

Višecijevni izmjenjivači u sustavu hlađenja ulaznog bloka rotacijske peći za proizvodnju portland cementa

Gulišija, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:167:566302>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**VIŠECIJEVNI IZMJENJIVAČI U SUSTAVU HLAĐENJA
ULAZNOG BLOKA ROTACIJSKE PEĆI ZA PROIZVODNJU
PORTLAND CEMENTA**

DIPLOMSKI RAD

MARIO GULIŠIJA

Mat. br. 245

Split, listopad 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
DIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: MATERIJALI

VIŠECIJEVNI IZMJENJIVAČI U SUSTAVU HLAĐENJA
ULAZNOG BLOKA ROTACIJSKE PEĆI ZA PROIZVODNJU
PORTLAND CEMENTA

DIPLOMSKI RAD

MARIO GULIŠIJA

Mat. br. 245

Split, listopad 2020.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
GRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
STUDY ORIENTATION: MATERIALS

**SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS IN ROTARY KILN
INLET BLOCK COOLING SYSTEM FOR PORTLAND CEMENT
PRODUCTION**

DIPLOMA THESIS

MARIO GULIŠIJA

Parent number: 245

Split, October 2020.

Sveučilište u Splitu
Kemijско-tehnološki fakultet u Splitu
Diplomski studij kemijske tehnologije

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijско inženjerstvo

Tema rada je prihvaćena na 28. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijско-tehnološkog fakulteta održanoj dana 25. rujna 2019. god. (točka 2 ad f)

Mentor: prof. dr. sc. Vanja Martinac

VIŠECIJEVNI IZMJENJIVAČI U SUSTAVU HLAĐENJA ULAZNOG BLOKA ROTACIJSKE PEĆI ZA PROIZVODNJU PORTLAND CEMENTA

Mario Gulišija, broj indeksa 245

Sažetak:

Diplomski rad obuhvaća rješenje sustava hlađenja ulaznog bloka rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa. Ispitana je serija industrijskih višecijevnih (**engl. shell&tube**) izmjenjivača topline s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi na ulaznom bloku peći. Cilj je utvrditi koji od ispitivanih industrijskih rekuperatora (MIT03-MIT10), tip 1-2, zadovoljava zadane radne uvjete. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu se mijenja od 6 (MIT03-MIT05) do 9 (MIT06-MIT10). Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{kr}$), dok je strujanje vode u cijevima pri svim ispitivanim protocima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$).

Ukoliko je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu ispitivani višecijevni izmjenjivači navedenih karakteristika zadovoljavaju za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.

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

Rad sadrži: 92 stranice, 13 slika, 29 tablica, 17 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Prof. dr. sc. Nenad Kuzmanić, predsjednik
2. Dr. sc. Jelena Jakić, znanst. suradnik, član
3. Prof. dr. sc. Vanja Martinac, član – mentor

Datum obrane: 22.10.2020.

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

BASIC DOCUMENTATION CARD

DIPLOMA THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology
Graduate study of chemical technology

Scientific area: Technical sciences

Scientific field: Chemical engineering

Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 02. ad f (September 25th 2019.).

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

SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS IN INPUT BLOCK ROTARY KILN COOLING SYSTEM FOR PORTLAND CEMENT PRODUCTION

Mario Gulišija, parent number 245

Abstract:

The work includes the solution of the entire cooling system of the rotary kiln for the production of Portland cement at the inlet block of the kiln. A series of industrial multi-tube heat exchangers (shell & tube) with fixed tube bundle, type 1-2, was tested for cooling mineral oil that lubricates the slide bearings at the inlet block of the kiln. The aim is to determine which of the tested industrial recuperators (MIT03-MIT10), type 1-2, meets the specified operating conditions. The tubes are arranged in a triangle with a step of 13 mm, and the number of baffles in the shell varies from 6 (MIT03-MIT05) to 9 (MIT06-MIT10). The test results show that the flow regime in the shell is laminar ($Re < Re_{kr}$), while the water flow in the tubes, flows in the transition area in all tested tubes ($2300 < Re < 10\ 000$). If the required heat exchange area is smaller than the available area, the tested industrial shell & tube heat exchangers with the above mentioned properties are sufficient to cool the slide bearings of the rotary kiln.

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

Thesis contains: 92 pages, 13 figures, 29 tables, 17 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Ph. D. Kuzmanić Nenad – chair person
2. Ph. D. Jelena Jakić, research associate – member
3. Ph. D. Vanja Martinac, full prof. – supervisor

Defence date: September 22th 2020.

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

Diplomski rad je izrađen u Zavodu za termodinamiku, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Vanje Martinac tijekom rujna 2020.

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Vanji Martinac na iskazanom povjerenju, vodstvu te korisnim informacijama tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem svim profesorima i asistentima na suradnji i prenesenom znanju tijekom studija.

Na kraju bih se zahvalio svojoj obitelji i prijateljima na strpljenju i podršci koju su mi pružili tijekom studija.

Mario Gulišija

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

Riješiti sustav hlađenja rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na ulaznom bloku peći, prema priloženoj shemi i karakterističnim podacima za topli (mineralno ulje) i hladni (rashladna voda) fluid na pojedinoj poziciji mjerenja. U tu svrhu ispitati seriju protusmjernih industrijskih izmjenjivača topline tipa cijevni snop u plaštu s jednim (1) prolazom fluida kroz plašt i dva (2) prolaza fluida kroz cijevi za odgovarajuće radne uvjete na ulaznom bloku peći. Cijevni snop sastoji se od 44 bakrene cijevi, $\lambda_c = 386,12 \text{ W/(m K)}$, vanjskog promjera $10 \times 1 \text{ mm}$. Cijevni snop u plaštu definiran je cijevnom pločom čiji vanjski promjer iznosi $106,5 \text{ mm}$, što daje zračnost od $0,6 \text{ mm}$ u odnosu na unutarnji promjer stijenke plašta. Na cijevnoj ploči raspored otvora za ugradnju bakrenih cijevi izveden je na način da je kroz središnjicu kruga povučena 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 niz od 5 provrta i na kraju zadnji niz s 4 provrta. Svi ovi provrti su u pravilnom rasporedu i čine istostranične trokute ($3 \times 60^\circ$). Ukupan broj provrta s gornje strane je 22 i simetrično preslikano na donju polovinu ploče također 22, tj. ukupno 44. Vanjski promjer plašta iznosi $114,3 \times 3,6 \text{ mm}$.

SAŽETAK

Diplomski rad obuhvaća rješenje sustava hlađenja rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na ulaznom bloku peći. Ispitana je serija industrijskih višecijevnih (**engl. shell&tube**) izmijenjivača topline s učvršćenim snopom cijevi, tip 1-2, u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi na ulaznom bloku peći.

Cilj je utvrditi koji od ispitivanih industrijskih rekuperatora (MIT03-MIT10), tip 1-2, zadovoljava zadane radne uvjete. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu se mijenja od 6 (MIT03-MIT05) do 9 (MIT06-MIT10).

Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{,kr}$), dok je strujanje vode u cijevima pri svim ispitivanim protocima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$).

Ukoliko je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu ispitivani višecijevni izmjenjivači navedenih karakteristika zadovoljavaju za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.

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

SUMMARY

The work includes the solution of the entire cooling system of the rotary kiln for the production of Portland cement at the inlet block of the kiln. A series of industrial multi-tube heat exchangers (shell & tube) with fixed tube bundle, type 1-2, was tested for cooling mineral oil that lubricates the slide bearings at the inlet block of the kiln. The aim is to determine which of the tested industrial recuperators (MIT03-MIT10), type 1-2, meets the specified operating conditions. The tubes are arranged in a triangle with a step of 13 mm, and the number of baffles in the shell varies from 6 (MIT03-MIT05) to 9 (MIT06-MIT10). The test results show that the flow regime in the shell is laminar ($Re < Re_{kr}$), while the water flow in the tubes, flows in the transition area in all tested tubes ($2300 < Re < 10\ 000$). If the required heat exchange area is smaller than the available area, the tested industrial shell & tube heat exchangers with the above mentioned properties are sufficient to cool the slide bearings of the rotary kiln.

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

SADRŽAJ

UVOD	1
1. OPĆI DIO	2
1.1. PROIZVODNJA PORTLAND CEMENTA	2
1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE.....	5
1.3. OSNOVNI TIPOVI REKUPERATORA	8
1.4. PREGRADE U PLAŠTU	9
1.5. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJE FLUIDA	11
1.6. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE	11
1.7. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI	15
1.8. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU	16
2. EKSPERIMENTALNI DIO	19
2.1. ULAZNI BLOK ROTACIJSKE PEĆI – ISTOČNA STRANA	25
2.1.1. UNUTARNJA STRANA – SJEVER – KUČIŠTE (11)	25
2.1.1.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUČIŠĆE (11)	25
2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA ULJA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUČIŠĆE (11)	27
2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUČIŠTE (11)	29
2.1.1.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI (ulazni blok peći, istočna strana, kućište – sjeverno (11), unutarnji IT)	30
2.1.1.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU (ulazni blok peći, istočna strana, kućište – sjeverno (11), unutarnji IT)	33
2.1.2. VANJSKA STRANA – SJEVER – KUČIŠTE (11)	46

2.1.3.	UNUTARNJA STRANA – JUG – KUČIŠTE (12)	53
2.1.4.	VANJSKA STRANA – JUG – KUČIŠTE (12)	59
3.1.	ULAZNI BLOK ROTACIJSKE PEĆI – ZAPADNA STRANA	63
3.1.1.	SJEVERNO KUČIŠTE (9) – UNUTARNJI IZMJENJIVAČ TOPLINE	63
3.1.2.	SJEVERNO KUČIŠTE (9) – VANJSKI IZMJENJIVAČ TOPLINE	68
3.1.3.	JUŽNO KUČIŠTE (10) – UNUTARNJI IZMJENJIVAČ TOPLINE	73
3.1.4.	JUŽNO KUČIŠTE (10) – VANJSKI IZMJENJIVAČ TOPLINE	78
4.	RASPRAVA	82
5.	ZAKLJUČCI.....	87
6.	LITERATURA	88
7.	POPIS SIMBOLA	90

UVOD

Uloga svakog kemijskog inženjera jest vođenje procesa na što prihvatljiviji način kako ne bi bilo neželjenih gubitaka eksergije u promatranom procesu. Iz tog razloga potrebno je procijeniti moguće gubitke koji se javljaju u zadanom procesu, otkriti njihove uzroke kako bi se energija što racionalnije iskoristila.

U praksi se inženjeri kemijske tehnologije susreću s različitim problemima u vođenju procesa kao što su određivanja kapaciteta pojedinih toplinskih uređaja, rješavanje sustava hlađenja i slično. Često se kao problematika javlja baš određivanje sustava hlađenja različitih blokova sustava gdje se javljaju različiti fluidi i prijenos topline s jednog bloka na drugi. Stoga, potrebno je posjedovati prethodno stečena znanja i zakone koji se uzimaju u obzir za sam prijenos topline.

Problematika ovog diplomskog rada leži u rješavanju sustava hlađenja rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa. Hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći potrebno je provesti odabirom odgovarajućeg protusmjernog izmjenjivača topline. Naime, rotacijska peć oslanja se na noseće prstenove i valjke. Oni su izloženi različitim dinamičkim opterećenjima koja potječu od težine peći, zasipa, rotacije peći i temperaturnih gradijenata. Iz tog razloga dolazi do zagrijavanja mineralnog ulja koje podmazuje klizne ležajeve pa je potrebno provesti njegovo hlađenje.

Shodno prethodno navedenim činjenicama, potrebno je ispitati seriju industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline, tip 1-2, koji će biti povoljni za rješavanje sustava hlađenja rotacijske peći na ulaznom bloku peći.

1. OPĆI DIO

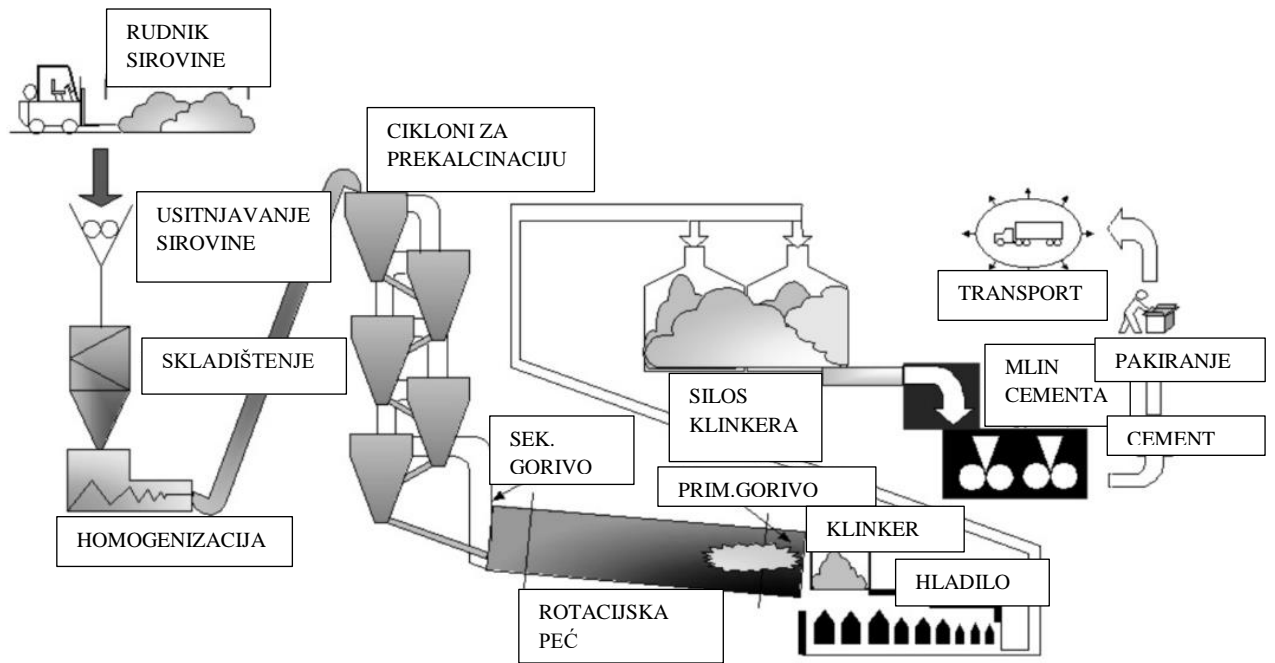
1.1. PROIZVODNJA PORTLAND CEMENTA

Tehnološki proces proizvodnje Portland cementa¹ provodi se kroz 4 faze:

- eksploatacija sirovine iz rudnika (priprema sirovine)
- pečenje sirovine u klinker
- mljevenje (proizvodnja cementa)
- skladištenje i transport

Proces proizvodnje započinje iskapanjem sirovine iz rudnika. Najjeftinija i najbolja sirovina za proizvodnju Portland cementa je prirodni kamen laporac ili tupina, koji sadrži vapnenac i glinu u odnosu 3:1. U nedostatku prirodnih sirovina mnoge industrije cementa rade s umjetnim sirovinama, tj. miješaju se tri glavne komponente, kao što su: vapnenac, glina i kvarc. Prije pečenja sirovine u klinker, potrebno je sirovinu usitniti drobilicama na određenu granulaciju (najčešće od 1 do 8 cm). Slijedi skladištenje sirovine u halama za sirovinu gdje se vrši predhomogenizacija. Nakon toga sirovina se suši u sušarama na zadovoljavajući postotak vlažnosti. Sirovina se dalje melje u mlinu sirovina do te mjere da samljevenu frakciju odnosi struja zraka u silos za homogenizaciju da bi se postigao određeni sastav sirovine te odvođi na predgrijavanje u izmjenjivač topline radi veće učinkovitosti prije ulaska u peć. Potom slijedi druga faza, pečenje sirovine u klinker, gdje se unutar rotacijske peći postižu temperature od oko 1400 °C, a sirovina se u djelomično rastaljenom stanju pretvara u klinker. Nakon toga dobiveni klinker ide na hlađenje zrakom u hladnjak klinkera. Iz hale klinkera cementni klinker se transportira na završno mljevenje u fini prah u mlinu cementa. Pri mljevenju mu se dodaje gips u iznosu od 5 mas. % te dobiva fini sivi prah koji se naziva Portland cement. Tako pripremljeni prah odnosno cement se pakira u vreće ili skladišti u silose, a potom se vrši njegov transport cisternama ili vrećama do potrošača.

