korak cijevi, c = 13 mm

Vanjski promjer cijevne ploče, d_{cp} = 106,5 mm

Unutarnji promjer plašta, d_{pl} = 107,1 mm

Vanjski promjer cijevi, d_o = 10 mm

Cijevni snop definiran je cijevnom pločom vanjskog promjera 106,5 mm; što daje zračnost od 0,6 mm u odnosu na unutarnji promjer plašta od 107,1 mm. Na prikazanoj cijevnoj ploči raspored otvora za ugradnju bakrenih cijevi izveden je na sljedeći način: Kroz središnjicu

kruga povučena je horizontalna linija dužine promjera. Od te linije odmjerena je paralelna linija prema gore na udaljenosti 7 mm. Na istoj se nalazi 7 provrta za cijevi na udaljenosti 13 mm. Sljedeći niz čini 6 provrta, zatim sljedeći niz čini 5 provrta i na kraju zadnji niz s četiri provrta. Svi ovi provrti su u pravilnom rasporedu i čine istostranične trokute (3 x 60^o). Ukupan broj provrta je 22 s gornje i 22 provrta s donje strane, što ukazuje da je ukupan broj cijevi u cijevnom snopu 44.

Dakle, ukupan broj cijevi, $N_c = 44$

Broj cijevi u prvom redu, $N_1 = 7$

Broj cijevi u drugom redu, $N_2 = 6$

Dužina cijevi, $L = 404$ mm

Broj pregrada u plaštu $N_{pr} = 6$

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

$$l_{\mathrm{pr}} = \frac{L}{\mathrm{N}_{pr}} = \frac{404}{6} = 67{,}33 \text{ mm}$$

Za raspored cijevi u trokutu, ekvivalentni promjer cijevi, d_e, se računa iz jednadžbe (25):

$$d_{\mathrm{e}} = \frac{1{,}1 \cdot (\mathrm{c}^2 - 0{,}917 \cdot d_{\mathrm{o}}^2)}{d_{\mathrm{o}}} = \frac{1{,}1 \cdot (13^2 - 0{,}917 \cdot 10^2)}{10} = 8{,}503 \text{ mm}$$

$$d_{\mathrm{e}} = 0{,}008503 \text{ m}$$

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa računa se iz jednadžbe (27):

$$A_{\mathrm{s}} = \frac{d_{\mathrm{pl}} \cdot l_{\mathrm{pr}} \cdot (\mathrm{c} - d_{\mathrm{o}})}{\mathrm{c}} = \frac{107{,}1 \cdot 67{,}33 \cdot (13 - 10)}{13} = 1664 \text{ mm}^2$$

$$A_{\mathrm{s}} = 0{,}00166 \text{ m}^2$$

Masena brzina fluida u plaštu (ulja) računa se iz jednadžbe (26):

$$q_{\mathrm{m,U}} = \frac{Q_{m,\mathrm{U}}}{A_{\mathrm{s}}} = \frac{Q_{v,\mathrm{U}} \cdot \rho_U}{A_{\mathrm{s}}} = \frac{\frac{8 \cdot 10^{-3}}{60}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 866\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}}{0{,}00166\ \mathrm{m}^2} = 69{,}56\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$\mathrm{Re} = \frac{q_{\mathrm{m,U}} \cdot \mathrm{d_e}}{\mu_{\mathrm{U}}} = \frac{69{,}56\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m}^2} \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{10617 \cdot 10^{-6}\frac{\mathrm{N\ s}}{\mathrm{m}^2}} = 55{,}71$$

Re < Re,kr

55,71 < 2300 laminarno strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu

Koeficijent prijenosa topline za laminarno strujanje fluida i šahovski raspored cijevi u plaštu računa se iz jednadžbe (28), gdje je C = 0,56, n = 0,50 i m = 0,36.

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_{\mathrm{o}} \cdot d_{\mathrm{e}}}{\lambda} = \mathrm{C} \cdot (\mathrm{Re})^{\mathrm{n}} \cdot (\mathrm{Pr})^{\mathrm{m}} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr_s}}\right)^{0{,}25} = 0{,}56 \cdot (\mathrm{Re})^{0{,}50} \cdot (\mathrm{Pr})^{0{,}36} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr_s}}\right)^{0{,}25}$$

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_{\mathrm{p}}}{\lambda} = \frac{10617 \cdot 10^{-6}\frac{\mathrm{N\ s}}{\mathrm{m}^2} \cdot 1883\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}}{0{,}144\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\ K}}} = 139$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_{\mathrm{o}} \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{0{,}144\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\ K}}} = 0{,}56 \cdot (55{,}71)^{0{,}50} \cdot (139)^{0{,}36} = 24{,}70$$

$$\alpha_{\mathrm{o}} = \frac{0{,}144\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}} \cdot 24{,}70}{0{,}008503\ \mathrm{m}} = 418\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

Koeficijent prijenosa topline α_{o} izračunat iz jednadžbe (28) 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 (29), tj.

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

$$\alpha_{\mathrm{o,sr}} = \frac{0{,}6 \cdot 418 \cdot 7 + 0{,}7 \cdot 418 \cdot 6 + 418 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44} = 374{,}3\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

2.7. PRORAČUN UKUPNOG KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE ILI KOEFICIJENTA PROLAZA TOPLINE

Ukupni koeficijent prijenosa topline (koeficijent prolaza topline) računa se prema jednadžbi (6), tj.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\mathrm{o}}} + r_{\mathrm{o}} + r_{\mathrm{c}} + r_{\mathrm{i}} \cdot \frac{A_{\mathrm{o}}}{A_{\mathrm{i}}} + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{i}}} \cdot \frac{A_{\mathrm{o}}}{A_{\mathrm{i}}}}$$

Ukoliko se otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja vanjske, r_{o} i unutarnje, r_{i} stijenke cijevi zanemare jednadžba tada prelazi u sljedeći oblik:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\mathrm{o}}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{i}}} \cdot \frac{A_{\mathrm{o}}}{A_{\mathrm{i}}}}$$

Također, uzevši u obzir jednadžbu za raspoloživu vanjsku površinu cijevi za izmjenu topline, $A_\mathrm{o} = \pi \cdot d_\mathrm{o} \cdot L \cdot N_\mathrm{c}$

te jednadžbu za raspoloživu unutarnju površinu cijevi za izmjenu topline

$A_\mathrm{i} = \pi \cdot d_\mathrm{i} \cdot L \cdot N_\mathrm{c}$

slijedi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\mathrm{o}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{i}} \cdot \frac{d_\mathrm{o}}{d_\mathrm{i}}}$$

Cijevi su bakrene, λ_c = 386,12 W/(m K).

Ukupni koeficijent prijenosa topline iznosi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{374{,}3} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386{,}12} + \frac{1}{902} \cdot \frac{10}{8}} = 246 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE

Potrebna površina za prijenos topline računa se iz jednadžbe (15), tj.:

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

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\mathrm{m,kor}}} = \frac{978\ \mathrm{W}}{246\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \cdot 10{,}2\ \mathrm{K}} = 0{,}389\ \mathrm{m^2}$$

Raspoloživa površina prijenosa topline iznosi:

$$A_\mathrm{o} = \pi \cdot d_\mathrm{o} \cdot L \cdot N_\mathrm{c} = \pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}\mathrm{m} \cdot 0{,}404\ \mathrm{m} \cdot 44 = 0{,}558\ \mathrm{m^2}$$

$A < A_o$ pa cijevni izmjenjivač, tip1-2, navedenih karakteristika zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja od 30 na 25,5 ^oC korištenjem rashladne vode ulazne temperature 17 ^oC (izlazna tempeartura vode $t_2'' = 17,84\ ^oC$).

2.9. PROMJENA TEMPERATURA ULAZNIH I IZLAZNIH FLUIDA

Pri radu tako dimenzioniranog i izvedenog izmjenjivača topline ustanovljeno je da dolazi do promjene temperatura ulaznih i izlaznih fluida, tj.

	Ulazna temperature ulja /^oC	Izlazna temperature ulja /^oC	Ulazna temperature vode /^oC
a)	36,5	31	21
b)	34	28	21

Da li navedeni izmjenjivač topline zadovoljava za novonastale uvjete?

Promjenom temperature ulaznih i izlaznih fluida mijenjaju se njihova fizikalna svojstva koja ulaze u jednadžbe za proračun izmjenjivača topline.

Srednje temperature mineralnog ulja u ovom slučaju iznose:

a) $t_{m,U} = \frac{t'+t''}{2} = \frac{36,5+31}{2} = 33,75\ ^oC$

odnosno

b) $t_{m,U} = \frac{t'+t''}{2} = \frac{34+28}{2} = 31\ ^oC$

Fizikalna svojstva ulja očitavaju se iz tablica[11] nakon izvršene interpolacije unutar temperaturnog intervala između 20 i 40 ^oC. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Fizikalna svojstva mineralnog ulja pri srednjim temperaturama

Fizikalna svojstva mineralnog ulja	$t_{m,U}$ / °C	
	33,75	31
ρ_U / kg/m^3	862	864
$c_{p,U}$ / J/(kg K)	1908	1896
λ_U / W/(m K)	0,143	0,143
ν_U / m^2/s	$10{,}14 \cdot 10^{-6}$	$11{,}11 \cdot 10^{-6}$
μ_U / (N s)/m^2	$8741 \cdot 10^{-6}$	$9599 \cdot 10^{-6}$

Temperatura vode na ulazu u cijevi izmjenjivača iznosi t_{V1} = 21 °C.

