Izmjenjivač topline cijevni snop u plaštu, tip 1-2

Drakulić, Slavica

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:167:967506

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-20**

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

IZMJENJIVAČ TOPLINE CIJEVNI SNOP U PLAŠTU, TIP 1-2

ZAVRŠNI RAD

SLAVICA DRAKULIĆ

Mat. br. 1439

Split, rujan 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
STRUČNI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: KEMIJSKA TEHNOLOGIJA I MATERIJALI

IZMJENJIVAČ TOPLINE CIJEVNI SNOP U PLAŠTU, TIP 1-2

ZAVRŠNI RAD

SLAVICA DRAKULIĆ

Mat. br. 1439

Split, rujan 2016.

UNIVERSITY OF SPLIT

FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY

PROFESSIONAL STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

STUDY ORIENTATION: CHEMICAL TECHNOLOGY AND MATERIALS

SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER, 2-PASS TUBE SIDE

BACHELOR THESIS

SLAVICA DRAKULIĆ

Parent number: 1439

Split, September 2016.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Stručni studij kemijske 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

IZMJENJIVAČ TOPLINE CIJEVNI SNOP U PLAŠTU, TIP 1-2

Slavica Drakulić, broj indeksa 1439

Sažetak:
Završni rad predstavlja proračun višecijevnog izmjenjivača s učvršćenim snopom cijevi u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi kugličnog mlina sirovine u tehnološkom procesu proizvodnje Portland-cementa.
Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskog višecijevnog izmjenjivača topline kako bi se isti mogao primijeniti za hlađenje mineralnog ulja od 33 ^{o}C na 26,5 ^{o}C, koje dostrujava volumnim protokom 8 L/min u prostor plašta. Kroz cijevni snop u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature 21 ^{o}C. Rezultati proračuna ukazuju da je raspoloživa površina prijenosa topline veća od potrebne i zadovoljava za postavljene uvjete. Povećanjem protoka rashladne vode dolazi do povećanja masene brzine vode u cijevima i prelaska iz laminarnog u prijelazno područje strujanja ($2300 < Re < 10\,000$). Time se povećava ukupni koeficijent prijelaza topline i smanjuje potrebna površina izmjenjivača za prijenos iste količine topline.

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

Rad sadrži: 56 stranica, 21 slika, 8 tablica, 18 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Izv. prof. dr. sc. Miroslav Labor – predsjednik
2. Renato Stipišić, viši predavač – član
3. Prof. dr. sc. Vanja Martinac – član-mentor

Datum obrane: 29. rujna 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
Professional 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, Ph D

SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER, 2-PASS TUBE SIDE

Slavica Drakulić, index number 1439

Abstract:
Final thesis presents the budget of the the industrial shell and tube heat exchanger with fixed tube bundles, 2-pass tube side, for cooling of mineral oil that lubricated plain bearings ball-mill raw material in the production of Portland cement.
The aim of this final thesis is to examine the characteristics of industrial shell and tube heat exchanger so that they could apply for the cooling of mineral oil from 33 °C to 26.5 °C, which flows inside the shell and around the tube with volume flow of 8 L/min. Through the tube bundle, in two passes, streaming cooling water inlet temperature 21 °C. The results of examination indicate that the available surface area of heat transfer is greater than required and meets the set requirements. By increasing the flow of cooling water is coming to an increase in the tube-side mass flow rate of water and the transition from laminar flow in the transitional area ($2300 < Re < 10\,000$).
This increases the overall heat transfer coefficient and reduces the required surface heat exchanger to transfer the same amount of heat.

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

Thesis contains: 56 pages, 21 figures, 8 tables, 18 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Miroslav Labor, PhD, associate prof. – chair person
2. Renato Stipišić, senior lecturer– member
3. Vanja Martinac, PhD, full prof. – supervisor

Defence date: September 29, 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 pruženoj pomoći pri izradi ovog završnog rada.

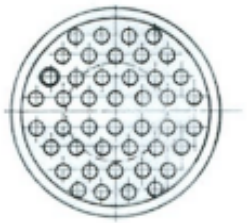
ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Protusmjerni izmjenjivač topline, tipa 1-2, izveden je kao bubanj unutarnjeg promjera 107 mm, unutar kojeg je smješten cijevni snop od 44 cijevi vanjskog promjera 10 x 1 mm i duljine 544 mm. U prostor oko cijevi dostrujava 8 L/min ulja kojeg je potrebno ohladiti od 33 ^{o}C na 26,5 ^{o}C.

Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature 21 ^{o}C. Volumni protok rashladne vode iznosi:

a) 1 m^3/h,
b) 1,5 m^3/h,
c) 2 m^3/h.

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



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

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

SAŽETAK

Završni rad predstavlja proračun višecijevnog izmjenjivača s učvršćenim snopom cijevi u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi kugličnog mlina sirovine u tehnološkom procesu proizvodnje Portland-cementa.

Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskog višecijevnog izmjenjivača topline kako bi se isti mogao primijeniti za hlađenje mineralnog ulja od 33 ^{o}C na 26,5 ^{o}C, koje dostrujava volumnim protokom 8 L/min u prostor plašta. Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature 21 ^{o}C. Rezultati proračuna ukazuju da je raspoloživa površina prijenosa topline veća od potrebne i zadovoljava za postavljene uvjete. Povećanjem protoka rashladne vode dolazi do povećanja masene brzine vode u cijevima i prelaska iz laminarnog u prijelazno područje strujanja ($2300 < Re < 10\ 000$). Time se povećava ukupni koeficijent prijelaza topline i smanjuje potrebna površina izmjenjivača za prijenos iste količine topline.

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

SUMMARY

Final thesis presents the budget of the the industrial shell and tube heat exchanger with fixed tube bundles, 2-pass tube side, for cooling of mineral oil that lubricated plain bearings ball-mill raw material in the production of Portland cement.

The aim of this final thesis is to examine the characteristics of industrial shell and tube heat exchanger so that they could apply for the cooling of mineral oil from 33 °C to 26.5 °C, which flows inside the shell and around the tube with volume flow of 8 L/min. Through the tube bundle, in two passes, streaming cooling water inlet temperature 21 °C. The results of examination indicate that the available surface area of heat transfer is greater than required and meets the set requirements. By increasing the flow of cooling water is coming to an increase in the tube-side mass flow rate of water and the transition from laminar flow in the transitional area ($2300 < Re < 10\ 000$).

This increases the overall heat transfer coefficient and reduces the required surface heat exchanger to transfer the same amount of heat.

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

SADRŽAJ

UVOD …… 1
1. OPĆI DIO ……...…….…. 2
1.1. KUGLIČNI MLIN …….……. 2
1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE ...……..……. 4
1.3. IZMJENJIVAČI TOPLINE S CIJEVNIM SNOPOM I PLAŠTEM …….…... 9
1.4. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE ……..... 14
1.4.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE ..…… 14
1.4.2. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE ……..…… 20
1.4.3. KOEFICIJENT PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKU U CIJEVI ……... 21
1.4.4. KOEFICIJENT PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKU CIJEVI SA STRANE PLAŠTA …….….. 23
2. EKSPERIMENTALNI DIO ……. 26
2.1. INDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA …….. 26
2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE …… 30
2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA …… 33
2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F ……..…. 34
2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI ……. 36
2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU …….…….. 41
2.7. PRORAČUN UKUPNOG KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE …….……..…. 44
2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE ….…… 45
3. RASPRAVA ……..…… 48
4. ZAKLJUČCI …….…….…..…… 51
5. LITERATURA ……..……. 52
6. POPIS SIMBOLA ……..……... 54

UVOD

Prijenos topline je pojava koja se javlja u većini uređaja kemijske procesne industrije. Uređaji koji se u tu svrhu koriste trebaju biti izvedeni uz što veću uštedu materijala, tj. da budu što je moguće manjih dimenzija. Za dimenzioniranje toplinskih uređaja u prvom redu je bitna brzina prijelaza topline.

Izmjena topline između tijela različite temperature vrši se provođenjem i konvekcijom što je vezano za tvar kao posrednika te izmjena topline toplinskim zračenjem što nije vezano za tvar. Prijenos topline zračenjem odvija se u obliku toplinskih zraka koje se prenose u obliku elektromagnetskih valova. Naime, svako tijelo zadane temperature zrači toplinu, koja se u obliku elektromagnetskih valova širi do drugog tijela.

Kad se toplina prostire tako da se ona s jednog fluida prenosi na neku pregradnu stijenku, zatim se provodi kroz stijenku i konačno s druge strane stijenke prenosi na neki drugi fluid, tada se takva kombinacija naziva prolaz topline. Ti primjeri su vrlo česti u toplinskim uređajima koje nazivamo izmjenjivačima topline.

U inženjerskoj praksi prostiranje topline nekad treba ubrzati, a nekad onemogućiti. Zadatak inženjera je da udovolji takvim zahtjevima, a to je moguće samo uz dobro poznavanje svih oblika i zakona prostiranja topline.

Zadatak ovog završnog rada temeljen je na rješavanju problema zagrijavanja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi kugličnog mlina sirovine u tehnološkom procesu proizvodnje Portland-cementa.

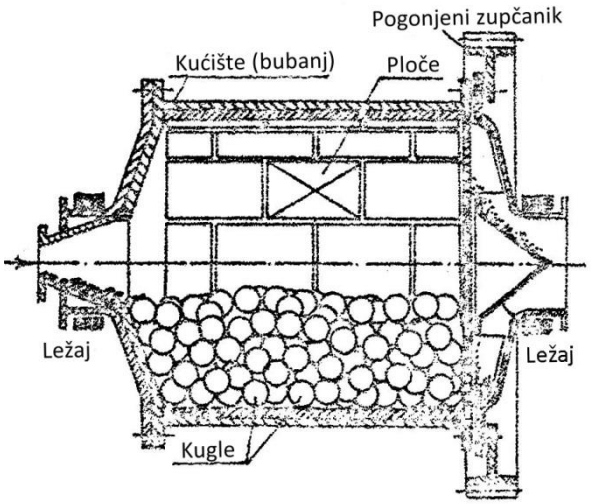
Cilj ovog rada je ispitati karakteristike industrijskog višecijevnog izmjenjivača topline u svrhu hlađenja mineralnog ulja za podmazivanje kliznih ležajeva kugličnog mlina.