Shema procesa proizvodnje Portland cementa² prikazana je na slici 1.



Slika 1. Shema proizvodnje Portland cementa²

Osnovni dijelovi procesa za proizvodnju Portland cementa su prije svega rudnik koji sadržava kvalitetnu sirovinu odgovarajućeg sastava. Uz odgovarajuću sirovinu tu još pripadaju i primarna drobilica, hala sirovine, dozatori, sekundarna drobilica, silosi za homogenizaciju, peć klinkera (rotacijska), hladnjak klinkera, hala klinkera, mlinovi cementa, silosi u koje se pohranjuje cement te sva utovarna i transportna pomagala i vozila. Na slici 2. prikazana je rotacijska peć za proizvodnju klinkera, a na slici 3. klizni ležajevi rotacijske peći.³



Slika 2. Rotacijska peć za proizvodnju klinkera³

Rotacijska peć je čelični cilindar promjera nekoliko metara i dužine 50 – 200 m. Iznutra je obložen visokotemperaturnim vatrostalnim opekama debljine do 0,5 m. Blago je nagnuta na jednu stranu i na donjem kraju opremljena plamenikom. Gornji kraj čini ulaz za sirovinu. Rotira se brzinom 3-4 okr./min oko uzdužne osi što uzrokuje postupno gibanje materijala s višeg, hladnijeg kraja, prema nižem. Na kraju se ispušta i hladi.⁴

Rotacijska peć je u osnovi nesavršeni protusmjerni izmjenjivač topline. Pri prijelazu topline s plinova na materijal, radi visokih temperaturnih razlika između materijala i plinova, toplina se nepovratno gubi kroz plašt peći i s vrućim klinkerom napušta peć. Prijelaz topline u slučaju klasičnih rotacijskih peći odvija se 80% zračenjem i 20% konvekcijom.¹

Rotacijska peć oslanja se na noseće prstenove i valjke koji su izloženi različitim dinamičkim opterećenjima koja potječu od težine peći, zasipa, rotacije peći i temperaturnih gradijenata, a raspoređeni su duž peći.



Slika 3. Klizni ležajevi rotacijske peći³

Vođenje pokretnih strojnih dijelova omogućuju klizni ležajevi. Tijekom rada rotacijske peći na kliznim ležajevima, dolazi do trenja što za posljedicu ima zagrijavanje mineralnog ulja (maziva) kojim se ležajevi podmazuju te ga je potrebno na adekvatni

način ohladiti. Za tu svrhu koriste se industrijski izmjenjivači topline različitih kapaciteta i izvedbi kako bi se postiglo adekvatno hlađenje kliznih ležajeva.

Podmazivanje uljem⁵ je od iznimne važnosti za sve uređaje koji sadržavaju brzohodne ležajeve na kojim se uslijed trenja javljaju visoke temperature, ali i visoki tlakovi. Najčešće korišteno te ujedno i ekonomski najisplativije jest optočno ili cirkulacijsko podmazivanje. Ovakva vrsta podmazivanja se u praksi pokazala kao provjerena jer zadovoljava i najvišim standardima podmazivanja. U sustavu se nalazi uljna pumpa u kojoj je pohranjeno ulje predviđeno za podmazivanje. Uz pomoć pumpe i cijevnog sustava ulje se transportira na mjesta predviđena za podmazivanje ležajeva. Ulje koje se cijedi prilikom podmazivanja, sakuplja se u tzv. zbirnike te se hladi i filtrira te ponovo koristi u sljedećem stupnju podmazivanja. Ulje koje cirkulira kroz mrežu cijevi istodobno ima i funkciju hlađenja ležajeva.

1.2. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Uređaji za prijenos topline odnosno izmjenjivači topline⁶⁻⁹ su uređaji u kojima se toplinska energija prenosi od toplijeg ka hladnijem fluidu koji struje kroz izmjenjivač radi zagrijavanja ili ohlađivanja jednog fluida drugim. U industrijskoj praksi toplina se najčešće izmjenjuje između dvije struje fluida. Njihova primjena je široka i često se primjenjuju u grijačima, kondenzatorima, hladnjacima, klima uređajima i slično. Posebice široku primjenu imaju u industrijskim postrojenjima pa se često koriste u prerađivačkoj i procesnoj industriji.

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

Prema načinu ostvarivanja kontakta odnosno prema načinu izmjene topline, izmjenjivači topline se dijele na:

- izmjenjivače topline s direktnim kontaktom fluida – u ovom slučaju toplina se izmjenjuje direktnim kontaktom toplijeg i hladnijeg fluida pa se ovakvi fluidi nakon izmjene relativno lako mogu odvojiti

- izmjenjivače topline s indirektnim kontaktom fluida – u ovom slučaju toplina se najprije izmjenjuje između toplog fluida i čvrste površine za prijenos topline, a zatim između čvrste površine i hladnog fluida.

Više su zastupljeni, posebno u industriji, izmjenjivači s indirektnim kontaktom fluida. Njih dijelimo na:

- rekuperatore
- regeneratore
- izmjenjivače s fluidiziranim slojem

U izmjenjivačima topline mogu se odviti tri mehanizma prijenosa topline:

- konvekcija (prijelaz topline s toplijeg fluida na stijenku cijevi, a zatim sa stijenke cijevi na hladniji fluid)
- kondukcija (provođenje topline kroz čvrstu stijenku)
- zračenje odnosno radijacija

U industriji se najčešće koriste rekuperatori. Kod takvih je aparata razdijelna stijenka rashladna ili ogrjevna površina, koja ne dopušta međusobni izravni dodir struja. Razdijelna stijenka može biti cijevnog ili pločastog oblika. Ova dva oblika razdijelne stijenke najčešće se koriste u tehničkoj praksi. Ukoliko je razdijelna stijenka cijevnog oblika isti se sastoji od snopa cijevi koji je umetnut u bubanj (plašt), tzv. shell&tube izvedba. Kroz cijevi struji jedna struja, npr. hladnija, koja se prolaskom kroz aparat zagrijava, a u prostoru oko cijevi struji toplija struja koja se hladi prolaskom kroz rekuperator.

Postoji više tipova višecijevnih izmjenjivača topline koji se primjenjuju ovisno o namjeni za pojedinu industrijsku granu:

- izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi u plaštu (Slika 4)¹⁰
- U-cijevni izmjenjivači (Slika 5)¹¹
- izmjenjivači s plutajućom glavom
- kotlasti izmjenjivači odnosno rebojleri

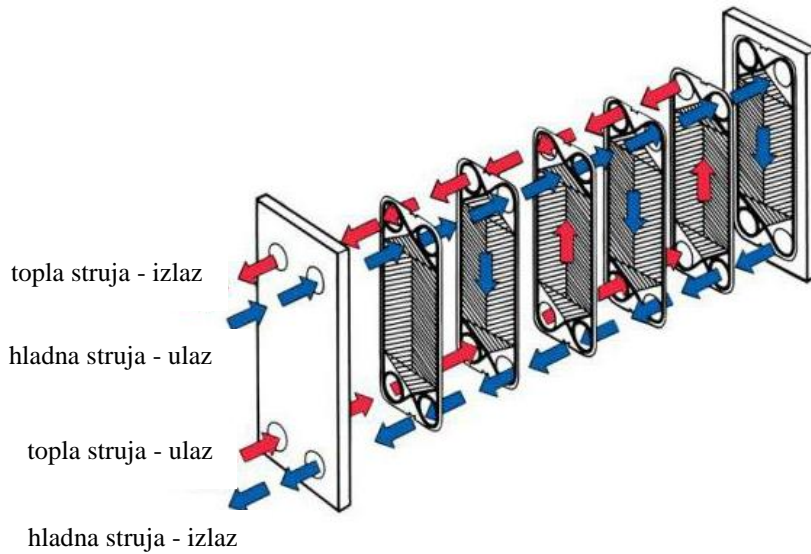


Slika 4. Izmjenjivač s učvršćenim snopom cijevi u plaštu (shell&tube)¹⁰



Slika 5. U-cjevni izmjenjivač¹¹

Na slici 6. prikazana je pločasta izvedba regeneratora.

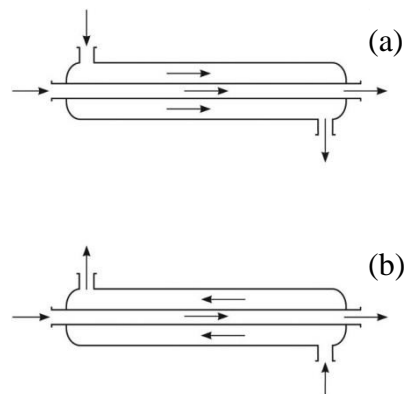


Slika 6. Pločasti (protusmjerni) izmjenjivač topline¹²

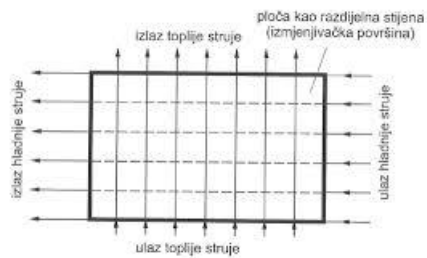
1.3. OSNOVNI TIPOVI REKUPERATORA

Podjela rekuperatora se vrši s obzirom na odnos strujanja dvaju fluida:

- istosmjerni (obe struje teku paralelno u istom smjeru, Slika 7a)
- protusmjerni (obe struje teku paralelno, ali u suprotnim smjerovima, Slika 7b)
- križni (struje fluida se međusobno križaju, Slika 8)

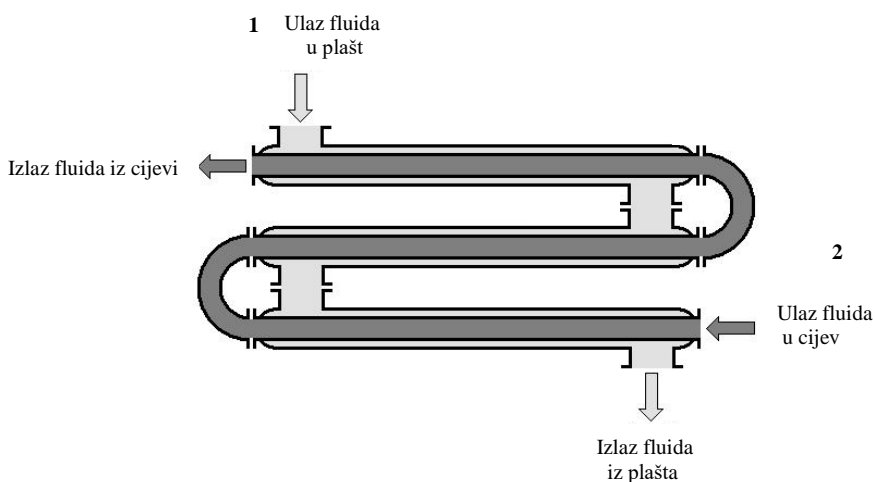


Slika 7. Istosmjerni (a) i protusmjerni (b) tip rekuperatora¹³



Slika 8. Križni tip rekuperatora⁶

Višecijevni (**engl. shell&tube**) izmjenjivači topline mogu biti horizontalne ili vertikalne izvedbe, s pregradama ili bez pregrada, te s jednim ili više prolaza fluida kroz cijevi odnosno kroz plašt (Slika 9.).