Fizikalna svojstva vode uzimaju se sada za poznatu ulaznu temperature 21 °C.

Fizikalne karakteristike vode, nakon izvršene interpolacije, pri 21 °C prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Fizikalna svojstva vode pri temperaturi 21 °C

Fizikalna svojstva vode	$t_{m,V}$ / °C
	21
ρ_V / kg/m^3	997,7
$c_{p,V}$ / J/(kg K)	4182
λ_V / W/(m K)	0,599
ν_V / m^2/s	$0{,}992 \cdot 10^{-6}$
μ_V / (N s)/m^2	$990 \cdot 10^{-6}$

Hladnija struja (rashladna voda) – dotječe u cijevi istom volumnom brzinom, $Q_{v,V} = 1\ \frac{m^3}{h}$.

Toplija struja (mineralno ulje) – dotječe u plašt istom volumnom brzinom, $Q_{v,V} = 8\ \frac{L}{min}$.

a)

Toplinski kapacitet ulja, pri $t_{m,U}$ = 33,75 °C

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

$$C_U = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60} \ \frac{m^3}{s} \cdot 862 \frac{kg}{m^3} \cdot 1908 \frac{J}{kg\ K}$$

$$C_U = 219 \ \frac{J}{s\ K} = 219 \ \frac{W}{K}$$

Maseni protok ulja:

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = 0{,}115 \ \frac{kg}{s}$$

b)

Toplinski kapacitet ulja, pri $t_{m,U}$ = 31 °C

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

$$C_U = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60} \ \frac{m^3}{s} \cdot 864 \frac{kg}{m^3} \cdot 1896 \frac{J}{kg\ K}$$

$$C_U = 218 \ \frac{J}{s\ K} = 218 \ \frac{W}{K}$$

Maseni protok ulja:

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = 0{,}115 \ \frac{kg}{s}$$

Toplinski kapacitet vode, pri t_V = 21 °C

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

$$C_V = \frac{1}{3600} \ \frac{m^3}{s} \cdot 997{,}7 \frac{kg}{m^3} \cdot 4182 \ \frac{J}{kg\ K}$$

$$C_{\mathrm{V}} = 1159\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s\ K}} = 1159\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

Maseni protok vode:

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

Mineralno ulje je slabija struja i nosi oznaku 1, a vodi pripada značenje jače struje i oznaka 2.

Izmijenjeni toplinski tok će biti:

a) $$\phi_{\mathrm{U}} = \dot{Q}_{\mathrm{U}} = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 218\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}} \cdot (36{,}5 - 31)\ \mathrm{K} = \ 1199\ \mathrm{W}$$

b) $$\phi_{\mathrm{U}} = \dot{Q}_{\mathrm{U}} = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 219\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}} \cdot (34 - 28)\ \mathrm{K} = \ 1314\ \mathrm{W}$$

Promjena temperature ulja:

a) $$\Delta t_{\mathrm{U}} = t_1' - t_1'' = 36{,}5 - 31 = \ 5{,}5\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

b) $$\Delta t_{\mathrm{U}} = t_1' - t_1'' = 34 - 28 = \ 6\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Toplina koju daje ulje prima rashladna voda koja struji kroz cijevi izmjenjivača.

a)

$$\phi_{\mathrm{V}} = \dot{Q}_{\mathrm{V}} = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = C_2 \cdot \Delta t_{\mathrm{V}} = \ 1199\ \mathrm{W}$$

b)

$$\phi_{\mathrm{V}} = \dot{Q}_{\mathrm{V}} = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = C_2 \cdot \Delta t_{\mathrm{V}} = \ 1314\ \mathrm{W}$$

Prirast temperature hladne vode će biti:

a)

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{V}}}{C_2} = \frac{1199\ \mathrm{W}}{1159\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}} = 1{,}03\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = (t_2'' - 21) = 1{,}03\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

b)

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{V}}}{C_2} = \frac{1314\ \mathrm{W}}{1159\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}} = 1{,}13\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = (t_2'' - 21) = 1{,}13\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Izlazna temperature vode:

a)

$$t_2'' = \Delta t_{\mathrm{V}} + 21 = 1{,}03 + 21 = 22{,}03\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

b)

$$t_2'' = \Delta t_{\mathrm{V}} + 21 = 1{,}13 + 21 = 22{,}13\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Ulazne i izlazne karakteristike toplog (mineralno ulje) i hladnog (voda) fluida prikazane su u tablici 10.

Tablica 10. Ulazne i izlazne karakteristike toplog (mineralno ulje) i hladnog (voda) fluida

$Q_{v,U}$ L/min	8	
$Q_{m,U}$ kg/s	0,115	
t_1' / °C	36,5	34
t_1'' / °C	31	28
Φ / W	1199	1314
$Q_{v,V}$ m^3/h	1	
$Q_{m,V}$ kg/s	0,277	
t_2' / °C	21	
t_2'' / °C	22,03	22,13
$C_U = C_1$ W/K	219	218
$C_V = C_2$ W/K	1159	

Srednje temperature vode u ovom slučaju iznose:

a) $t_{m,V} = \frac{t'+t''}{2} = \frac{21+22,03}{2} = 21,52\ ^{o}C$

odnosno

b) $t_{m,V} = \frac{t'+t''}{2} = \frac{21+22,13}{2} = 21,57\ ^{o}C$

Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva vode na srednjim temperaturama, nakon izvršene interpolacije, prikazane su u tablici 11.

Tablica 11. Fizikalna svojstva vode pri srednjim temperaturama

Fizikalna svojstva vode	$t_{m,V}$ / °C	
	21,52	21,57
ρ_V / kg/m^3	997,54	997,53
$c_{p,V}$ / J/(kg K)	4182	4182
λ_V / W/(m K)	0,600	0,600
ν_V / m^2/s	$0{,}983 \cdot 10^{-6}$	$0{,}982 \cdot 10^{-6}$
μ_V / (N s)/m^2	$981 \cdot 10^{-6}$	$980 \cdot 10^{-6}$

Za ulazne i izlazne karakteristike toplog (mineralno ulje) i hladnog (voda) fluida, prikazane u tablici 10, te za protusmjerni tok fluida slijedi:

a)

$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 36{,}5 - 22{,}03 = 14{,}47$ K

$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 31 - 21 = 10$ K

$$\Delta T_\mathrm{m} = \frac{14{,}47 - 10}{\ln\left(\frac{14{,}47}{10}\right)} = 12{,}10 \text{ K}$$

$$\mathrm{R} = \frac{T_{\mathrm{t},1} - T_{\mathrm{t},2}}{T_{\mathrm{h},2} - T_{\mathrm{h},1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{36{,}5 - 31}{22{,}03 - 21} = 5{,}34$$

$$\mathrm{P} = \frac{T_{\mathrm{h},2} - T_{\mathrm{h},1}}{T_{t,1} - T_{\mathrm{h},1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{22{,}03 - 21}{36{,}5 - 21} = 0{,}067$$

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5{,}34 \cdot 0{,}067 - 1}{0{,}067 - 1}\right)^{1/1}}{5{,}34 - \left(\frac{5{,}34 \cdot 0{,}067 - 1}{0{,}067 - 1}\right)^{1/1}} = 0{,}066999$$

$$F = \left[\frac{(5{,}34^2 + 1)^{1/2}}{5{,}34 - 1}\right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0{,}066999}{1 - 5{,}34 \cdot 0{,}066999}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0{,}066999}\right) - 1 - 5{,}34 + (5{,}34^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0{,}066999}\right) - 1 - 5{,}34 - (5{,}34^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0{,}993$$

b)

$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 34 - 22{,}13 = 11{,}87$ K

$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 28 - 21 = 7$ K

$$\Delta T_m = \frac{11{,}87 - 7}{\ln\left(\frac{11{,}87}{7}\right)} = 9{,}22 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{34 - 28}{22{,}13 - 21} = 5{,}31$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{22{,}13 - 21}{34 - 21} = 0{,}087$$

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5{,}31 \cdot 0{,}087 - 1}{0{,}087 - 1}\right)^{1/1}}{5{,}31 - \left(\frac{5{,}31 \cdot 0{,}087 - 1}{0{,}087 - 1}\right)^{1/1}} = 0{,}087$$

$$F = \left[\frac{(5{,}31^2+1)^{1/2}}{5{,}31-1}\right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1-0{,}087}{1-5{,}31\cdot 0{,}087}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0{,}087}\right)-1-5{,}31+(5{,}31^2+1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0{,}087}\right)-1-5{,}31-(5{,}31^2+1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0{,}986$$

Ulazne karakteristike mineralnog ulja i vode, srednje logaritamske razlike temperatura, postignute vrijednosti parametara R, P, P_n, faktora korekcije F te korigirane srednje logaritamske temperature fluida $\Delta T_{m,kor}$, prikazane su u tablici 12.