1. OPĆI DIO

1.1. KUGLIČNI MLIN

Kuglični mlinovi koriste se u različitim tehnološkim procesima u svrhu pripreme sirovine. Naime, nakon izbora polazne sirovine prva tehnološka operacija je usitnjavanje kako bi se dobile čestice odgovarajućih veličina pogodne za daljnu obradu. Usitnjavanje je proces koji se koristi za promjenu veličine i oblika čestica, fizikalnih i mehaničkih svojstava praškastog materijala, kao i homogenizaciju dva ili više materijala. Glavni ciljevi postupka kugličnog mljevenja su smanjenje veličine čestica praha i homogenizacija mješavine prahova u čvrstom stanju. Kuglični mlin može se definirati kao valjkasta komora koja rotira horizontalno oko svoje osi i pritom je djelomično ispunjen sirovinom i kuglicama za mljevenje.[1]

Shematski prikaz[2] kugličnog mlina prikazan je na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz kugličnog mlina[2]

Na slici 2 prikazan je kuglični mlin za mljevenje sirovinskog materijala za dobivanje portlandskog cementa[3], a na slici 3 kuglični mlin u fazi remonta.[4]

Slika 2. Kuglični mlin za mljevenje sirovinskog materijala[3]

Slika 3. Kuglični mlin za mljevenje sirovinskog materijala na remontu[4]

Radi olakšavanja klizanja površina nalijeganja te radi smanjivanja i sprječavanja trošenja upotrebljavaju se maziva.[5] Najvažnija maziva za ležaje su ulja. Najčešće se daje

prednost jeftinim mineralnim uljima u odnosu na sintetička ulja. Podmazivanje uljem 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.[5]

U procesu okretanja mlina dolazi do trenja na dodirnim djelovima uređaja (kliznim ležajevima) koje uzrokuje zagrijavanje ulja.

Sva tekuća maziva postaju s porastom temperature rjeđa, što znači da im se viskoznost smanjuje.

Stoga je potrebno ulje ohladiti, a u tu svrhu koriste se odgovarajući izmjenjivači topline.

1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline[6-10] su uređaji u kojima se toplinska energija izmjenjuje između dva fluida. Imaju vrlo široku primjenu u postrojenjima centralnog grijanja, postrojenjima za pripremu potrošne tople vode (bojleri, radijatori, kaloriferi) te kod postrojenja koja se primjenjuju u rashladnoj tehnici. Također, svoju veliku primjenu imaju kod termoenergetskih postrojenja i nuklearnih reaktora, zatim u kemijskoj i prehrambenoj industriji kao isparivači, kondenzatori, kristalizatori, sušionice i dr.

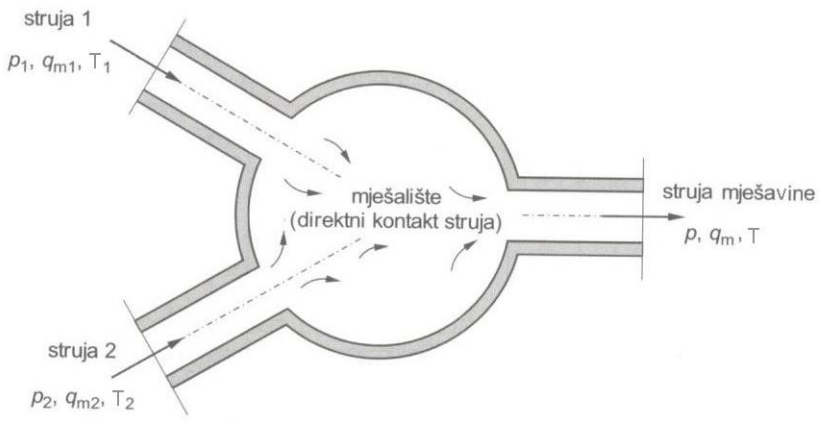
Podjela izmjenjivača topline vrši se prema:

- načinu izmjene topline i
- načinu protjecanja fluida kroz izmjenjivač.

Prema načinu izmjene topline, ovisno o postojanju i/ili ne postojanju razdijeljne stijenke između toplije i hladnije struje izmjenjivači se mogu podijeliti na:

- izmjenjivače topline s izravnim (direktnim) kontaktom fluida
- izmjenjivače topline s indirektnim kontaktom fluida

Kod izmjenjivača topline[6] s izravnim kontaktom fluida (slika 4) izmjena topline između struja fluida odvija se direktnim kontaktom fluida u mješalištu.



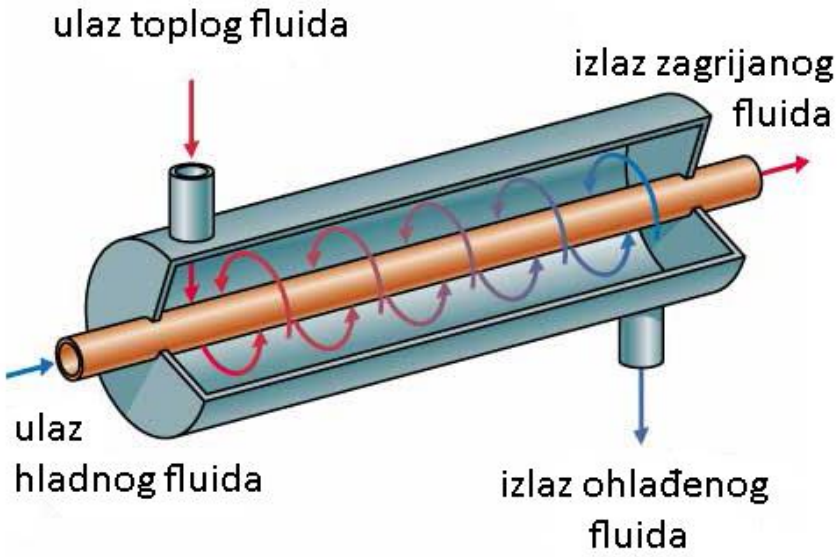
Slika 4. Izravni izmjenjivač topline[6]

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. direktnim miješanjem vode i vodene pare može se sniziti pregrijanje ili postići kondenzacija pare. Kada su uređaji s izravnim kontaktom fluida namijenjeni hlađenju jednog od fluida nazivaju se rashladnim tornjevima (npr. hlađenje povratne rashladne (tople) vode hladnim zrakom u termoelektranama, slika 5).

Slika 5. Rashladni tornjevi termoelektrana[11]

Izmjenjivači topline kod kojih su struje (fluidi) međusobno razdvojeni čvrstom stjenkom nazivaju se rekuperativnim izmjenjivačima ili, kraće, rekuperatorima.

Razdijelna stijenka je rashladna, odnosno ogrjevna površina, koja može biti cijevnog ili pločastog oblika. Razdijelna stijenka ne dopušta međusobni izravni dodir fluida.
Prema svojoj konstrukciji rekuperatori mogu biti cijevni (od kojih su najvažniji uređaji sa cijevnim snopom i omotačem), pločasti i sa istaknutim (orebrenim) površinama. Rekuperativni izmjenjivač topline s jednim prolazom fluida[12] prikazan je na slici 6.

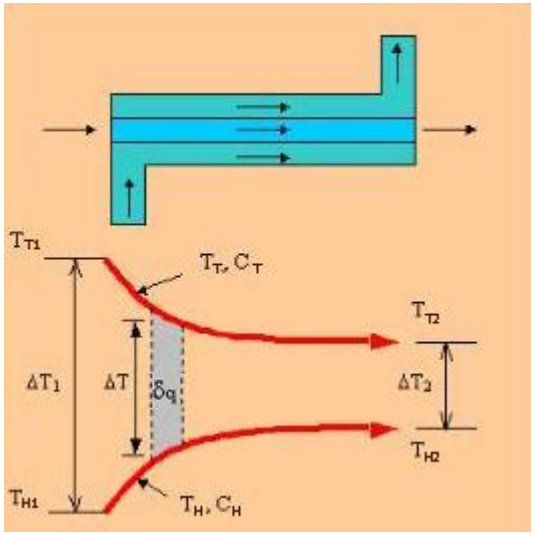


Slika 6. Rekuperativni izmjenjivač topline s jednim prolazom fluida[12]

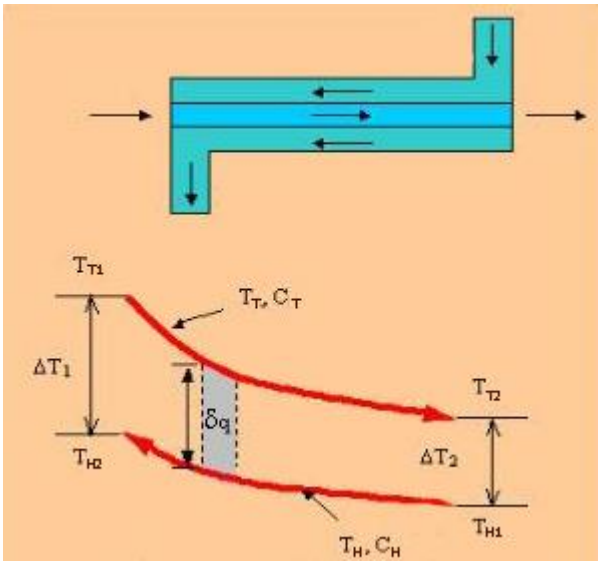
Kod ovih izmjenjivača topline svaki fluid protječe kroz uređaj samo u jednom prolazu. Pri tome su mogući sljedeći tokovi fluida:

- istosmjerni
- protusmjerni i
- unakrsni tok.

U praksi je kod velikog broja rekuperatora agregatno stanje fluida na ulazu i izlazu iz uređaja isto. Uslijed toga, pri izmjeni topline, temperatura toplijeg fluida opada, a hladnijeg raste. Na slikama 7 i 8 prikazane su šematski aksijalne (po dužini uređaja) raspodjele temperatura jednofaznih fluida u rekuperatorima s jednim prolazom fluida istosmjernog i protusmjernog toka.



Slika 7. Šematski prikaz istosmjernog izmjenjivača topline i temperaturni pad duž izmjenjivača[12]

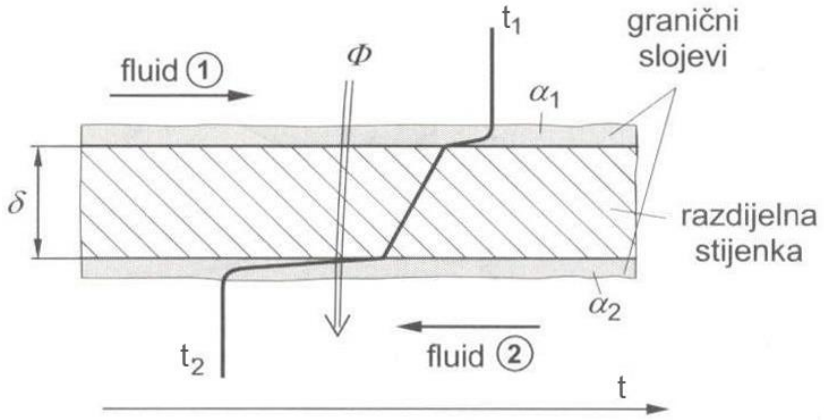


Slika 8. Šematski prikaz protusmjernog izmjenjivača topline i temperaturni pad duž izmjenjivača[12]

Izmjena topline između toplijeg i hladnijeg fluida, u izmjenjivaču topline, ostvaruje se prolazom topline, koje uključuje:

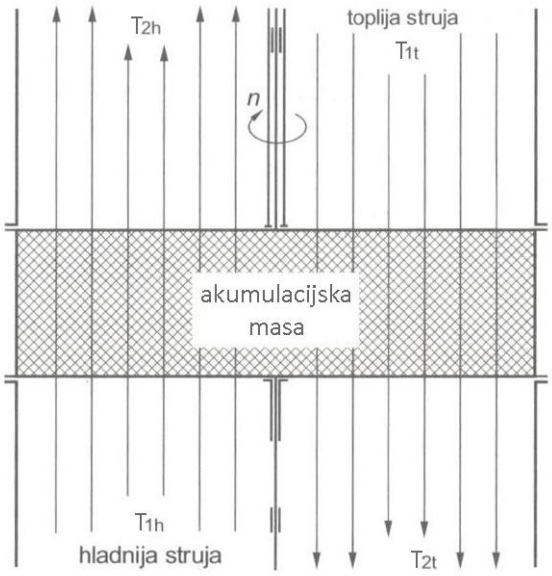
- prijelaz topline s toplijeg fluida na stijenku,
- provođenje topline kroz stijenku te
- prijelaz topline sa stijenke na hladniji fluid.