Slika 9. Višecijevni (**engl. shell&tube**) rekuperator, tip 1-2 (1 prolaz kroz plašt, 2 prolaza kroz cijevi)¹⁴

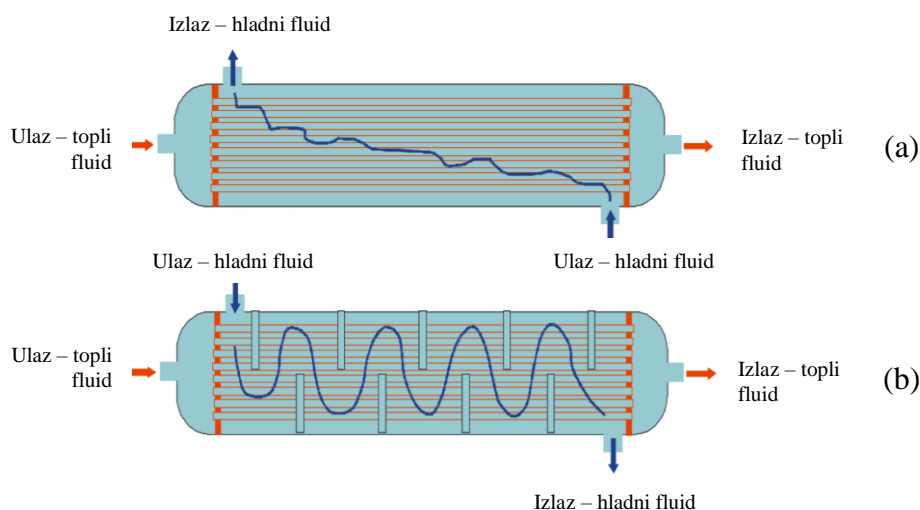
1.4. PREGRADE U PLAŠTU

Pregrade^{8,15} u plaštu imaju trostruku ulogu:

- pridržavaju cijevi te ih na taj način drže fiksiranim,
- održavaju cijevi na propisanom razmaku u odnosu jedna na drugu te
- usmjeravaju fluid na strani plašta.

Važno je napomenuti kako pregrade ne ispunjavaju cijeli presjek plašta. Zato je kod dizajniranja i odabira vrste izmjenjivača topline za pojedinu industriju važno odabrati valjan razmak između pregrada te odsječka pregrada kako bi se osigurala najveća moguća brzina strujanja fluida te samim time brzina prijenosa topline uz što manji pad tlaka.

Za horizontalne izmjenjivače topline orijentacija reza pregrada je bitna. Ako nema fazne promjene, rez mora biti horizontalan. Zbog toga fluid struji gore-dolje čime se sprječava stvaranje slojeva, i to toplijeg fluida pri vrhu, a hladnijeg pri dnu. Ako fluid u plaštu kondenzira rez je vertikalan kako bi se osigurao tok kondenzata prema izlazu bez značajnog zadržavanja kapljevine pregradom. Ako dolazi do vrenja pregrade mogu biti ili vertikalne ili horizontalne.



Slika 10. Protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada (a) i istosmjerni izmjenjivač topline s pregradama (b)¹⁶

Kako je i zadano u ovom diplomskom radu, postoje različiti tipovi industrijskih izmjenjivača topline, npr. MIT 03, MIT 04, itd. Svaki tip izmjenjivača se odlikuje različitom duljinom cijevi u cijevnom snopu kao i različitim brojem pregrada u plaštu.

MIT 03 ima najmanju duljinu cijevi i najmanji broj pregrada. Oznake MIT-ova rastu kako raste duljina cijevi te broj pregrada u plaštu.

1.5. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJE FLUIDA

Radi lakšeg proračuna izmjenjivača topline, za identifikaciju pojedinih struja fluida, koristi se vrijednost toplinskog kapaciteta, koji se računa iz izraza:

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

gdje je:

C – toplinski kapacitet, W/K

Q_m – maseni protok fluida, kg/s

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

Dogovorno je uzeto da se indeks 1 pripisuje slabijoj struji fluida (manja vrijednost C), a jačoj struji fluida indeks 2 (veća vrijednost C).

Sukladno gore navedenom, vrijedi omjer:

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

Navedeni omjer je u granicama:

$$0 \leq \frac{C_1}{C_2} \leq 1 \quad (3)$$

Za ulazne temperature se koristi oznaka jednostrukog apostrofa ', a za izlazne temperature dvostrukog apostrofa ''.

1.6. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Za toplinski tok u rekuperatoru^{6,7} može se napisati formalnu matematičku vezu:

$$\phi = f(K, A_o, t', t'', C) \quad (4)$$

gdje je:

ϕ – toplinski tok ili fluks, W

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

A_o – ukupna površina prijenosa topline, m²

C – toplinski kapaciteti slabije odnosno jače struje, W/K

t', t'' – ulazna odnosno izlazna temperatura slabije ili jače struje

Koeficijent prolaza topline je bitna veličina pri ovakvim proračunima. Ta veličina sadrži u svojoj strukturi sve relevantne toplinske otpore koji se javljaju na relaciji izmjene topline *fluid-stijenka-fluid*. Stoga su u izraz za koeficijent prolaza topline uključeni koeficijenti prijelaza topline s jedne i druge strane razdjelne stijenke, njena toplinska provodnost, kao i njena geometrija.

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_i + \frac{A_o}{A_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_o} \right)} \quad (5)$$

gdje je:

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

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

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

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

Tijekom računanja potrebno je uzeti temperaturnu ovisnost fizikalnih svojstava fluida, a koja se očitavaju iz tablica za temperaturu t_m koja odgovara aritmetičkoj sredini ulazne i izlazne vrijednosti temperature pojedine struje, tj.

$$t_m = \frac{t' + t''}{2} \quad (6)$$

gdje je:

t_m – aritmetička sredina promatrane struje fluida, °C

t' i t'' – ulazna odnosno izlazna temperatura pojedine struje fluida, °C.

Također važno je voditi računa o onečišćenjima na stijenkama cijevi odnosno naslagama koje se mogu pojaviti. Njih je teško odrediti, no uzimaju se iskustveno ovisno o mediju koji cirkulira kroz cijevi. Ako se nakon nekog vremena naslage pojave, mogu se uklanjati mehanički (struganje, četkanje, fluid u cijevi), kemijski (upotreba adekvatnih otapala koji će prouzrokovati kemijsku reakciju) ili ispiranjem.

Osnovni izraz za proračun bilo kojeg izmjenjivača topline je:

$$\phi = K \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (7)$$

gdje je:

ϕ – toplinski tok ili fluks, kJ/h

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

A – površina prijenosa topline, m²

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

Srednja logaritamska razlika temperatura definirana je izrazom:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (8)$$

gdje su:

ΔT_1 i ΔT_2 – razlike temperatura "hladnog" i "toplog" fluida na jednoj i drugoj strani izmjenjivača topline, s time da se indeks 1 odnosi na veću temperaturnu razliku, a indeks 2 na manju razliku, ovisno o promatranoj situaciji.

Srednja logaritamska razlika temperatura izračunata iz jednadžbe (8) vrijedi za izmjenjivače topline s jednim prolazom fluida i kroz plašt i kroz cijevi. Međutim, najčešće se izmjenjivači konstruiraju tako da ima više prolaza kroz plašt i/ili cijevi.

U takvim slučajevima dolazi do križanja temperatura, tj. u jednom dijelu cijevi i plašta "hladni" fluid ima višu temperaturu od "toplog" fluida, te je stoga potrebno izvršiti korekciju ΔT_m .

Korigirana srednja vrijednost, $\Delta T_{m, \text{kor}}$, dobiva se množenjem izračunatog ΔT_m iz jednadžbe (8) s faktorom F , koji se može odrediti koristeći odgovarajuće dijagrame ovisnosti $F = f(P, R)$ ili pak računskim putem.

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F \quad (9)$$

Korelacije potrebne za proračun faktora F su sljedeće:

$$F = \left[\frac{(R^2+1)^{1/2}}{R-1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1-P_n}{1-R \cdot P_n}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{P_n}\right)^{-1-R+(R^2+1)^{1/2}}}{\left(\frac{2}{P_n}\right)^{-1-R-(R^2+1)^{1/2}}}\right]} \quad (10)$$

gdje je:

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} \quad (11)$$

U jednadžbi (11) n predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt.

Parametar P je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} \quad (12)$$

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

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} \quad (13)$$

Općenita je preporuka da korekcijski faktor ne smije biti manji od 0,75. Ukoliko se dobije faktor manji od 0,75 treba pokušati s izmjenjivačem s više prolaza fluida kroz plašt dok se ne dobije zadovoljavajuća vrijednost korekcijskog faktora.

1.7. KOEFICIJENTI PRIJELAZA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI

Za koeficijent prijelaza topline^{6,7}, kada ne dolazi do promjene faza, za laminarno područje strujanja ($Re < 2300$) koristi se Sieder-Tateova jednadžba:

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

gdje je:

Nu – Nusseltova značajka

α_i – koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi, $\text{kJ}/(\text{h m}^2 \text{K})$

d_i – unutarnji promjer cijevi, m

λ – toplinska vodljivost fluida, $\text{kJ}/(\text{m K})$

Pe – Pecletova značajka

L – duljina cijevi, m

μ – viskoznost, Pa s

μ_s – viskoznost fluida pri temperaturi stijenke, Pa s

Pecletova značajka je:

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

gdje su:

Re – Reynoldsova značajka

Pr – Prandtlova značajka

koje se izračunavaju prema relacijama:

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

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

gdje je:

ω – brzina fluida u cijevi, m/s

ρ – gustoća fluida u cijevi, kg/m^3

q_m – masena brzina fluida u cijevi, $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$

c_p – toplinski kapacitet fluida, $\text{kJ}/(\text{kg K})$

Za ostala dva načina strujanja (turbulentno i prijelazno područje) vrijede sljedeći izrazi:

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

Izraz (18) vrijedi za turbulentno strujanje u cijevima ($Re > 10\,000$).

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

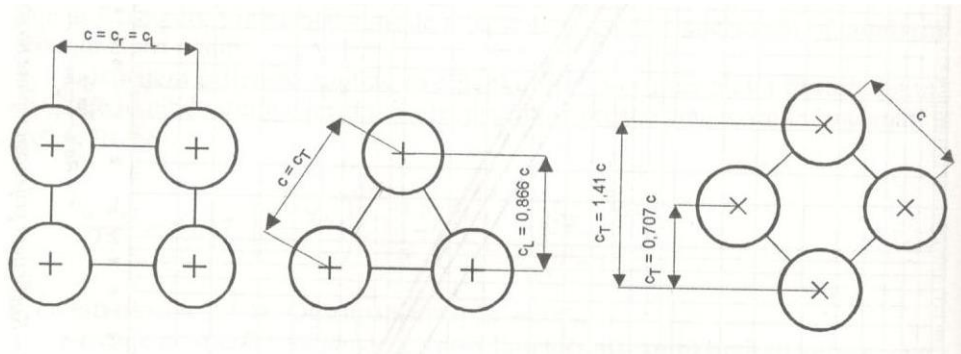
Izraz (19), tzv. Hausenova jednačba vrijedi za prijelazno područje strujanja u cijevima ($2300 < Re < 10\,000$).

1.8. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU

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

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

Duljina stranice trokuta ili kvadrata, koje čine tri ili četiri susjedne cijevi, naziva se korak cijevi, c . Prema rasporedu cijev u cijevnom snopu razlikuje se također i uzdužni korak c_L i poprečni korak c_T . Njihovi međusobni odnosi prikazani su na slici 11.



Slika 11. Raspored i korak cijevi u cijevnom snopu⁷

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

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

Za raspored cijevi u trokutu d_e se računa prema izrazu:

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

Masena brzina fluida u plaštu, q_m , računa se pomoću izraza:

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

gdje je:

Q_m – maseni protok fluida, kg/h

A_s – slobodna površina presjeka cijevnog snopa, m²

Slobodna površina presjeka se računa iz izraza:

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

gdje je:

d_{pl} – unutarnji promjer plašta, m

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

c – korak cijevi, m

d_o – vanjski promjer cijevi, m

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

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

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

Za šahovski raspored cijevi i turbulentno strujanje fluida; svojstva fluida $0,7 < Pr < 480$ i odnose u cijevnom snopu $1,3 < (c_L/d_o) < 2,6$ i $0,6 < (c_L/d_o) < 4$

$$C = 0,41 (c_T/c_L)^{0,166} \quad \text{za } (c_T/c_L) < 2$$

$$C = 0,46 \quad \text{za } (c_T/c_L) \geq 2$$

$n = 0,60$ i $m = 0,33$.

Koeficijent prijelaza topline izračunat preko izraza (24) važi za treći i iduće redove u snopu cijevi. Razlog tome je nedovoljno razvijeno strujanje i prijelaz topline kod prvog i drugog reda.

Prema tome, srednja vrijednost koeficijenta prijelaza topline⁹ za snop od N redova u pravcu strujanja je:

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

gdje je:

N_1 – broj cijevi u prvom redu

N_2 – broj cijevi u drugom redu

N – ukupan broj cijevi.

2.EKSPERIMENTALNI DIO

Shema rotacijske peći, s prikazom temperature, protoka rashladne vode i oznakama broja kućišta na ulaznom bloku rotacijske peći prikazana je na slici 2. Iz slike je vidljivo da su položaji izmjenjivača postavljeni na sjevernom i južnom kućištu ulaznog bloka – s unutarnje i vanjske strane kućišta u smjeru istok-zapad. Dakle, ulazni blok ima četiri izmjenjivača (2 unutarnja, 2 vanjska) u smjeru istok, te četiri izmjenjivača u smjeru zapad.