Tablica 12. Ulazne karakteristike mineralnog ulja i vode i dobivene srednje logaritamske razlike temperatura

a)		b)	
mineralno ulje	voda	mineralno ulje	voda
$Q_{v,U}$ = 8 L/min	$Q_{v,V}$ = 1 m^3/ h	$Q_{v,U}$ = 8 L/min	$Q_{v,V}$ = 1 m^3/ h
t_1' = 36,5 °C	t_2' = 21 °C	t_1' = 34 °C	t_2' = 21 °C
t_1'' = 31 °C	t_2'' = 22,03 °C	t_1'' = 28 °C	t_2'' = 22,13 °C
ΔT_m / K			
12,10		9,22	
R			
5,34		5,31	
P			
0,067		0,087	
P_n			
0,067		0,087	
F			
0,993		0,986	
$\Delta T_{m,kor}$ / K			
12,02		9,09	

Proračun α_i

vanjski promjer cijevi d_o = 10 mm,

debljina cijevi, δ = 1 mm,

duljina cijevi, L = 404 mm.

unutarnji promjer cijevi, d_i = 8 mm

poprečna površina presjeka cijevi, $a_c = 50{,}24 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m}^2$

ukupna poprečna površina presjeka cijevi, $A_c = 0{,}00221\ \mathrm{m}^2$

Maseni protok vode u cijevi:

a)

$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V$

$$Q_{\mathrm{m,V}} = \frac{1}{3600}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 997{,}54\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 0{,}277\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

b)

$$Q_{\mathrm{m,V}} = \frac{1}{3600}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 997{,}53\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 0{,}277\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

Masena brzina fluida (voda) u cijevi:

a)

$$q_{\mathrm{m,V}} = \frac{Q_{\mathrm{v,V}} \cdot \mathrm{N_{prolaz}}}{A_c} = \frac{\frac{1}{3600}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 997{,}54\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 2}{0{,}00221\ \mathrm{m}^2} = 251\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m}^2}$$

b)

$$q_{\mathrm{m,V}} = \frac{Q_{\mathrm{v,V}} \cdot \mathrm{N_{prolaz}}}{A_c} = \frac{\frac{1}{3600}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 997{,}53\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 2}{0{,}00221\ \mathrm{m}^2} = 251\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m}^2}$$

Brzina vode u cijevi:

a)

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{251\,\frac{kg}{s\,m^2}}{997{,}54\,\frac{kg}{m^3}} = 0{,}25\,\frac{m}{s}$$

b)

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{251\,\frac{kg}{s\,m^2}}{997{,}53\,\frac{kg}{m^3}} = 0{,}25\,\frac{m}{s}$$

Reynoldsova značajka:

a)

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{251\,\frac{kg}{s\,m^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} m}{981 \cdot 10^{-6}\,\frac{N\,s}{m^2}} = 2047$$

Re < Re,kr

2047 < 2300 laminarno strujanje u cijevima

Za izračunavanje Nusselta koristi se Sieder-Tateova korelacija (16)

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{981 \cdot 10^{-6}\,\frac{N\,s}{m^2} \cdot 4182\,\frac{J}{kg\,K}}{0{,}600\,\frac{W}{m\,K}} = 6{,}84$$

$$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} = 2047 \cdot 6{,}84 = 14001$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_\mathrm{i} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 1{,}86 \cdot \left(14001 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{404 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}\right)^{\frac{1}{3}} = 12{,}13$$

$$\alpha_\mathrm{i} = \frac{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}} \cdot 12{,}13}{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}} = 910\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

b)

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega_c \cdot \mathrm{d_i} \cdot \rho_V}{\mu_\mathrm{V}} = \frac{q_\mathrm{m,V} \cdot \mathrm{d_i}}{\mu_\mathrm{V}} = \frac{251\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{980 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}}} = 2049$$

Re < Re,kr

2049 < 2300 laminarno strujanje u cijevima

Za izračunavanje Nusselta koristi se Sieder-Tateova korelacija (16)

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_\mathrm{i} \cdot d_\mathrm{i}}{\lambda} = 1{,}86 \cdot \left(\mathrm{Pe} \cdot \frac{d_\mathrm{i}}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_\mathrm{s}}\right)^{0{,}14}$$

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_\mathrm{p}}{\lambda} = \frac{980 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 4182\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}}{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 6{,}83$$

$$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} = 2049 \cdot 6{,}83 = 13995$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_\mathrm{i} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 1{,}86 \cdot \left(13995 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{404 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}\right)^{\frac{1}{3}} = 12{,}13$$

$$\alpha_{\mathrm{i}} = \frac{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}} \cdot 12{,}13}{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}} = 910\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

U tablici 13 prikazane su postignute vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline u cijevi, α_{i}, o protočnim karakteristikama vode u cijevima izmjenjivača (2 prolaza fluida kroz cijevi).

Tablica 13. Vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline u cijevi o protočnim karakteristikama fluida (vode) u cijevima

Re	2047	2049
	laminarno područje (Re < 2300)	
$Q_{\mathrm{m,V}}$ kg/s	0,277	
$q_{\mathrm{m,V}}$ kg/(s m^2)	251	
ω_{c} m/s	0,25	
α_{i} W/(m^2 K)	910	

Proračun α_{o}

Korak cijevi, c = 13 mm (raspored cijevi u trokutu)

Vanjski promjer cijevne ploče, d_{cp} = 106,5 mm

Unutarnji promjer plašta, d_{pl} = 107,1 mm

Vanjski promjer cijevi, d_{o} = 10 mm

Ukupan broj cijevi, N_{c} = 44

Broj cijevi u prvom redu, N_1 = 7

Broj cijevi u drugom redu, N_2 = 6

Dužina cijevi, L = 404 mm

Broj pregrada u plaštu $N_{pr} = 6$

Razmak između pregrada u plaštu, $l_{pr} = 67{,}33$ mm

Ekvivalentni promjer cijevi, $d_e = 0{,}008503$ m

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa, $A_s = 0{,}00166\ \mathrm{m}^2$

Maseni protok mineralnogulja u plaštu:

a)

$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U$

$$Q_{m,U} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 862\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 0{,}115\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

b)

$$Q_{m,U} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 864\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 0{,}115\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

Masena brzina fluida u plaštu (mineralno uljea) računa se iz jednadžbe (26):

a)

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{8 \cdot 10^{-3}}{60}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 862\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}}{0{,}00166\ \mathrm{m}^2} = 69{,}24\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m}^2}$$

b)

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{8 \cdot 10^{-3}}{60}\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 864\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}}{0{,}00166\ \mathrm{m}^2} = 69{,}40\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

a)

$$\mathrm{Re} = \frac{q_{\mathrm{m,U}} \cdot \mathrm{d_e}}{\mu_{\mathrm{U}}} = \frac{69{,}24\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}} \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{8741 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}}} = 67{,}35$$

Re < Re,kr

67,35 < 2300 laminarno strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu

Koeficijent prijenosa topline za laminarno strujanje fluida i šahovski raspored cijevi u plaštu računa se iz jednadžbe (28):

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_{\mathrm{o}} \cdot d_{\mathrm{e}}}{\lambda} = 0{,}56 \cdot (\mathrm{Re})^{0{,}50} \cdot (\mathrm{Pr})^{0{,}36} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr_s}}\right)^{0{,}25}$$

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_{\mathrm{p}}}{\lambda} = \frac{8741 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 1908\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}}{0{,}143\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 117$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_{\mathrm{o}} \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{0{,}143\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 0{,}56 \cdot (67{,}35)^{0{,}50} \cdot (117)^{0{,}36} = 25{,}52$$

$$\alpha_{\mathrm{o}} = \frac{0{,}143\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}} \cdot 25{,}52}{0{,}008503\ \mathrm{m}} = 429\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline iznosi:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0{,}6 \cdot 429 \cdot 7 + 0{,}7 \cdot 429 \cdot 6 + 429 \cdot [44 - (7+6)]}{44} = 384{,}2 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

b)

$$\mathrm{Re} = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{69{,}24 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m^2}} \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{9599 \cdot 10^{-6} \frac{\mathrm{N\ s}}{\mathrm{m^2}}} = 61{,}33$$

Re < Re,kr

61,33 < 2300 laminarno strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu

Koeficijent prijenosa topline za laminarno strujanje fluida i šahovski raspored cijevi u plaštu računa se iz jednadžbe (28):

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

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{8741 \cdot 10^{-6} \frac{\mathrm{N\ s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 1896 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}}{0{,}143 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\ K}}} = 116$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_o \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{0{,}143\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\ K}}} = 0{,}56 \cdot (61{,}33)^{0{,}50} \cdot (116)^{0{,}36} = 24{,}28$$

$$\alpha_o = \frac{0{,}143 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\ K}} \cdot 24{,}28}{0{,}008503\ \mathrm{m}} = 408 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline iznosi:

$$\alpha_{\mathrm{o,sr}} = \frac{0{,}6 \cdot 408 \cdot 7 + 0{,}7 \cdot 408 \cdot 6 + 408 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44} = 365{,}3 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

U tablici 14 prikazane su postignute vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline za laminarno strujanje fluida i šahovski raspored cijevi u plaštu, $\alpha_{o,sr}$, o protočnim karakteristikama mineralnog ulja u plaštu izmjenjivača (1 prolaz fluida kroz plašt).

