

Višecijevni 1-2 tip izmjenjivača topline

Bućma, Silvia

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:876864>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

VIŠECIJEVNI 1-2 TIP IZMJENJIVAČA TOPLINE

ZAVRŠNI RAD

SILVIA BUĆMA

Mat. br. 1308

Split, rujan 2021.

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

VIŠECIJEVNI 1-2 TIP IZMJENJIVAČA TOPLINE

ZAVRŠNI RAD

SILVIA BUĆMA

Mat. br. 1308

Split, rujan 2021.

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

SHELL&TUBE EXCHANGER, 1-2 TYPE

BACHELOR THESIS

SILVIA BUĆMA

Parent number: 1308

Split, September 2021.

Sveučilište u Splitu
Kemijско-tehnološki fakultet u Splitu
Preddiplomski studij kemijске tehnologije

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijско inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 6. Elektronskoj sjednici Fakultetskog vijeća Kemijско-tehnološkog fakulteta održanoj 15 i 16. prosinca 2020.

Mentor: prof. dr. sc. Vanja Martinac

Pomoć pri izradi:

VIŠECIJEVNI 1-2 TIP IZMJENJIVAČA TOPLINE

Silvia Bućma, broj indeksa 1308

Sažetak

Svrha ovog završnog rada je istražiti da li se industrijski MIT09 izmjenjivač topline, tip 1-2, duljine cijevi 770 mm može primijeniti za hlađenje mineralnog ulja, kojim se podmazuju klizni ležajevi na srednjem bloku rotacijske peći s vanjske i unutarnje strane južnog kućišta (8) na istočnoj strani peći. Mineralno ulje temperature 40 °C, dostrujava u prostor plašta volumnim protokom od 0,8 m³/h na unutarnjoj te 0,36 m³/h na vanjskoj strani kućišta. Kroz cijevni snop struji rashladna voda volumnim protokom 1,2 m³/h i ulazne temperature 25,1 °C, u dva prolaza. Raspored cijevi u cijevnom snopu je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran dok je strujanje vode u cijevnom snopu u prijelaznom području. Ispitivani višecijevni izmjenjivač MIT09 zadovoljava za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći i na vanjskoj i na unutarnjoj strani južnog kućišta (8) budući da je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu navedenog izmjenjivača. Ukoliko se protok ulja na vanjskoj strani poveća na 0,72 m³/h potrebna površina za izmjenu topline je i dalje manja u odnosu na raspoloživu površinu i navedeni izmjenjivač zadovoljava.

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

Rad sadrži: 56 stranica, 8 slika, 10 tablica, 19 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

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

Datum obrane: 17. rujna 2021.

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

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

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

Scientific area: Technical sciences

Scientific field: Chemical engineering

Thesis subject was approved by electronic Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, November 15th and 16th 2020.

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

Technical assistance:

SHELL&TUBE EXCHANGER, 1-2 TYPE

Silvia Bućma, parent number 1308

Abstract

The main purpose of this bachelor thesis is to determine whether the industrial MIT09 heat exchanger, type 1-2, pipe length 770 mm can be used for cooling mineral oil, which lubricates the plain bearings on the middle block of the rotary kiln on the outside and inside of the south basis (8) on the east side of the kiln. Mineral oil with the temperature of 40 °C flows into shell space with a volume flow 0.8 m³/h on the inside and 0.36 m³/h on the outside of the basis. Cooling water flows through the pipe bundle with the volume flow of 1.2 m³/h and with the inlet temperature of 25.1 °C in two passes. The arrangement of the pipes in the pipe bundle is in a triangle with a step off 13 mm with 9 baffles inside of the shell. The test of examination indicates that the flow regime in the shell is laminar while the water flow in the pipe bundle is in transition area. The examined multi-tube heat exchanger MIT09 satisfies for cooling the sliding bearings of the rotary kiln on both the outer and inner side of the southern basis (8) since the required heat exchange area is smaller than available area of the specified exchanger. If the oil flow on the outside increases to 0.72 m³/h, the heat exchange required area is still smaller than the available area and the specified exchanger satisfies.

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

Thesis contains: 56 pages, 8 figures, 10 tables, 19 references

Original in: Croatian

Defence committee:

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

Defence date: September 17th 2021.

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

Završni rad je izrađen u Zavodu za termodinamiku, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Vanje Martinac tijekom srpnja 2021.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Vanji Martinac na velikoj pomoći i ukazanom razumijevanju pri izradi ovog završnog rada, kao i profesorima koji su se srdačno trudili da od nas mladih naprave dobre buduće inženjere.

Također, zahvala ide mojim vjernim kolegama i prijateljima koji su postali kao obitelj i bili uz mene u najljepšim, kao i u onim ne tako lijepim trenutcima.

Posebno se želim zahvaliti svojoj obitelji na bezuvjetnoj ljubavi i podršci, prilikom cijelog života pa tako i studiranja, bez koje ne bih bila danas gdje jesam i osoba kakva jesam!

Silvia Bućma

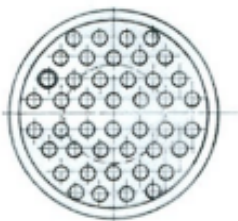
ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Potrebno je izvršiti hlađenje srednjeg bloka rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na istočnoj strani peći na južnom kućištu (pozicija 8) s vanjske i unutarnje strane kućišta korištenjem industrijskog MIT09 izmjenjivača topline, tip 1-2. Duljina cijevi u cijevnom snopu iznosi 770 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Fluid u plaštu je mineralno ulje, a kroz cijevni snop struji rashladna voda u dva prolaza. U cijevnom snopu su 44 bakrene cijevi, $\lambda_c = 386,12 \text{ W/(m K)}$, vanjskog promjera $d_o = 10 \text{ mm}$ i debljine $\delta = 1 \text{ mm}$. Vanjski promjer plašta iznosi $114,3 \times 3,6 \text{ mm}$.

Karakteristične veličine hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida na srednjem bloku rotacijske peći su:

Pozicija mjerenja				Izmjerene vrijednosti				
Blok peći	Položaj izmjenjivača	Kućište (br.)	Vodena strana	Temp. ulja na ulazu / °C	Δt_u / °C	Protok ulja / $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	Protok vode / $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	Temp. vode na ulazu / °C
Srednji blok peći	Istočna strana	južno (8)	unutarnja	40	8	0,80	1,2	25,1
			vanjska			0,36		

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



Odrediti potrebnu površinu prijenosa topline za industrijski MIT09 izmjenjivač i navedene uvjete rada.

Ako se protok ulja na vanjskoj strani južnog kućišta (8) poveća za dva puta odrediti potrebnu površinu prijenosa topline.

SAŽETAK

Svrha ovog završnog rada je istražiti da li se industrijski MIT09 izmjenjivač topline, tip 1-2, duljine cijevi 770 mm može primijeniti za hlađenje mineralnog ulja, kojim se podmazuju klizni ležajevi na srednjem bloku rotacijske peći s vanjske i unutarnje strane južnog kućišta (8) na istočnoj strani peći. Mineralno ulje temperature 40 °C, dostrujava u prostor plašta volumnim protokom od 0,8 m³/h na unutarnjoj te 0,36 m³/h na vanjskoj strani kućišta. Kroz cijevni snop struji rashladna voda volumnim protokom 1,2 m³/h i ulazne temperature 25,1 °C, u dva prolaza. Raspored cijevi u cijevnom snopu je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran dok je strujanje vode u cijevnom snopu u prijelaznom području. Ispitivani višecijevni izmjenjivač MIT09 zadovoljava za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći i na vanjskoj i na unutarnjoj strani južnog kućišta (8) budući da je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu navedenog izmjenjivača. Ukoliko se protok ulja na vanjskoj strani poveća na 0,72 m³/h potrebna površina za izmjenu topline je i dalje manja u odnosu na raspoloživu površinu i navedeni izmjenjivač zadovoljava.

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

SUMMARY

The main purpose of this bachelor thesis is to determine whether the industrial MIT09 heat exchanger, type 1-2, pipe length 770 mm can be used for cooling mineral oil, which lubricates the plain bearings on the middle block of the rotary kiln on the outside and inside of the south basis (8) on the east side of the kiln. Mineral oil with the temperature of 40 °C flows into shell space with a volume flow 0.8 m³/h on the inside and 0.36 m³/h on the outside of the basis. Cooling water flows through the pipe bundle with the volume flow of 1.2 m³/h and with the inlet temperature of 25.1 °C in two passes. The arrangement of the pipes in the pipe bundle is in a triangle with a step off 13 mm with 9 baffles inside of the shell. The test of examination indicates that the flow regime in the shell is laminar while the water flow in the pipe bundle is in transition area. The examined multi-tube heat exchanger MIT09 satisfies for cooling the sliding bearings of the rotary kiln on both the outer and inner side of the southern basis (8) since the required heat exchange area is smaller than available area of the specified exchanger. If the oil flow on the outside increases to 0.72 m³/h, the heat exchange required area is still smaller than the available area and the specified exchanger satisfies.

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

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. OPĆI DIO.....	2
1.1. PROIZVODNJA PORTLAND CEMENTA.....	2
1.2. ROTACIJSKA PEĆ.....	3
1.3. IZMJENJIVAČI TOPLINE.....	5
1.4. REKUPERATOR.....	7
1.5. IZMJENJIVAČ TOPLINE TIP 1-2.....	9
1.6. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE.....	10
1.6.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE.....	10
1.6.2. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE.....	14
1.6.3. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI.....	15
2. EKSPERIMENTALNI DIO.....	18
2.1. SREDNJI BLOK ROTACIJSKE PEĆI-ISTOČNA STRANA.....	21
2.1.1. UNUTARNJA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (8).....	21
2.1.1.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8).....	21
2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA UNUTARNJOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8).....	23
2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA NA UNUTARNJOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8).....	24
2.1.1.4. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ).....	26
2.1.1.5. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ).....	28
2.1.2. VANJSKA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (8).....	31
2.1.2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8).....	31
2.1.2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8).....	32
2.1.2.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8).....	33
2.1.2.4. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI – VANJSKA STRANA.....	34
2.1.2.5. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), VANJSKI IZMJENJIVAČ).....	36
2.1.3. VANJSKA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINEARALNOG ULJA NA 0,72 m ³ /h.....	39

2.1.3.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h.....	39
2.1.3.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h.....	40
2.1.3.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h.....	41
2.1.3.4. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), VANJSKI IZMJENJIVAČ) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h	43
2.1.3.5. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), VANJSKI IZMJENJIVAČ) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h	44
3. RASPRAVA.....	48
4. ZAKLJUČCI.....	51
5. LITERATURA.....	52
6. POPIS SIMBOLA	54

UVOD

Kemijsko inženjerstvo spoj je kemijskih i tehnoloških načela u svrhu kemijske proizvodnje. S obzirom da su poslovi kemijskog inženjera povezani s mnogim različitim područjima, nužno je poznavanje načela kemije i kemijskog inženjerstva, strojarstva, matematike, fizike, elektrotehnike i termodinamike. Ovaj posao je vrlo važan za industriju jer unapređenje bilo kojeg aspekta proizvodnje i pronalaženje optimalnog rješenja može dovesti do velikih ušteda na energiji i materijalu kao i do manjeg onečišćenja okoliša.