Prolaz topline kroz razdijelnu stijenku rekuperatora[6] prikazan je na slici 9.



Slika 9. Prolaz topline kroz razdijelnu stijenku rekuperatora[6]

Osim rekuperativnih izmjenjivača topline postoje i tzv. regenerativni izmjenjivači ili regeneratori (slika 10). Kod regeneratora se dva fluida, koja izmjenjuju topline, kreću stacionarno ali naizmjenično preko površine za izmjenu topline (akumulacijska masa). Toplina se pri strujanju toplijeg fluida prenosi na akumulacijsku masu, koja polagano rotira na vertikalnoj osovini, i tu se akumulira.



Slika 10. Regenerativni izmjenjivač topline[6]

S druge strane tako zagrijane mase struji hladniji fluid koji preuzima na sebe ovu akumuliranu topline i pri tome se zagrijava. Po svojoj konstrukciji[10] regeneratori mogu biti s rotirajućom matricom (npr. rotacijski regenerator plinske turbine) i nepokretnom matricom (npr. zračni predgrijač za visoke peći ili peći za taljenje stakla).

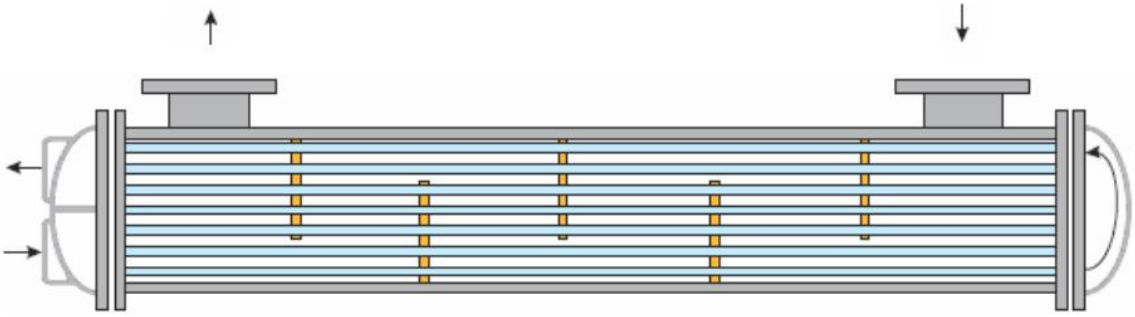
1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE S CIJEVNIM SNOPOM I PLAŠTEM

Izmjenjivač topline s cijevnim snopom i plaštem[6,10] sastoji se iz snopa cijevi koji je umetnut u plašt (bubanj).

Razlikuje se više tipova industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline:

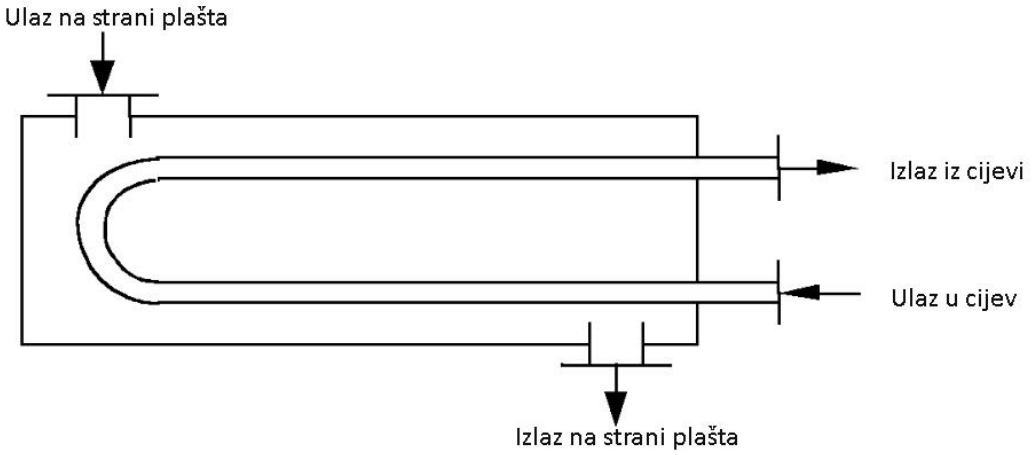
- izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi
- U-cijevni izmjenjivači
- izmjenjivači s plutajućom glavom
- kotlasti isparivači (rebojleri).

Da bi se ostvarila što veća izmjena topline u što je moguće manjem izmjenjivaču topline, u praksi se često upotrebljavaju izmjenjivači kod kojih svaka struja može i više puta prolaziti kroz izmjenjivač. Za industrijske potrebe se najčešće koriste izmjenjivači s 1 ili 2 prolaza kroz plašt. Jednu od izvedbi prikazuje slika 11.



Slika 11. Rekuperativni izmjenjivač topline s dva prolaza fluida kroz cijevi i jednim prolazom fluida kroz plašt[13]

Na slici 12 dan je šematski prikaz[14] ovakvog izmjenjivač topline. Pri tome se u istom izmjenjivaču topline može kombinirati istosmjerni i protusmjerni tok fluida.



Slika 12. Šematski prikaz 1-2 izmjenjivača topline[14]

Prikazani uređaj sastoji se iz snopa cijevi koji je umetnut u bubanj (plašt). Izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi imaju snop cijevi učvršćen na oba kraja plašta (slika 13a), dok U-cijevni izmjenjivači imaju cijevni snop na jednom kraju slobodan na kojem savijanje cijevi treba biti propisno izvedeno (slika 13b).[15]

(a) (b)

Slika 13. Cijevni snop za izmjenjivač s učvršćenim snopom cijevi (a) i fiksni snop cijevi za U-cijevni izmjenjivač (b)[15]

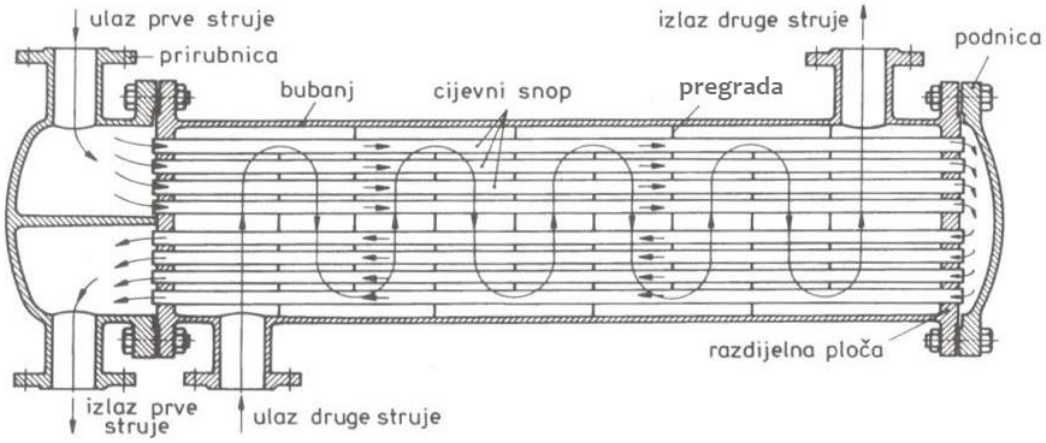
Cijevni snop izmjenjivača izrađen je od čeličnih ili bakrenih cijevi koje su na krajevima uvaljane ili zavarene u cijevni zid. Plašt je izrađen od čeličnog lima. Kroz cijevi struji jedan fluid (npr. hladniji), koji se prolaskom kroz rekuperator zagrijava, a u prostoru

oko cijevi struji topliji fluid koji se hladi prolaskom kroz rekuperator. Razdijelne stijenke ili površine kojima se prenosi toplina su cijevne stjenke.

Industrijski izmjenjivač topline[16] (SA 080, Calvenzano, Italija), hladnjak ulja, prikazan je na slici 14.

Slika 14. Hladnjak ulja[16]

Protjecanje dva fluida kroz izmjenjivač topline s cijevnim snopom i plaštem šematski je prikazano na slici 15. Pri tome se ostvaruje jedan prolaz fluida kroz omotač i dva prolaza fluida kroz cijevi.



Slika 15. Shematski prikaz proticanja fluida kroz 1-2 izmjenjivač topline[6]

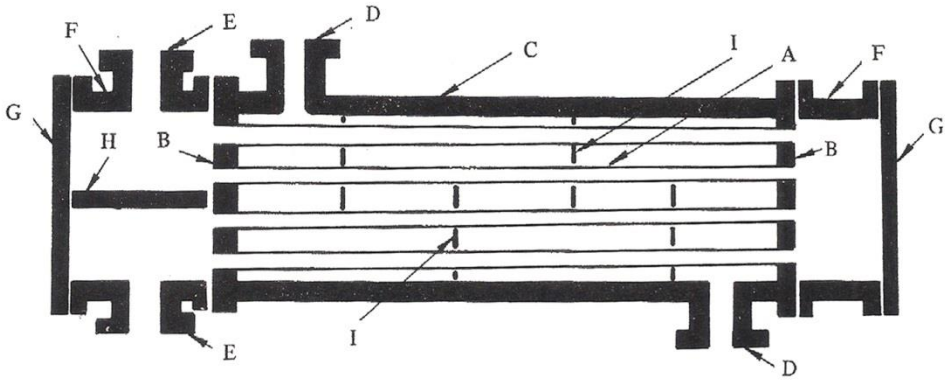
Cijevni izmjenjivači topline karakteriziraju se i označavaju prema TEMA standardima (***T**ubular **E**xanger **M**anufactures **A**ssociation*, New York 1978.).

Osnovni dijelovi[10,17] izmjenjivača topline s cijevnim snopom su:

- cijevi
- cijevne ploče
- plašt i priključci za fluid u plaštu
- priključci i komore za fluid u cijevima
- poklopci komore
- razdjeljna ploča i
- pregrade.

Ovi izmjenjivači topline svoju industrijsku primjenu najčešće nalaze za izmjenu topline između dviju kapljevina.

Šematski prikaz i osnovni dijelovi izmjenjivača s cijevnim snopom s jednim prolazom fluida kroz omotač i dva prolaza fluida kroz cijevi[10,17] prikazan je na slici 16.