Tablica 14. Vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline za laminarno strujanje fluida i šahovski raspored cijevi u plaštu o protočnim karakteristikama fluida u plaštu

Re	67,35	61,33
	laminarno područje (Re < 2300)	
$Q_{m,U}$ kg/s	0,115	
$q_{m,U}$ kg/(s m^2)	69,24	69,40
Pr	117	116
Nu	25,52	24,28
α_o W/(m^2 K)	429	408
$\alpha_{o,sr}$ W/(m^2 K)	384,2	365,3

Proračun *k*

Cijevi su bakrene, λ_c = 386,12 W/(m K).

Ukupni koeficijent prijenosa topline iznosi:

a)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{384{,}2} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386{,}12} + \frac{1}{910} \cdot \frac{10}{8}} = 251 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

b)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{365{,}3} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386{,}12} + \frac{1}{910} \cdot \frac{10}{8}} = 243 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

Proračun potrebne površine za prijenos topline, *A*

a)

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\mathrm{m,kor}}} = \frac{1199\ \mathrm{W}}{251\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \cdot 12{,}02\ \mathrm{K}} = 0{,}397\ \mathrm{m^2}$$

b)

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\mathrm{m,kor}}} = \frac{1314\ \mathrm{W}}{243\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \cdot 9{,}09\ \mathrm{K}} = 0{,}595\ \mathrm{m^2}$$

Raspoloživa površina prijenosa topline iznosi:

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

Izmjenjivač navedenih karakteristika ne može poslužiti za hlađenje mineralnog ulja sa 34 na 28 °C (slučaj b) uz korištenje rashladne vode ulazne temperature 21 °C (izlazna temperature vode, t_2'' = 22,13 °C), jer je u tom slučaju potrebna površina za prijenos topline veća od raspoložive površine.

U tablici 15 dane su dobivene vrijednosti za protusmjerni izmjenjivač topline cijevni snop u plaštu, tip 1-2.

Tablica 15. Tablične vrijednosti za protusmjerni 1-2 tip cijevnog izmjenjivača (dva prolaza fluida (voda) kroz cijevi i jednim prolazom fluida (mineralno ulje) kroz plašt

$Q_{v,U}$ L/min	8		
$Q_{m,U}$ kg/s	0,115		
		a)	b)
t_1' / °C	30	36,5	34
t_1'' / °C	25,5	31	28
$\alpha_{o,sr}$ W/(m^2 K)	374,3	384,2	365,3
$Q_{v,V}$ m^3/h	1		
$Q_{m,V}$ kg/s	0,277		
t_2' / °C	17	21	21
t_2'' / °C	17,84	22,03	22,13
α_i W/(m^2 K)	902	910	910
k W/(m^2 K)	246	251	243
$\Delta T_{m,kor}$ K	10,2	12,02	9,09
A m^2	0,398	0,397	0,595
A_o m^2	0,558		
L m	0,404		

3. RASPRAVA

Zadatak ovog završnog rada temeljen je na rješavanju problema koji se javlja u tehnološkom procesu proizvodnje portlandskog cementa (slika 1) tijekom izvedbe fizikalne operacije mljevenja sirovine (6-mlin sirovine). Postupak mljevenja sirovine je najvažnija operacija u procesu pripreme iste, a odvija se u odgovarajućem kugličnom mlinu. Uslijed trenja koje se javlja pri radu kugličnog mlina, a također i uslijed promjene radne temperature u pogonu, pogotovo u ljetnom periodu, dolazi do zagrijavanja mineralnog ulja koje podmazuje ležaj. Porastom temperature mineralno ulje postaje rjeđe, tj. dolazi do smanjenja njegove viskoznosti. Stoga je, za pravilan rad mlina, ulje potrebno ohladiti, kako bi zadržalo svoje fizikalne karakteristike. U tu svrhu koriste se odgovarajući izmjenjivači topline. Viskoznost je usko vezana za Re značajku koja određuje ostale faktore proračuna za konstrukciju izmjenjivača topline kojim upravljaju zadane temperature procesa. U ovom radu ispitane su karakteristike industrijskog višecijevnog izmjenjivača topline s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, kako bi se isti mogao primijeniti za hlađenje mineralnog ulja s 30 ^{o}C na 25,5 ^{o}C. Za hlađenje se koristi rashladna voda ulazne temperature 17 ^{o}C i volumnog protoka 1 m^3/h. Izmjenjivač topline je tipa cijevni snop u plaštu s dva prolaza fluida (voda) kroz cijevi i jednim prolazom fluida (mineralno ulje) kroz plašt. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm. Cijevni snop sastoji se od 44 bakrene cijevi (slika 15) vanjskog promjera 10 x 1 mm i duljine 404 mm. Broj pregrada u plaštu je 6. Vanjski promjer plašta iznosi 114,3 x 3,6 mm.

Rezultati ispitivanja ukazuju da je toplinski kapacitet struje ulja, C_U, manji od toplinskog kapaciteta struje vode C_V, tj. $C_U < C_V$, (217 W/K < 1161 W/K) te ulju pripada značenje slabije struje i oznaka 1, a vodi pripada značenje jače struje i oznaka 2.

Maseni protok ulja, $Q_{m,U}$, iznosi 0,155 kg/s, a maseni protok vode, $Q_{m,V}$ iznosi 0,277 kg/s. Izmijenjena toplina u jedinici vremena, tj. toplinski tok u izmjenjivaču može se izračunati iz ohlađivanja ($t_1' - t_1''$) slabije (toplije) struje ili iz zagrijavanja ($t_2'' - t_2'$) jače (hladnije) struje. Iz toplinsko-bilančne jednadžbe za slabiju struju proizlazi da izmijenjeni toplinski tok iznosi 979 W. Toplinu koju daje ulje prima rashladna voda pa je prirast temperature hladne vode, Δt_V = 0,84 ^{o}C, odnosno njena temperatura na izlazu, t_2'', iznosi 17,84 ^{o}C. Poznavajući temperature oba fluida na ulazu i izlazu izračunata je t_m koja odgovara

aritmetičkoj sredini ulazne i izlazne temperature promatrane struje kako bi se navedena temperaturna ovisnost uzela u obzir i odredila fizikalna svojstva fluida pri datim uvjetima. Primijenjeni višecijevni izmjenjivač je protusmjerni te je za iste razlike temperature na ulazu i izlazu iz izmjenjivača (ΔT_1 i ΔT_2) pokretačka sila procesa ΔT_m manja za faktor korekcije F.

Za date uvjete u cijevima se odvija laminarno strujanje (Re < Re,kr; 1812 < 2300) te se za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevi koristi Sieder-Tateova relacija. Koeficijent prijenosa topline u cijevi, α_i, u ovisnosti o protočnim karakteristikama vode u cijevima izmjenjivača (2 prolaza fluida kroz cijevi), iznosi 902 W/(m^2 K).

Za računanje koeficijenta prijenosa topline na strani ulja, tj. u plaštu u obzir se uzima broj cijevi, njihov raspored, broj pregrada i ostale geometrijske karakteristike.

U plaštu se također odvija laminarno strujanje fluida (mineralno ulje) (Re < Re,kr; 55,71 < 2300) preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu s korakom od 13 mm. Koeficijent prijenosa topline α_o iznosi 418 W/(m^2 K) koji važi za treći i iduće redove u snopu cijevi. Razlog tomu je nedovoljno razvijeno strujanje i prijenos topline kod prvog i drugog reda. Stoga treba uzeti u obzir korekcijske faktore za prvi ε_I i drugi ε_{II} red cijevi u šahovskom rasporedu, tj. $\varepsilon_I = 0,6$, a $\varepsilon_{II} = 0,7$ i odrediti srednju vrijednost koeficijenta prijenosa topline, $\alpha_{o,sr}$, za snop od N redova u pravcu strujanja, koji iznosi 374,3 W/(m^2 K). Ukupni koeficijent prijenosa topline ili koeficijent prolaza topline, *k*, iznosi 246 W/(m^2 K). Potrebna površinu za prijenos topline, *A*, računa se iz toplinsko-kinetičke jednadžbe i iznosi 0,389 m^2. Raspoloživa površina za prijenos topline, A_o, iznosi 0,558 m^2. Iz dobivenih rezultata je vidljivo da je $A < A_o$ pa cijevni izmjenjivač, tip 1-2, navedenih karakteristika zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja od 30 na 25,5 ^{o}C korištenjem rashladne vode ulazne temperature 17 ^{o}C (izlazna temperatura vode $t_2'' = 17,84$ ^{o}C).