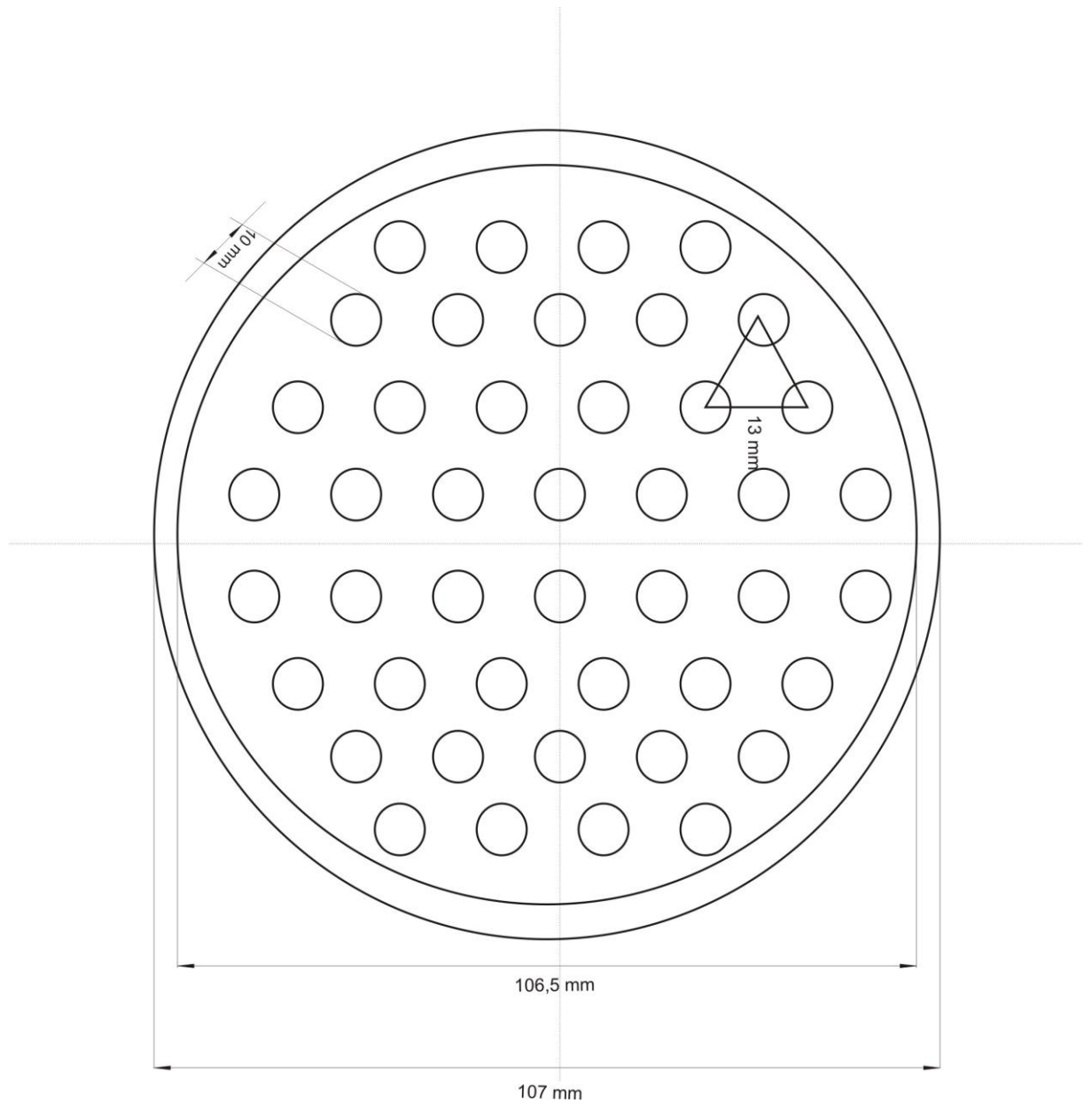
Ukupno 8 izmjenjivača na ulaznom bloku.

Potrebno je ispitati seriju industrijskih izmjenjivača topline, tip 1-2, čije su oznake prikazane u Tablici 1.

Tablica 1. Oznake industrijskih izmjenjivača topline (IT), tip 1-2

Tip izmjenjivača	Duljina cijevi u cijevnom snopu, $L/$ mm	Broj pregrada u plaštu, N_{pr}
MIT 03	250	6
MIT 04	320	6
MIT 05	400	6
MIT 06	540	9
MIT 07	610	9
MIT 08	690	9
MIT 09	770	9
MIT 10	840	9

Prikaz cijevnog snopa u plaštu za sve ispitivane MITove prikazan je na slici 1.



Slika 1. Cijevni snop u plaštu

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, $N_2 = 6$

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

$$d_{pl} = 114,3 - 3,6 \cdot 2 = 107,1 \approx 107 \text{ mm}$$

Poprečna površina presjeka cijevi, a_c , u svim MITovima je ista:

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

Ukupna poprečna površina presjeka cijevi, A_c , u svim MITovima je također ista, tj.

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

U MITovima se mijenja broj pregrada u plaštu

MIT03 – MIT 05.....6 pregrada

MIT 06 – MIT 109 pregrada

Ekvivalentni promjer cijevi, d_e :

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

Svi MITovi imaju isti $d_e = 8,503 \text{ mm} = 0,008503 \text{ m}$

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa, A_s , se mijenja u MITovima jer se mijenja razmak između pregrada, l_{pr} , ovisno o dužini cijevi L i broju pregrada N_{pr} .

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

$$l_{pr} = \frac{L}{N_{pr}}$$

U tablici 2. prikazani su podaci za razmak između pregrada, l_{pr} i slobodnu površinu presjeka cijevnog snopa, A_s , za ispitivane industrijske IT, a u tablici 3 prikazani su podaci raspoložive površine za prijenos topline za svaki pojedini IT.

Tablica 2. Razmak između pregrada, l_{pr} i slobodna površina presjeka cijevnog snopa, A_s

Tip izmjenjivača	l_{pr} / mm	A_s / mm^2
MIT 03	41,67	1029
MIT 04	53,34	1317
MIT 05	66,67	1646
MIT 06	60,00	1482
MIT 07	67,78	1674
MIT 08	70,67	1745
MIT 09	85,56	2113
MIT 10	93,34	2305

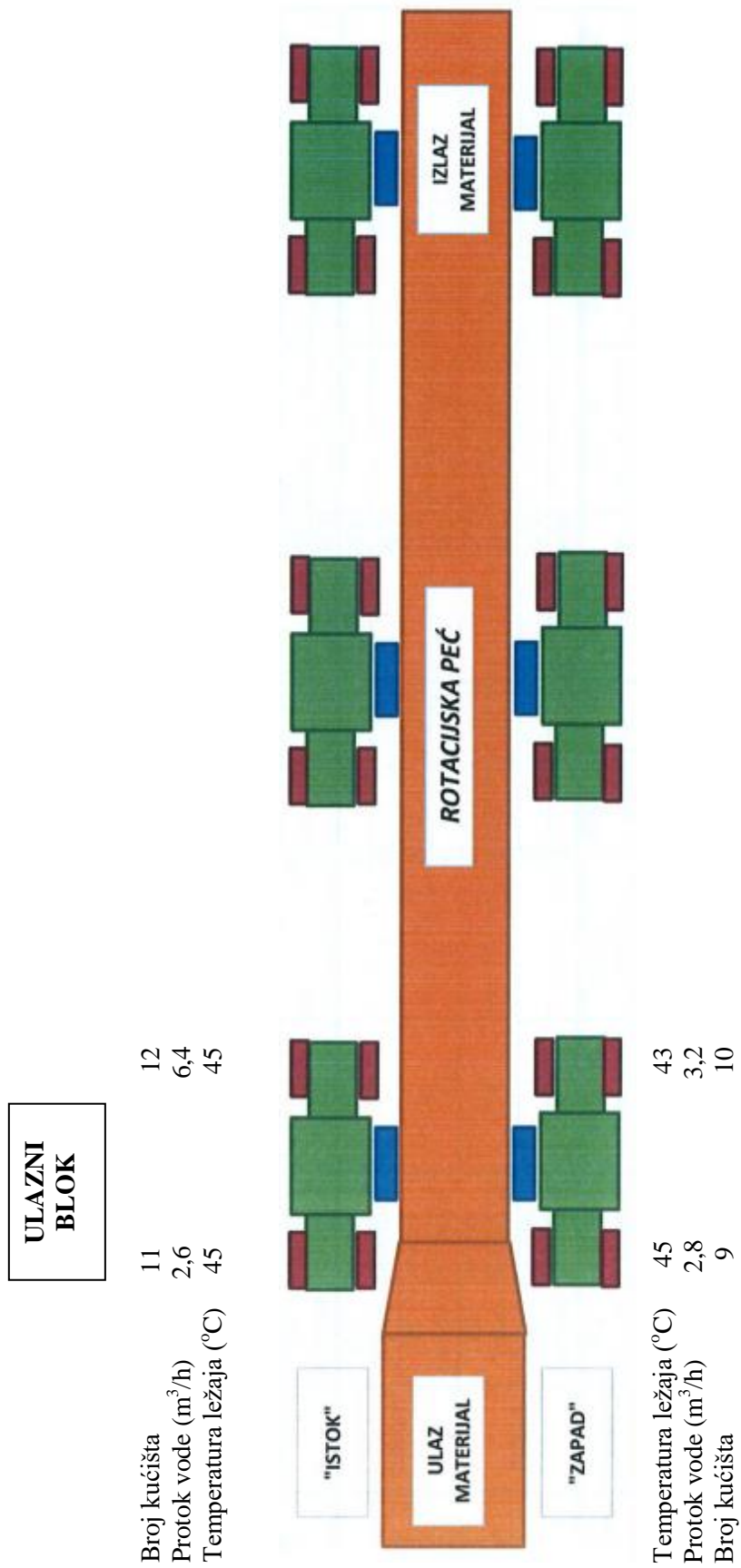
Tablica 3. Raspoloživa površina, A_o , za prijenos topline

Tip izmjenjivača	Duljina cijevi u cijevnom snopu, L / mm	$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c / \text{m}^2$
MIT 03	250	0,345
MIT 04	320	0,442
MIT 05	400	0,553
MIT 06	540	0,746
MIT 07	610	0,843
MIT 08	690	0,953
MIT 09	770	1,064
MIT 10	840	1,160

Karakteristični podaci za topli i hladni fluid prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Karakteristične veličine hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida na ulaznom bloku rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa.

Pozicija mjerenja				Izmjerene vrijednosti				
Blok peći	Položaj izmjenjivača	Kučište (br.)	Vodena strana	Temp. ulja na ulazu / °C	Protok ulja /m ³ h ⁻¹	Protok vode /m ³ h ⁻¹	Temp. vode na izlazu / °C	Razlika u temp. vode / K
Ulazni blok peći	Istočna strana	sjeverno (11)	unutarnja	45	1,44	2,6	26,8	1,7
			vanjska		1,20		27,4	2,3
		južno (12)	unutarnja	45	1,44	6,4	26,8	1,7
			vanjska		1,80		26,8	1,7
	Zapadna strana	sjeverno (9)	unutarnja	45	1,80	2,8	26,8	1,7
			vanjska		2,00		27,8	2,7
		južno (10)	unutarnja	43	1,44	3,2	26,2	1,1
			vanjska		1,80		26,8	1,7



Slika 2. Prikaz temperature, protoka rashladne vode i broj kućišta rotacijske peći na ulaznom bloku

2.1. ULAZNI BLOK ROTACIJSKE PEĆI – ISTOČNA STRANA

2.1.1. UNUTARNJA STRANA – SJEVER – KUČIŠTE (11)

2.1.1.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUČIŠTE (11)

Identifikacija pojedine struje fluida vrši se prema kriteriju vrijednosti toplinskog kapaciteta C .

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{V,U} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$ na sjevernom (11) kućištu, na unutarnjoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_U = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hladniji fluid je voda, izlazne temperature $t''_V = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$, a razlika u temperaturi vode iznosi $1,7 \text{ K}$.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_V = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{V,V} = 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 25,95 \text{ }^\circ\text{C}$.

Obzirom da se temperatura $25,95 \text{ }^\circ\text{C}$ ne nalazi u tablicama¹⁷, potrebno je napraviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i $40 \text{ }^\circ\text{C}$ koje se nalaze u danim tablicama.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 5.

Tablica 5. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi $25,95 \text{ }^\circ\text{C}$

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_{m,V} / \text{ }^\circ\text{C}$
	25,95
$\rho_V / \text{ kg/m}^3$	996,215
$c_{p,V} / \text{ kJ/(kg K)}$	4,1808
$\lambda_V / \text{ W/(m K)}$	0,6066
$\nu_V / \text{ m}^2/\text{s}$	$0,9053 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / \text{ (N s)/m}^2$	$901,854 \cdot 10^{-6}$

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi $45 \text{ }^\circ\text{C}$, prikazana su u tablici 6.

Tablica 6. Fizikalna svojstva ulja pri ulaznoj temperaturi 45 °C

Fizikalna svojstva ulja	$t'_U / ^\circ\text{C}$
	45
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	854,75
$c_{p,U} / \text{kJ}/(\text{kg K})$	1,955
$\lambda_U / \text{W}/(\text{m K})$	0,14275
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,1825 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6139 \cdot 10^{-6}$

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

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

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT)

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

$$C_V = \frac{2,6}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1808 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 3,008 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3008 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT)

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

$$C_U = \frac{1,44}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,955 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_U = 0,668 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 668 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{1,44}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,342 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{2,6}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,719 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

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

Shodno tome oznake su sljedeće:

C_1 – toplinski kapacitet struje ulja = 668 W/K

C_2 – toplinski kapacitet struje rashladne vode = 3008 W/K

t_1' – ulazna temperatura ulja

t_1'' – izlazna temperatura ulja

t_2' – ulazna temperatura rashladne vode

t_2'' – izlazna temperatura rashladne vode

2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA ULJA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUČIŠTE (11)

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT), odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3008 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 5114 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 5114 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 668 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (45 - t_1'') = 5114 \text{ W}$$

$$t_1'' = 37,34 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT) je 37,34 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t'_1 - t''_1 = 45 - 37,34 = 7,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu ulja koja se određuje prema jednadžbi (6).

Srednja temperatura ulja (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{45 + 37,34}{2} = 41,17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva ulja, nakon izvršene interpolacije, prikazana su u tablici 7.

Tablica 7. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja 41,17 °C (ulazni blok peći istočna strana kućište – sjeverno (11) – unutarnji IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / ^\circ\text{C}$
	41,17
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	857,24
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9389
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,14294
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,7543 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6647,33 \cdot 10^{-6}$

2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUČIŠTE (11)

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,V} = 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,U} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 45 - 26,8 = 18,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 37,34 - 25,1 = 12,24 \text{ K}$$

Srednja logaritamska razlika temperature:

$$\Delta T_m = \frac{18,2 - 12,24}{\ln\left(\frac{18,2}{12,24}\right)} = 15,03 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{45 - 37,34}{26,8 - 25,1} = 4,5$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,8 - 25,1}{45 - 25,1} = 0,085$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,5 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}}{4,5 - \left(\frac{4,5 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}} = 0,085$$

$$F = \left[\frac{(4,5^2 + 1)^{1/2}}{4,5 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,085}{1 - 4,5 \cdot 0,085}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 4,5 + (4,5^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 4,5 - (4,5^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0,882$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 15,03 \cdot 0,882 = 13,26 \text{ K}$$

2.1.1.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI – (ulazni blok peći, istočna strana, kućište – sjeverno (11), unutarnji IT)

Maseni protok rashladne vode (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{2,6}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,719 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Masena brzina rashladne vode u cijevi

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{0,719 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{996,125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,653 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{901,854 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 5775$$

$Re > Re_{kr}$

$5775 > 2300$ prijelazno područje strujanja $2300 < Re < 10\,000$, pa se koristi Hausenova jednadžba:

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

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

Za svaki od raspoloživih MITova računa se α_i .