Prijenos topline osnovni je dio mnogih kemijskih procesa. Do prijenosa topline doći će između dvaju tijela (i/ili fluida) kada se oni nalaze na različitim temperaturama i to uvijek u smjeru prelaska topline s tijela više temperature na tijelo niže temperature. Postoje tri osnovna mehanizma prijenosa topline: kondukcija ili provođenje topline, konvekcija ili strujanje topline te radijacija ili toplinsko zračenje.

U praksi, najčešća je kombinacija konvekcije i kondukcije. Toplina s toplijeg fluida (u njemu se toplina prenosi konvekcijom) prenosi se na neko čvrsto tijelo, tj. pregradnu stijenku, zatim se kondukcijom toplina provodi kroz stijenku i ponovno s druge strane stijenke prenosi na hladniji fluid. Takva kombinacija mehanizama prijenosa topline naziva se prolaz topline i prisutna je u toplinskim uređajima kao što su izmjenjivači topline (IT).

Dobar inženjer mora poznavati oblike i zakone prijenosa topline da bi mogao ubrzati prijenos topline gdje je to moguće i ekonomski isplativo, ali i onemogućiti prijenos topline ukoliko će time spriječiti gubitke koji su uglavnom nepoželjni.

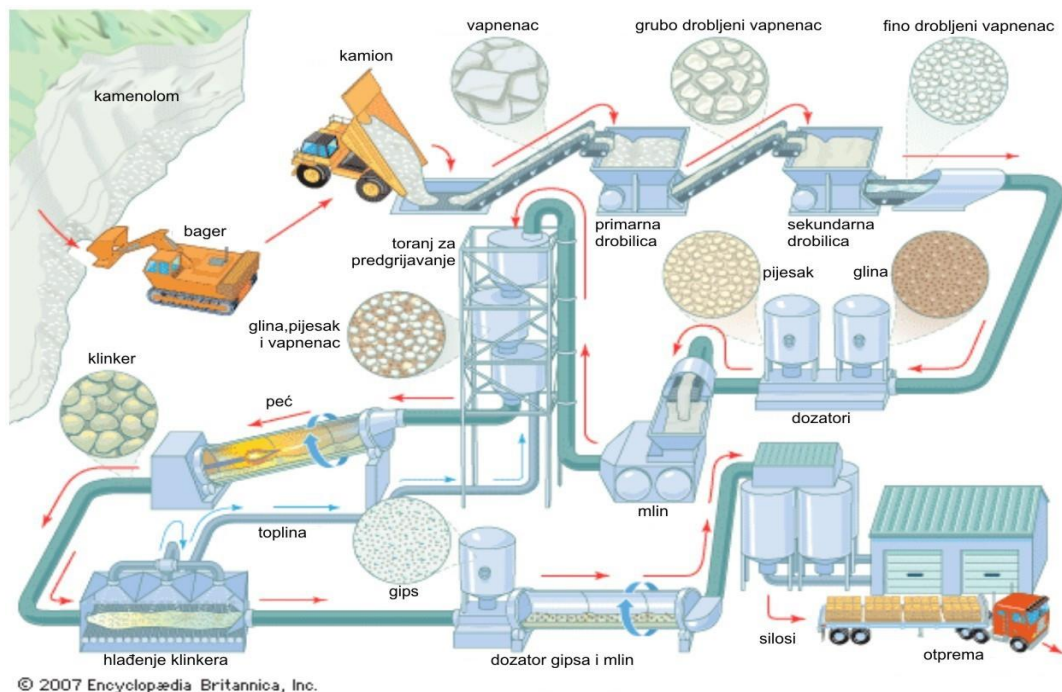
Cilj ovog završnog rada je ispitati mogućnosti i karakteristike MIT09 izmjenjivača topline, tipa 1-2, kojem je svrha hlađenje mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći pri proizvodnji Portland cementa.

1. OPĆI DIO

1.1. PROIZVODNJA PORTLAND CEMENTA

Cement ¹ je zajednički naziv za sva veziva s izraženim hidrauličkim svojstvima što znači da u dodiru s vodom daju čvrste i netopljive produkte koji se koriste prvenstveno u građevinarstvu za proizvodnju betona i mortova. Cementi se mogu podijeliti na silikatne i aluminatne (ovisno o tome jesu li glavni minerali klinkera silikati ili kalcijevi aluminati), a u silikatne cemente pripada Portland cement.

Shematski prikaz proizvodnje Portland cementa¹ prikazan je na slici 1.1.



Slika 1.1. Shematski prikaz proizvodnje Portland cementa¹

Iz slike 1.1. je vidljivo da proizvodni proces obuhvaća sljedeće faze:

1. Eksploatacija mineralnih sirovina (najčešće vapnenac i lapor) iz kamenoloma – dobiva se materijal nejednolikog kemijskog i granulometrijskog sastava

2. Oplemenjivanje i homogenizacija mineralnih sirovina za proizvodnju klinkera – sirovina se usitjava na potrebnu granulaciju, a zatim homogenizira (ujednačeni kemijski sastav je vrlo bitan za kvalitetu i svojstva cementa)
3. Miješanje mineralnih sirovina i proizvodnja klinkera – mljevenje i miješanje doziranih sirovina u rotacijskoj peći pri temperaturi od 1400 °C do 1500 °C pri čemu nastaje klinker¹
4. Mljevenje klinkera i dodavanje aditiva te pakiranje cementa

1.2. ROTACIJSKA PEĆ

Rotacijska peć¹ (slika 1.2) je čelični cilindar u kojem pod utjecajem visokih temperatura dolazi do kontinuirane rotacije sirovine oko uzdužne osi peći pri čemu nastaje klinker.

Rotacijska peć može biti dužine do 200 metara te promjera od nekoliko metara. Peć je uobičajeno nagnuta na jednu stranu te s višeg, hladnijeg kraja ulazi sirovina, dok se na suprotnom, nižem kraju nalazi plamenik.

Uslijed rotacije, dolazi do miješanja sirovine, a zbog nagnutosti rotacijske peći, ona pada prema nižem, toplijem kraju peći. Nagib rotacijske peći uglavnom se kreće između 2–6 % i olakšava rotaciju sirovine oko uzdužne osi, kao i njeno kretanje prema dnu peći. Sirovina i toplina, koja dolazi od plamenika, kreću se u suprotnim smjerovima i na taj način osigurava se kontinuirani rast temperature unutar peći.

Rotacijska peć oslanja se na nosive prstenove koji su izloženi velikim dinamičkim opterećenjima. Opterećenja potiču od same težine peći, rotacije peći i temperaturnih gradijenata.³

Osovine i vratila (imaju ulogu nošenja mirujućih ili rotirajućih strojnih dijelova) imaju oslonce u kliznim ležajevima (slika 1.3). Prilikom rotacije javlja se trenje između površina koje se dodiruju te da bi se taj otpor smanjio i spriječilo zagrijavanje tarnih površina, klizni ležajevi se podmazuju. Kako bi se olakšalo klizanje površina nalijeganja, ali i smanjilo, i ako je moguće spriječilo trošenje, upotrebljavaju se maziva.



Slika 1.2. Rotacijska peć za proizvodnju cementa²

Maziva se nanose na klizna mjesta, prijanjaju uz materijale te razdvajaju hrapavošću izazvane međusobne neravnosti površina nalijeganja. Trebaju imati nisku unutarnju žilavost, ne smiju nagrizati materijale i trebaju ih štiti od korozije te po mogućnosti prenositi pritisak, hladiti, brtviti i štiti maziva mjesta od nečistoća i vode.⁴

Od maziva, najčešće se koriste tekuća maziva, tj. ulja i to mineralna ulja. Prilikom klizanja dviju podmazanih površina jedne po drugoj, istovremeno se pomiču i slojevi ulja. Što je trenje između površina veće, žilavost ulja je veća. Ta žilavost se zove viskozitet. S porastom temperature, viskozitet se smanjuje i ulja postaju rjeđa. Zbog toga je uvijek bitno naznačiti koliki je viskozitet pri određenoj temperaturi, odnosno ovisnost viskoziteta o temperaturi.

Najidealnije je hidrodinamičko podmazivanje (potreban tlak za nošenje stvara se samo gibanjem tijela) jer se tada ne troše klizne površine. Najsigurnije je cirkulacijsko podmazivanje jer njime ulje koje cirkulira istodobno hladi ležajeve. Podmazivanje se obavlja pomoću jedne pumpe preko sustava cijevi na način da ulje koje otječe, filtrira se, u određenim slučajevima hladi i sakuplja u spremnike. To ulje se ponovno pumpa u sustav i time se osigurava cirkulacijsko podmazivanje.

Kako je već poznato na kliznim ležajevima dolazi do trenja između kliznih površina i prilikom toga dolazi do zagrijavanja tekućeg maziva, tj. mineralnog ulja. Zbog toga je ulje potrebno ohladiti, najčešće rashladnom vodom. Glavnu ulogu u tome imaju izmjenjivači topline.



Slika 1.3. Klizni ležajevi rotacijske peći⁵

1.3. IZMJENJIVAČI TOPLINE

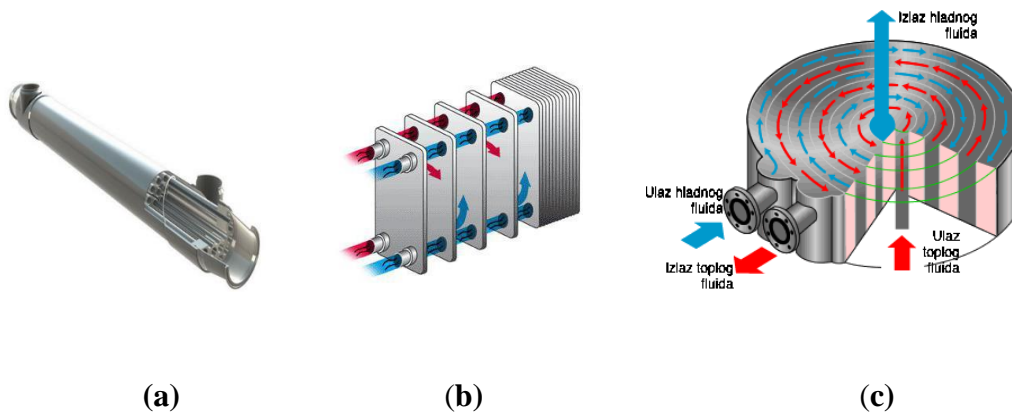
Izmjena topline između dva medija čest je zadatak u inženjerskoj praksi. Tu ulogu obavljaju izmjenjivači topline⁶⁻¹¹, uređaji u kojima se prenosi toplina između dva ili više fluida radi zagrijavanja ili ohlađivanja jednog fluida drugim.

Široko su rasprostranjeni u postrojenjima centralnog grijanja (služe za grijanje prostora, hlađenje, klimatizaciju), u postrojenjima za pripremu potrošne tople vode kao i u raznim kemijskim i petrokemijskim postrojenjima gdje se primjenjuju u rashladnoj tehnici kao isparivači ili kondenzatori.