U drugom dijelu ovog završnog rada trebalo je provjeriti da li navedeni izmjenjivač topline zadovoljava za izmjenu topline između dva fluida (mineralno ulje-rashladna voda) ukoliko dođe do porasta promjene temperature ulaznih i izlaznih fluida. Za slučaj a) $\Delta t_U = 5,5$ ^{o}C; $\Delta t_V = 1,03$ ^{o}C, a za slučaj b) $\Delta t_U = 6$ ^{o}C; $\Delta t_V = 1,13$ ^{o}C. Volumni protoci oba fluida ostaju isti. Porastom promjene temperature ulaznih i izlaznih fluida dolazi do porasta izmijenjenog toplinskog toka na 1199 W (slučaj a) odnosno 1314 W (slučaj b).

Rezultati ispitivanja ukazuju da je u oba slučaja strujanje i u cijevima i u plaštu laminarno (Re < Re,kr).

Uz porast promjene temperature ulja, Δt_U, od 5,5 ^oC, potrebna površina za izmjenu topline (A = 0,397 m^2) je manja u odnosu na raspoloživu (A_o = 0,558 m^2) površinu te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja. Dakle, cijevni izmjenjivač, tip 1-2, navedenih karakteristika može se koristiti za hlađenje mineralnog ulja od 36,5 na 31 ^oC korištenjem rashladne vode ulazne temperature 21 ^oC (izlazna tempeartura vode t_2'' = 22,03 ^oC).

Porastom promjene temperature ulja, Δt_U, iznad 5,5 ^oC, potrebna površina za izmjenu topline raste (A = 0,595 m^2) u odnosu na raspoloživu površinu (A_o = 0,558 m^2) te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika ne zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja. Dakle, cijevni izmjenjivač, tip 1-2, navedenih karakteristika ne može se koristiti za hlađenje mineralnog ulja od 34 na 28 ^oC korištenjem rashladne vode ulazne temperature 21 ^oC (izlazna tempeartura vode t_2'' = 22,13 ^oC).

Za brže izvođenje procesa hlađenja mineralnog ulja pogona mlina, može se djelovati povećanjem kontaktne površine izmjene topline, tj. povećati broj cijevi ili uzeti cijevi hrapavih površina, povećati broj prolaza ili povećati protoke. No povećanje protoka za sobom povlači još izmjenu i mehanizma i učestalost sudara unutar fluida, utječe i na debljinu slojeva unutar fluida, a samim time i kinematiku fluida o kojoj ovisi cijeli proces. Moguće je koristiti i druge rashladne tvari, većeg specifičnog toplinskog kapaciteta, no obično su skupi, a voda je prije svega obnovljivi izvor energije sa uporabljivim i dobrim kemijskim i fizikalnim svojstvima. Moguće je uzeti i cijevi s većom vodljivosti, no opet u takvim slučajevima treba voditi računa o poroznosti materijala, njegovoj ekonomičnosti i vijeku trajanja. Općenito, svakom problemu treba pristupiti sveobuhvatno te su gore navedeni načini poboljšanja prijenosa topline samo neki od njih. U praksi se susreću realni procesi s nizom odstupanja koje treba u što moguće kraćem roku sanirati te proces nastojati izvoditi najbliže po uzoru na idealno ponašanje.

4. ZAKLJUČCI

- Za hlađenje mineralnog ulja volumnog protoka $Q_{v,U}$ = 8 L/min, konačni izbor je izmjenjivač tipa cijevni snop u plaštu s dva prolaza rashladne vode ($Q_{v,V}$ = 1 m^3/h) kroz cijevni snop (t_2' = 17 ^oC; t_2'' = 17,78 ^oC) i jedan prolaz mineralnog ulja kroz plašt (t_1' = 30 ^oC; t_1'' = 25,5 ^oC). U cijevnom snopu ima 44 bakrene cijevi vanjskog promjera d_o = 10 mm, debljine δ = 1 mm. Duljina cijevi je 404 mm i raspored cijevi je u trokutu s korakom 13 mm. U plaštu je šest pregrada.

- Uz jednake volumne protoke hladnog i toplog fluida izmjenjivač navedenih karakteristika zadovoljava za uvjete hladnog fluida (t_2' = 21 ^oC; t_2'' = 22,03 ^oC) i toplog fluida (t_1' = 36,5 ^oC; t_1'' = 31 ^oC). Do porasta promjene temperature ulja, Δt_U, od 5,5 ^oC, potrebna površina za izmjenu topline je manja u odnosu na raspoloživu površinu te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja.

- Uz jednake volumne protoke hladnog i toplog fluida izmjenjivač navedenih karakteristika ne zadovoljava za uvjete hladnog fluida (t_2' = 21 ^oC; t_2'' = 22,13 ^oC) i toplog fluida (t_1' = 34 ^oC; t_1'' = 28 ^oC). Porastom promjene temperature ulja, Δt_U, iznad 5,5 ^oC, potrebna površina za izmjenu topline raste u odnosu na raspoloživu površinu te višecijevni izmjenjivač navedenih karakteristika ne zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja.

5. LITERATURA

1. Z. Osmanović, J. Zelić, Proizvodnja Portland-cementa, Sveučilište u Tuzli, Lukavac, 2011, str. 7.
2. Kuglični mlin za mljevenje portlandskog cementa, http://www.ss-prirodoslovna-tehnicka-st.skole.hr/tehnoloski-procesi-prof-skobalj/ (12.05.2016.)
3. K. H. Decker, Elementi strojeva, III izdanje, Golden marketing, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.
4. A. Galović, Termodinamika II, V izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010, str. 192.-238.
5. F. Bošnjaković, Nauka o toplini, II dio, IV izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
6. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994, str. 149-200.
7. O. Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1994., str. 108.
8. https://hr.wikipedia.org/wiki/Izmjenjiva%C4%8D_topline (11.04.2016.)
9. Procesna oprema, http://www.metacomm-bih.com/procesna-oprema/izmenjivac-toplote.php (13.05.2016.).
10. Shell & Tube Heat Exchanger, http://jakarta.all.biz/shell-tube-heat-exchanger-g2834 (13.05.2016.).
11. 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 m^2)

R – omjer kapacitivnih brzina

Re – Reynoldsova značajka

r_c – otpor prijenosu topline stijenke cijevi, (m^2 K)/W

r_i i r_o – otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja unutarnje i vanjske stijenke cijevi,

(m^2 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, ^oC

t'' – izlazna temperature struje fluida, ^oC.

t_1' – ulazna temperature slabije struje, ^oC

t_1'' – izlazna temperature slabije struje, ^oC

t_2' – ulazna temperature jače struje, ^oC

t_2'' – izlazna temperature jače struje., ^oC

t_m – aritmetička sredina temperature promatrane struje, ^oC

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

7. PRILOG

(proračun u računalnom programu Matchcad 15)

AR 1

ULJE $Qvu := \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60} \ \frac{m^3}{s}$

$t11 := 30 \ oC$

$t12 := 25.5 \ oC$

VODA $Qvv := \frac{1}{3600} = 2.778 \times 10^{-4} \ \frac{m^3}{s}$

$t21 := 17 \ oC$

MALE CIJEVI

$\lambda Cu := 386.12 \ \frac{W}{mK}$

$l := 0.404 \ m$

$\delta c := 0.001 \ m$

PLAŠT

$c := 0.013 \ m$ korak cijevi (šahovski raspored)

$dvpl := 0.1143 \ m$ vanjski promjer plašta

$dpl := (dvpl - 2 \cdot 0.0036) = 0.107 \ m$ unutarnji promjer plašta

FIZIKALNA SVOJSTVA ULJA

$tsr1 := \frac{t11 + t12}{2} = 27.75$

$i := 1..3$

$t_i :=$

20
40
60

$\rho_i :=$

871
858
845

$cp_i :=$

1850
1934
2018

$\lambda u_i :=$

0.144
0.143
0.142

$\upsilon u_i :=$

$15 \cdot 10^{-6}$
$7.93 \cdot 10^{-6}$
$4.94 \cdot 10^{-6}$

$\rho u := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) = 865.962 \ \frac{kg}{m3}$

$cpu := cp_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (cp_1 - cp_2) = 1.883 \times 10^3 \ \frac{J}{kgK}$

$\lambda u := \lambda u_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\lambda u_1 - \lambda u_2) = 0.144 \ \frac{W}{mK}$

$\upsilon u := \upsilon u_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\upsilon u_1 - \upsilon u_2) = 1.226 \times 10^{-5} \ \frac{m^2}{s}$

$\mu u := \upsilon u \cdot \rho u = 0.011 \quad \frac{Ns}{m^2}$

FIZIKALNA SVOJSTVA VODE pri T21

$i := 1..5$

$t_i :=$	$\rho_i :=$	$cp_i :=$	$\lambda v_i :=$	$\upsilon v_i :=$
0	1000	4219	0.555	$1.79\,10^{-6}$
20	998	4182	0.598	$1.01\cdot10^{-6}$
40	992	4178	0.627	$0.658\,10^{-6}$
60	983	4190	0.651	$0.478\,10^{-6}$
80	972	4199	0.669	$0.365\,10^{-6}$