MIT03

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{901,854 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,6066 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 6,22$$

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5775^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{250} \right)^{2/3} \right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 5013 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT03}$$

MIT04

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot \left(5775^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{320} \right)^{\frac{2}{3}} \right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 4944 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT04}$$

MIT05

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5775^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{400} \right)^{2/3} \right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 4889,81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT05}$$

MIT06

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5775^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{540}\right)^{2/3}\right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 4828,96 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT06}$$

MIT07

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5775^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{610}\right)^{2/3}\right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 4807,52 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT07}$$

MIT08

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5775^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{690}\right)^{2/3}\right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 4787,54 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT08}$$

MIT09

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5775^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{770}\right)^{2/3}\right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 4771,09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT09}$$

MIT10

$$\frac{\alpha_i}{4180,8 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 651 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5775^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{840}\right)^{2/3}\right]}{5775} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 4758,87 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{za MIT10}$$

2.1.1.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU (ulazni blok peći, istočna strana, kućište – sjeverno (11), unutarnji IT)

Masena brzina ulja u plaštu za MIT03:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1029 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 333,23 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{333,23 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 426,25$$

$$Re < Re_{kr}$$

426,25 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (426,25)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 983 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 983 \cdot 7 + 0,7 \cdot 983 \cdot 6 + 983 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 880 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad \text{za MIT03}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{880} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{5013} \cdot \frac{10}{8}} = 720 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{5114 \text{ W}}{720 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,535 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT03:

$$A_o = 0,345 \text{ m}^2 \quad \text{ne zadovoljava}$$

Masena brzina ulja u plaštu, za **MIT04**:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1317 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 260,36 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{260,36 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 333,04$$

$$Re < Re_{kr}$$

333,04 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (333,04)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 869 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 869 \cdot 7 + 0,7 \cdot 869 \cdot 6 + 869 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 778 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad \text{za MIT04}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{778} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{4944} \cdot \frac{10}{8}} = 649 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{5114 \text{ W}}{649 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,593 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT04:

$$A_o = 0,442 \text{ m}^2 \quad \text{ne zadovoljava}$$

Masena brzina ulja u plaštu, za MIT05:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1646 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 208,32 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{208,32 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 266,47$$

$$Re < Re_{kr}$$

266,47 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (266,46)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 777 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 777 \cdot 7 + 0,7 \cdot 777 \cdot 6 + 777 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 696 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad \text{za MIT05}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{696} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{4889,81} \cdot \frac{10}{8}} = 590 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{5114 \text{ W}}{590 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,653 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT05:

$$A_o = 0,553 \text{ m}^2 \quad \text{ne zadovoljava}$$

Masena brzina ulja u plaštu, za **MIT06**:

9 pregrada u plaštu

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1482 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 231,37 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{231,37 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 296$$

$$Re < Re_{kr}$$

296 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (296)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 819 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 819 \cdot 7 + 0,7 \cdot 819 \cdot 6 + 819 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 737 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad \text{za MIT06}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{737} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{4828,96} \cdot \frac{10}{8}} = 618 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{5114 \text{ W}}{618 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,624 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT06:

$$A_o = 0,746 \text{ m}^2 \quad \text{zadovoljava}$$

Masena brzina ulja u plaštu, za MIT07:

9 pregrada u plaštu

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1674 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 204,84 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$\text{Re} = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{204,84 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 262,02$$

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

$262,02 < 2300$ laminarno strujanje u plaštu

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

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (262,02)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 770 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 770 \cdot 7 + 0,7 \cdot 770 \cdot 6 + 770 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 689,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad \text{za MIT07}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{689,5} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{4807,52} \cdot \frac{10}{8}} = 584 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,\text{kor}}} = \frac{5114 \text{ W}}{584 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,666 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT07:

$$A_o = 0,843 \text{ m}^2 \quad \text{zadovoljava}$$

Masena brzina ulja u plaštu za **MIT08**:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1745 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 196,50 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{196,50 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 251,35$$

$$Re < Re_{kr}$$

251,35 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (251,35)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 755 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 755 \cdot 7 + 0,7 \cdot 755 \cdot 6 + 755 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 676 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad \text{za MIT08}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{676} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{4787,54} \cdot \frac{10}{8}} = 574 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{5114 \text{ W}}{574 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,671 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT08:

$$A_o = 0,953 \text{ m}^2 \quad \text{zadovoljava}$$

Masena brzina ulja u plaštu za **MIT09**:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2113 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 162,28 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{162,28 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 208$$

$$Re < Re_{kr}$$

208 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (208)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 686 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 686 \cdot 7 + 0,7 \cdot 686 \cdot 6 + 686 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 614 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad \text{za MIT09}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{614} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{4771,09} \cdot \frac{10}{8}} = 528 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,\text{kor}}} = \frac{5114 \text{ W}}{528 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,730 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT09:

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

Masena brzina ulja u plaštu za **MIT10**:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{1,44 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2305 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 149 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{149 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 190$$

$$Re < Re_{\text{kr}}$$

190 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6647,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1938,9 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 90,167$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,14294 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (190)^{0,50} \cdot (90,167)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 659 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 659 \cdot 7 + 0,7 \cdot 659 \cdot 6 + 659 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 590 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \quad \text{za MIT10}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{590} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{4758,87} \cdot \frac{10}{8}} = 510 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{5114 \text{ W}}{510 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 13,26 \text{ K}} = 0,756 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT10:

$$A_o = 1,161 \text{ m}^2 \quad \text{zadovoljava}$$

U tablici 8. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (**engl. shell&tube**), tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), unutarnji IT.

Tablica 8. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (engl. *shell&tube*), tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), unutarnji IT

$Q_{v,V}$	2,6 m ³ /h							
ϕ_V	5114 W							
$Q_{m,V}$	0,719 kg/s							
$q_{m,V}$	651 kg/(s m ²)							
ω_c	0,653 m/s							
Δt_V	1,7 °C							
t_2''	26,8 °C	$t_{m,V} = 25,95$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3800 W/K							
$Q_{v,U}$	1,44 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,342 kg/s							
$C_U = C_1/$	668 W/K							
t_1'	45 °C	$t_{m,U} = 41,17$ °C						
t_1''	37,34 °C							
Δt_U	7,65 °C							
ΔT_m	15,03 K							
F	0,882							
$\Delta T_{m,kor}$	13,26 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	5775 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)	5013	4944	4889,81	4828,96	4807,52	4787,54	4771,09	4758,87
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	333,23	260,36	208,32	231,37	204,84	196,50	162,28	149
Re (u plaštu) (laminarno)	426,25	333,04	266,47	296	262,02	251,35	208	190
α_o W/(m ² K)	983	869	777	819	770	755	686	659
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	880	778	696	737	689,5	676	614	590
K W/(m ² K)	720	649	590	618	584	574	528	510
A m ²	0,535	0,593	0,653	0,624	0,666	0,671	0,730	0,756
A_o m ²	0,345	0,442	0,553	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,250	0,320	0,400	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

2.1.2. VANJSKA STRANA – SJEVER – KUČIŠTE (11)

Koristeći prethodno navedene izvode i jednačbe u poglavlju 2.1.1. izračunate su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje shell&tube izmjenjivače, tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), vanjski IT.

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{V,U} = 1,20 \text{ m}^3/\text{h}$ na sjevernom (11) kućištu, na vanjskoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_{U} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hladniji fluid je rashladna voda, izlazne temperature $t''_{V} = 27,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a razlika u temperaturi vode iznosi 2,3 K.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_{V} = 25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{V,V} = 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 26,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Obzirom da se temperatura 26,25 °C ne nalazi u tablicama¹⁷, potrebno je napraviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 °C koje se nalaze u danim tablicama.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi 26,25 °C

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_{m,V} / \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\rho_V / \text{ kg/m}^3$	996,125
$c_{p,V} / \text{ kJ/(kg K)}$	4,18075
$\lambda_V / \text{ W/(m K)}$	0,6071
$\nu_V / \text{ m}^2/\text{s}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / \text{ (N s)/m}^2$	$896,5125 \cdot 10^{-6}$

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi 45 °C, prikazana su u tablici 6.

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_2 = \frac{2,6}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18075 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_2 = 3,008 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3008 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Vidljivo je da toplinski kapacitet vode (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT) ostaje nepromijenjen.

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$

$$C_1 = \frac{1,20}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,955 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_1 = 0,557 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 557 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT) se smanjio jer je smanjen volumni protok ulja u plaštu vanjskog izmjenjivača.

Maseni protok ulja (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{1,20}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,285 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{2,6}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,719 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode se ne mijenja.

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT), odnosno izlazna temperatura ulja na vanjskoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3008 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 2,3 \text{ K} = 6918 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 6918 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 557 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (45 - t_1'') = 6918 \text{ W}$$

$$t_1'' = 32,58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT) je 32,58 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 45 - 32,58 = 12,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu ulja (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{45 + 32,58}{2} = 38,79 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva ulja, nakon izvršene interpolacije, prikazana su u tablici 10.

Tablica 10. Fizikalna svojstva ulja u funkciji temperature ulja, pri $t_{m,U} = 38,79 \text{ } ^\circ\text{C}$ (ulazni blok peći istočna strana kućište – sjeverno (11) – vanjski IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ } ^\circ\text{C}$
	38,79
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	858,79
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9289
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,14306
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$8,3577 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$7177,54 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 1,20 \text{ m}^3/\text{h}$), za vanjski IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 45 - 27,4 = 17,6 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 32,58 - 25,1 = 7,48 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{17,6 - 7,48}{\ln\left(\frac{17,6}{7,48}\right)} = 11,83 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{45 - 32,58}{27,4 - 25,1} = 5,4$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{27,4 - 25,1}{45 - 25,1} = 0,116$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5,4 \cdot 0,116 - 1}{0,116 - 1}\right)^{1/1}}{5,4 - \left(\frac{5,4 \cdot 0,116 - 1}{0,116 - 1}\right)^{1/1}} = 0,116$$

$$F = \left[\frac{(5,4^2 + 1)^{1/2}}{5,4 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,116}{1 - 5,4 \cdot 0,116}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,116}\right) - 1 - 5,4 + (5,4^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,116}\right) - 1 - 5,4 - (5,4^2 + 1)^{1/2}}\right]} = 0,963$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 11,83 \cdot 0,963 = 11,33 \text{ K}$$

U tablici 11. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače (**engl.** *shell&tube*), tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), vanjski IT.

Tablica 11. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače
(**engl.** *shell&tube*), tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), vanjski IT

$Q_{v,V}$	2,6 m ³ /h							
ϕ_V	6918 W							
$Q_{m,V}$	0,719 kg/s							
$q_{m,V}$	651 kg/(s m ²)							
ω_c	0,653 m/s							
Δt_V	2,3 °C							
t_2''	27,4 °C	$t_{m,V} = 26,25$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3800 W/K							
$Q_{v,U}$	1,20 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,285 kg/s							
$C_U = C_1/$	557 W/K							
t_1'	45 °C	$t_{m,U} = 38,79$ °C						
t_1''	32,58 °C							
Δt_U	12,42 °C							
ΔT_m	11,83 K							
F	0,963							
$\Delta T_{m,kor}$	11,33 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	5806 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)				4857,26	4837	4816	4799	4787
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)				193,16	171,01	164,05	135,48	114,28
Re (u plaštu)				228,83	202,59	194,34	160,50	135,38
α_o W/(m ² K)				739,22	695,55	681,24	619	568,58
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)				661,94	622,83	610,02	554,28	509,14
K W/(m ² K)				564,77	535,74	525,92	483,74	449
A m ²				1,081	1,139	1,161	1,262	1,359
A_o m ²				0,746	0,843	0,953	1,064	1,161
L m				0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

Rezultati proračuna ukazuju da je potrebno podatke za protok ulja na istočnoj strana, kućište (11), sjever, vanjska strana korigirati, tj. povećati protok ulja na 1,80 m³/h, kako bi se zadovoljila raspoloživa površina prijenosa topline ispitivanih industrijskih IT.

Koristeći prethodno navedene izvode i jednadžbe izračunate su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne shell&tube izmjenjivače, tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), vanjski IT (uz volumni protok ulja $Q_{V,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$).

Povećanjem protoka ulja na 1,8 m³/h povećao se toplinski kapacitet ulja $C_1 = 836 \text{ W/K}$, dok temperatura ulja na izlazu (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT) iznosi 36,72 °C.

Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja 40,86 °C prikazana su u tablici 12.

Tablica 12. Fizikalna svojstva ulja u funkciji temperature ulja (ulazni blok peći, istočna strana kućište – sjeverno (11), vanjski IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / ^\circ\text{C}$ 40,86
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	857,44
$c_{p,U} / \text{J}/(\text{kg K})$	1,9376
$\lambda_U / \text{W}/(\text{m K})$	0,14296
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,80143 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6689,26 \cdot 10^{-6}$

U tablici 13. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače (**engl. shell&tube**), tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), vanjski IT, (uz volumni protok ulja $Q_{V,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$).

Tablica 13. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače (engl. *shell&tube*), tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (11), vanjski IT, (uz volumni protok ulja $Q_{V,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$)

$Q_{v,v}$	2,6 m ³ /h							
ϕ_V	6918 W							
$Q_{m,v}$	0,719 kg/s							
$q_{m,v}$	651 kg/(s m ²)							
ω_c	0,653 m/s							
Δt_V	2,3 °C							
t_2''	27,4 °C	$t_{m,v} = 26,25 \text{ °C}$						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3800 W/K							
$Q_{v,U}$	1,80 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,427 kg/s							
$C_U = C_1/$	836 W/K							
t_1'	45 °C	$t_{m,U} = 40,86 \text{ °C}$						
t_1''	36,72 °C							
Δt_U	8,28 °C							
ΔT_m	14,40 K							
F	0,984							
$\Delta T_{m,kor}$	14,17 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	5806 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)				4857,26	4837	4816	4799	4787
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)				289,28	256,11	246	203	186
Re (u plaštu)				367,72	325,55	313	258	236
α_o W/(m ² K)				914,68	860,59	844	766	733
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)				819,05	771	756	686	656
K W/(m ² K)				675	642	631	581	559
A m ²				0,723	0,760	0,774	0,840	0,873
A_o m ²				0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m				0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

2.1.3. UNUTARNJA STRANA – JUG – KUČIŠTE (12)

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{v,U} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$ na južnom (12) kućištu, na unutarnjoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_U = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hladniji fluid je rashladna voda, izlazne temperature $t''_V = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$, a razlika u temperaturi vode iznosi 1,7 K.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_V = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{v,V} = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ pri srednjoj temperaturi $t_{m,V} = 25,95 \text{ }^\circ\text{C}$ prikazana su u tablici 5.