Podjela izmjenjivača topline prema njihovoj primjeni:

- izmjenjivači topline bez promjene faze – niti jedan od fluida koji struji kroz izmjenjivač topline ne mijenja svoje agregatno stanje te svaki od fluida izmjenjuje svoju toplinu s drugim. Zbog toga se i jednom i drugom fluidu mijenja temperatura sve vrijeme izmjene topline.
- izmjenjivači topline s promjenom faze – prijelaz faze uglavnom je između kapljevito i plinovito fluida. Ovisno o tome vrši li se isparivanje ili kondenzacija, postoje isparivači (parni kotlovi) i kondenzatori (kondenzator vodene pare).

Podjela izmjenjivača prema konstrukciji prikazana je na slici 1.4.



Slika 1.4. Cijevni¹²(a), pločasti¹³ (b) te spiralni¹⁴(c) izmjenjivač topline

Podjela izmjenjivača prema načinu izmjene topline:

- izmjenjivači topline s direktnim kontaktom fluida – u ovom slučaju dolazi do direktnog kontakta između toplijeg i hladnijeg fluida, odnosno miješanja, a nakon izmjene topline fluidi se mogu relativno lako odijeliti
- izmjenjivači 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. Takvi izmjenjivači topline nazivaju se rekuperatorima.

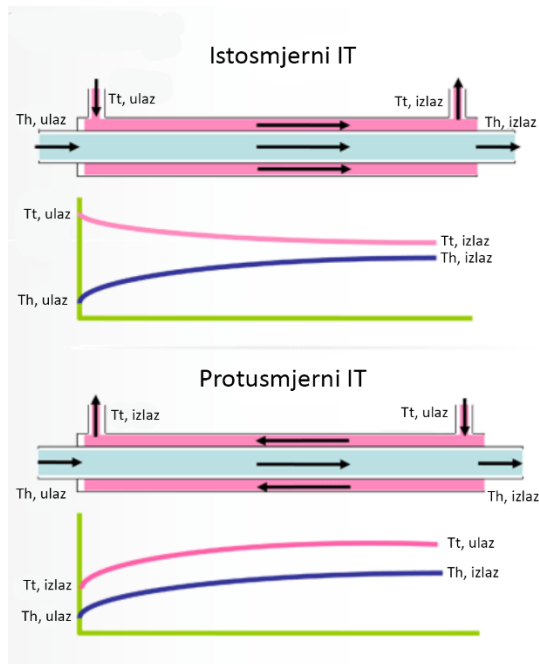
1.4. REKUPERATOR

Rekuperatori su izmjenjivači topline kod kojih su struje, koje mogu biti kapljevine ili plinovi, odvojeni čvrstom stijenkom. Kod takvih uređaja čvrsta stijenka predstavlja rashladnu, tj. ogrjevnu površinu i sprječava izravni kontakt fluida. Izmjena topline odvija se na način da se konvekcijom toplina prenosi sa toplijeg fluida na čvrstu stijenku, zatim kroz stijenku toplina se prenosi kondukcijom i naposljetku toplina se opet prenosi konvekcijom sa stijenke na hladniji fluid. Ovakav način izmjene topline naziva se prolazom topline i njime je omogućeno hlađenje toplijeg fluida, odnosno zagrijavanje hladnijeg fluida. Do prijenosa topline doći će uslijed razlike temperatura između dvaju fluida, tj. kada postoji ΔT . Ta razlika temperatura predstavlja pokretačku silu prijenosa topline.

Rekuperatori se, prema smjeru strujanja fluida, dijele na:

- istosmjerne – oba fluida ulaze na istoj strani izmjenjivača i struje u istom smjeru; kod njih je iskorištenost površine za izmjenu topline najmanja jer je intezitet prijenosa topline proporcionalan razlici temperatura koja je najveća na početku izmjenjivača, a zatim se sve više smanjuje
- protusmjerne – fluidi ulaze na suprotnim stranama izmjenjivača te struje u suprotnim smjerovima; razlika temperatura je uglavnom ujednačena duž cijelog izmjenjivača te je iskorištenost površine za izmjenu topline najveća
- unakrsne ili križne – strujanje jednog fluida okomito je na smjer strujanja drugog fluida.

Na slici 1.5 dat je prikaz istosmjernog i protusmjernog izmjenjivača topline, tj. rekuperatora¹⁵.



Slika 1.5. Prikaz istosmjernog i protusmjernog strujanja fluida¹⁵

U industriji, razlikuje se više tipova višecijevnih izmjenjivača topline:

- a) U–cijevni izmjenjivači
- b) izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi
- c) izmjenjivači s plutajućom glavom
- d) kotlasti izmjenjivači (rebojleri)

Na slici 1.6 (a) prikazan je U–cijevni izmjenjivač¹⁶, a na slici 1.6 (b) izmjenjivač s učvršćenim snopom cijevi¹⁷.



(a)



(b)

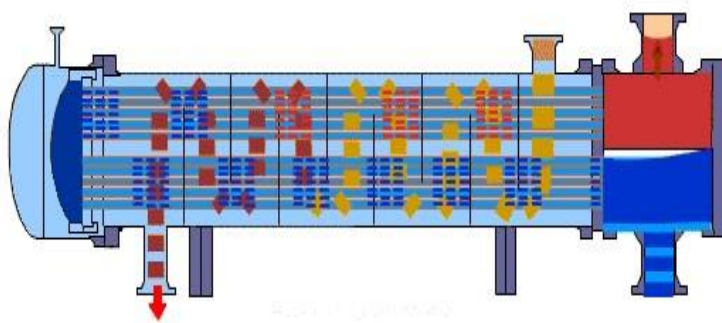
Slika 1.6. U–cijevni izmjenjivač¹⁶ (a) i izmjenjivač topline s učvršćenim snopom cijevi¹⁷ (b)

1.5. IZMJENJIVAČ TOPLINE TIP 1-2

Višecijevni izmjenjivači topline sastoje se od plašta i određenog broja cijevi. Kroz plašt prolazi topliji fluid, a kroz cijevi hladniji fluid. U praksi se najčešće koriste izmjenjivači topline kod kojih je moguće da svaka struja više puta prolazi kroz plašt, odnosno cijevi. Tako se razlikuju izmjenjivači tipa 1-2, 1-4, 1-8, 2-4 itd.

Kod izmjenjivača topline tipa 1-2 (slika 1.7), prvi broj označava broj prolazaka toplijeg fluida kroz plašt, a drugi broj označava broj prolazaka hladnijeg fluida kroz cijevi. Prema tome, kod izmjenjivača topline tipa 1-2, topliji fluid prolazi jednom kroz plašt, dok hladniji fluid prolazi dvaput kroz cijevi.

Unutar plašta nalaze se pregrade koje imaju ulogu preusmjeravanja fluida te da nema njih dolazilo bi do stagniranja fluida u plaštu.



Slika 1.7. Izmjenjivač topline tipa 1-2¹⁰

Pregrade također podupiru cijevi kako bi se minimalizirale vibracije te samim time i oštećenja cijevi.

Veći broj prolaza fluida kroz cijevi koristi se kako bi se povećala brzina prolaska fluida kroz cijevi kao i koeficijent prijenosa topline. Također, smanjuje se veličina izmjenjivača topline te samim time i proizvodni troškovi. Prednost ovog načina dizajna izmjenjivača topline je i u tome što fluid može ući i izaći na istoj strani što čini konstrukciju puno jednostavnijom.

1.6. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE

1.6.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Izmijenjeni toplinski tok^{7,11,18} u rekuperatoru ovisi o sljedećim varijablama:

$$\Phi = f(K, A_o, t_1', t_1'', t_2', t_2'', C_1, C_2) \quad (1)$$

gdje je:

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

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

A_o – ukupna površina prijenosa topline, m²

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

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

t_1' – ulazna temperatura slabije struje, °C

t_1'' – izlazna temperatura slabije struje, °C

t_2' – ulazna temperature jače struje, °C

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

Prema dogovoru, slabija struja je ona koja ima manju vrijednost toplinskog kapaciteta C te njoj se pridružuje indeks 1, tj.

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

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

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

gdje je:

$Q_{m,i}$ – maseni protok pojedine struje fluida, kg/s

$c_{p,i}$ – specifični toplinski kapacitet pojedine struje fluida pri konstantnom tlaku, J/(kg K)

Vrijedi omjer:

$$0 \leq \frac{c_1}{c_2} = \frac{Q_{m,1} \cdot c_{p,1}}{Q_{m,2} \cdot c_{p,2}} \leq 1 \quad (4)$$

Također, za ulazne temperature fluida upotrebljava se apostrof ' , a za izlazne temperature fluida upotrebljava se apostrof '' .

Toplinski tok za svaki fluid može se izraziti toplinsko-bilansnom jednačbom, tj.

– za topliji fluid

$$\Phi_T = \dot{Q}_T = Q_{m,T} \cdot c_{p,T} \cdot (T_{T1} - T_{T2}) = Q_{v,T} \cdot \rho_T \cdot c_{p,T} \cdot \Delta T_T = C_T \cdot \Delta T_T \quad (5)$$

– za hladniji fluid

$$\Phi_H = \dot{Q}_H = Q_{m,H} \cdot c_{p,H} \cdot (T_{H1} - T_{H2}) = Q_{v,H} \cdot \rho_H \cdot c_{p,TH} \cdot \Delta T_H = C_H \cdot \Delta T_H \quad (6)$$

$$C = Q_v \cdot \rho \cdot c_p = q_m \cdot c_p \quad (7)$$

gdje je:

ΔT – razlika temperature koju doživi pojedini fluid, K

Q_v – volumni protok fluida, m³/h

q_m – masena brzina fluida, kg/(s m²)

Uz pretpostavku da nema toplinskih gubitaka slijedi:

$$\Phi = \dot{Q} = C_T \cdot (T_{T1} - T_{T2}) = C_H \cdot (T_{H1} - T_{H2}) \quad (8)$$

Dakle, dobije se omjer kapacitivnih brzina:

$$\frac{C_T}{C_H} = \frac{(T_{T1} - T_{T2})}{(T_{H1} - T_{H2})} \quad (9)$$

Iz jednačbe proizlazi da će veću temperaturnu promjenu u izmjenjivaču doživjeti fluid s manjom kapacitivnom brzinom.

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

$$\delta \Phi = \delta \dot{Q} = K \cdot (T_T - T_H) \cdot dA \quad (10)$$

gdje je:

K – koeficijent prolaza topline (ili ukupni koeficijent prijenosa topline) kroz diferencijalnu površinu dA izmjenjivača topline, W/(m² 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:

$$\delta\Phi = K \cdot (T_T - T_H) \cdot dA = \delta\Phi_T = \delta\Phi_H \quad (11)$$

$$\delta\Phi_T = - C_T \cdot dT_T \quad (12)$$

$$\delta\Phi_H = - C_H \cdot dT_H \quad (13)$$

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).