$\rho vt := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - t21}{t_1 - t_2}\right)\cdot(\rho_1 - \rho_2) = 998.3 \ \frac{kg}{m3}$

$cpvt := cp_1 - \left(\frac{t_1 - t21}{t_1 - t_2}\right)\cdot(cp_1 - cp_2) = 4.188\times 10^3 \ \frac{J}{kgK}$

BILANCA TOPLINE

$Qu := Qvu\cdot\rho u\cdot cpu\cdot(t11 - t12) = 978.131\ W$

$Qmu := Qvu\cdot\rho u = 0.115 \ \frac{kg}{s}$

$C1 := Qmu\cdot cpu = 217.362 \ \frac{W}{K}$

$Qv := Qu$

$t22 := \left(\frac{Qv}{Qvv\cdot\rho vt\cdot cpvt}\right) + t21 = 17.842\ oC$

$Qv := Qvv\cdot\rho vt\cdot cpvt\cdot(t22 - t21)$

FIZIKALNA SVOJSTVA VODE pri Tsr2

$tsr2 := \frac{t21 + t22}{2} = 17.421\ oC$

$i := 1..5$

$t_i :=$	$\rho_i :=$	$cp_i :=$	$\lambda v_i :=$	$\upsilon v_i :=$
0	1000	4219	0.555	$1.79\,10^{-6}$
20	998	4182	0.598	$1.01\cdot10^{-6}$
40	992	4178	0.627	$0.658\,10^{-6}$
60	983	4190	0.651	$0.478\,10^{-6}$
80	972	4199	0.669	$0.365\,10^{-6}$

$$\rho v := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\rho_1 - \rho_2\right) = 998.258 \quad \frac{kg}{m3}$$

$$cpv := cp_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(cp_1 - cp_2\right) = 4.187\times 10^{3} \quad \frac{J}{kgK}$$

$$\lambda v := \lambda v_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\lambda v_1 - \lambda v_2\right) = 0.592 \quad \frac{W}{mK}$$

$$\upsilon v := \upsilon v_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\upsilon v_1 - \upsilon v_2\right) = 1.111\times 10^{-6} \quad \frac{m^2}{s}$$

$$\mu v := \upsilon v\cdot\rho v = 1.109\times 10^{-3} \quad \frac{Ns}{m^2}$$

$$Qmv := Qvv\cdot\rho v = 0.277 \quad \frac{kg}{s}$$

$$C2 := Qmv\cdot cpv = 1.161\times 10^{3} \quad \frac{W}{K}$$

SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA VODE Δ Tm

$$\Delta T1 := t11 - t22 = 12.158 \quad K$$

$\Delta T2 := t12 - t21 = 8.5$ K

$$\Delta Tm := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)} = 10.22 \quad K$$

KOREKCIJSKI FAKTOR

$$R := \frac{t11 - t12}{t22 - t21} = 5.342$$

$$P := \frac{t22 - t21}{t11 - t21} = 0.065$$

$n := 1$ broj prolaza kroz plašt

$$Pn := \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{\frac{1}{n}}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{\frac{1}{n}}} = 0.065$$

$$F := \left[\frac{\left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}{R - 1}\right] \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{1 - Pn}{1 - R \cdot Pn}\right)}{\ln\left[\frac{\frac{2}{Pn} - 1 - R + \left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{2}{Pn} - 1 - R - \left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}\right]}\right] = 0.994$$

$\Delta Tmkor := F \cdot \Delta Tm = 10.157$ K

BROJ CIJEVI U CJEVNOM SNOPU

$\pi := 3.14$

$do := 10 \cdot 10^{-3}$ m vanjski promjer cijevi

$di := do - \left(2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}\right) = 8 \times 10^{-3}$ m unutarnji promjer cijevi

$Nc := 44$ broj cijevi

$ac := \left(\frac{di^2 \cdot \pi}{4} \right) = 5.024 \times 10^{-5}$ m^2 poprečna površina presjeka cijevi

$Ac := Nc \cdot ac = 2.211 \times 10^{-3}$ m^2 ukupna površina presjeka cijevi

Koeficijent prijenosa topline (α u)

$Npr := 2$ broj prolaza u cijevi

$qmv := \frac{Qmv \cdot Npr}{Ac} = 250.881$ $\frac{kg}{sm^2}$ masena brzina fluida (vode) u cijevi

$uc := \frac{qmv}{\rho v} = 0.251$ $\frac{m}{s}$ brzina vode u cijevi

$Re := \frac{uc \cdot di \cdot \rho v}{\mu v} = 1.81 \times 10^3$ $Re < Rek(2300)$ laminarno strujanje u cijevima

$Pr := \frac{\mu v \cdot cpv}{\lambda v} = 7.835$

$Pe := Re \cdot Pr = 1.418 \times 10^4$

$\mu := \mu s$ viskozitet fluida pri temp. stijenke

$Nu := 1.86 \left(Pe \cdot \frac{di}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu s} \right)^{0.14} = 12.181$ Sieder-Tateova korelacija (odstupanje +/- 12%)

$\alpha u := \frac{Nu \cdot \lambda v}{di} = 902.074$ $\frac{W}{m^2 K}$ Koeficijent prijenosa topline u unutrašnjosti cijevi (α sa stijenke na vodu)

Koeficijent prijenosa topline (α v)

$$db := do \cdot \left(\frac{Nc}{0.249} \right)^{\frac{1}{2.207}} = 0.104 \ m$$ promjer cijevnog snopa

$$dekv := \frac{1.10}{do} \cdot \left(c^2 - 0.917 \cdot do^2 \right) = 8.503 \times 10^{-3} \ m$$ ekvivalentni promjer cjevi u plaštu za raspored cijevi u trokutu

$Np := 6$ broj pregrada u plaštu

$$lpr := \frac{l}{Np} = 0.067$$

$$As := \frac{dpl \cdot lpr \cdot (c - do)}{c} = 1.664 \times 10^{-3} \ m^2$$ slobodna površina presjeka cjevnog snopa

$$qmu := \frac{Qmu}{As} = 69.381 \ \frac{kg}{sm^2}$$ masena brzina ulja

$$Re := \frac{qmu \cdot dekv}{\mu u} = 55.566$$

$$Pr := \frac{\mu u \cdot cpu}{\lambda u} = 139.174$$

$$Nu := 0.56 \, Re^{0.50} \cdot Pr^{0.36} = 24.676$$

$$\alpha := \frac{Nu \cdot \lambda u}{dekv} = 416.767$$ Koeficijent prijenosa topline sa stijenke cijevi na stranu plašta

$$\alpha v := \frac{0.6 \cdot \alpha \cdot 7 + 0.7 \cdot \alpha \cdot 6 + \alpha \cdot (Nc - 13)}{Nc} = 373.196 \ \frac{W}{m^2 K}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline u praksi (U)

$$U := \frac{1}{\frac{1}{\alpha v} + \frac{\delta c}{\lambda Cu} + \frac{1}{\alpha u}\cdot\frac{do}{di}} = 245.831$$

$$Ao := \frac{Qu}{U\cdot\Delta Tmkor} = 0.392\ m^2$$ Potrebna površina za prijenos topline

$$Aoo := do\cdot\pi\cdot l\cdot Nc = 0.558\ m^2$$ Raspoloživa površina prijenosa topline

AR 2

ULJE $Qvu := \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60} \quad \frac{m^3}{s}$

VODA $Qvv := \frac{1}{3600} = 2.778 \times 10^{-4} \quad \frac{m^3}{s}$

$t11 := 36.5 \quad oC$

$t12 := 31 \quad oC$

$t21 := 21 \quad oC$

MALE CIJEVI

$\lambda Cu := 386.12 \quad \frac{W}{mK}$

$l := 0.404 \quad m$

$\delta c := 0.001 \quad m$

PLAŠT

$c := 0.013 \quad m$ korak cijevi (šahovski raspored)

$dvpl := 0.1143 \quad m$ vanjski promjer plašta

$dpl := (dvpl - 2 \cdot 0.0036) = 0.107 \quad m$ unutarnji promjer plašta

FIZIKALNA SVOJSTVA ULJA

$tsr1 := \frac{t11 + t12}{2} = 33.75$

$i := 1..3$

$t_i :=$

20
40
60

$\rho_i :=$

871
858
845

$cp_i :=$

1850
1934
2018

$\lambda u_i :=$

0.144
0.143
0.142

$\upsilon u_i :=$

$15 \cdot 10^{-6}$
$7.93 \cdot 10^{-6}$
$4.94 \cdot 10^{-6}$

$\rho u := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) = 862.063 \quad \frac{kg}{m3}$

$cpu := cp_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (cp_1 - cp_2) = 1.908 \times 10^3 \quad \frac{J}{kgK}$

$\lambda u := \lambda u_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\lambda u_1 - \lambda u_2) = 0.143 \quad \frac{W}{mK}$