Slika 16. Šematski prikaz izmjenjivača topline s osnovnim dijelovima[10]

Oznake na slici 16 su sljedeće:

A – cijevi, osiguravaju površinu za izmjenu topline između fluida koji protječe kroz cijevi i fluida koji struji kroz u plaštu.

B – cijevna ploča, omogućava formiranje cijevnog snopa u izmjenjivaču. To je metalna ploča kružnog oblika s otvorima koji su napravljeni prema određenom rasporedu, u koje se učvršćuju cijevi.

C – plašt je cilindar u koji je smješten cijevni snop.

D – priključci kroz koje u plašt ulazi, odnosno iz plašta izlazi fluid koji protječe oko cjevnog snopa.

E – priključci i F- komore kroz koje se osigurava pritjecanje, protjecanje i istjecanje fluida u cjevima.

G – poklopci komore, služe za zatvaranje komora. Komora, poklopac komore i priključak za fluid u cjevima predstavlja "glavu" izmjenjivača topline s cjevnim snopom i plaštem. Na slici 11 je prikazan uređaj s nepokretnim glavama koje se nalaze na oba kraja uređaja.

H – razdjeljna ploča, postavlja se u prednju komoru, čime se ostvaruju dva prolaza fluida u cijevima.

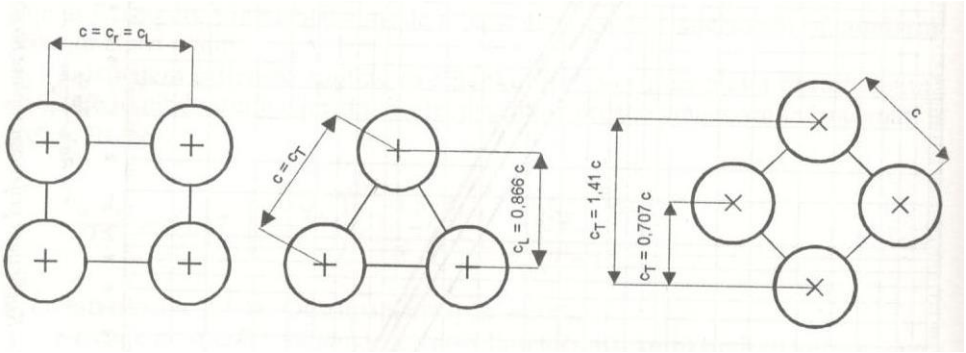
I – pregrade, drže cijevi snopa zajedno, spriječavajući vibracije cijevi pri radu izmjenjivača. Omogućavaju povećanje brzine strujanja fluida u plaštu, a time i rast vrijednosti koeficijenta prijelaza topline za fluid u plaštu. Pregrade se raspoređuju ekvidistantno po dužini aparata. Kad to nije moguće za prvu i/ili posljednju pregradu, one se postavljaju što je moguće bliže priključcima za fluid koji protiče u plaštu.

U cijevnom snopu izmjenjivača cijevi se ugrađuju na više načina u odnosu na smjer toka fluida. To su:

- 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 cijevnom snopu[7] prikazani su na slici 17.



Slika 17. Raspored i korak cijevi u cijevnom snopu[7]

1.4. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE

1.4.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Izmijenjeni toplinski tok u rekuperatoru[6-10] ovisi o sljedećim varijablama:

$$\Phi = \mathrm{f}\,(k, A_o, t_1', t_1'', t_2', t_2'', C_1, C_2) \qquad (1)$$

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

t_1' – ulazna temperature slabije struje,

t_1'' – izlazna temperature slabije struje,

t_2' – ulazna temperature jače struje,

t_2'' – izlazna temperature jače struje.

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

$$C_1 = Q_{\mathrm{m},1} \cdot c_{\mathrm{p},1} \tag{2}$$

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

$$C_2 = Q_{\mathrm{m},2} \cdot c_{\mathrm{p},2} \tag{3}$$

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 tome vrijedi omjer:

$$0 \leq \frac{C_1}{C_2} = \frac{Q_{m,1} \cdot c_{p,1}}{Q_{m,2} \cdot c_{p,2}} \leq 1 \tag{4}$$

Također, za oznake ulazne temperature pojedine struje upotrebljava se apostrof ’, dok za oznaku izlazne temperature pojedine struje upotrebljava se apostrof ’’.

Toplinski tok[10] za svaki fluid može se izraziti toplinsko-bilansnom jednadžbom, tj.

- za topli fluid

$$\phi_{\mathrm{T}} = \dot{Q}_{\mathrm{T}} = Q_{\mathrm{m,T}} \cdot c_{\mathrm{p,T}} \cdot (T_{T1} - T_{\mathrm{T2}}) = Q_{\mathrm{v,T}} \cdot \rho_{\mathrm{T}} \cdot c_{\mathrm{p,T}} \cdot \Delta T_{\mathrm{T}} = C_{\mathrm{T}} \cdot \Delta T_{\mathrm{T}} \tag{5}$$

- za hladni fluid

$$\phi_{\mathrm{H}} = \dot{Q}_{\mathrm{H}} = Q_{\mathrm{m,H}} \cdot c_{\mathrm{p,H}} \cdot (T_{\mathrm{H2}} - T_{\mathrm{H1}}) = Q_{\mathrm{v,H}} \cdot \rho_{\mathrm{H}} \cdot c_{\mathrm{p,H}} \cdot \Delta T_{\mathrm{H}} = C_{\mathrm{H}} \cdot \Delta T_{\mathrm{H}} \tag{6}$$

$$C = Q_{\mathrm{v}} \cdot \rho \cdot c_{\mathrm{p}} = q_{\mathrm{m}} \cdot c_{\mathrm{p}} \tag{7}$$

gdje je:

Q_{v} – volumni protok fluida, m^3/h

ΔT – razlika temperature koju doživi pojedini fluid, K

q_{m} – masena brzina fluida, $\mathrm{kg/(s\ m^2)}$

Ostale veličine imaju prije navedeno značenje.

Uz pretpostavku da nema toplinskih gubitaka slijedi da je:

$$\phi = \dot{Q} = C_{\mathrm{T}} \cdot (T_{\mathrm{T1}} - T_{\mathrm{T2}}) = C_{\mathrm{H}} \cdot (T_{\mathrm{H2}} - T_{\mathrm{H1}}) \tag{8}$$

odnosno

$$\frac{C_{\mathrm{H}}}{C_{\mathrm{T}}} = \frac{(T_{\mathrm{T1}} - T_{\mathrm{T2}})}{(T_{\mathrm{H2}} - T_{H1})} \tag{9}$$

Iz jednažbe (9) proizilazi, da će fluid s manjom kapacitivnom brzinom doživjeti veću temperaturnu promjenu u izmjenjivaču.

Toplinski tok koji se izmjenjuje između toplog i hladnog fluida može se izraziti toplinsko-kinetičkom jednadžbom:

$$\delta\phi = \delta\dot{Q} = k \cdot (T_{\mathrm{T}} - T_{\mathrm{H}}) \cdot dA \tag{10}$$

gdje je:

k – koeficijent prolaza topline kroz diferencijalnu površinu dA izmjenjivača topline, W/(m^2 K)

T_{T}, T_{H} – temperature toplijeg i hladnijeg fluida na elementarnoj dužini uređaja, K

S druge strane, iz toplinsko-bilansnih jednadžbi, vrijedi da je:

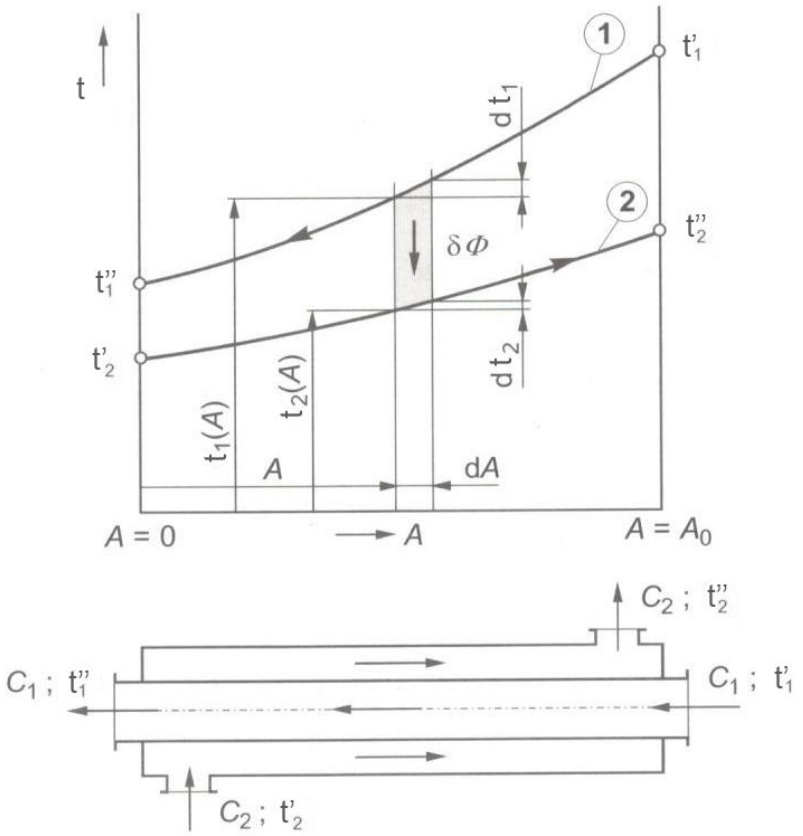
$$\delta\phi = \delta\dot{Q} = k \cdot (T_{\mathrm{T}} - T_{\mathrm{H}}) \cdot dA = \delta\dot{Q_{\mathrm{T}}} = \delta\dot{Q_{\mathrm{H}}} \tag{11}$$

$$\delta\dot{Q_{\mathrm{T}}} = - C_{\mathrm{T}} \cdot dT_{\mathrm{T}} \tag{12}$$

$$\delta\dot{Q_{\mathrm{H}}} = C_{\mathrm{H}} \cdot dT_{\mathrm{H}} \tag{13}$$

Prema tome, za svaki fluid vrijede po dvije jednadžbe toplinskog toka, za toplu struju jednadžbe (11) i (12), a za hladnu struju jednadžbe (11) i (13).

Prikaz temperaturnog profila[6,9], za protusmjerni izmjenjivač tipa “cijev u cijevi”, prikazan je na slici 18.



Slika 18. Temperaturni tok struja uzduž protusmjernog izmjenjivača[6,9]

Srednja logaritamska razlika temperature, koja predstavlja pokretačku silu za izmjenu topline, definirana je izrazom:

$$\Delta T_{\mathrm{m}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \qquad (14)$$

gdje je:

ΔT_1 i ΔT_2 - razlika 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 12, slijedi:

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

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

Dakle, izmijenjeni toplinski tok u rekuperatorima protusmjernog i/ili istosmjernog toka može se prikazati konačnom toplinsko-kinetičkom jednadžbom:

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

gdje je:

ΔT_{m} – srednja logaritamska pokretačka sila procesa, odnosno srednja logaritamska razlika temperatura između "toplog" i "hladnog" fluida, K.