Srednja logaritamska razlika temperatura definirana je izrazom:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (14)$$

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

ΔT_m iz jednadžbe (14) vrijedi za izmjenjivače topline sa samo jednim prolazom fluida kroz cijevi i plašt. Međutim, izmjenjivači se najčešće konstruiraju tako da postoji više prolaza kroz cijevi i/ili plašt (izmjenjivač topline tipa 1-2, 1-4, itd.). Zbog toga često dolazi do križanja, odnosno u jednom dijelu cijevi i plašta hladniji fluid će imati višu temperaturu od toplijeg fluida. U takvim slučajevima ΔT_m korigira se sa korekcijskim faktorom F . Isti se može očitati iz dijagrama ovisnosti $F = f(P, R)$, gdje parametar P predstavlja toplinsku efikasnost hladnog fluida, a parametar R omjer kapacitivnih brzina. Preporučuje se da korekcijski faktor ne bude manji od 0,75 jer u tom slučaju treba pokušati s izmjenjivačem s više prolaza fluida kroz plašt.

Korigirana srednja logaritamska razlika temperatura, nakon što se odredi korekcijski faktor F , bit će:

$$\Delta T_{m, kor} = F \cdot \Delta T_m \quad (15)$$

Faktor korekcije, F , je funkcija dva bezdimenzijska omjera, R i P , tj. $F = f(P, R)$ i određuje se korištenjem izraza:

$$F = \left[\frac{(R^2 + 1)^{1/2}}{R - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - P_n}{1 - R \cdot P_n} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{2}{P_n} \right)^{-1 - R} + (R^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{P_n} \right)^{-1 - R} - (R^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \right]} \quad (16)$$

Parametar P je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} \quad (17)$$

Parametar R jednak je omjeru kapacitivnih brzina, kako je prikazano izrazom (9):

$$\frac{C_T}{C_H} = \frac{(T_{T1} - T_{T2})}{(T_{H1} - T_{H2})}$$
$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t'_1 - t''_1}{t''_2 - t'_2} \quad (18)$$

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} \quad (19)$$

gdje n predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt.

Osnovna jednadžba za proračun izmjenjivača topline je:

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (20)$$

odnosno, za višecijevni izmjenjivač gdje je potrebno izračunati korekcijski faktor F , slijedi:

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta T_{m, kor} \quad (21)$$

gdje je:

Φ – toplinski tok ili fluks, kJ/h

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

A – površina prijenosa topline, m²

$\Delta T_{m, kor}$ – korigirana srednja logaritamska razlika temperatura, K

1.6.2. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE

Koeficijent prolaza topline¹¹ ili ukupni koeficijent prijenosa topline bitna je veličina koja ovisi o više stavki: koeficijentima prijenosa topline unutarnje i vanjske stijenke cijevi, geometriji, otporima koji se javljaju uslijed onečišćenja te toplinskoj provodnosti.

Računa se iz izraza:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_i \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}} \quad (22)$$

gdje je:

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

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

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

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

r_c – otpor prijenosu topline stijenke cijevi, tj. recipročna vrijednost toplinske vodljivosti materijala, od kojeg je načinjena cijev, pomnožena s debljinom stijenke (m² K)/W

A_o/A_i – omjer vanjske i unutarnje površine cijevi

U izrazu (22) za koeficijent prolaza topline, kao i u izrazima (2) i (3) za toplinske kapacitete pojedinih struja, pojavljuju se fizikalna svojstva struja (fluida). S obzirom da fizikalna svojstva ovise o temperaturi, ona se uzimaju iz toplinskih tablica¹⁹. Stoga je potrebno izračunati srednju temperaturu fluida koja predstavlja aritmetičku sredinu ulazne i izlazne temperature, odnosno:

$$t_m = \frac{t' + t''}{2} \quad (23)$$

gdje je:

t_m – aritmetička sredina temperatura fluida, °C

t' i t'' – ulazna i izlazna temperatura fluida, °C

1.6.3. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI

Za koeficijent prijenosa topline¹¹ kada ne dolazi do promjene faza, u praksi se koriste odgovarajuće jednadžbe koje ovise o načinu strujanja fluida, odnosno o tome je li laminarno, prijelazno ili turbulentno područje.

Za slučaj laminarnog strujanja ($Re < 2300$), upotrebljava se Sieder–Tateova jednadžba:

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

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (25)$$

$$Re = \frac{\omega \cdot d_i \cdot \rho}{\mu} = \frac{q_m \cdot d_i}{\mu} \quad (26)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (27)$$

gdje je:

Nu – Nusseltova značajka

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

d_i – unutarnji promjer cijevi, m

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

Pe – Pecletova značajka

Re – Reynoldsova značajka

Pr – Prandtlova značajka

L – duljina cijevi, m

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

μ – viskoznost, 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/(m² h)

Za slučaj prijelaznog područja ($2300 < Re < 10\ 000$), upotrebljava se Hausenova jednačica:

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right]}{Re} \cdot Pr^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (28)$$

Za slučaj turbulentnog strujanja ($Re > 10\ 000$), upotrebljava se izraz:

$$Nu = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 0,027 \cdot (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (29)$$

Cijevi u cijevnom snopu mogu biti ugrađene različitim rasporedima, a najčešći su: raspored u trokutu, kvadratni raspored te rotirani kvadratni rasporedi.

Duljina stranice trokuta ili kvadrata, koje čine tri ili četiri susjedne cijevi naziva se korak cijevi, c .

Ekvivalentni promjer cijevi, za kvadratni i rotirani kvadratni raspored cijevi u cijevnom snopu, računa se iz izraza:

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(c^2 - \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} \right)}{d_0 \cdot \pi} \quad (30)$$

Za raspored cijevi u trokutu iz izraza:

$$d_e = \frac{1,1 \cdot (c^2 - 0,917 \cdot d_0^2)}{d_0} \quad (31)$$

Masena brzina fluida u plaštu, q_m iz izraza:

$$q_m = \frac{Q_m}{A_s} \quad (32)$$

gdje je:

Q_m – maseni protok fluida, kg/h

A_s – slobodna površina presjeka cijevnog snopa, m^2

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa se računa iz izraza:

$$A_s = \frac{d_{pl} \cdot l_{pr} \cdot (c - d_o)}{c} \quad (33)$$

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

Za strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu¹⁸ koeficijent prijenosa topline dan je jednadžbom:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_i}{\lambda} = C \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^m \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (34)$$

Konstante C , n i m ovise o režimu strujanja i rasporedu cijevi te za laminarno strujanje gornja jednadžba će biti:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_i}{\lambda} = 0,56 \cdot (Re)^{0,50} \cdot (Pr)^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (35)$$

Koeficijent prijenosa topline izračunat iz jednadžbe (35) vrijedi za treći red te redove nakon njega u snopu cijevi jer kod prvog i drugog reda je nedovoljno razvijeno strujanje pa samim time i prijenos topline.

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline, za snop od N , računa se iz izraza:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot \alpha_o \cdot N_1 + 0,7 \cdot \alpha_o \cdot N_2 + \alpha_o \cdot [N - (N_1 + N_2)]}{N} \quad (36)$$

gdje je:

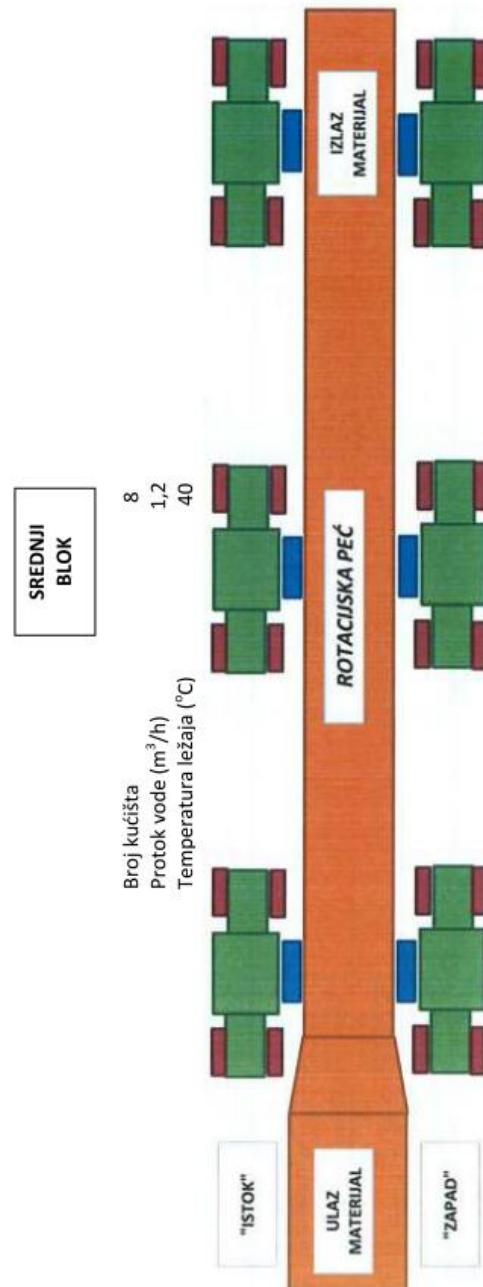
N_1 – broj cijevi u prvom redu

N_2 – broj cijevi u drugom redu

N – ukupan broj cijevi

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Shema rotacijske peći prikazana je na slici 2.1. Iz slike je vidljiva pozicija južnog (8) kućišta na srednjem bloku rotacijske peći, za koju je potrebno ispitati primjenu industrijskog višecijevnog izmjenjivača topline MIT09 s vanjske i unutarnje strane.



Slika 2.1. Prikaz temperature, protoka rashladne vode i broj kućišta rotacijske peći na srednjem bloku (južna strana) – kućište (8)

Iz slike 2.1 se uočava da se razmatra položaj izmjenjivača na južnom kućištu (kućište broj 8) srednjeg bloka rotacijske peći u smjeru istok i to s vanjske i unutarnje strane kućišta po jedan izmjenjivač topline.

Poprečna površina presjeka cijevi, a_c , u ispitivanom MIT09 je:

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

Ukupna poprečna površina presjeka cijevi, A_c , iznosi:

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

Ekvivalentni promjer cijevi, d_e :

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

$$d_e = 8,503 \text{ mm} = 0,008503 \text{ m}$$

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa, A_s , ovisi o razmaku između pregrada, l_{pr} , ovisno o dužini cijevi L i broju pregrada N_{pr} .

$$A_s = \frac{d_{pl} \cdot l_{pr} \cdot (c - d_o)}{c} = \frac{107 \cdot l_{pr} \cdot (13 - 10)}{13} = \frac{107 \cdot 85,56 \cdot (13 - 10)}{13}$$

$$A_s = 2113 \text{ mm}^2$$

$$l_{pr} = \frac{L}{N_{pr}} = \frac{770}{9} = 85,56 \text{ mm}$$

U tablici 2.1 prikazane su karakteristične veličine za ispitivani višecijevni izmjenjivač topline MIT09.

Tablica 2.1. Karakteristične veličine za pojedini ispitivani višecijevni izmjenjivač topline, tip 1-2

Tip izmjenjivača	Duljina cijevi u cijevnom snopu, L / mm	Broj pregrada u plaštu, N_{pr}	$l_{\text{pr}} / \text{mm}$	A_s / mm^2	$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c / \text{m}^2$
MIT 09	770	9	85,56	2113	1,064

Cijevni snop u plaštu izmjenjivača sastoji se od 44 bakrene cijevi, $\lambda_c = 386,12 \text{ W}/(\text{m K})$. Raspored cijevi u cijevnom snopu je u trokutu s korakom od 13 mm.