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi $45 \text{ }^\circ\text{C}$, prikazana su u tablici 6.

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – unutarnji IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_2 = \frac{6,4}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1808 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_2 = 7,404 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 7404 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – unutarnji IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$

$$C_1 = \frac{1,44}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,955 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_1 = 0,668 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 668 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – unutarnji IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{1,44}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,342 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – unutarnji IT)

$$Q_{m,v} = Q_{v,v} \cdot \rho_v = \frac{6,4}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,771 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – unutarnji IT), odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

$$\phi_v = \dot{Q}_v = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = C_2 \cdot \Delta t_v$$

$$\phi_v = \dot{Q}_v = 7404 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 12587 \text{ W}$$

$$\phi_u = \dot{Q}_u = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 12587 \text{ W}$$

$$\phi_u = \dot{Q}_u = 668 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (45 - t_1'') = 12587 \text{ W}$$

$$t_1'' = 26,16 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok istočna strana, kućište južno (12) – unutarnji IT) je 26,16 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_u = t_1' - t_1'' = 45 - 26,16 = 18,84 \text{ }^\circ\text{C}$$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 45 - 26,8 = 18,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 26,16 - 25,1 = 1,06 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{18,2 - 1,06}{\ln\left(\frac{18,2}{1,06}\right)} = 6,03 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{45 - 26,16}{26,8 - 25,1} = 11,08$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,8 - 25,1}{45 - 25,1} = 0,085$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{11,8 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}}{11,8 - \left(\frac{11,8 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}} = 0,085$$

$$F = \left[\frac{(11,8^2 + 1)^{1/2}}{11,8 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,085}{1 - 11,8 \cdot 0,085}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 11,8 + (11,8^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 11,8 - (11,8^2 + 1)^{1/2}}\right]} = \textit{negativno}$$

Dakle, zadani protok rashladne vode na unutarnjoj strani kućišta – jug (12) potrebno je korigirati, tj. smanjiti protok vode na $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Smanjenjem volumnog protoka vode na $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$, uz nepromijenjeni $\Delta t_V = 1,7 \text{ }^\circ\text{C}$, smanjuje se toplinski kapacitet vode (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – unutarnji IT), a time i izmijenjeni toplinski tok, te slijedi:

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_2 = \frac{3,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1808 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_2 = 3,702 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3702 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3702 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 6293 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 6293 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 668 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (45 - t_1'') = 6293 \text{ W}$$

Izlazna temperatura ulja sada iznosi:

$$t_1'' = 35,58 \text{ }^\circ\text{C}$$

Promjena temperature ulja je:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 45 - 35,58 = 9,42 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu ulja $t_{m,U} = 40,29 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja $t_{m,U} = 40,29 \text{ }^\circ\text{C}$

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,V} / \text{ }^\circ\text{C}$
	40,29
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	857,812
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9352
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,14298
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,887 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6765,26 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,U} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 45 - 26,8 = 18,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 35,58 - 25,1 = 10,48 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{18,2 - 10,48}{\ln\left(\frac{18,2}{10,48}\right)} = 13,97 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{45 - 35,58}{26,8 - 25,1} = 5,54$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,8 - 25,1}{45 - 25,1} = 0,085$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5,54 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}}{5,54 - \left(\frac{5,54 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}} = 0,085$$

$$F = \left[\frac{(5,54^2 + 1)^{1/2}}{11,8 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,085}{1 - 11,8 \cdot 0,085}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 11,8 + (11,8^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 11,8 - (11,8^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0,986$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F = 13,97 \cdot 0,986 = 13,77 \text{ K}$$

U tablici 15. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (**engl. shell&tube**), tip 1-2, istočna strana, kućište južno (12), unutarnji IT, (uz volumni protok vode $Q_{V,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$).

Tablica 15. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (engl. *shell&tube*), tip 1-2, istočna strana, kućište jug (12), unutarnji IT

$Q_{v,V}$	3,2 m ³ /h							
ϕ_V	6293 W							
$Q_{m,V}$	0,885 kg/s							
$q_{m,V}$	801 kg/(s m ²)							
ω_c	0,804 m/s							
Δt_V	1,7 °C							
t_2''	26,8 °C	$t_{m,V} = 25,95$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3702 W/K							
$Q_{v,U}$	1,44 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,342 kg/s							
$C_U = C_1/$	668 W/K							
t_1'	45 °C	$t_{m,U} = 40,29$ °C						
t_1''	35,58 °C							
Δt_U	9,42 °C							
ΔT_m	13,97 K							
F	0,986							
$\Delta T_{m,kor}$	13,77 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	7105 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)	6228	6142	6068	6060	6033	5948	5927	5912
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	333,45	260,53	208,46	231,53	204,97	196,63	162,39	148,86
Re (u plaštu)	419	321,45	262	291	257,62	247,14	204,10	187,10
α_o W/(m ² K)	979,65	858,55	775,10	816,87	768,59	792,86	684,12	655
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	877,23	768,79	694,07	720,33	688,24	709,97	612,60	586,52
K W/(m ² K)	744,46	663,63	606,29	626,13	601,41	616,81	541,75	521,10
A m ²	0,614	0,689	0,754	0,729	0,760	0,741	0,844	0,877
A_o m ²	0,345	0,442	0,553	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,250	0,320	0,400	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

2.1.4. VANJSKA STRANA – JUG – KUČIŠTE (12)

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{v,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$ na južnom (12) kućištu, na vanjskoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_{U} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hladniji fluid je rashladna voda, izlazne temperature $t''_{V} = 26,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a razlika u temperaturi vode iznosi 1,7 K.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_{V} = 25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{v,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 25,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i prikazana su u tablici 5.

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$, prikazana su u tablici 6.

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – vanjski IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_2 = \frac{3,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1808 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_2 = 3,702 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3702 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – vanjski IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$

$$C_1 = \frac{1,80}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,955 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_1 = 0,836 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 836 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – vanjski IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{1,80}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,427 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – vanjski IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{3,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,885 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok istočna strana, kućište južno (12) – vanjski IT), odnosno izlazna temperatura ulja na vanjskoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3702 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 6293,4 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 6293,4 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 836 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (45 - t_1'') = 6293,4 \text{ W}$$

$$t_1'' = 37,47 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok istočna strana, kućište južno (12) – vanjski IT) je 37,47 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 45 - 37,47 = 7,53 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu ulja $t_{m,U} = 41,235 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 16.

Tablica 16. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja $t_{m,U} = 41,235 \text{ }^\circ\text{C}$ (ulazni blok peći istočna strana kućište – jug (12) – vanjski IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$
	41,235
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	857,20
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9392
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,1429
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,7454 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6639,33 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$), za vanjski IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 45 - 226,8 = 18,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 37,47 - 25,1 = 12,37 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{18,2 - 12,37}{\ln\left(\frac{18,2}{12,37}\right)} = 15,09 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{45 - 37,47}{26,8 - 25,1} = 4,43$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''} = \frac{26,8 - 25,1}{45 - 25,1} = 0,085$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,43 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}}{4,43 - \left(\frac{4,43 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}} = 0,085$$

$$F = \left[\frac{(4,43^2 + 1)^{1/2}}{4,43 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,085}{1 - 4,43 \cdot 0,085}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 4,43 + (4,43^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 4,43 - (4,43^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0,981$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 15,09 \cdot 0,981 = 14,80 \text{ K}$$

U tablici 17. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače (**engl. shell&tube**), tip 1-2, istočna strana, kućište južno (12), vanjski IT, (uz volumni protok vode $Q_{v,v} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$).

Tablica 17. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (engl. *shell&tube*), tip 1-2, istočna strana, kućište jug (12), vanjski IT

$Q_{v,V}$	3,2 m ³ /h							
ϕ_V	6293,4 W							
$Q_{m,V}$	0,885 kg/s							
$q_{m,V}$	801 kg/(s m ²)							
ω_c	0,804 m/s							
Δt_V	1,7 °C							
t_2''	26,8 °C	$t_{m,V} = 25,95$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3702 W/K							
$Q_{v,U}$	1,80 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,427 kg/s							
$C_U = C_1/$	836 W/K							
t_1'	45 °C	$t_{m,U} = 41,235$ °C						
t_1''	37,47 °C							
Δt_U	7,53 °C							
ΔT_m	15,09 K							
F	0,981							
$\Delta T_{m,kor}$	14,80 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	7105 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)	6228	6142	6068	6060	6033	5948	5927	5912
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	416,52	325,44	260,39	289,20	256,03	245,62	203	186
Re (u plaštu)	533,45	417	333,48	370,38	328	315	260	238
α_o W/(m ² K)	1099	971	869	915,52	862	844,31	767	734
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	984	869,49	749,51	820	772	756	687	668
K W/(m ² K)	820	737,35	648,17	700	664	651,26	599	4
A m ²	0,519	0,577	0,656	0,608	0,640	0,653	0,710	0,728
A_o m ²	0,345	0,442	0,553	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,250	0,320	0,400	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

Rezultati proračuna su ukazali da treba smanjiti protok rashladne vode na 3,2 m³/h, kako bi se zadovoljila raspoloživa površina prijenosa topline ispitivanih industrijskih IT, i na unutarnjoj i na vanjskoj strani kućišta (12).

Karakteristične veličine hladnog 2 (rashladna voda) i toplog 1 (mineralno ulje) fluida na ulaznom bloku rotacijske peći, istočna strana, kućište: sjeverno (11) i južno (12), na unutarnjoj i vanjskoj strani, nakon izvršene korekcije, prikazane su u u tablici 18.

Tablica 18. Karakteristične veličine hladnog 2 (rashladna voda) i toplog 1 (mineralno ulje) fluida na ulaznom bloku rotacijske peći, istočna strana položaja izmjenjivača topline

Položaj IT	Kućište (br.)	Vodena strana	t''_1 / °C	t'_1 / °C	$Q_{v,U}$ /m ³ h ⁻¹	$Q_{v,v}$ /m ³ h ⁻¹	t''_2 / °C	Δt_v / K
Istočna strana	sjeverno (11)	unutarnja	45	37,35	1,44	2,6	26,8	1,7
		vanjska		36,72	1,80		27,4	2,3
	južno (12)	unutarnja	45	35,58	1,44	3,2	26,8	1,7
		vanjska		37,47	1,80		26,8	1,7

3.1. ULAZNI BLOK ROTACIJSKE PEĆI – ZAPADNA STRANA

3.1.1. SJEVERNO KUČIŠTE (9) – UNUTARNJI IZMJENJIVAČ TOPLINE

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{v,U} = 1,80$ m³/h na sjevernom (9) kućištu, na unutarnjoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_U = 45$ °C.

Hladniji fluid je rashladna voda, izlazne temperature $t''_v = 26,8$ °C, a razlika u temperaturi vode iznosi 1,7 K.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_v = 25,1$ °C,

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{v,v} = 2,8$ m³/h.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,v} = 25,95$ °C i prikazana su u tablici 5.

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi 45 °C, prikazana su u tablici 6.

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_2 = \frac{2,8}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1808 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_2 = 3,239 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3239 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$

$$C_1 = \frac{1,80}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,955 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_1 = 0,836 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 836 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{1,80}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,427 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{2,8}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,775 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT), odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3239 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 5507 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 5507 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 836 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (45 - t_1'') = 5507 \text{ W}$$

$$t_1'' = 38,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT) je 38,41 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 45 - 38,41 = 6,59 \text{ °C}$$

Fizikalna svojstva ulja¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu ulja $t_{m,U} = 41,705 \text{ °C}$.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 19.

Tablica 19. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja $t_{m,U} = 41,705 \text{ °C}$ (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{°C}$
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	856,89
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9412
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,1429
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,6751 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6576,72 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,V} = 2,8 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 45 - 26,8 = 18,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 38,41 - 25,1 = 13,31 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{18,2 - 13,31}{\ln\left(\frac{18,2}{13,31}\right)} = 15,63 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{45 - 38,41}{26,8 - 25,1} = 3,88$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,8 - 25,1}{45 - 25,1} = 0,085$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{3,88 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}}{3,88 - \left(\frac{3,88 \cdot 0,085 - 1}{0,085 - 1}\right)^{1/1}} = 0,085$$

$$F = \left[\frac{(3,88^2 + 1)^{1/2}}{3,88 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,085}{1 - 3,88 \cdot 0,085}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 3,88 + (3,88^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,085}\right) - 1 - 3,88 - (3,88^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,992$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F = 15,63 \cdot 0,992 = 15,51 \text{ K}$$

U tablici 20. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (**engl. shell&tube**), tip 1-2, zapadna strana, kućište sjeverno (9), unutarnji IT.

Tablica 20. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (engl. *shell&tube*), tip 1-2, zapadna strana, kućište sjeverno (9), unutarnji IT

$Q_{v,v}$	2,8 m ³ /h							
ϕ_v	5507 W							
$Q_{m,v}$	0,775 kg/s							
$q_{m,v}$	701 kg/(s m ²)							
ω_c	0,704 m/s							
Δt_v	1,7 °C							
t_2''	26,8 °C	$t_{m,v} = 25,95$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_v = C_2$	3239 W/K							
$Q_{v,u}$	1,80 m ³ /h							
$Q_{m,u}$	0,427 kg/s							
$C_u = C_1/$	836 W/K							
t_1'	45 °C	$t_{m,u} = 41,705$ °C						
t_1''	38,41 °C							
Δt_u	6,59 °C							
ΔT_m	15,63 K							
F	0,992							
$\Delta T_{m,kor}$	15,51 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	6213 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)	5427	5352	5294	5228	5205	5183	5165	5152
$q_{m,u}$ kg/(s m ²)	416,37	325,32	260,29	289,10	255,94	245,53	202,77	185,88
Re (u plaštu)	538,32	421	336,53	374	330,90	317,44	262,16	240,32
α_o W/(m ² K)	1100	973,12	870	917,19	862,73	845	767,91	735,22
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	985	871,38	779	821	772,54	757	688	658
K W/(m ² K)	801	723	657	685	651	639	589	567
A m ²	0,443	0,491	0,540	0,518	0,545	0,556	0,603	0,626
A_o m ²	0,345	0,442	0,553	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,250	0,320	0,400	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

3.1.2. SJEVERNO KUČIŠTE (9) – VANJSKI IZMJENJIVAČ TOPLINE

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{V,U} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ na sjevernom (9) kućištu, na vanjskoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_{U} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hladniji fluid je rashladna voda, izlazne temperature $t''_{V} = 27,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a razlika u temperaturi vode iznosi $2,7 \text{ K}$.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_{V} = 25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{V,V} = 2,8 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 26,45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i prikazana su u tablici 21.