Izraz (14) vrijedi za izmjenjivače topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i jednim prolazom fluida kroz cijevi.

Kod izmjenjivača s više prolaza fluida kroz cijevi i/ili plašt, istovremeno su prisutni istosmjerni, protusmjerni i unakrsni tok. U takvim slučajevima dolazi do križanja temperatura, tj. u jednom dijelu cijevi i plašta "hladni" fluid ima višu temperaturu od "toplog" fluida. Tada je omjer $\Phi/(k \cdot A)$ mnogo složenija funkcija o ulaznim i izlaznim temperaturama fluida.

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

$$\Delta T_{\mathrm{m,\,kor}} = \Delta T_{\mathrm{m}} \cdot \mathrm{F} \tag{16}$$

Osnovna jednadžba za proračun izmjenjivača topline tada glasi:

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_{\mathrm{m,\,kor}} \tag{17}$$

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

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

Faktor korekcije, F, je funkcija dva bezdimenzijska omjera, R i P, tj. F = f (P, R).

$$\mathrm{R} = \frac{T_{\mathrm{t},1} - T_{\mathrm{t},2}}{T_{\mathrm{h},2} - T_{\mathrm{h},1}} \tag{18}$$

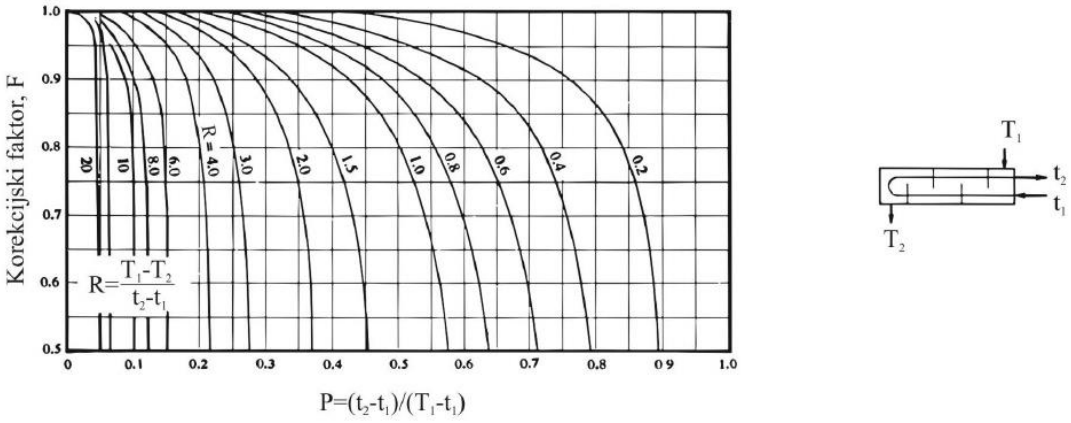
Parametar R je, dakle, jednak omjeru kapacitivnih brzina $\frac{C_{\mathrm{H}}}{C_{\mathrm{T}}} = \frac{(T_{\mathrm{T1}} - T_{\mathrm{T2}})}{(T_{\mathrm{H2}} - T_{\mathrm{H1}})}$.

Parametar P je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$\mathrm{P} = \frac{T_{\mathrm{h},2} - T_{\mathrm{h},1}}{T_{t,1} - T_{\mathrm{h},1}} \tag{19}$$

Vrijednosti faktora F za izmjenjivače s cijevnim snopom i plaštem mogu se naći u TEMA standardima.

Korekcijski faktor F za izmjenjivač topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i dva prolaza fluida kroz cijevi prikazan je na slici 19.



Slika 19. Dijagram[7] ovisnosti F = f (P, R) za protusmjerni izmjenjivač tipa 1-2

Očitavanje F s ravnog dijela krivulje može dovesti do velike pogreške. Stoga se ne preporučuje računanje s F manjim 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.

Korekcijski faktor F može se odrediti korištenjem sljedećeg izraza[7]:

$$\mathrm{F} = \left[\frac{(\mathrm{R}^2+1)^{1/2}}{\mathrm{R}-1}\right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1-\mathrm{P_n}}{1-\mathrm{R}\cdot\mathrm{P_n}}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{\mathrm{P_n}}\right)-1-\mathrm{R}+(\mathrm{R}^2+1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{\mathrm{P_n}}\right)-1-\mathrm{R}-(\mathrm{R}^2+1)^{\frac{1}{2}}}\right]} \tag{20}$$

gdje je:

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} \tag{21}$$

U jednadžbi (21) n predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt.

Parametri R i P određuju se koristeći izraze (18) i (19).

1.4.2. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE

Koeficijent prolaza topline (ili ukupni koeficijent prijenosa topline) bitna je veličina pri pri proračunu izmjenjivača topline.

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[7], u praksi se računa prema izrazu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_i \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}} \tag{22}$$

gdje je:

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

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

α_i – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj stijenki 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 izrazu (22) za koeficijent polaza topline, kao i izrazima (2) i (3) za toplinske kapacitete pojedinih struja javljaju se i fizikalna svojstva struja (fluida).

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

$$t_m = \frac{t' + t''}{2} \tag{23}$$

gdje je:

t_m – aritmetička sredina temperature promatrane struje, ^oC

t' – ulazna temperature struje fluida, ^oC

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

1.4.3. KOEFICIJENT PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKU U CIJEVI

Za koeficijent prijenosa topline[7] na stijenku u cijevi kada ne dolazi do promjene faze najčešće se za laminarno strujanje fluida u vodoravnim i okomitim cijevima (Re < 2300) koristi Sieder-Tateova jednadžba (odstupanja su ± 12%):

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 1{,}86 \cdot \left(Pe \cdot \frac{d_i}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0{,}14} \tag{24}$$

$$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} \tag{25}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_i \cdot \rho}{\mu} = \frac{q_m \cdot d_i}{\mu} \tag{26}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \tag{27}$$

gdje su:

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 temperature stijenke, Pa s

ω – brzina fluida u cijevi, m/s

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

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

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 0{,}027 \cdot (\mathrm{Re})^{0{,}8} \cdot (\mathrm{Pr})^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0{,}14} \qquad (28)$$

Za prijelazno područje strujanja 2300 < Re < 10 000 može se primijeniti Hausenova jednadžba:

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0{,}166 \cdot \left(\mathrm{Re}^{2/3} - 125\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right]}{\mathrm{Re}} \cdot \mathrm{Pr}^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0{,}14} \qquad (29)$$

Sve veličine u izrazu (29) imaju prije navedeno značenje.

1.4.4. KOEFICIJENT PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKU CIJEVI SA STRANE PLAŠTA

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

$$\frac{\alpha_o \cdot d_e}{\lambda} = 0{,}027 \cdot \mathrm{Re}^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \tag{30}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{q_m \cdot d_e}{\mu} \tag{31}$$

gdje je:

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

d_e – ekvivalentni promjer plašta, m.

Uzimajući u obzir raspored i korak cijevi u cjevnom snopu izmjenjivača (slika 12) ekvivalentni promjer plašta može se odrediti na sljedeći način:

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

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(c^2 - \frac{d_o^2 \cdot \pi}{4}\right)}{d_o \cdot \pi} \tag{32}$$

gdje je d_o vanjski promjer cijevi.

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

$$d_e = \frac{1{,}1 \cdot (c^2 - 0{,}917 \cdot d_o^2)}{d_o} \tag{33}$$

Masena brzina fluida u plaštu računa se iz:

$$q_{\mathrm{m}} = \frac{Q_{\mathrm{m}}}{A_{\mathrm{s}}} \tag{34}$$

gdje je:

Q_{m} – maseni protok fluida, kg/h

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

$$A_{\mathrm{s}} = \frac{d_{\mathrm{pl}} \cdot l_{\mathrm{pr}} \cdot (\mathrm{c} - d_{\mathrm{o}})}{\mathrm{c}} \tag{35}$$

gdje je:

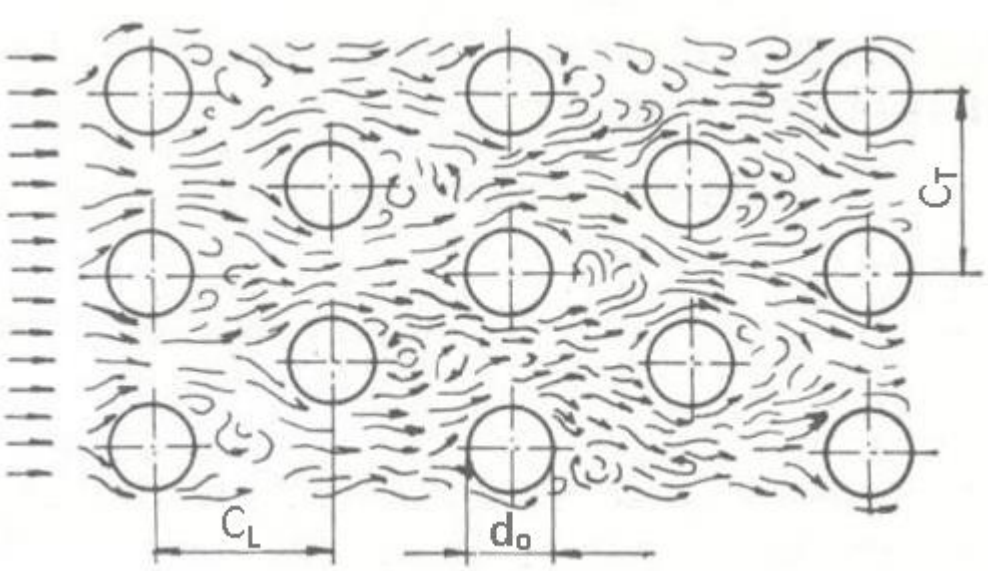
d_{pl} – unutarnji promjer plašta, m

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, kako je prikazano na slici 20, čest je slučaj iz prakse.[8]



Slika 20. Strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu[8]

Koeficijent prijenosa topline za ovaj slučaj dan je jednadžbom[8]:

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

Za šahovski raspored cijevi i laminarno strujanje fluida[8] C = 0,56, n = 0,50 i m = 0,36.

Za šahovski raspored cijevi i turbulentno strujanje fluida[8]; svojstva fluida: 0,7< Pr < 480 i odnosi u cjevnom snopu: 1,3 < (C_T/d_o) < 2,6 i 0,6 < (C_L/d_o) < 4

$C = 0,41 \cdot (C_T / C_L)^{0,166}$ za $(C_T / C_L) < 2$

C = 0,46 za $(C_T / C_L) \geq 2$

n = 0,60 m = 0,33.

Koeficijent prijenosa topline α_o izračunat iz jednadžbe (36) važi za treći i iduće redove u snopu cijevi. 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 ε_{II} red cijevi u šahovskom rasporedu, tj. $\varepsilon_I = 0,6$, a $\varepsilon_{II} = 0,7$.