Vanjski promjer plašta $114 \times 3,6 \text{ mm}$

Unutarnji promjer plašta, $d_{\text{pl}} = 114 - 3,6 \cdot 2 = 107 \text{ mm}$

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

Debljina cijevi, $\delta = 1 \text{ mm}$

Unutarnji promjer cijevi, $d_i = 10 - 1 \cdot 2 = 8 \text{ mm}$

Broj cijevi u prvom redu, $N_1 = 7$

Broj cijevi u drugom redu, $N_2 = 6$

Karakteristične veličine hladnog i toplog fluida na srednjem bloku rotacijske peći prikazane su u tablici 2.2.

Tablica 2.2. Karakteristične veličine hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida na srednjem bloku rotacijske peći

Pozicija mjerenja				Izmjerene vrijednosti				
Blok peći	Položaj izmjenjivača	Kućište (br.)	Vodena strana	Temp. ulja na ulazu / °C	$\Delta t_U / ^\circ\text{C}$	Protok ulja / $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	Protok vode / $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	Temp. vode na ulazu / °C
Srednji blok peći	Istočna strana	južno (8)	unutarnja	40	8	0,80	1,2	25,1
			vanjska			0,36		

Topli fluid (mineralno ulje) temperature 40 °C u prostor plašta dostrujava volumnim protokom od 0,80 m³/h na unutarnjoj te 0,36 m³/h na vanjskoj strani kućišta, a treba se ohladiti za $\Delta T_U = 8$ K.

Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda volumnim protokom 1,2 m³/h i ulazne temperature 25,1 °C.

2.1. SREDNJI BLOK ROTACIJSKE PEĆI-ISTOČNA STRANA

2.1.1. UNUTARNJA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (8)

2.1.1.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8)

Iz zadanih podataka slijedi:

Ulazna temperatura mineralnog ulja, $t'_U = 40$ °C

Razlika u temperaturi ulja, $\Delta t_U = 8$ °C = 8 K

Volumni protok mineralnog ulja, $Q_{v,U} = 0,8$ m³/h

Ulazna temperatura rashladne vode, $t_V' = 25,1$ °C

Volumni protok rashladne vode, $Q_{v,V} = 1,2$ m³/h

Slijedi da je izlazna temperatura ulja:

$$\Delta t_U = t'_U - t''_U \quad \rightarrow \quad t''_U = t'_U - \Delta t_U = (40 - 8) \text{ °C} = 32 \text{ °C}$$

Fizikalna svojstva ulja¹⁹ uzimaju se za srednju temperaturu ulja:

$$t_{m,U} = \frac{t'_U + t''_U}{2} = \frac{40 + 32}{2} = 36 \text{ °C}$$

Srednja temperatura ulja, 36 °C, ne nalazi se u tablicama¹⁹ te je potrebno izvršiti interpolaciju. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 2.3.

Tablica 2.3. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi 36 °C:

$t / ^\circ\text{C}$	36 °C
$\rho_u / \text{kg/m}^3$	860,60
$c_{p,u} / \text{kJ}/(\text{kg K})$	1,9172
$\lambda_u / \text{W}/(\text{m K})$	0,1432
$\nu_u / \text{m}^2/\text{s}$	$6,344 \cdot 10^{-6}$
$^*\mu_u / (\text{N s})/\text{m}^2$	$5459,65 \cdot 10^{-6}$

$$^*\mu = \nu \cdot \rho$$

Fizikalna svojstva rashladne vode pri temperaturi 25,1 °C, prikazana su u tablici 2.4.

Tablica 2.4: Fizikalna svojstva rashladne vode pri temperaturi 25,1 °C:

$t / ^\circ\text{C}$	25,1 °C
$\rho_v / \text{kg/m}^3$	996,47
$c_{p,v} / \text{kJ}/(\text{kg K})$	4,18098
$\lambda_v / \text{W}/(\text{m K})$	0,605395
$\nu_w / \text{m}^2/\text{s}$	$0,92024 \cdot 10^{-6}$
$\mu_v / \text{Ns}/\text{m}^2$	$916,8916 \cdot 10^{-6}$

Toplinski kapacitet mineralnog ulja (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – unutarnji izmjenjivač) je:

$$C_U = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$
$$C_U = \frac{0,8}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9172 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$
$$C_U = 0,367 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 367 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet rashladne vode (ulazni blok istočna strana, kućište južno (8) – unutarnji izmjenjivač)

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

$$C_V = \frac{1,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18098 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1,389 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 1389 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Mineralno ulje je slabija struja i nosi oznaku 1, a rashladna voda je jača struja i nosi oznaku 2.

Stoga, oznake su sljedeće:

$$C_U = C_1 = 367 \text{ W/K}$$

$$C_V = C_2 = 1389 \text{ W/K}$$

t_1' – ulazna temperatura mineralnog ulja

t_1'' – izlazna temperatura mineralnog ulja

t_2' – ulazna temperatura rashladne vode

t_2'' – izlazna temperatura rashladne vode

2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA UNUTARNJOJ STRANI– JUG – KUĆIŠTE (8)

Izmijenjeni toplinski tok (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – unutarnji izmjenjivač), će biti:

$$\phi_U = C_1 \cdot (t_1'' - t_1') = C_1 \cdot \Delta T_U = 367 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (-8)\text{K} = -2933 \text{ W}$$

Toplina koju prima rashladna voda je toplina koju predaje mineralno ulje:

$$\phi_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = 2933 \text{ W}$$

$$\phi_V = 1389 \cdot (t_2'' - 25,1) = 2933 \text{ W}$$

$$t_2'' = 27,21 \text{ }^\circ\text{C}$$

Promjena temperature vode:

$$\Delta t_V = t_2'' - t_2' = 27,21 - 25,1 = 2,11 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva rashladne vode za daljnji proračun se uzimaju pri srednjoj temperaturi vode, tj.:

$$t_{m,v} = \frac{t_2' + t_2''}{2} = \frac{25,1 + 27,21}{2} = 26,16 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti za fizikalne karakteristike rashladne vode pri srednjoj temperaturi 26,16 °C prikazane su u tablici 2.5.

Tablica 2.5. Fizikalna svojstva rashladne vode pri srednjoj temperaturi 26,16 °C

$t / ^\circ\text{C}$	26,16 °C
$\rho_V / \text{kg/m}^3$	996,152
$c_{p,V} / \text{kJ}/(\text{kg K})$	4,180768
$\lambda_V / \text{W}/(\text{m K})$	0,606932
$\nu_V / \text{m}^2/\text{s}$	$0,901584 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / \text{Ns}/\text{m}^2$	$898,1147 \cdot 10^{-6}$

2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA NA UNUTARNJOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8)

Srednja logaritamska razlika temperatura:

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

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,u} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,v} = 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$) za unutarnji izmjenjivač – jug- kućište (8) slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 40 - 27,21 = 12,79 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 32 - 25,1 = 6,9 \text{ K}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta T_m = \frac{12,79 - 6,9}{\ln\left(\frac{12,79}{6,9}\right)} = 9,54 \text{ K}$$

Izračun korekcijskog faktora, F:

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

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

Parametar P predstavlja toplinsku efikasnost hladnog fluida i računa se:

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{27,21 - 25,1}{40 - 25,1} = 0,142$$

Parametar R predstavlja omjer kapacitivnih brzina i računa se:

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{40 - 32}{27,21 - 25,1} = 3,79$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{3,79 \cdot 0,142 - 1}{0,142 - 1}\right)^{1/1}}{3,79 - \left(\frac{3,79 \cdot 0,142 - 1}{0,142 - 1}\right)^{1/1}} = 0,142$$

Slijedi da je korekcijski faktor, F :

$$F = \left[\frac{(3,79^2 + 1)^{1/2}}{3,79 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,142}{1 - 3,79 \cdot 0,142}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,142}\right) - 1 - 3,79 + (3,79^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,142}\right) - 1 - 3,79 - (3,79^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,967$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F = 9,54 \cdot 0,967 = 9,23 \text{ K}$$

2.1.1.4. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ)

Karakteristike cijevi:

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

Debljina cijevi, $\delta = 1 \text{ mm}$

Duljina cijevi, $L = 770 \text{ mm}$

Ukupan broj cijevi u cijevnom snopu, $N_c = 44$

Maseni protok, $Q_{m,v}$, rashladne vode (srednji blok istočna strana, kućište jug (8) – unutarjni izmjenjivač)

$$Q_{m,v} = Q_{v,v} \cdot \rho_v = \frac{1,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,332 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Masena brzina, $q_{m,v}$, rashladne vode u cijevi

$$q_{m,v} = \frac{Q_{m,v} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{0,332 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina, ω_c , vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,v}}{\rho_v} = \frac{300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{996,152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,302 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_v}{\mu_v} = \frac{q_{m,v} \cdot d_i}{\mu_v} = \frac{300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{898,1147 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 2672$$

$Re > Re_{kr}$

2672 > 2300 prijelazno područje strujanja 2300 < Re < 10 000, pa se koristi Hausenova jednadžba:

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{898,1147 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180,768 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,606932 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 6,12$$

MIT09

$L = 770 \text{ mm}$

$$\frac{\alpha_i}{4180,768 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (2672^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{770}\right)^{2/3}\right]}{2672} \cdot 6,12^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 1648 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

2.1.1.5. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ)

Masena brzina, $q_{m,U}$, mineralnog ulja u plaštu,:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{0,80 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2113 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 90,51 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Maseni protok ulja (srednji blok istočna strana, kućište jug (8) – unutarnji izmjenjivač)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{0,80}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,191 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{90,51 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{5459,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 141$$

$$Re < Re_{kr}$$

141 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{5459,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1917,2 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,1432 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 73,10$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,1432 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (141)^{0,50} \cdot (73,10)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 525 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

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

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 525 \cdot 7 + 0,7 \cdot 525 \cdot 6 + 525 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 470 \frac{W}{m^2 K}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{470} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1648} \cdot \frac{10}{8}} = 346 \frac{W}{m^2 K}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{2930 \text{ W}}{346 \frac{W}{m^2 K} \cdot 9,23 \text{ K}} = 0,918 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT09:

$$A_o = 1,064 \text{ m}^2 \quad \text{zadovoljava}$$

U tablici 2.6 prikazane su tablične vrijednosti za ispitivani industrijski protusmjerni izmjenjivače MIT09, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište jug (8), unutarnji izmjenjivač topline.