$\upsilon u := \upsilon u_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\upsilon u_1 - \upsilon u_2) = 1.014 \times 10^{-5} \quad \frac{m^2}{s}$

$$\mu u := \upsilon u \cdot \rho u = 8.741 \times 10^{-3} \quad \frac{Ns}{m^2}$$

FIZIKALNA SVOJSTVA VODE pri T21

$i := 1..5$

$t_i :=$	$\rho_i :=$	$cp_i :=$	$\lambda v_i :=$	$\upsilon v_i :=$
0	1000	4219	0.555	$1.79\,10^{-6}$
20	998	4182	0.598	$1.01 \cdot 10^{-6}$
40	992	4178	0.627	$0.658\,10^{-6}$
60	983	4190	0.651	$0.478\,10^{-6}$
80	972	4199	0.669	$0.365\,10^{-6}$

$$\rho vt := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - t21}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) = 997.9 \quad \frac{kg}{m3}$$

$$cpvt := cp_1 - \left(\frac{t_1 - t21}{t_1 - t_2} \right) \cdot (cp_1 - cp_2) = 4.18 \times 10^3 \quad \frac{J}{kgK}$$

BILANCA TOPLINE

$$Qu := Qvu \cdot \rho u \cdot cpu \cdot (t11 - t12) = 1.206 \times 10^3 \quad W$$

$$Qmu := Qvu \cdot \rho u = 0.115 \quad \frac{kg}{s}$$

$$C1 := Qmu \cdot cpu = 219.28 \quad \frac{W}{K}$$

$$Qv := Qu$$

$$t22 := \left(\frac{Qv}{Qvv \cdot \rho vt \cdot cpvt} \right) + t21 = 22.041 \quad oC$$

$$Qv := Qvv \cdot \rho vt \cdot cpvt \cdot (t22 - t21)$$

FIZIKALNA SVOJSTVA VODE pri Tsr2

$$tsr2 := \frac{t21 + t22}{2} = 21.52 \quad oC$$

$i := 1..5$

$t_i :=$	$\rho_i :=$	$cp_i :=$	$\lambda v_i :=$	$\upsilon v_i :=$
0	1000	4219	0.555	$1.79\,10^{-6}$
20	998	4182	0.598	$1.01\cdot10^{-6}$
40	992	4178	0.627	$0.658\,10^{-6}$
60	983	4190	0.651	$0.478\,10^{-6}$
80	972	4199	0.669	$0.365\,10^{-6}$

$$\rho v := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\rho_1 - \rho_2\right) = 997.848 \quad \frac{kg}{m3}$$

$$cpv := cp_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(cp_1 - cp_2\right) = 4.179\times 10^{3} \quad \frac{J}{kgK}$$

$$\lambda v := \lambda v_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\lambda v_1 - \lambda v_2\right) = 0.601 \quad \frac{W}{mK}$$

$$\upsilon v := \upsilon v_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\upsilon v_1 - \upsilon v_2\right) = 9.507\times 10^{-7} \quad \frac{m^2}{s}$$

$$\mu v := \upsilon v\cdot\rho v = 9.487\times 10^{-4} \quad \frac{Ns}{m^2}$$

$$Qmv := Qvv\cdot\rho v = 0.277 \quad \frac{kg}{s}$$

$$C2 := Qmv\cdot cpv = 1.158\times 10^{3} \quad \frac{W}{K}$$

SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA VODE Δ Tm

$$\Delta T1 := t11 - t22 = 14.459 \quad K$$

$\Delta T2 := t12 - t21 = 10$ K

$$\Delta Tm := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)} = 12.093 \quad K$$

KOREKCIJSKI FAKTOR

$$R := \frac{t11 - t12}{t22 - t21} = 5.284$$

$$P := \frac{t22 - t21}{t11 - t21} = 0.067$$

$n := 1$ broj prolaza kroz plaš t

$$Pn := \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{\frac{1}{n}}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{\frac{1}{n}}} = 0.067$$

$$F := \left[\frac{\left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}{R - 1}\right] \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{1 - Pn}{1 - R \cdot Pn}\right)}{\ln\left[\frac{\frac{2}{Pn} - 1 - R + \left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{2}{Pn} - 1 - R - \left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}\right]}\right] = 0.993$$

$\Delta Tmkor := F \cdot \Delta Tm = 12.013$ K

BROJ CIJEVI U CJEVNOM SNOPU

$\pi := 3.14$

$do := 10 \cdot 10^{-3}$ m vanjski promjer cijevi

$di := do - \left(2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}\right) = 8 \times 10^{-3}$ m unutarnji promjer cijevi

$Nc := 44$ broj cijevi

$ac := \left(\frac{di^2 \cdot \pi}{4}\right) = 5.024 \times 10^{-5}$ m^2 poprečna površina presjeka cijevi

$Ac := Nc \cdot ac = 2.211 \times 10^{-3}$ m^2 ukupna površina presjeka cijevi

Koeficijent prijenosa topline (α u)

$Npr := 2$ broj prolaza u cijevi

$qmv := \frac{Qmv \cdot Npr}{Ac} = 250.778$ $\frac{kg}{sm^2}$ masena brzina fluida (vode) u cijevi

$uc := \frac{qmv}{\rho v} = 0.251$ $\frac{m}{s}$ brzina vode u cijevi

$Re := \frac{uc \cdot di \cdot \rho v}{\mu v} = 2.115 \times 10^3$ $Re < Rek(2300)$ laminarno strujanje u cijevima

$Pr := \frac{\mu v \cdot cpv}{\lambda v} = 6.594$

$Pe := Re \cdot Pr = 1.394 \times 10^4$

$\mu := \mu s$ viskozitet fluida pri temp. stijenke

$Nu := 1.86\left(Pe \cdot \frac{di}{l}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu s}\right)^{0.14} = 12.112$ Sieder-Tateova korelacija (odstupanje +/- 12 %)

$\alpha u := \frac{Nu \cdot \lambda v}{di} = 910.323$ $\frac{W}{m^2 K}$ Koeficijent prijenosa topline u unutraš njosti cijevi (α sa stijenke na vodu)

Koeficijent prijenosa topline (α v)

$$db := do \cdot \left(\frac{Nc}{0.249} \right)^{\frac{1}{2.207}} = 0.104 \quad m$$ promjer cijevnog snopa

$$dekv := \frac{1.10}{do} \cdot \left(c^2 - 0.917 do^2 \right) = 8.503 \times 10^{-3} \quad m$$ ekvivalentni promjer cijevi u plaštu za raspored cijevi u trokutu

$Np := 6$ broj pregrada u plaštu

$$lpr := \frac{l}{Np} = 0.067$$

$$As := \frac{dpl \cdot lpr \cdot (c - do)}{c} = 1.664 \times 10^{-3} \quad m^2$$ slobodna površina presjeka cijevnog snopa

$$qmu := \frac{Qmu}{As} = 69.068 \quad \frac{kg}{sm^2}$$ masena brzina ulja

$$Re := \frac{qmu \cdot dekv}{\mu u} = 67.19$$

$$Pr := \frac{\mu u \cdot cpu}{\lambda u} = 116.356$$

$$Nu := 0.56 \, Re^{0.50} \cdot Pr^{0.36} = 25.44$$

$$\alpha := \frac{Nu \cdot \lambda u}{dekv} = 428.78$$ Koeficijent prijenosa topline sa stijenke cijevi na stranu plašta

$$\alpha v := \frac{0.6 \cdot \alpha \cdot 7 + 0.7 \cdot \alpha \cdot 6 + \alpha \cdot (Nc - 13)}{Nc} = 383.953 \quad \frac{W}{m^2 K}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline u praksi (U)

$$U := \frac{1}{\frac{1}{\alpha v} + \frac{\delta c}{\lambda Cu} + \frac{1}{\alpha u}\cdot\frac{do}{di}} = 251.243$$

$$Ao := \frac{Qu}{U\cdot\Delta Tmkor} = 0.4 \ m^2$$ Potrebna površina za prijenos topline

$$Aoo := do\cdot\pi\cdot l\cdot Nc = 0.558 \ m^2$$ Raspoloživa površina prijenosa topline

AR 3

ULJE $Qvu := \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60} \quad \frac{m^3}{s}$ VODA $Qvv := \frac{1}{3600} = 2.778 \times 10^{-4} \quad \frac{m^3}{s}$

$t11 := 34 \quad oC$

$t12 := 28 \quad oC$

$t21 := 21 \quad oC$

MALE CIJEVI

$\lambda Cu := 386.12 \quad \frac{W}{mK}$

$l := 0.404 \quad m$

$\delta c := 0.001 \quad m$

PLAŠT

$c := 0.013 \quad m$ korak cijevi (šahovski raspored)