Dakle, srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline[8] za snop od N redova u pravcu strujanja je:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot \alpha_o \cdot N_1 + 0,7 \cdot \alpha_o \cdot \mathrm{N_2} + \alpha_o \cdot [\mathrm{N} - (\mathrm{N_1} + \mathrm{N_2})]}{\mathrm{N}} \qquad (37)$$

gdje je:

α_o – koeficijent prijenosa topline izračunat iz jednadžbe (36), W/(m^2 K)

N_1 – broj cijevi u prvom redu,

N_2 – broj cijevi u drugom redu,

N – ukupan broj cijevi.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1. INDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA

Zbog prikladnijeg načina proračuna izmjenjivača topline pojedine struje fluida treba identificirati prema kriteriju vrijednosti toplinskog kapaciteta (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 33 ^{o}C.

Temperature ulja na izlazu iz plašta iznosi 26,5 ^{o}C.

Fizikalna svojstva ulja[18] uzimaju se za srednju temperaturu ulja izračunatu prema jednadžbi (23):

$$t_{\mathrm{m,U}} = \frac{t' + t''}{2} = \quad \frac{33 + 26{,}5}{2} = 29{,}75\ {}^{o}\mathrm{C}$$

Obzirom da se temperatura 29,75 ^{o}C ne nalazi u tablicama[18], potrebno je obaviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 ^{o}C koje se nalaze u tablicama.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Fizikalna svojstva mineralnog ulja pri srednjoj temperaturi 29,75 ^{o}C

Fizikalna svojstva mineralnog ulja	$t_{\mathrm{m,U}}$ / ^{o}C
	29,75
ρ_{U} / kg/m^3	865
$c_{\mathrm{p,U}}$ / J/(kg K)	1809
λ_{U} / W/(m K)	0,144
ν_{U} / m^2/s	$11{,}55 \cdot 10^{-6}$
* μ_{U} / (N s)/m^2	$9994 \cdot 10^{-6}$

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

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

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

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

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

Temperatura vode na ulazu u cijevi izmjenjivača iznosi 21 ^{o}C.

Fizikalna svojstva hladne vode uzimaju se za poznatu ulaznu temperature hladne vode 21 ^{o}C.

Obzirom da se temperatura 21 ^{o}C ne nalazi u tablicama[18], potrebno je obaviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 ^{o}C koje se nalaze u tablicama.

Fizikalna svojstva vode, nakon izvršene interpolacije, pri 21 ^{o}C dana su u tablici 2.

Tablica 2. Fizikalna svojstva rashladne vode pri 21 ^{o}C

Fizikalna svojstva rashladne vode	t_V / ^{o}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	$990 \cdot 10^{-6}$

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

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

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

Toplinski kapacitet ulja:

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

$$C_{\mathrm{U}} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{60}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 865 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 1809 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}$$

$$C_{\mathrm{U}} = 209\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s\ K}} = 209\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

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, uz volumni protok $Q_{\mathrm{v,V}} = 1\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$

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

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

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

Maseni protok vode:

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

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

$$C_{\mathrm{V}} = \frac{1{,}5}{3600}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 997{,}7 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}$$

$$C_{\mathrm{V}} = 1738\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s\ K}} = 1738\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{\mathrm{m,V}} = Q_{\mathrm{v,V}} \cdot \rho_{\mathrm{V}} = 0{,}416\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

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

$$C_{\mathrm{V}} = \frac{2}{3600}\ \frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}} \cdot\ 997{,}7 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}} \cdot\ 4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}$$

$$C_{\mathrm{V}} = 2318\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s\ K}} = 2318\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{\mathrm{m,V}} = Q_{\mathrm{v,V}} \cdot \rho_{\mathrm{V}} = 0{,}554\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

Toplinski kapacitet struje ulja, C_{U}, je manji od toplinskog kapaciteta struje vode C_{V}, tj. $C_{\mathrm{U}} < C_{\mathrm{V}}$, te stoga ulju pripada značenje slabije struje i oznaka 1, a vodi pripada značenje jače struje i oznaka 2.

Shodno tome oznake su sljedeće:

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

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

t_1' – ulazna temperatura ulja

t_1'' – izlazna temperatura ulja

t_2' – ulazna temperatura vode

t_2'' – izlazna temperatura vode

Povećanjem volumnog protoka vode (jača struja), mijenjat će se njena izlazna temperatura, dok ulazna temperatura jače struje ostaje konstantna (21 ^{o}C).

Ulazna i izlazna temperature slabije struje (mineralno ulje) te volumni protok (8 L/min) mineralnog ulja ostaju konstantni.

2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE

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

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

Izmijenjeni toplinski tok:

$$\phi_{\mathrm{U}} = \dot{Q}_{\mathrm{U}} = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 209\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}} \cdot (33 - 26{,}5)\ \mathrm{K} = \ 1358\ \mathrm{W}$$

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_{\mathrm{U}} = t_1' - t_1'' = 33 - 26{,}5 = \ 6{,}5\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Toplina koju daje ulje prima rashladna voda u cijevima izmjenjivača.

$$\phi_{\mathrm{V}} = \dot{Q}_{\mathrm{V}} = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = C_2 \cdot \Delta t_{\mathrm{V}} = \ 1358\ \mathrm{W}$$

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

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{V}}}{C_2} = \frac{1358\ \mathrm{W}}{1159\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}} = 1{,}17\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = (t_2'' - 21) = 1{,}17\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Izlazna temperature vode:

$$t_2'' = \Delta t_{\mathrm{V}} + 21 = 1{,}17 + 21 = 22{,}2\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

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

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{V}}}{C_2} = \frac{1358\ \mathrm{W}}{1738\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}} = 0{,}78\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

$$\Delta t_{\mathrm{V}} = (t_2'' - 21) = 0{,}78\ \ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Izlazna temperature vode:

$$t_2'' = \Delta t_V + 21 = 0{,}78 + 21 = 21{,}78 \ ^oC$$

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

$$\Delta t_V = \frac{\dot{Q}_V}{C_2} = \frac{1358 \ W}{2318 \frac{W}{K}} = 0{,}59 \ ^oC$$

$$\Delta t_V = (t_2'' - 21) = 0{,}59 \ ^oC$$

Izlazna temperature vode:

$$t_2'' = \Delta t_V + 21 = 0{,}59 + 21 = 21{,}59 \ ^oC$$

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

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

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

$Q_{v,U}$ / L/min	8		
$Q_{m,U}$ / kg/s	0,115		
t_1' / ^{o}C	33		
t_1'' / ^{o}C	26,5		
$Q_{v,V}$ / m^3/h	1	1,5	2
$Q_{m,V}$ / kg/s	0,277	0,416	0,554
t_2' / ^{o}C	21		
t_2'' / ^{o}C	22,2	21,78	21,59
$C_U = C_1$ / W/K	209		
$C_V = C_2$ / W/K	1159	1738	2318

Fizikalna svojstva vode, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperature vode koja se određuje prema jednadžbi (23).

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

$$t_{\mathrm{m,V}} = \frac{t' + t''}{2} = \quad \frac{21 + 22{,}2}{2} = 21{,}6\ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

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

$$t_{\mathrm{m,V}} = \frac{t' + t''}{2} = \quad \frac{21 + 21{,}78}{2} = 21{,}39\ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

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

$$t_{\mathrm{m,V}} = \frac{t' + t''}{2} = \quad \frac{21 + 21{,}59}{2} = 21{,}30\ ^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$$

Obzirom da se temperature 21,6; 21,39 i 21,30 ^{o}C, ne nalazi u tablicama[18], potrebno je obaviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 ^{o}C koje se nalaze u tablicama.

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

Tablica 4. Fizikalna svojstva vode u funkciji temperature vode

Fizikalna svojstva vode	$t_{\mathrm{m,V}}$ / ^{o}C		
	21,6	21,39	21,30
ρ_{V} / kg/m^3	997,52	997,58	997,61
$c_{\mathrm{p,V}}$ / J/(kg K)	4182	4182	4182
λ_{V} / W/(m K)	0,600	0,600	0,600
ν_{V} / m^2/s	$0{,}982 \cdot 10^{-6}$	$0{,}986 \cdot 10^{-6}$	$0{,}987 \cdot 10^{-6}$
* μ_{V} / (N s)/m^2	$979 \cdot 10^{-6}$	$983 \cdot 10^{-6}$	$985 \cdot 10^{-6}$

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

2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA

Srednja logaritamska razlika temperature računa se iz jednažbe (14), tj.

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

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

$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 33 - 22{,}2 = 10{,}8$ K

$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 26{,}5 - 21 = 5{,}5$ K

$$\Delta T_{\mathrm{m}} = \frac{10{,}8 - 5{,}5}{\ln\left(\frac{10{,}8}{5{,}5}\right)} = 7{,}85 \text{ K}$$

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

$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 33 - 21{,}78 = 11{,}22$ K

$\Delta T_2 = 5{,}5$ K

$$\Delta T_{\mathrm{m}} = \frac{11{,}22 - 5{,}5}{\ln\left(\frac{11{,}22}{5{,}5}\right)} = 8{,}02 \text{ K}$$

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

$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 33 - 21{,}59 = 11{,}41$ K

$\Delta T_2 = 5{,}5$ K

$$\Delta T_{\mathrm{m}} = \frac{11{,}41 - 5{,}5}{\ln\left(\frac{11{,}41}{5{,}5}\right)} = 8{,}10 \text{ K}$$

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

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

mineralno ulje	voda		
$Q_{v,U}$ = 8 L/min	$Q_{v,V}$ = 1 m^3/h	$Q_{v,V}$ = 1,5 m^3/h	$Q_{v,V}$ = 2 m^3/h
t_1' = 33 °C	t_2' = 21 °C	t_2' = 21 °C	t_2' = 21 °C
t_1'' = 26,5 °C	t_2'' = 22,2 °C	t_2'' = 21,78 °C	t_2'' = 21,59 °C
ΔT_m / K	7,85	8,02	8,10

2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F

Faktor korekcije, F, računa se iz jednadžbe (20):

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

Parametri R i P iz jednadžbi (18) i (19), a Pn iz jednadžbe (21):

$$R = \frac{T_{t,1}-T_{t,2}}{T_{h,2}-T_{h,1}} = \frac{t_1'-t_1''}{t_2''-t_2'} = \frac{33-26{,}5}{22{,}2-21} = 5{,}42$$

$$P = \frac{T_{h,2}-T_{h,1}}{T_{t,1}-T_{h,1}} = \frac{t_2''-t_2'}{t_1'-t_2'} = \frac{22{,}2-21}{33-21} = 0{,}1$$

Broj prolaza kroz plašt, n = 1.

$$P_n = \frac{1-\left(\frac{R\cdot P-1}{P-1}\right)^{1/n}}{R-\left(\frac{R\cdot P-1}{P-1}\right)^{1/n}} = \frac{1-\left(\frac{5{,}42\cdot 0{,}1-1}{0{,}1-1}\right)^{1/1}}{5{,}42-\left(\frac{5{,}42\cdot 0{,}1-1}{0{,}1-1}\right)^{1/1}} = \frac{0{,}49}{4{,}91} = 0{,}0998$$

$$F = \left[\frac{(5{,}42^2+1)^{1/2}}{5{,}42-1}\right]\cdot \frac{\ln\left(\frac{1-0{,}0998}{1-5{,}42\cdot 0{,}0998}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0{,}0998}\right)-1-5{,}42+(5{,}42^2+1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0{,}0998}\right)-1-5{,}42-(5{,}42^2+1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0{,}978$$

Korigirana srednja logaritamska temperature fluida računa se iz jednadžbe (16), tj.