Tablica 2.6. Prikaz tabličnih vrijednosti za višecijevni 1-2 tip izmjenjivača topline, MIT09 (dva prolaza rashladne vode kroz cijevi i jedan prolaz mineralnog ulja kroz plašt) - istočna strana, srednji blok peći, južno kućište (8) – unutarnji izmjenjivač

$Q_{v,V}$	1,2 m ³ /h	
ϕ_V	2933 W	
$Q_{m,V}$	0,332 kg/s	
$q_{m,V}$	300 kg/(s m ²)	
w_c	0,302 m/s	
Δt_V	2,11 °C	
t_2''	27,21 °C	$t_{m,V} = 26,16$ °C
t_2'	25,1 °C	
$C_V = C_2$	1389 W/K	
$Q_{v,U}$	0,80 m ³ /h	
$Q_{m,U}$	0,191 kg/s	
$C_U = C_1/$	275 W/K	
t_1'	40 °C	$t_{m,U} = 36$ °C
t_1''	32 °C	
Δt_U	8 °C	
ΔT_m	9,54 K	
F	0,967	
$\Delta T_{m,kor}$	9,23	
	MIT09	
Re (u cijevi)	2672 (prijelazno područje)	
α_i W/(m ² K)	1648	
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	90,51	
Re (u plaštu)	141 (laminarno područje)	
α_o W/(m ² K)	525	
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	470	
K W/(m ² K)	346	
A m ²	0,918	
A_o m ²	1,064	
L m	0,770	

2.1.2. VANJSKA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (8)

2.1.2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8)

Iz zadanih podataka slijedi:

Ulazna temperatura mineralnog ulja, $t'_{U} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Razlika u temperaturi ulja, $\Delta t_{U} = 8 \text{ }^{\circ}\text{C} = 8 \text{ K}$

Volumni protok mineralnog ulja, $Q_{v,U} = 0,36 \text{ m}^3/\text{h}$

Ulazna temperatura rashladne vode, $t'_{V} = 25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Volumni protok rashladne vode, $Q_{v,V} = 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$

Srednja temperatura mineralnog ulja na vanjskoj strani južnog (8) kućišta iznosi $t_{m,U} = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i jednaka je srednjoj temperaturi mineralnog ulja na unutarnjoj strani južnog (8) kućišta. Fizikalna svojstva mineralnog ulja¹⁹ pri srednjoj temperaturi $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$, prikazana su u tablici 2.3.

Fizikalna svojstva vode pri temperaturi $25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, prikazana su u tablici 2.4.

Toplinski kapacitet mineralnog ulja (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – vanjski izmjenjivač)

$$C_U = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$
$$C_U = \frac{0,36}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9172 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$
$$C_U = 0,165 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 165 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet rashladne vode (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – vanjski izmjenjivač)

$$C_V = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$
$$C_V = \frac{1,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18098 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1,389 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 1389 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Mineralno ulje je slabija struja i nosi oznaku 1, a rashladna voda je jača struja i nosi oznaku 2.

Stoga, oznake su sljedeće:

$$C_U = C_1 = 165 \text{ W/K}$$

$$C_V = C_2 = 1389 \text{ W/K}$$

t_1' – ulazna temperatura mineralnog ulja

t_1'' – izlazna temperatura mineralnog ulja

t_2' – ulazna temperatura rashladne vode

t_2'' – izlazna temperatura rashladne vode

2.1.2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8)

Izmijenjeni toplinski tok (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – vanjski izmjenjivač), će biti:

$$\phi_U = C_1 \cdot (t_1'' - t_1') = C_1 \cdot \Delta T_U = 165 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (-8)\text{K} = -1320 \text{ W}$$

$$\phi_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = 1320 \text{ W}$$

$$\phi_V = 1389 \cdot (t_2'' - 25,1) = 1320 \text{ W}$$

$$t_2'' = 26,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

Promjena temperature vode je:

$$\Delta t_V = t_2'' - t_2' = 26,05 - 25,1 = 0,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva rashladne vode za daljnji proračun uzimaju se pri srednjoj temperaturi vode, tj. pri:

$$t_{m,V} = \frac{t_2' + t_2''}{2} = \frac{25,1 + 26,05}{2} = 25,58 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti za fizikalne karakteristike rashladne vode pri srednjoj temperaturi 25,58 °C prikazane su u tablici 2.7.

Tablica 2.7. Fizikalna svojstva rashladne vode pri srednjoj temperaturi 25,58 °C

$t / ^\circ\text{C}$	25,58 °C
$\rho_v / \text{kg/m}^3$	996,326
$c_{p,v} / \text{kJ}/(\text{kg K})$	4,180884
$\lambda_v / \text{W}/(\text{m K})$	0,606091
$\nu_v / \text{m}^2/\text{s}$	$0,911792 \cdot 10^{-6}$
$\mu_v / (\text{N s})/\text{m}^2$	$908,4421 \cdot 10^{-6}$

2.1.2.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8)

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 0,36 \text{ m}^3/\text{h}$), za vanjski izmjenjivač – kućište 8, slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 40 - 26,05 = 13,95 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 32 - 25,1 = 6,9 \text{ K}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta T_m = \frac{13,95 - 6,9}{\ln\left(\frac{13,95}{6,9}\right)} = 10,29 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{40 - 32}{26,05 - 25,1} = 8,42$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,05 - 25,1}{40 - 25,1} = 0,064$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{8,42 \cdot 0,064 - 1}{0,064 - 1}\right)^{1/1}}{8,42 - \left(\frac{8,42 \cdot 0,064 - 1}{0,064 - 1}\right)^{1/1}} = 0,064$$

$$F = \left[\frac{(8,42^2 + 1)^{1/2}}{8,42 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,064}{1 - 8,42 \cdot 0,064}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,064}\right) - 1 - 8,42 + (8,42^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,064}\right) - 1 - 8,42 - (8,42^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,987$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 10,29 \cdot 0,987 = 10,15 \text{ K}$$

2.1.2.4. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI – VANJSKA STRANA

Karakteristike cijevi:

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

Unutarnji promjer, $d_i = 8 \text{ mm}$

Debljina cijevi, $\delta = 1 \text{ mm}$

Duljina cijevi, $L = 770 \text{ mm}$

Maseni protok, $Q_{m,v}$, rashladne vode (srednji blok istočna strana, kuište jug (8) – vanjski izmjenjivač)

$$Q_{m,v} = Q_{v,v} \cdot \rho_v = \frac{1,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,326 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,332 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Masena brzina, $q_{m,v}$, rashladne vode u cijevi

$$q_{m,v} = \frac{Q_{m,v} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{0,332 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina, ω_c , vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,v}}{\rho_v} = \frac{300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{996,326 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,301 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_v}{\mu_v} = \frac{q_{m,v} \cdot d_i}{\mu_v} = \frac{300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{908,4421 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 2642$$

$Re > Re_{kr}$

2642 > 2300 prijelazno područje strujanja 2300 < Re < 10 000, pa se koristi Hausenova jednažba:

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{908,4421 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180,884 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,606091 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 6,27$$

MIT09

$$L = 770 \text{ mm}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180,884 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (2642^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{770}\right)^{2/3}\right]}{2642} \cdot 6,27^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 1605 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

2.1.2.5. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), VANJSKI IZMJENJIVAČ)

Masena brzina ulja u plaštu:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{0,36 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2113 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 40,73 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Maseni protok ulja (srednji blok, istočna strana, kućište jug (8) – vanjski izmjenjivač)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{0,36}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,086 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{40,73 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{5459,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 63,43$$

$$Re < Re_{kr}$$

63,43 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{5459,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1917,2 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,1432 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 73,10$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,1432 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (63,43)^{0,50} \cdot (73,10)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 352 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 352 \cdot 7 + 0,7 \cdot 352 \cdot 6 + 352 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 315,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{315,2} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1605} \cdot \frac{10}{8}} = 253 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1320 \text{ W}}{253 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 10,15 \text{ K}} = 0,514 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT09:

$$A_o = 1,064 \text{ m}^2 \quad \text{zadovoljava}$$

U tablici 2.8 prikazane su tablične vrijednosti za ispitivani industrijski protusmjerni izmjenjivače MIT09, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište jug (8), vanjski izmjenjivač topline.

Tablica 2.8. Tablične vrijednosti za ispitivani industrijski protusmjerni izmjenjivač MIT09, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište jug (8), vanjski izmjenjivač topline.

$Q_{v,V}$	1,2 m ³ /h	
ϕ_V	1320 W	
$Q_{m,V}$	0,332 kg/s	
$q_{m,V}$	300 kg/(s m ²)	
ω_c	0,302 m/s	
Δt_V	0,95 °C	
t_2''	26,05 °C	$t_{m,V} = 25,58$ °C
t_2'	25,1 °C	
$C_V = C_2$	1389 W/K	
$Q_{v,U}$	0,36 m ³ /h	
$Q_{m,U}$	0,086 kg/s	
$C_U = C_1/$	165 W/K	
t_1'	40 °C	$t_{m,U} = 36$ °C
t_1''	32 °C	
Δt_U	8 °C	
ΔT_m	10,29 K	
F	0,987	
$\Delta T_{m,kor}$	10,15 K	
	MIT09	
Re (u cijevi)	2642 (prijelazno područje)	
α_i W/(m ² K)	1605	
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	40,73	
Re (u plaštu)	63,43 (laminarno područje)	
α_o W/(m ² K)	352	
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	315,2	
K W/(m ² K)	253	
A m ²	0,514	
A_o m ²	1,064	
L m	0,770	

2.1.3. VANJSKA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h

2.1.3.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h

Iz zadanih podataka slijedi:

Ulazna temperatura mineralnog ulja, $t'_U = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

Razlika u temperaturi ulja, $\Delta t_U = 8 \text{ }^\circ\text{C} = 8 \text{ K}$

Volumni protok mineralnog ulja, $Q_{v,U} = 0,36 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 2 = 0,72 \text{ m}^3/\text{h}$

Ulazna temperatura rashladne vode, $t'_V = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$

Volumni protok rashladne vode, $Q_{v,V} = 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$

Srednja temperatura mineralnog ulja na vanjskoj strani južnog (8) kućišta se ne mijenja i iznosi $t_{m,U} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ te su fizikalna svojstva mineralnog ulja¹⁹ prikazana u tablici 2.3.

Fizikalna svojstva vode pri temperaturi $25,1 \text{ }^\circ\text{C}$, prikazana su u tablici 2.4.

Toplinski kapacitet mineralnog ulja (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – vanjski izmjenjivač)

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

$$C_U = \frac{0,72}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9172 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_U = 0,330 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 330 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet rashladne vode pri temperaturi $t'_V = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – vanjski izmjenjivač) se ne mijenja

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

$$C_V = \frac{1,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18098 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1,389 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 1389 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Mineralno ulje je slabija struja i nosi oznaku 1, a rashladna voda je jača struja i nosi oznaku 2.