Tablica 21. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi vode $t_{m,V} = 26,45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_{m,V} / \text{ }^{\circ}\text{C}$ 26,45
$\rho_V / \text{ kg/m}^3$	996,065
$c_{p,V} / \text{ kJ/(kg K)}$	4,1807
$\lambda_V / \text{ W/(m K)}$	0,6074
$\nu_V / \text{ m}^2/\text{s}$	$0,8965 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / \text{ (N s)/m}^2$	$892,953 \cdot 10^{-6}$

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$, prikazana su u tablici 6.

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – vanjski IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_2 = \frac{2,8}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,065 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1807 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_2 = 3,239 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3239 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$

$$C_1 = \frac{2,0}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,955 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_1 = 0,928 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 928 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{2,0}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 854,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,475 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{2,8}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,065 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,775 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT), odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3239 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 2,7 \text{ K} = 8745,3 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 8745,3 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 928 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (45 - t_1'') = 8745,3 \text{ W}$$

$$t_1'' = 35,58 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – unutarnji IT) je 35,58 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 45 - 35,58 = 9,42 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu ulja $t_{m,U} = 40,29 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 22.

Tablica 22. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja $t_{m,U} = 40,29 \text{ }^\circ\text{C}$ (ulazni blok zapadna strana, kućište sjever (9) – vanjski IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	857,81
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9352
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,14298
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,8866 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6765,24 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,V} = 2,8 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,U} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 45 - 27,8 = 17,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 35,58 - 25,1 = 10,48 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{17,2 - 10,48}{\ln\left(\frac{17,2}{10,48}\right)} = 13,56 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{45 - 35,58}{27,8 - 25,1} = 3,49$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{27,8 - 25,1}{45 - 25,1} = 0,136$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{3,49 \cdot 0,136 - 1}{0,136 - 1}\right)^{1/1}}{3,49 - \left(\frac{3,49 \cdot 0,136 - 1}{0,136 - 1}\right)^{1/1}} = 0,136$$

$$F = \left[\frac{(3,49^2 + 1)^{1/2}}{3,49 - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - 0,136}{1 - 3,49 \cdot 0,136} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{2}{0,136} \right) - 1 - 3,49 + (3,49^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,136} \right) - 1 - 3,49 - (3,49^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,976$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F = 13,56 \cdot 0,976 = 13,23 \text{ K}$$

U tablici 23. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače (**engl.** *shell&tube*), tip 1-2, zapadna strana, kućište sjeverno (9), vanjski IT.

Tablica 23. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (engl. *shell&tube*), tip 1-2, zapadna strana, kućište sjeverno (9), vanjski IT

$Q_{v,V}$	2,8 m ³ /h							
ϕ_V	8745,3 W							
$Q_{m,V}$	0,775 kg/s							
$q_{m,V}$	701 kg/(s m ²)							
ω_c	0,704 m/s							
Δt_V	2,7 °C							
t_2''	27,8 °C	$t_{m,V} = 26,45$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3239 W/K							
$Q_{v,U}$	2,0 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,475 kg/s							
$C_U = C_1/$	928 W/K							
t_1'	45 °C	$t_{m,U} = 40,29$ °C						
t_1''	35,58 °C							
Δt_U	9,42 °C							
ΔT_m	13,56 K							
F	0,976							
$\Delta T_{m,kor}$	13,23 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	6280 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)	5472	5396	5337	5271	4971	5225	5207	5194
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	463,13	362	290	322	285	273	226	207
Re (u plaštu)	582	455	364	404	358	343	283	260
α_o W/(m ² K)	1155	1021	913	962	906	887	805	772
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	1034,25	914	818	861	811	794	721	691
K W/(m ² K)	835	753	685	714	672	666	614	592
A m ²	0,792	0,878	0,965	0,926	0,984	0,993	1,077	1,117
A_o m ²	0,345	0,442	0,553	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,250	0,320	0,400	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

3.1.3. JUŽNO KUČIŠTE (10) – UNUTARNJI IZMJENJIVAČ TOPLINE

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{V,U} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$ na južnom (10) kućištu, na unutarnjoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_{U} = 43 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hladniji fluid je rashladna voda, izlazne temperature $t''_{V} = 26,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a razlika u temperaturi vode iznosi 1,1 K.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_{V} = 25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{V,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 25,65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i prikazana su u tablici 24.

Tablica 24. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi vode $t_{m,V} = 25,65 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_{m,V} / \text{ }^{\circ}\text{C}$
	25,65
$\rho_V / \text{ kg/m}^3$	996,305
$c_{p,V} / \text{ kJ/(kg K)}$	4,18087
$\lambda_V / \text{ W/(m K)}$	0,6062
$\nu_V / \text{ m}^2/\text{s}$	$0,9106 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / \text{ (N s)/m}^2$	$907,195 \cdot 10^{-6}$

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi $43 \text{ }^{\circ}\text{C}$, prikazana su u tablici 25.

Tablica 25. Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi ulja $43 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ }^{\circ}\text{C}$
	43
$\rho_U / \text{ kg/m}^3$	856,05
$c_{p,U} / \text{ kJ/(kg K)}$	1,9466
$\lambda_U / \text{ W/(m K)}$	0,14285
$\nu_U / \text{ m}^2/\text{s}$	$7,4815 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / \text{ (N s)/m}^2$	$6404,54 \cdot 10^{-6}$

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$

$$C_2 = \frac{3,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,305 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18087 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_2 = 3,703 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3703 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$

$$C_1 = \frac{1,44}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 856,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9466 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_1 = 0,667 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 667 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{1,44}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 856,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,342 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{3,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,305 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,886 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT), odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3703 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,1 \text{ K} = 4073,3 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 4073,3 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 667 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (43 - t_1'') = 4073,3 \text{ W}$$

$$t_1'' = 36,89 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT) je 36,89 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 43 - 36,89 = 8,11 \text{ °C}$$

Fizikalna svojstva ulja¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu ulja $t_{m,U} = 39,95 \text{ °C}$.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 26.

Tablica 26. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja $t_{m,U} = 39,95 \text{ °C}$ (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{°C}$
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	858,033
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9338
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,1430
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,9375 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6810,615 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,U} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 43 - 26,2 = 16,8 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 36,89 - 25,1 = 11,79 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{16,8 - 11,79}{\ln\left(\frac{16,8}{11,79}\right)} = 14,15 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{43 - 36,89}{26,2 - 25,1} = 5,55$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,2 - 25,1}{43 - 25,1} = 0,061$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5,55 \cdot 0,061 - 1}{0,061 - 1}\right)^{1/1}}{5,55 - \left(\frac{5,55 \cdot 0,061 - 1}{0,061 - 1}\right)^{1/1}} = 0,061$$

$$F = \left[\frac{(5,55^2 + 1)^{1/2}}{5,55 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,061}{1 - 5,55 \cdot 0,061}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,061}\right) - 1 - 5,55 + (5,55^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,061}\right) - 1 - 5,55 - (5,55^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,994$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F = 14,15 \cdot 0,994 = 14,07 \text{ K}$$

U tablici 27. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (**engl.** *shell&tube*), tip 1-2, zapadna strana, kućište južno (10), unutarnji IT.

Tablica 27. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače
(**engl.** *shell&tube*), tip 1-2, zapadna strana, kućište južno (10), unutarnji IT

$Q_{v,V}$	3,2 m ³ /h							
ϕ_V	4073,3 W							
$Q_{m,V}$	0,886 kg/s							
$q_{m,V}$	802 kg/(s m ²)							
ω_c	0,805 m/s							
Δt_V	1,1 °C							
t_2''	26,2 °C	$t_{m,V} = 25,65$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3703 W/K							
$Q_{v,U}$	1,44 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,342 kg/s							
$C_U = C_1/$	667 W/K							
t_1'	43 °C	$t_{m,U} = 39,95$ °C						
t_1''	36,89 °C							
Δt_U	8,11 °C							
ΔT_m	14,15 K							
F	0,994							
$\Delta T_{m,kor}$	14,07 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	7072 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)	6209	6123	6056	5981	5955	5930	5909	5894
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	333,54	260,60	208,51	231,59	205,03	196,68	162,43	144,76
Re (u plaštu)	416,42	325,36	260,32	289,14	256,32	245,55	202,79	180,73
α_o W/(m ² K)	979,15	865,50	774,17	816	768,20	752	683,30	645,06
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	876,78	775,30	693,23	731	688	673,38	612,15	577,62
K W/(m ² K)	744	668	606	633	600,25	589	541,21	514
A m ²	0,389	0,433	0,478	0,457	0,482	0,492	0,535	0,563
A_o m ²	0,345	0,442	0,553	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,250	0,320	0,400	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

3.1.4. JUŽNO KUČIŠTE (10) – VANJSKI IZMJENJIVAČ TOPLINE

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{v,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$ na južnom (10) kućištu, na vanjskoj strani.

Ulazna temperatura ulja je $t'_U = 43 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hladniji fluid je rashladna voda, izlazne temperature $t''_V = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$, a razlika u temperaturi vode iznosi $1,7 \text{ K}$.

Vrijednost ulazne temperature vode je $t'_V = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$,

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{v,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 25,95 \text{ }^\circ\text{C}$ i prikazana su u tablici 5.

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi $43 \text{ }^\circ\text{C}$, prikazana su u tablici 25.

Toplinski kapacitet vode (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – vanjski IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$
$$C_2 = \frac{3,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1808 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$
$$C_2 = 3,702 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 3702 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – vanjski IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$
$$C_1 = \frac{1,80}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 856,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9466 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$
$$C_1 = 0,833 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 833 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – vanjski IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{1,8}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 856,05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,428 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{3,2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 996,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,886 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT), odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 3702 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 6293,4 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 6293,4 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 833 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (43 - t_1'') = 6293,4 \text{ W}$$

$$t_1'' = 35,44 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT) je 35,44 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 43 - 35,44 = 7,55 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja¹⁷ uzimaju se za srednju temperaturu ulja $t_{m,U} = 39,22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 28.

Tablica 28. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja $t_{m,U} = 39,22 \text{ }^\circ\text{C}$ (ulazni blok zapadna strana, kućište jug (10) – unutarnji IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$
	39,22
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	858,507
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,9307
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,14304
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$8,2057 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$7044,677 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$), za vanjski IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 43 - 26,8 = 16,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 35,44 - 25,1 = 10,34 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{16,2 - 10,34}{\ln\left(\frac{16,2}{10,34}\right)} = 13,05 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{43 - 35,44}{26,8 - 25,1} = 4,45$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,8 - 25,1}{43 - 25,1} = 0,095$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,45 \cdot 0,095 - 1}{0,095 - 1}\right)^{1/1}}{4,45 - \left(\frac{4,45 \cdot 0,095 - 1}{0,095 - 1}\right)^{1/1}} = 0,095$$

$$F = \left[\frac{(4,45^2 + 1)^{1/2}}{4,45 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,095}{1 - 4,45 \cdot 0,095}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,095}\right) - 1 - 4,45 + (4,45^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,095}\right) - 1 - 4,45 - (4,45^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,987$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 13,05 \cdot 0,987 = 12,88 \text{ K}$$

U tablici 29. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače (**engl. shell&tube**), tip 1-2, zapadna strana, kućište južno (10), vanjski IT.

Tablica 29. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače (engl. *shell&tube*), tip 1-2, zapadna strana, kućište južno (10), vanjski IT

$Q_{v,V}$	3,2 m ³ /h							
ϕ_V	6293,4 W							
$Q_{m,V}$	0,886kg/s							
$q_{m,V}$	802 kg/(s m ²)							
ω_c	0,805 m/s							
Δt_V	1,7 °C							
t_2''	26,8 °C	$t_{m,V} = 25,95$ °C						
t_2'	25,1 °C							
$C_V = C_2$	3702 W/K							
$Q_{v,U}$	1,8 m ³ /h							
$Q_{m,U}$	0,428 kg/s							
$C_U = C_1/$	833 W/K							
t_1'	43 °C	$t_{m,U} = 39,22$ °C						
t_1''	35,44 °C							
Δt_U	7,55 °C							
ΔT_m	13,05 K							
F	0,987							
$\Delta T_{m,kor}$	12,88 K							
	MIT03	MIT04	MIT05	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	7114 (prijelazno područje)							
α_i W/(m ² K)	6236,15	6149,50	6085,13	5665,52	5980,19	5955,34	5934,88	5665,26
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	417,16	325,93	260,79	289,64	260,63	245,99	203,15	186,23
Re (u plaštu)	503,52	393,40	314,78	349,60	314,58	296,91	245,20	224,78
α_o W/(m ² K)	1089,29	951,71	851,31	897,16	851,04	826,79	751,36	719,39
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	975,41	852,21	762,31	803,37	762,07	740,35	672,81	644,18
K W/(m ² K)	814,17	725	657,98	681,21	656,24	639,71	588,40	563,19
A m ²	0,600	0,674	0,743	0,717	0,745	0,764	0,830	0,868
A_o m ²	0,345	0,442	0,553	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,250	0,320	0,400	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

4. RASPRAVA

Upotreba izmjenjivača topline u sustavima hlađenja industrijskih rotacijskih peći u različitim tehnološkim procesima ima značajnu ulogu. To se prvenstveno odnosi na primjenu rekuperatora u kojima su fluidi između kojih se vrši izmjena topline međusobno odijeljeni čvrstom stijenkom. Fluidi struje istovremeno i pri stacionarnim uvjetima.

Mineralno ulje kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći se tijekom njenog rada zagrijava te ga je potrebno na adekvatan način ohladiti.