$\Delta T_{m,\,kor} = \Delta T_m \cdot F = 7{,}85 \cdot 0{,}978 = 7{,}68$ K

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

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

parametri	$Q_{v,V}$ / (m^3/h)		
	1	1,5	2
R	5,42	8,33	11,02
P	0,1	0,065	0,049
P_n	0,0998	0,065	0,049
F	0,978	0,986	0,852
ΔT_m / K	7,85	8,02	8,10
$\Delta T_{m,kor}$ / K	7,68	7,91	6,90

2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI

Cijevi su vanjskog promjera d_o = 10 mm, debljine δ = 1 mm i dužine L = 544 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.

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

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{prolaz}}{A_c} = \frac{\frac{1}{3600}\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 997{,}52\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2}{0{,}00221 \text{ m}^2} = 250\frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

gdje je N_{prolaz} – broj prolaza fluida kroz cijevi

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{250\frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{997{,}52\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0{,}25\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega_c \cdot \mathrm{d_i} \cdot \rho_V}{\mu_\mathrm{V}} = \frac{q_{\mathrm{m,V}} \cdot \mathrm{d_i}}{\mu_\mathrm{V}} = \frac{250\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{979 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}}} = 2043$$

Re < Re,kr

2043 < 2300 laminarno strujanje u cijevima

Za izračunavanje Nuselta koristi se Sieder-Tateova jednadžba (24)

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

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_\mathrm{p}}{\lambda} = \frac{979 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 4182\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}}{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 6{,}82$$

$$\mathrm{Pe} = \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} = 2043 \cdot 6{,}82 = 13933{,}26$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_\mathrm{i} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 1{,}86 \cdot \left(13933{,}26 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{544 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}\right)^{\frac{1}{3}} = 10{,}97$$

$$\alpha_\mathrm{i} = \frac{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}} \cdot 10{,}97}{8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}} = 823\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

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

$$q_{\mathrm{m,V}} = \frac{Q_{\mathrm{m,V}} \cdot \mathrm{N_{prolaz}}}{A_{\mathrm{c}}} = \frac{\frac{1{,}5}{3600}\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}} \cdot 997{,}52\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}} \cdot 2}{0{,}00221\ \mathrm{m^2}} = 376\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m^2}}$$

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_{\mathrm{c}} = \frac{q_{\mathrm{m,V}}}{\rho_{\mathrm{V}}} = \frac{376\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m^2}}}{997{,}52\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}} = 0{,}38\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega_{\mathrm{c}} \cdot \mathrm{d_i} \cdot \rho_V}{\mu_{\mathrm{V}}} = \frac{q_{\mathrm{m,V}} \cdot \mathrm{d_i}}{\mu_{\mathrm{V}}} = \frac{376\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\ m^2}} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{979 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\ s}}{\mathrm{m^2}}} = 3073$$

Re > Re,kr

3073 > 2300

prijelazno područje strujanja 2300 < Re < 10 000

Za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima tada se koristi jednadžba (29), tj.

$$\frac{\alpha_{\mathrm{i}}}{c_{\mathrm{p}} \cdot q_{\mathrm{m}}} = \frac{0{,}166 \cdot \left(\mathrm{Re}^{2/3} - 125\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{\mathrm{i}}}{L}\right)^{2/3}\right]}{\mathrm{Re}} \cdot \mathrm{Pr}^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{\mathrm{s}}}\right)^{0{,}14}$$

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_\mathrm{p}}{\lambda} = \frac{979 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 4182\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}}{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 6{,}82$$

$$\frac{\alpha_\mathrm{i}}{4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}} \cdot 376\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}}} = \frac{0{,}166 \cdot \left(3073^{2/3} - 125\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{544}\right)^{2/3}\right]}{3073} \cdot 6{,}82^{-\frac{2}{3}}$$

$$\frac{\alpha_\mathrm{i}}{4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}} \cdot 376\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}}} = 0{,}001375$$

$$\alpha_\mathrm{i} = 0{,}001375 \cdot\ 4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}} \cdot 376\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}} = 2162\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K}}$$

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

$$q_\mathrm{m,V} = \frac{Q_\mathrm{m,V} \cdot \mathrm{N_{pr}}}{A_\mathrm{c}} = \frac{\frac{1{,}5}{3600}\,\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}} \cdot 997{,}52\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}} \cdot 2}{0{,}00221\ \mathrm{m^2}} = 502\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}}$$

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_\mathrm{c} = \frac{q_\mathrm{m,V}}{\rho_\mathrm{V}} = \frac{502\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}}}{997{,}52\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}} = 0{,}50\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega_\mathrm{c} \cdot \mathrm{d_i} \cdot \rho_V}{\mu_\mathrm{V}} = \frac{q_\mathrm{m,V} \cdot \mathrm{d_i}}{\mu_\mathrm{V}} = \frac{502\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}} \cdot 8 \cdot 10^{-3}\mathrm{m}}{979 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}}} = 4102$$

Re > Re,kr

4102 > 2300

prijelazno područje 2300 < Re < 10 000

Za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima tada se koristi jednadžba (29), tj.

$$\frac{\alpha_\mathrm{i}}{c_\mathrm{p} \cdot q_\mathrm{m}} = \frac{0{,}166 \cdot \left(\mathrm{Re}^{2/3} - 125\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_\mathrm{i}}{L}\right)^{2/3}\right]}{\mathrm{Re}} \cdot \mathrm{Pr}^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_\mathrm{s}}\right)^{0{,}14}$$

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_\mathrm{p}}{\lambda} = \frac{979 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 4182\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}}{0{,}600\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 6{,}82$$

$$\frac{\alpha_\mathrm{i}}{4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}} \cdot 502\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}}} = \frac{0{,}166 \cdot \left(4102^{2/3} - 125\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{544}\right)^{2/3}\right]}{4102} \cdot 6{,}82^{-\frac{2}{3}}$$

$$\frac{\alpha_\mathrm{i}}{4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}} \cdot 502\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}}} = 0{,}001566$$

$$\alpha_\mathrm{i} = 0{,}001566 \cdot\ 4182\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}} \cdot 502\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}} = 3287\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K}}$$

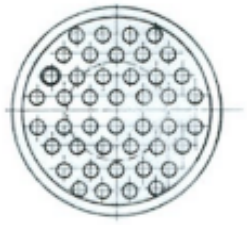
U tablici 7 prikazane su postignute vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline u cijevi, α_i, o protočnim karakteristikama fluida (vode) u cijevima izmjenjivača (2 prolaza fluida kroz cijevi).

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

Re	2043	3073	4102
	laminarno područje (Re < 2300)	prijelazno područje (2300 < Re < 10 000)	
$Q_{m,V}$ kg/s	0,277	0,416	0,554
$q_{m,V}$ kg/(s m^2)	250	376	502
ω_c m/s	0,25	0,38	0,50
α_i W/(m^2 K)	823	2162	3287

2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU

Raspored cijevi u cijevnom snopu, prikazan na slici 21, je u trokutu s korakom od 13 mm.



Slika 21. Raspored cijevi u cijevnom snopu 1-2 tipa izmjenjivača

Korak cijevi, c = 13 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, $L = 544$ mm

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

Vanjski promjer cijevi, $d_o = 10$ mm

Broj pregrada u plaštu $N_{pr} = 9$

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

$$l_{\mathrm{pr}} = \frac{L}{\mathrm{N}_{pr}} = \frac{544}{9} = 60{,}44 \text{ mm}$$

Za raspored cijevi u trokutu, ekvivalentni promjer cijevi, d_e, se računa iz jednadžbe (33):

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

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

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa računa se iz jednadžbe (35):

$$A_{\mathrm{s}} = \frac{d_{\mathrm{pl}} \cdot l_{\mathrm{pr}} \cdot (\mathrm{c} - d_{\mathrm{o}})}{\mathrm{c}} = \frac{107 \cdot 60{,}44 \cdot (13 - 10)}{13} = 1492 \text{ mm}^2$$

$$A_{\mathrm{s}} = 0{,}00149 \text{ m}^2$$

Masena brzina fluida u plaštu (ulja) računa se iz jednadžbe (34):

$$q_{\mathrm{m,U}} = \frac{Q_{\mathrm{m,U}}}{A_{\mathrm{s}}} = \frac{Q_{\mathrm{v,U}} \cdot \rho_U}{A_{\mathrm{s}}} = \frac{\frac{8 \cdot 10^{-3}}{60} \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} \cdot 865 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}}{0{,}00149 \text{ m}^2} = 77{,}40 \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$\mathrm{Re} = \frac{q_{\mathrm{m,U}} \cdot \mathrm{d_e}}{\mu_{\mathrm{U}}} = \frac{77{,}40\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s\,m^2}} \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{9994 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}}} = 65{,}85$$

Re < Re,kr

2043 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

Koeficijent prijenosa topline za laminarno strujanje fluida i šahovski raspored cijevi u plaštu računa se iz jednadžbe (35), gdje je C = 0,56, n = 0,50 i m = 0,36.

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

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

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c_{\mathrm{p}}}{\lambda} = \frac{9994 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{N\,s}}{\mathrm{m^2}} \cdot 1809\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}}{0{,}144\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 126$$

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_{\mathrm{o}} \cdot 0{,}008503\ \mathrm{m}}{0{,}144\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}}} = 0{,}56 \cdot (65{,}86)^{0{,}50} \cdot (126)^{0{,}36} = 25{,}92$$

$$\alpha_{\mathrm{o}} = \frac{0{,}144\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,K}} \cdot 25{,}92}{0{,}008603\ \mathrm{m}} = 434\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,K}}$$

Koeficijent prijenosa topline α_{o} izračunat iz jednadžbe (36) važi za treći i iduće redove u snopu cijevi.

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline za snop od N redova u pravcu strujanja računa se iz jednadžbe (37), tj.

$$\alpha_{\mathrm{o,sr}} = \frac{0{,}6 \cdot \alpha_{\mathrm{o}} \cdot N_1 + 0{,}7 \cdot \alpha_{\mathrm{o}} \cdot \mathrm{N}_2 + \alpha_{\mathrm{o}} \cdot [\mathrm{N} - (\mathrm{N}_1 + \mathrm{N}_2)]}{\mathrm{N}}$$

Iz slike 15 je vidljivo da je broj cijevi u prvom redu $N_1 = 7$, a broj cijevi u drugom redu $N_2 = 6$. Uvrštavanjem brojčanih vrijednosti u jednadžbu (37) slijedi:

$$\alpha_{\mathrm{o,sr}} = \frac{0{,}6 \cdot 434 \cdot 7 + 0{,}7 \cdot 434 \cdot 6 + 434 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44} = 389 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

2.7. PRORAČUN UKUPNOG KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE

Ukupni koeficijent prijenosa topline (koeficijent prolaza topline) računa se prema jednadžbi (22), tj.