Stoga, oznake su sljedeće:

$$C_U = C_1 = 330 \text{ W/K}$$

$$C_V = C_2 = 1389 \text{ W/K}$$

t_1' – ulazna temperatura mineralnog ulja

t_1'' – izlazna temperatura mineralnog ulja

t_2' – ulazna temperatura rashladne vode

t_2'' – izlazna temperatura rashladne vode

2.1.3.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h

Izmijenjeni toplinski tok (srednji blok istočna strana, kućište južno (8) – vanjski izmjenjivač), će biti:

$$\phi_U = C_1 \cdot (t_1'' - t_1') = C_1 \cdot \Delta T_U = 330 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (-8)\text{K} = -2647 \text{ W}$$

Toplina koju prima rashladna voda je toplina koju predaje mineralno ulje:

$$\phi_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = 2647 \text{ W}$$

Prema tome, temperatura vode na izlazu je:

$$\phi_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = 2647 \text{ W}$$
$$t_2'' = \frac{\phi_V}{C_2} + t_2' = \frac{2647 \text{ W}}{1389 \frac{\text{W}}{\text{K}}} + 25,1^\circ\text{C}$$

$$t_2'' = 27,00 \text{ }^\circ\text{C}$$

Promjena temperature vode je:

$$\Delta t_v = t_2'' - t_2' = 27,00 - 25,1 = 1,90 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva rashladne vode za daljnji proračun uzimaju se pri srednjoj temperaturi vode, tj.:

$$t_{m,v} = \frac{t_2' + t_2''}{2} = \frac{25,1 + 27,00}{2} = 26,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti za fizikalne karakteristike vode pri srednjoj temperaturi 26,05 °C prikazane su u tablici 2.9.

Tablica 2.9. Fizikalna svojstva rashladne vode pri srednjoj temperaturi 26,05 °C

$t / \text{ }^\circ\text{C}$	26,05 °C
$\rho_v / \text{ kg/m}^3$	996,185
$c_{p,v} / \text{ kJ/(kg K)}$	4,181
$\lambda_v / \text{ W/(m K)}$	0,607
$\omega_v / \text{ m}^2/\text{s}$	$0,904 \cdot 10^{-6}$
$\mu_v / \text{ (N s)/m}^2$	$900,073 \cdot 10^{-6}$

2.1.3.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA NA VANJSKOJ STRANI – JUG – KUĆIŠTE (8) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h

Srednja logaritamska razlika temperature:

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

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 0,72 \text{ m}^3/\text{h}$), za vanjski izmjenjivač slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 40 - 27,00 = 13,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 32 - 25,1 = 6,9 \text{ K}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta T_m = \frac{13,00 - 6,9}{\ln\left(\frac{13,00}{6,9}\right)} = 9,63 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{40 - 32}{27,00 - 25,1} = 4,21$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{27,00 - 25,1}{40 - 25,1} = 0,127$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,21 \cdot 0,127 - 1}{0,127 - 1}\right)^{1/1}}{4,21 - \left(\frac{4,21 \cdot 0,127 - 1}{0,127 - 1}\right)^{1/1}} = 0,127$$

$$F = \left[\frac{(4,21^2 + 1)^{1/2}}{4,21 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,127}{1 - 4,21 \cdot 0,127}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,127}\right) - 1 - 4,21 + (4,21^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0,127}\right) - 1 - 4,21 - (4,21^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0,978$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 9,63 \cdot 0,978 = 9,42 \text{ K}$$

2.1.3.4. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), VANJSKI IZMJENJIVAČ) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h

Karakteristike cijevi:

Vanjski promjer, $d_o = 10$ mm

Unutarnji promjer, $d_i = 8$ mm

Debljina cijevi, $\delta = 1$ mm

Duljina cijevi, $L = 770$ mm

Maseni protok, $Q_{m,v}$, rashladne vode (srednji blok istočna strana, kućište jug (8) – vanjski izmjenjivač):

$$Q_{m,v} = Q_{v,v} \cdot \rho_v = \frac{1,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,332 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Masena brzina, $q_{m,v}$, rashladne vode u cijevi

$$q_{m,v} = \frac{Q_{m,v} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{0,332 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina, ω_c , vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,v}}{\rho_v} = \frac{300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{996,185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,301 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_v}{\mu_v} = \frac{q_{m,v} \cdot d_i}{\mu_v} = \frac{300 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{900,073 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 2666$$

$Re > Re_{kr}$

2666 > 2300 prijelazno područje strujanja 2300 < Re < 10 000, pa se koristi Hausenova jednačica:

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{900,073 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2} \cdot 4181 \frac{J}{kg K}}{0,607 \frac{W}{m K}} = 6,20$$

MIT09

L = 770 mm

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{J}{kg K} \cdot 300 \frac{kg}{s m^2}} = \frac{0,166 \cdot (2666^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{770}\right)^{2/3}\right]}{2666} \cdot 6,20^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 1630 \frac{W}{m^2 K}$$

2.1.3.5. IZRAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – JUG (8), VANJSKI IZMJENJIVAČ) UZ POVEĆANI PROTOK MINERALNOG ULJA NA 0,72 m³/h

Masena brzina ulja u plaštu:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{0,72 \frac{m^3}{s} \cdot 860,6 \frac{kg}{m^3}}{2113 \cdot 10^{-6} m^2} = 81,45 \frac{kg}{s m^2}$$

Maseni protok ulja (srednji blok istočna strana, kućište jug (8) – vanjski izmjenjivač)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{0,72}{3600} \frac{m^3}{s} \cdot 860,6 \frac{kg}{m^3} = 0,172 \frac{kg}{s}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{81,45 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{5459,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 126,85$$

$$Re < Re_{kr}$$

126,85 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{5459,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1917,2 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,1432 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 73,10$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,1432 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (126,85)^{0,50} \cdot (73,10)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 498 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 498 \cdot 7 + 0,7 \cdot 498 \cdot 6 + 498 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 446 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{446} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1630} \cdot \frac{10}{8}} = 332 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{2647 \text{ W}}{332 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 9,42 \text{ K}} = 0,846 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT09:

$$A_o = 1,064 \text{ m}^2 \quad \text{zadovoljava}$$

U tablici 2.10 prikazane su tablične vrijednosti za ispitivani industrijski protusmjerni izmjenjivače MIT09, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište jug (8), vanjski izmjenjivač topline, ukoliko se poveća volumni protok mineralnog ulja na 0,72 m³/kg.

Tablica 2.10. Tablične vrijednosti za ispitivani industrijski protusmjerni izmjenjivač MIT09, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište jug (8), vanjski izmjenjivač topline

$Q_{v,V}$	1,2 m ³ /h	
ϕ_V	2647 W	
$Q_{m,V}$	0,332 kg/s	
$q_{m,V}$	300 kg/(s m ²)	
ω_c	0,301 m/s	
Δt_V	1,90 °C	
t_2''	27,00 °C	$t_{m,V} = 26,05$ °C
t_2'	25,1 °C	
$C_V = C_2$	1389 W/K	
$Q_{v,U}$	0,72 m ³ /h	
$Q_{m,U}$	0,172 kg/s	
$C_U = C_1/$	330 W/K	
t_1'	40 °C	$t_{m,U} = 36$ °C
t_1''	32 °C	
Δt_U	8 °C	
ΔT_m	9,63 K	
F	0,978	
$\Delta T_{m,kor}$	9,42 K	
	MIT09	
Re (u cijevi)	2666 (prijelazno područje)	
α_i W/(m ² K)	1630	
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	81,45	
Re (u plaštu)	126,85 (laminarno područje)	
α_o W/(m ² K)	498	
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	446	
K W/(m ² K)	332	
A m ²	0,846	
A_o m ²	1,064	
L m	0,770	

3. RASPRAVA

U ovom završnom radu napravljen je proračun i obrađena problematika za višecijevni izmjenjivač topline, tipa 1-2 koji bi se koristio za hlađenje zagrijanog mineralnog ulja koje služi za podmazivanje kliznih ležajeva rotacijske peći pri proizvodnji Portland cementa. Naime, tijekom rada rotacijske peći dolazi do pojave trenja što uzrokuje zagrijavanje mineralnog ulja. Poznato je da se povišenjem temperature, viskozitet mineralnog ulja smanjuje i samim time ulje gubi svoja svojstva. Zbog toga je to ulje potrebno ohladiti pomoću izmjenjivača topline.

Svrha ovog završnog rada bila je ispitati karakteristike navedenog izmjenjivača topline te na temelju istih donijeti zaključak o njegovoj primjenivosti u procesu hlađenja srednjeg bloka rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na istočnoj strani peći na južnom kućištu (pozicija 8) s vanjske i unutarnje strane kućišta.

Ispitivane su karakteristike industrijskog MIT09 izmjenjivača topline, tipa 1-2, vanjskog promjera plašta 114,3 x 3,6 mm. U cijevnom snopu postoje 44 bakrene cijevi, $\lambda_c = 386,12 \text{ W/(m K)}$. Raspored cijevi u cijevnom snopu je u trokutu s korakom od 13 mm. Cijevi su debljine $\delta = 1 \text{ mm}$ i vanjskog promjera 10 mm. Duljina cijevi u cijevnom snopu je 770 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Ulje, temperature 40 °C, dostrujava u prostor plašta protokom od 0,8 m³/h na unutarnjem izmjenjivaču te protokom od 0,36 m³/h na vanjskom izmjenjivaču. Također, ispitane su i karakteristike za slučaj da se protok ulja na vanjskoj strani poveća za dva puta, odnosno da ulje dostrujava protokom od 0,72 m³/h na vanjskom izmjenjivaču. Kroz cijevni snop, struji rashladna voda, ulazne temperature 25,1 °C, protokom od 1,2 m³/h. Mineralno ulje potrebno je ohladiti za $\Delta T = 8 \text{ K}$, tj. $\Delta t = 8 \text{ °C}$.

Karakteristične veličine za višecijevni izmjenjivač topline koje su se koristile u daljnjem proračunu prikazane su u tablici 2.1. Na temelju poznatih karakteristika cijevi (vanjski promjer, d_o , duljina cijevi, L i ukupan broj cijevi, N_c) izračunata je raspoloživa površina za prijenos topline koja iznosi $A_o = 1,064 \text{ m}^2$.

Identifikacijom ulazne struje toplog (mineralno ulje) i hladnog fluida (rashladna voda) proizlazi da je slabija struja mineralno ulje. Prema dogovoru, značenje slabije struje pripada fluidu s manjim toplinskim kapacitetom (u ovom slučaju mineralnom ulju) te mu se pridružuje indeks 1, dok se jačoj struji (u ovom slučaju rashladnoj vodi) pridružuje indeks 2. Toplinski kapacitet mineralnog ulja na unutarnjoj strani iznosi 367 W/K, dok na vanjskoj iznosi 165 W/K, odnosno uz protok od 0,72 m³/h iznosi 330 W/K. Toplinski kapacitet rashladne vode na unutarnjoj te na vanjskoj strani za oba protoka ostaje isti i iznosi 1389 W/K.

Izlazna temperatura rashladne vode, t_2'' , može se izračunati pomoću toplinskog toka. Toplinski tok, odnosno izmijenjena toplina može se izračunati iz ohlađivanja toplijeg fluida ili zagrijavanja hladnijeg fluida jer je toplina koju prima hladniji fluid upravo ona toplina koju otpušta topliji fluid. Toplinski tok s unutarnje strane kućišta iznosi 2933 W, a s vanjske strane, za protok ulja od 0,36 m³/h, iznosi 1320 W, odnosno za protok ulja od 0,72 m³/h, iznosi 2647 W. Pomoću toplinsko-bilančne jednadžbe odredi se temperatura rashladne vode na izlazu koja s unutarnje strane iznosi 27,21 °C te 26,05 °C sa vanjske strane kućišta. Za protok od 0,72 m³/h iznosi 27 °C.