$dvpl := 0.1143 \quad m$ vanjski promjer plašta

$dpl := (dvpl - 2 \cdot 0.0036) = 0.107 \quad m$ unutarnji promjer plašta

FIZIKALNA SVOJSTVA ULJA

$tsr1 := \frac{t11 + t12}{2} = 31$

$i := 1..3$

$t_i :=$

20
40
60

$\rho_i :=$

871
858
845

$cp_i :=$

1850
1934
2018

$\lambda u_i :=$

0.144
0.143
0.142

$\upsilon u_i :=$

$15 \cdot 10^{-6}$
$7.93 \cdot 10^{-6}$
$4.94 \cdot 10^{-6}$

$\rho u := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) = 863.85 \quad \frac{kg}{m3}$

$cpu := cp_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (cp_1 - cp_2) = 1.896 \times 10^3 \quad \frac{J}{kgK}$

$\lambda u := \lambda u_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\lambda u_1 - \lambda u_2) = 0.143 \quad \frac{W}{mK}$

$\upsilon u := \upsilon u_1 - \left(\frac{t_1 - tsr1}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\upsilon u_1 - \upsilon u_2) = 1.111 \times 10^{-5} \quad \frac{m^2}{s}$

$$\mu u := \upsilon u \cdot \rho u = 9.599 \times 10^{-3} \quad \frac{Ns}{m^2}$$

FIZIKALNA SVOJSTVA VODE pri T21

$i := 1..5$

$t_i :=$	$\rho_i :=$	$cp_i :=$	$\lambda v_i :=$	$\upsilon v_i :=$
0	1000	4219	0.555	$1.79\,10^{-6}$
20	998	4182	0.598	$1.01 \cdot 10^{-6}$
40	992	4178	0.627	$0.658\,10^{-6}$
60	983	4190	0.651	$0.478\,10^{-6}$
80	972	4199	0.669	$0.365\,10^{-6}$

$$\rho vt := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - t21}{t_1 - t_2} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) = 997.9 \quad \frac{kg}{m3}$$

$$cpvt := cp_1 - \left(\frac{t_1 - t21}{t_1 - t_2} \right) \cdot (cp_1 - cp_2) = 4.18 \times 10^3 \quad \frac{J}{kgK}$$

BILANCA TOPLINE

$$Qu := Qvu \cdot \rho u \cdot cpu \cdot (t11 - t12) = 1.31 \times 10^3 \quad W$$

$$Qmu := Qvu \cdot \rho u = 0.115 \quad \frac{kg}{s}$$

$$C1 := Qmu \cdot cpu = 218.404 \quad \frac{W}{K}$$

$$Qv := Qu$$

$$t22 := \left(\frac{Qv}{Qvv \cdot \rho vt \cdot cpvt} \right) + t21 = 22.131 \quad oC$$

$$Qv := Qvv \cdot \rho vt \cdot cpvt \cdot (t22 - t21)$$

FIZIKALNA SVOJSTVA VODE pri Tsr2

$$tsr2 := \frac{t21 + t22}{2} = 21.565 \quad oC$$

$i := 1..5$

$t_i :=$	$\rho_i :=$	$cp_i :=$	$\lambda v_i :=$	$\upsilon v_i :=$
0	1000	4219	0.555	$1.79\,10^{-6}$
20	998	4182	0.598	$1.01\cdot10^{-6}$
40	992	4178	0.627	$0.658\,10^{-6}$
60	983	4190	0.651	$0.478\,10^{-6}$
80	972	4199	0.669	$0.365\,10^{-6}$

$$\rho v := \rho_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\rho_1 - \rho_2\right) = 997.843 \quad \frac{kg}{m3}$$

$$cpv := cp_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(cp_1 - cp_2\right) = 4.179\times 10^{3} \quad \frac{J}{kgK}$$

$$\lambda v := \lambda v_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\lambda v_1 - \lambda v_2\right) = 0.601 \quad \frac{W}{mK}$$

$$\upsilon v := \upsilon v_1 - \left(\frac{t_1 - tsr2}{t_1 - t_2}\right)\cdot\left(\upsilon v_1 - \upsilon v_2\right) = 9.489\times 10^{-7} \quad \frac{m^2}{s}$$

$$\mu v := \upsilon v\cdot\rho v = 9.469\times 10^{-4} \quad \frac{Ns}{m^2}$$

$$Qmv := Qvv\cdot\rho v = 0.277 \quad \frac{kg}{s}$$

$$C2 := Qmv\cdot cpv = 1.158\times 10^{3} \quad \frac{W}{K}$$

SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA VODE Δ Tm

$$\Delta T1 := t11 - t22 = 11.869 \quad K$$

$\Delta T2 := t12 - t21 = 7$ K

$$\Delta Tm := \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)} = 9.221 \quad K$$

KOREKCIJSKI FAKTOR

$$R := \frac{t11 - t12}{t22 - t21} = 5.305$$

$$P := \frac{t22 - t21}{t11 - t21} = 0.087$$

$n := 1$ broj prolaza kroz plašt

$$Pn := \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{\frac{1}{n}}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{\frac{1}{n}}} = 0.087$$

$$F := \left[\frac{\left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}{R - 1}\right] \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{1 - Pn}{1 - R \cdot Pn}\right)}{\ln\left[\frac{\frac{2}{Pn} - 1 - R + \left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{2}{Pn} - 1 - R - \left(R^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}}\right]}\right] = 0.986$$

$\Delta Tmkor := F \cdot \Delta Tm = 9.096$ K

BROJ CIJEVI U CJEVNOM SNOPU

$\pi := 3.14$

$do := 10 \cdot 10^{-3}$ m vanjski promjer cijevi

$di := do - \left(2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}\right) = 8 \times 10^{-3}$ m unutarnji promjer cijevi

$Nc := 44$ broj cijevi

$ac := \left(\frac{di^2 \cdot \pi}{4} \right) = 5.024 \times 10^{-5}$ m^2 poprečna površina presjeka cijevi

$Ac := Nc \cdot ac = 2.211 \times 10^{-3}$ m^2 ukupna površina presjeka cijevi

Koeficijent prijenosa topline (α u)

$Npr := 2$ broj prolaza u cijevi

$qmv := \frac{Qmv \cdot Npr}{Ac} = 250.777$ $\frac{kg}{sm^2}$ masena brzina fluida (vode) u cijevi

$uc := \frac{qmv}{\rho v} = 0.251$ $\frac{m}{s}$ brzina vode u cijevi

$Re := \frac{uc \cdot di \cdot \rho v}{\mu v} = 2.119 \times 10^3$ $Re < Rek(2300)$ laminarno strujanje u cijevima

$Pr := \frac{\mu v \cdot cpv}{\lambda v} = 6.58$

$Pe := Re \cdot Pr = 1.394 \times 10^4$

$\mu := \mu s$ viskozitet fluida pri temp. stjenke

$Nu := 1.86 \left(Pe \cdot \frac{di}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu s} \right)^{0.14} = 12.111$ Sieder-Tateova korelacija (odstupanje +/- 12 %)

$\alpha u := \frac{Nu \cdot \lambda v}{di} = 910.413$ $\frac{W}{m^2 K}$ Koeficijent prijenosa topline u unutrašnjosti cijevi (α sa stijenke na vodu)

Koeficijent prijenosa topline (α v)

$$db := do \cdot \left(\frac{Nc}{0.249} \right)^{\frac{1}{2.207}} = 0.104 \quad m$$ promjer cijevnog snopa

$$dekv := \frac{1.10}{do} \cdot \left(c^2 - 0.917 \cdot do^2 \right) = 8.503 \times 10^{-3} \quad m$$ ekvivalentni promjer cijevi u plaštu za raspored cijevi u trokutu

$Np := 6$ broj pregrada u plaštu

$$lpr := \frac{l}{Np} = 0.067$$

$$As := \frac{dpl \cdot lpr \cdot (c - do)}{c} = 1.664 \times 10^{-3} \quad m^2$$ slobodna površina presjeka cijevnog snopa

$$qmu := \frac{Qmu}{As} = 69.212 \quad \frac{kg}{sm^2}$$ masena brzina ulja

$$Re := \frac{qmu \cdot dekv}{\mu u} = 61.311$$

$$Pr := \frac{\mu u \cdot cpu}{\lambda u} = 126.88$$

$$Nu := 0.56 \, Re^{0.50} \cdot Pr^{0.36} = 25.072$$

$$\alpha := \frac{Nu \cdot \lambda u}{dekv} = 422.969$$ Koeficijent prijenosa topline sa stijenke cijevi na stranu plašta

$$\alpha v := \frac{0.6 \cdot \alpha \cdot 7 + 0.7 \cdot \alpha \cdot 6 + \alpha \cdot (Nc - 13)}{Nc} = 378.75 \quad \frac{W}{m^2 K}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline u praksi (U)

$$U := \frac{1}{\frac{1}{\alpha v} + \frac{\delta c}{\lambda Cu} + \frac{1}{\alpha u}\cdot\frac{do}{di}} = 249.013$$

$$Ao := \frac{Qu}{U\cdot\Delta Tmkor} = 0.579 \ m^2$$ Potrebna površina za prijenos topline

$$Aoo := do\cdot\pi\cdot l\cdot Nc = 0.558 \ m^2$$ Raspoloživa površina prijenosa topline