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

Otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja vanjske, r_{o} i unutarnje, r_{i} stijenke cijevi su zanemareni.

Jednadžba tada prelazi u sljedeći oblik:

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

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 za α_{i} = 823 W/(m^2 K)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{389} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386{,}12} + \frac{1}{823} \cdot \frac{10}{8}} = 244 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za α_{i} = 2162 W/(m^2 K)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{389} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386{,}12} + \frac{1}{2162} \cdot \frac{10}{8}} = 317 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za α_{i} = 3287 W/(m^2 K)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{389} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386{,}12} + \frac{1}{3287} \cdot \frac{10}{8}} = 339 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}}$$

2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE

Potrebna površina za prijenos topline računa se iz jednadžbe (17):

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

Za slučaj a) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\mathrm{m,kor}}} = \frac{1358\ \mathrm{W}}{244\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \cdot 7{,}68\ \mathrm{K}} = 0{,}725\ \mathrm{m^2}$$

Za slučaj b) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\mathrm{m,kor}}} = \frac{1358\ \mathrm{W}}{317\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \cdot 7{,}68\ \mathrm{K}} = 0{,}557\ \mathrm{m^2}$$

Za slučaj c) potrebna površina za prijenos topline iznosi:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{\mathrm{m,kor}}} = \frac{1358\ \mathrm{W}}{339\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\ K}} \cdot 7{,}68\ \mathrm{K}} = 0{,}521\ \mathrm{m^2}$$

Raspoloživa površina prijenosa topline iznosi:

$$A_{\mathrm{o}} = \pi \cdot d_{\mathrm{o}} \cdot L \cdot N_{\mathrm{c}} = \pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}\mathrm{m} \cdot 0{,}544\ \mathrm{m} \cdot 44 = 0{,}752\ \mathrm{m^2}$$

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

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

$Q_{v,U}$ / L/min	8		
$Q_{m,U}$ / kg/s	0,115		
t_1' / °C	33		
t_1'' / °C	26,5		
$\alpha_{o,sr}$ / W/(m^2 K)	389		
$Q_{v,V}$ / m^3/h	1	1,5	2
$Q_{m,V}$ / kg/s	0,277	0,416	0,554
t_2' / °C	21		
t_2'' / °C	22,2	21,78	21,59
α_I / W/(m^2 K)	823	2126	3287
k / W/(m^2 K)	244	317	339
$\Delta T_{m,kor}$ / K	7,68	7,91	6,90
A / m^2	0,724	0,557	0,521
A_o / m^2	0,752		
L / m	0,544		

3. RASPRAVA

U završnom radu je obrađena problematika hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju ležajevi kugličnog mlina za mljevenje sirovinskog materijala za dobivanje portlandskog cementa. Naime, tijekom rada kugličnog mlina, uslijed trenja, a također i vanjskih čimbenika koji utječu na povišenu temperaturu u pogonu, dolazi do zagrijavanja ulja. Ulju se zagrijavanjem smanjuje viskoznost što znači da mu se smanjuje i kvaliteta pa ga je potrebno ohladiti prikladnim načinom kako bi mu se snizila temperatura.

U tu svrhu mogu se koristiti industrijski izmjenjivači topline, tzv. hladnjaci odgovarajućih karakteristika. Jedan takav je prikazan na slici 8.

U ovom radu razmatrao se industrijski višecijevni izmjenjivač topline s učvršćenim snopom cijevi. Karakteristike ovog izmjenjivača navedene su u zadatku ovog završnog rada, tj. protusmjerni izmjenjivač topline, tipa 1-2, izveden je kao bubanj unutarnjeg promjera 107 mm, unutar kojeg je smješten cijevni snop od 44 cijevi vanjskog promjera 10 x 1 mm i duljine 544 mm. Broj pregrada u plaštu je 9.

Cijevni snop (slika 15) definiran je cijevnom pločom čiji vanjski promjer iznosi 106,5 mm, što daje zračnost od 0,6 mm u odnosu na unutarnji promjer, d_{pl}, stijenke plašta. Na ovoj cijevnoj ploči raspored otvora za ugradnju bakrenih cijevi izveden je na slijedeći 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 od 13 mm. Sljedeći niz čini 6 provrta, zatim sljedeći niz od 5 provrta i konačno zadnji s 4 provrta. Svi ovi provrti su u pravilnom rasporedu i tvore istostranične trokute (3 x 60°). Ukupan broj provrta odnosno cijevi je 22 s gornje strane i simetrično preslikano na donju polovinu ploče također 22 cijevi, tj. ukupno u cijevnom snopu se nalaze 44 cijevi.

Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda, a u prostor oko cijevi dostrujava zagrijano ulje.
U ovom radu uzete su sljedeće karakteristične veličine za pojedini fluid:

Volumni protok toplog fluida (ulje) = 8 L/min

Ulazna temperature toplog fluida, $t_1' = 33\ ^oC$

Izlazna temperature toplog fluida, $t_1'' = 26{,}5\ ^oC$

Volumni protok hladnog fluida (voda) = 1; 1,5 i 2 m^3/h

Ulazna temperature hladnog fluida, $t_2' = 21\ ^oC$

Identificirajući ulazne struje hladnog (voda) i toplog fluida (ulje) prema vrijednosti toplinskog kapaciteta proizilazi da je slabija struja mineralno ulje (ima manju vrijednost toplinskog kapaciteta) i njoj se pridružuje indeks 1. Jača struja je voda i njoj se pridružuje indeks 2. Toplinski kapacitet mineralnog ulja iznosi $C_1 = 209$ W/K. Toplinski kapacitet vode raste kako raste njen volumni protok i iznosi $C_2 = 1159$; 1738 te 2318 W/K.

Izlazna temperature hladnog fluida, t_2'' (izračunata iz toplinsko-bilančne jednadžbe), mijenja se kako se povećava protok vode u cijevima izmjenjivača.

Iz tablice 3 je vidljivo da izlazna temperatura vode opada s porastom volumnog protoka rashladne vode u cijevima izmjenjivača, tj. od 22,2 ^oC pri volumnom protoku $Q_{v,V} = 1\ m^3/h$, na 21,78 ^oC pri $Q_{v,V} = 1{,}5\ m^3/h$ te 21,59 ^oC pri $Q_{v,V} = 2\ m^3/h$.

Proračun izmjenjivača topline izvršen je pomoću srednje logaritamske razlike temperatura. Pri tome se razmatra odnos između toplinskog toka, Φ, površine izmjenjivača, A i ulaznih i izlaznih temperatura dvaju razmatranih fluida.

Povećavanjem masenog protoka vode u cijevnom snopu od 0,277 kg/s na 0,416 kg/s i 0,554 kg/s dolazi do značajnog porasta Re značajke te se iz laminarnog režima strujanja u cijevima (Re < 2300) prelazi u prijelazno područje strujanja (2300 < Re < 10 000). U tablici 7 prikazane su vrijednosti Re značajke o karakterističnim veličinama fluida (voda) u cijevima.

Time se povećava koeficijent prijelaza topline α_i na strani vode u cijevima, što doprinosi povećanju ukupnog koeficijenta prijelaza topline, k, te smanjenju potrebne površine, A, za izmjenu topline, što je vidljivo iz postignutih vrijednosti prikazanih u tablici 8.

Uz najmanji maseni protok vode, $Q_{m,V} = 0$, 277 kg/s potrebna površina, A, za izmjenu topline iznosi 0,724 m^2. Raspoloživa površina za izmjenu topline za višecijevni izmjenjivač (engl. *shell and tube*) topline zadanih karakteristika iznosi $A_o = 0{,}752\ m^2$.

Iz navedenog se može zaključiti da prikazani izmjenjivač topline zadovoljava za navedene uvjete toplog i hladnog fluida, te se može koristiti za hlađenje zagrijanog mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi kugličnog mlina. Povećanjem volumnog protoka rashladne vode (hladniji fluid) dolazi do smanjenja potrebne površine za izmjenu topline što ukazuje da se može koristiti i izmjenjivač s dužinom cijevi manjom od L = 0,544 m.

4. ZAKLJUČCI

- Potrebna površina za izmjenu topline je manja od raspoložive te prikazani izmjenjivač topline cijevni snop u plaštu, tip 1-2, zadovoljava za navedene uvjete toplog i hladnog fluida, te se može koristiti za hlađenje zagrijanog mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi kugličnog mlina.

- Povećanjem protoka rashladne vode u cijevnom snopu dolazi do povećanja masene brzine vode u cijevima, a time do značajnog porasta Re značajke te se iz laminarnog režima strujanja u cijevima (Re < 2300) prelazi u prijelazno područje strujanja (2300 < Re < 10 000).

- Time se povećava koeficijent prijelaza topline α_i na strani vode u cijevima, što doprinosi povećanju ukupnog koeficijenta prijelaza topline, k, te smanjenju potrebne površine, A, za izmjenu topline.

5. LITERATURA

1. Lj. Slokar, Metalurgija praha i sinter materijali, Metalurški fakultet, Sisak, 2015., str. 8.
2. www.pbf.unizg.hr/content/download/2121/16013/.../mljevenje.ppt (25.05.2016.)
3. http://www.cis.org.rs/en/cms/about-cement/modern-production-of-potland-cement (25.05.2016.)
4. https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSBLTZf4P2DKTtZUgt_N3o7mzJExzL5kqLRx4uRJa-pU16CNxBV (25.05.2016.)
5. K. H. Decker, Elementi strojeva, III izdanje, Golden marketing, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.
6. A. Galović, Termodinamika II, V izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
7. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994, str. 149-200.
8. O. Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1994., str. 108.
9. F. Bošnjaković, Nauka o topline, II dio, IV izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
10. B. Đorđević, V. Valent, S. Šerbanović, Termodinamika i termotehnika, II izdanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
11. http://vode.rs/rashladne-vode/ (27.05.2016.)
12. Basic concepts of heat exchangers http://me1065.wikidot.com/automotive-heat-exchangers (27.05.2016.)
13. Heat Transfer by Heat Exchangers - Shell & Tube http://www.wermac.org/equipment/heatexchanger_part2.html (21.05.2016.)
14. Design and Development of the System http://infohouse.p2ric.org/ref/06/05796/42199/chapter3b.htm (25.07.2001.)
15. Tube bundle heat exchanger http://www.frpcoolingtower.co/tube-bundle-heat-exchanger.html (28.01.2016.)
16. Water to Oil Heat Exchangers–SA Series http://cooler.omtfiltri.com/water-to-oil-coolers-sa/ (27.05.2016.)

17. Shell and Tube Heat Exchangers: Introduction
http://facstaff.cbu.edu/rprice/lectures/shelltube.html (5.02.2003.)
18. 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