S obzirom da se u ovom slučaju radi o višecijevnom izmjenjivaču topline, tipa 1-2, logaritamsku razliku temperatura potrebno je korigirati uz pomoć korekcijskog faktora F . Time se dobiva korigirana logaritamska razlika temperatura koja će se upotrijebiti pri izračunu potrebne površine za prijenos topline.

Daljnijim ispitivanjem, dokazano je da je za izračun koeficijenta prijenosa topline u cijevima potrebno primjeniti Hansenovu jednadžbu jer se vrijednosti Reynoldsove značajke nalaze u prijelaznom području strujanja, odnosno Re se nalazi u intervalu $2300 < Re < 10\ 000$. Na unutarnjem izmjenjivaču Re iznosi 2672, dok na vanjskom izmjenjivaču iznosi 2642, odnosno 2666 za dva puta povećani protok. Koeficijent prijenosa topline u cijevima duljine 770 mm s unutarnje strane iznosi 1648 W/(m² K), dok s vanjske iznosi 1605 W/(m² K), odnosno 1630 W/(m² K) za dva puta povećani protok.

Pri računanju koeficijenta prijenosa topline u plaštu, na strani mineralnog ulja, utvrđeno je da je u plaštu prisutno laminarno strujanje ($Re < 2300$) pa se za izračun upotrebljava Nusseltova značajka. Za unutarnji izmjenjivač, Re u plaštu iznosi 141, dok na vanjskom izmjenjivaču $Re = 63,43$ za protok $0,36 \text{ m}^3/\text{h}$, odnosno $Re = 126,85$ za protok $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$. Kako se vrijednost protoka ulja povećala za dva puta s vanjske strane, tako se i vrijednost Reynoldsove značajke udvostručila. Za izračun koeficijenta prijenosa topline u plaštu, također je potrebno uzeti u obzir ukupan broj cijevi te broj cijevi u prvom, odnosno drugom redu. Koeficijent prijenosa topline na strani ulja, na unutarnjem izmjenjivaču iznosi $\alpha_{o,sr} = 470 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, dok na vanjskom izmjenjivaču iznosi $\alpha_{o,sr} = 315,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ za protok $0,36 \text{ m}^3/\text{h}$, odnosno $\alpha_{o,sr} = 446 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ za dva puta povećani protok na vanjskom izmjenjivaču.

Koeficijent prolaza topline uvelike ovisi o koeficijentu prijenosa topline u cijevi, odnosno plaštu. On na unutarnjem izmjenjivaču iznosi $K = 346 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, dok na vanjskom izmjenjivaču za protok $0,36 \text{ m}^3/\text{h}$ iznosi $K = 253 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, odnosno $K = 332 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ za protok $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$. Uočava se da se koeficijent prolaza topline povećava s povećanjem protoka ulja.

Na kraju ispitivanja, određena je potrebna površina za prijenos topline. Ona ovisi o toplinskom toku, ukupnom prolazu topline te korigiranoj logaritamskoj razlici temperatura. Potrebna površina za prijenos topline na unutarnjem izmjenjivaču iznosi $A = 0,918 \text{ m}^2$, dok na vanjskom iznosi $A = 0,514 \text{ m}^2$ za protok ulja od $0,36 \text{ m}^3/\text{h}$, odnosno $A = 0,846 \text{ m}^2$ za protok od $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$. Iz postignutih rezultata je vidljivo da je pri svim ispitivanim uvjetima rada potrebna površina MIT09 izmjenjivača topline manja u odnosu na raspoloživu, koja iznosi $A_o = 1,064 \text{ m}^2$.

Dakle, rezultati istraživanja pokazuju da industrijski MIT09 izmjenjivač topline, tipa 1-2 zadovoljava potrebe cementne industrije za hlađenje ležajeva rotacijske peći s vanjske i unutarnje strane južnog kućišta budući da je potrebna površina za prijenos topline manja od raspoložive površine za prijenos topline. U slučaju da se protok ulja s vanjske strane poveća na $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$, potrebna površina za prijenos topline je i dalje manja u odnosu na raspoloživu te i uz taj uvjet izmjenjivač zadovoljava.

4. ZAKLJUČCI

Na temelju provedenih ispitivanja, dolazi se do sljedećih zaključaka:

– Pri računanju koeficijenata prijenosa topline u cijevima potrebno je primijeniti Hansenovu jednadžbu jer vrijednosti Reynoldsove značajke spadaju u prijelazno područje strujanja, odnosno $2300 < Re < 10\ 000$.

– Koeficijenti prijenosa topline u plaštu izračunavaju se preko Nusseltove značajke jer u plaštu prevladava laminarno strujanje, odnosno $Re < 2300$.

– Povećanjem protoka ulja dolazi do povećanja turbulencija u plaštu što povećava koeficijent prolaza topline i samim time poboljšava prijenos topline. Koeficijent prolaza topline i potrebna površina za izmjenu topline odnose se kao obrnuto proporcionalne veličine, što znači da povećanjem vrijednosti koeficijenta prolaza topline smanjuje se potrebna površina za izmjenu te iste topline.

– Ispitivani MIT09 izmjenjivač topline, tipa 1-2, zadovoljava potrebe za hlađenjem mineralnog ulja s unutarnje i vanjske strane južnog kućišta na srednjem bloku rotacijske peći budući da je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu izmjenjivača. Dokazano je da navedeni izmjenjivač također zadovoljava u slučaju da se protok ulja poveća na $0,72\ \text{m}^3/\text{h}$ na vanjskoj strani kućišta jer je potrebna površina manja u odnosu na raspoloživu površinu za prijenos topline.

5. LITERATURA

1. D. Vrkljan, M. Klanfar, Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, RGN-fakultet Zagreb, 2010.

URL:https://rudar.rgn.hr/~mklanfar/nids_mklanfar/TEHNOLOGIJA%20NEMETALA/Cementne%20sirovine.pdf (pristupljeno 11.08.2021.)

2. Rotacijska peć za proizvodnju cementa.

URL: <http://www.cement-plants.com/clinker-production/rotary-kiln/>

(pristupljeno 11.08.2021.)

3. A. Žiga, A. Karač, D. Vukojević – Analytical and numerical stress analysis of the rotary kiln ring, Tehnički vjesnik, 20 (2013) (6) 941-946.

4. K. H. Decker, Elementi strojeva, 3. izdanje, Golden marketing, Tehnička knjiga, Zagreb, 2006., str. 237-250.

5. Klizni ležajevi rotacijske peći.

URL:<http://ba.cicmk.com/rotary-kiln/high-quality-customed-cement-rotary-kiln.html>

(pristupljeno 14.08.2021.)

6. A. Galović - Termodinamika II, IV.nepromijenjeno izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2007., str. 192-237.

7. G. Towler, R. Sinnott in Chemical engineering design, Principles, practice and economics of plant and process design, Elsevier, B/H, 2008., Chapter 12, Heat transfer equipment, 793-823.

8. Pogonski i radni strojevi02, Prijenos topline, 12-1–12-8.

URL: <https://docplayer.gr/71861900-11-dinamika-kompresibilnih-fluida.html>

(pristupljeno 14.08.2021.)

9. S. H. Gawande, S. D. Wankhede, R. N. Yerrawar, V. J. Sonawane, U. B. Ubarhande, Design and Development of Shell & Tube Heat Exchanger for Beverage, Modern Mechanical Engineering, 2 (2012) 4 1-5. [DOI:10.4236/mme.2012.24015](https://doi.org/10.4236/mme.2012.24015)

10. R. Srikanth – Heat transfer, AP Government GATE Online Classes, 2020.

URL:<https://www.jntua.ac.in/gate-online-classes/registration/downloads/material/a159109920698.pdf> (pristupljeno 10.08.2021.)

11. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, II. prerađeno i dopunjeno izdanje, Zagreb, 1994., str. 149-200.

12. Cijevni izmjenjivač topline.

URL:<https://hr.srimathumitha.com/domashniy-uyut/9584-teploobmennik-trubchatyy-opisanie-harakteristiki-ustroystvo-i-otzyvy.html> (pristupljeno 07.08.2021.)

13. Pločasti izmjenjivač topline.

URL:<https://hr.erch2014.com/domashniy-uyut/9392-teploobmennik-dlya-otopleniya-dlya-goryachey-vody.html> (pristupljeno 08.08.2021.)

14. Spiralni izmjenjivač topline.

URL:<http://pmarpl.com.au/training/pmaops205b/proc205-010303-spiral-heat-exchanger.htm> (pristupljeno 07.08.2021.)

15. Prikaz istosmjernog i protusmjernog strujanja fluida.

URL:<http://www.longwin.com/english/edu/heat-exchanger.html> (pristupljeno 07.08.2021.)

16. U – cijevni izmjenjivač.

URL:<https://www.indiamart.com/proddetail/u-tube-bundle-heat-exchanger-17171108133.html> (pristupljeno 14.08.2021.)

17. Izmenjivač topine s učvršćenim snopom cijevi.

URL:<http://heatexchan.blogspot.com/2017/02/the-calculation-of-fixed-tubesheet.html> (pristupljeno 14.8.2021.)

18. O. Fabris – Osnove inženjerske termodinamike, III. izdanje, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1994.

19. B. Kraut – Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982., str. 230.

6. POPIS SIMBOLA

OZNAKE

A – površina prijenosa topline, m^2

A_c – ukupna poprečna površina presjeka cijevi, m^2

A_o – raspoloživa površina prijenosa topline, m^2

A_s – slobodna površina presjeka cijevnog snopa, m^2

a_c – poprečna površina presjeka cijevi, m^2

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

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

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

c – korak cijevi, m

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

d_e – ekvivalentni promjer plašta, m

d_i – unutarnji promjer cijevi, m

d_o – vanjski promjer cijevi, m.

d_{pl} – unutarnji promjer plašta, m

F – korekcijski faktor

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

L – duljina cijevi, m

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

N – ukupan broj cijevi

N_c – ukupan broj cijevi u cijevnom snopu

N_{pr} – broj pregrada u plaštu

N_{prolaz} – broj prolaza fluida kroz cijevi

Nu – Nusseltova značajka

N_1 – broj cijevi u prvom redu cijevnog snopa

N_2 – broj cijevi u drugom redu cijevnog snopa

P – toplinska efikasnost hladnog fluida

Pe – Pecletova značajka

Pr – Prandtlova značajka

Q_m – maseni protok fluida, kg/s

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

R – omjer kapacitivnih brzina

Re – Reynoldsova značajka

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

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

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

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

t' – ulazna temperatura struje fluida, °C

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

t_1' – ulazna temperatura slabije struje, °C

t_1'' – izlazna temperatura slabije struje, °C

t_2' – ulazna temperatura jače struje, °C

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

t_m – aritmetička sredina temperatura promatrane struje, °C

Grčka slova

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

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

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

δ – debljina cijevi, mm

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

μ – dinamička viskoznost fluida, Pa s

μ_s – dinamička viskoznost fluida pri temperature stijenke, Pa s

ν – kinematička viskoznost fluida, m^2/s

ρ – gustoća fluida, kg/m^3

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

ω – brzina fluida u cijevi, m/s