U ovom radu ispitivana je serija industrijskih višecijevnih (**engl.** *shell & tube*) izmjenjivača s učvršćenim cijevnim snopom u plaštu, s jednim (1) prolazom fluida kroz plašt i dva (2) prolaza fluida kroz cijevi, za ispitivane radne uvjete na ulaznom bloku peći koji su prikazani u tablici 4. Iz slike 2. na kojoj je prikazana shema rotacijske peći je vidljivo da na ulaznom bloku peći ima ukupno osam (8) izmjenjivača, na poziciji istok-zapad, koji su postavljeni na sjevernom i južnom kućištu peći, s unutarnje i vanjske strane.

Ispitivano je osam (8) industrijskih rekuperatora oznake MIT03 do MIT10, koji se međusobno razlikuju po duljini cijevi i broju pregrada u plaštu (Tablica 1.). Broj pregrada se mijenja od 6 (MIT03-MIT05) do 9 (MIT06-MIT10).

Prikaz cijevnog snopa u plaštu za sve ispitivane MITove prikazan je na slici 1. Ukupan broj cijevi u cijevnom snopu je 44, broj cijevi u prvom redu iznosi $N_1 = 7$, a u drugom redu $N_2 = 6$. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm. Svi MITovi imaju jednaku poprečnu površinu presjeka cijevi, $a_c = 50,24 \text{ mm}^2$, ukupnu poprečnu površinu presjeka cijevi, $A_c = 0,00221 \text{ m}^2$, kao i ekvivalentni promjer cijevi, $d_e = 8,503 \text{ mm}$. Slobodna površina presjeka cijevnog snopa, A_s , se mijenja u MITovima jer se mijenja razmak između pregrada, l_{pr} , ovisno o dužini cijevi L i broju pregrada N_{pr} .

Pri svim ispitivanim uvjetima rada na pojedinom kućištu ulaznog bloka uočljivo je da je kapacitet toplije struje (mineralnog ulja) C_U manji od kapaciteta hladnije struje (rashladna voda) C_V , te mu kao slabijoj struji pripada indeks 1, dok rashladnoj vodi kao jačoj struji pripada indeks 2.

Također, iz zadanih podataka proizilazi da je temperatura ulazne vode u izmjenjivač na svim pozicijama ulaznog bloka jednaka i iznosi $25,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Poznavajući toplinski kapacitet

vode, C_2 , i razliku temperatura vode na ulazu i izlazu izmjenjivača, Δt_V , dolazi se do toplinskog toka koji se mora ostvariti na pojedinoj poziciji ulaznog bloka. Toplinu koju u jedinici vremena prima rashladna voda odgovara toplini koju u jedinici vremena otpušta mineralno ulje, te se na osnovu toga može izračunati smanjenje temperature ulja, Δt_U , odnosno temperatura ulja na izlazu iz izmjenjivača, t''_1 .

Kod ovih izmjenjivača s više prolaza kroz cijevi istovremeno su prisutni istosmjerni i protusmjerni tokovi, a također zbog prisustva pregrada u plaštu djelomično je prisutan i križni tok. Pokretačka sila procesa $\Delta T_{m, kor}$ će biti manja od srednje logaritamske vrijednosti ΔT_m za iste razlike temperatura na ulazu i izlazu iz izmjenjivača ΔT_1 i ΔT_2 . Vrijednost ΔT_m se korigira množenjem s korekcijskim faktorom F koji ne smije biti manji od 0,75.

Sve fizikalne veličine ispitivanih fluida očitane su iz odgovarajućih tablica¹⁷ pri srednjoj aritmetičkoj temperaturi danog fluida (rashladna voda i/ili mineralno ulje) na ulazu i izlazu iz izmjenjivača.

Rezultati ispitivanja ukazuju da je na svim ispitivanim kućištima režim strujanja u plaštu izmjenjivača laminaran ($Re < Re_{kr}$), dok je strujanje vode u cijevima pri svim ispitivanim volumnim protocima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$).

Praćenjem karakterističnih veličina toplog (mineralnog ulja) fluida na ulaznom bloku peći i postavljanjem toplinsko-bilansne jednadžbe uočljivo je da u slučaju kada smanjenje temperature mineralnog ulja ide preko $\Delta t_U = 10$ K ispitivani indutrijski višecijevni izmjenjivači ne zadovoljavaju za izmjenu topline (Tablica 11) između hladnog i toplog fluida u svrhu hlađenja kliznih ležajeva rotacijske peći.

Rezultati proračuna istočne strane ulaznog bloka, kućište sjeverno (11) unutarnji IT (Tablica 8) pokazuju da za radne uvjete volumnog protoka rashladne vode $Q_{V,V} = 2,6$ m³/h i porast temperature vode $\Delta t_V = 1,7$ K te volumnog protoka mineralnog ulja $Q_{V,U} = 1,44$ m³/h i smanjenje temperature ulja $\Delta t_U = 7,65$ K, zadovoljavaju MITovi od MIT06-MIT10. Izmjenjivači MIT03-MIT05, tj. izmjenjivači manje duljine cijevi i raspoložive površine za izmjenu topline, A_o , ne zadovoljavaju za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.

Rezultati proračuna istočne strane, kućište sjeverno (11) vanjski IT (Tablica 11) ukazuju da za radne uvjete volumnog protoka rashladne vode $Q_{V,V} = 2,6$ m³/h ali uz porast

temperature vode $\Delta t_V = 2,3$ K te smanjenje volumnog protoka mineralnog ulja na $Q_{V,U} = 1,2$ m³/h, smanjenje temperature ulja raste na $\Delta t_U = 12,42$ K, te niti jedan od ispitivanih izmjenjivača ne zadovoljava za izmjenu topline. Rezultati proračuna ukazuju da je potrebno podatke za protok ulja na istočnoj strana, kućište (11), sjever, vanjska strana korigirati, tj. povećati protok ulja na 1,80 m³/h, kako bi se zadovoljila raspoloživa površina prijenosa topline ispitivanih industrijskih IT. Povećanjem protoka ulja na $Q_{V,U} = 1,8$ m³/h povećao se toplinski kapacitet ulja na $C_1 = 836$ W/K, dok temperatura ulja na izlazu (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (11) – vanjski IT) iznosi 36,72 °C, odnosno $\Delta t_U = 8,28$ K (Tablica 13.). Uz upotrebu izmjenjivača MIT06 do MIT10 moguće je ostvariti izmjenu topline pri navedenim uvjetima rada na kućištu (11) s vanjske strane.

Radni uvjeti na unutarnjoj strani kućišta (12), na južnoj strani istočnog bloka ne zadovoljavaju, tj. zadani volumni protok rashladne vode sa $Q_{V,V} = 6,4$ m³/h potrebno je smanjiti na $Q_{V,V} = 3,2$ m³/h, uz nepromijenjeni $\Delta t_V = 1,7$ K. Volumni protok ulja ostaje nepromijenjen, tj. $Q_{V,U} = 1,44$ m³/h. Rezultati su prikazani u tablici 15. Smanjenjem volumnog protoka vode uz nepromijenjeni Δt_V smanjuje se toplinski kapacitet vode (ulazni blok istočna strana, kućište jug (12) – unutarnji IT) na $C_2 = 3702$ W/K, kao i izmijenjeni toplinski tok, te izlazna temperatura ulja na izlazu iznosi 35,58 °C, odnosno $\Delta t_U = 9,42$ K. Višecijevni izmjenjivači MIT06 do MIT10 zadovoljavaju postavljene uvjete.

Na vanjskoj strani istog kućišta (12) (Tablica 17) volumni protok ulja raste na $Q_{V,U} = 1,8$ m³/h, dok karakteristike rashladne vode ostaju jednake, tj. volumni protok $Q_{V,V} = 3,2$ m³/h, i $\Delta t_V = 1,7$ K. Promjena temperature ulja u ovom slučaju iznosi $\Delta t_U = 7,53$ K. I u ovom slučaju višecijevni izmjenjivači MIT06 do MIT10 zadovoljavaju postavljene uvjete i omogućavaju izmjenu topline.

Dakle, rezultati proračuna ukazuju da je potrebno smanjiti protok vode na $Q_{V,V} = 3,2$ m³/h, kako bi se zadovoljila raspoloživa površina prijenosa topline ispitivanih industrijskih IT, i na unutarnjoj i na vanjskoj strani kućišta (12).

Karakteristične veličine hladnog 2 (rashladna voda) i toplog 1 (mineralno ulje) fluida na ulaznom bloku rotacijske peći, istočna strana, kućište: sjeverno (11) i južno (12), na unutarnjoj i vanjskoj strani, nakon izvršene korekcije, prikazane su u u tablici 18.

Ispitivanja ulaznog bloka rotacijske peći na zapadnoj strani, sjeverno kućište (9) – unutarnji izmjenjivač topline prikazani su u tablici 20. Radni uvjeti volumnog protoka rashladne vode su $Q_{V,V} = 2,8 \text{ m}^3/\text{h}$, a porast temperature vode $\Delta t_V = 1,7 \text{ K}$ te volumni protok mineralnog ulja $Q_{V,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$ i smanjenje temperature ulja $\Delta t_U = 6,59 \text{ K}$. Za navedene uvjete i karakteristične veličine hladnog i toplog fluida zadovoljava već MIT05. Potrebna površina za izmjenu topline iznosi $A = 0,540 \text{ m}^2$, a raspoloživa površina je $A_o = 0,553 \text{ m}^2$.

Ispitivanja ulaznog bloka rotacijske peći na zapadnoj strani, sjeverno kućište (9) – vanjski izmjenjivač topline prikazani su u tablici 23. Radni uvjeti volumnog protoka rashladne vode su ostali isti, tj. $Q_{V,V} = 2,8 \text{ m}^3/\text{h}$, ali je porast temperature vode porastao na $\Delta t_V = 2,7 \text{ K}$ te volumni protok mineralnog ulja na $Q_{V,U} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ i smanjenje temperature ulja za $\Delta t_U = 9,42 \text{ K}$. Za navedene uvjete i karakteristične veličine hladnog i toplog fluida zadovoljava izmjenjivač MIT10. Potrebna površina za izmjenu topline iznosi $A = 1,117 \text{ m}^2$, a raspoloživa površina je $A_o = 1,1603 \text{ m}^2$.

Radni uvjeti na unutarnjoj strani kućišta (10), na južnoj strani zapadnog bloka su volumni protok rashladne vode $Q_{V,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$, uz $\Delta t_V = 1,1 \text{ K}$. Volumni protok ulja ostaje nepromijenjen, tj. $Q_{V,U} = 1,44 \text{ m}^3/\text{h}$.

Na južnoj strani zapadnog bloka i na unutrašnjoj i na vanjskoj strani kućišta (10) temperatura ulja na ulazu iznosi $43 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na svim ostalim pozicijama ulaznog bloka peći temperatura ulja na ulazu iznosi $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rezultati su prikazani u tablici 27. Izlazna temperatura ulja iznosi $36,89 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno $\Delta t_U = 8,11 \text{ K}$. Za navedene uvjete i karakteristične veličine hladnog i toplog fluida zadovoljava već MIT04. Potrebna površina za izmjenu topline iznosi $A = 0,442 \text{ m}^2$, a raspoloživa površina je $A_o = 0,433 \text{ m}^2$.

Radni uvjeti na vanjskoj strani kućišta (10), na južnoj strani zapadnog bloka su volumni protok rashladne vode $Q_{V,V} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$, uz $\Delta t_V = 1,7 \text{ K}$. Volumni protok ulja iznosi $Q_{V,U} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$. Rezultati su prikazani u tablici 29. Izlazna temperatura ulja iznosi $35,44 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno $\Delta t_U = 7,55 \text{ K}$. Za navedene uvjete i karakteristične veličine hladnog i toplog fluida višecijevni izmjenjivači MIT06 do MIT10 zadovoljavaju postavljene uvjete.

Rezultati ispitivanja su pokazali da na istočnoj strani ulaznog bloka rotacijske peći na unutarnjoj i vanjskoj poziciji kućišta (11) i (12), kao i na zapadnoj strani ulaznog bloka rotacijske peći na unutarnjoj i vanjskoj poziciji kućišta (10), te na unutarnjoj poziciji kućišta (9) višecijevni izmjenjivači MIT06 do MIT10 zadovoljavaju postavljene uvjete rada. U svim ovim slučajevima potrebna površina za izmjenu topline je manja u odnosu na raspoloživu površinu te ispitivani višecijevni izmjenjivači navedenih karakteristika zadovoljavaju.

Rezultati ispitivanja su također pokazali da na ulaznom bloku rotacijske peći na zapadnoj strani, sjeverno kućište (9) – vanjski izmjenjivač topline zadovoljava samo MIT10 višecijevni izmjenjivač.

Dakle, u svrhu rješavanja sustava hlađenja kliznih ležajeva ulaznog bloka rotacijske peći na svim pozicijama kućišta (11) i (12) na istočnoj strani te na svim pozicijama kućišta (10) i unutarnjoj poziciji kućišta (9) na zapadnoj strani može se postaviti višecijevni izmjenjivač MIT06, dok bi na vanjskoj poziciji kućišta (9) na zapadnoj strani trebalo postaviti višecijevni izmjenjivač MIT10.

S obzirom da višecijevni MIT10 izmjenjivač topline zadovoljava pri svim karakterističnim veličinama hladnog 2 (rashladna voda) i toplog 1 (mineralno ulje) fluida na ulaznom bloku rotacijske peći i sa istočne i sa zapadne strane za sve ispitivane pozicije kućišta ulaznog bloka rotacijske peći isti bi trebalo postaviti na svim kućištima ulaznog bloka peći u svrhu hlađenja kliznih ležajeva.

5. ZAKLJUČCI

- Na svim ispitivanim kućištima ulaznog bloka rotacijske peći režim strujanja u plaštu izmjenjivača je laminaran ($Re < Re_{kr}$), dok je strujanje vode u cijevima pri svim ispitivanim volumnim protocima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$).
- Porastom promjene temperature toplijeg fluida (mineralno ulje) iznad $\Delta t_U = 10\text{ K}$ ni jedan ispitivani industrijski višecijevni izmjenjivač topline ne zadovoljava za izmjenu topline budući je potrebna površina za izmjenu topline veća u odnosu na raspoloživu površinu ispitivanog izmjenjivača.
- Pri svim karakterističnim veličinama hladnog 2 (rashladna voda) i toplog 1 (mineralno ulje) fluida na ulaznom bloku rotacijske peći i sa istočne i sa zapadne strane zadovoljava samo MIT10 višecijevni izmjenjivač te bi isti trebalo postaviti na svim kućištima ulaznog bloka peći u svrhu hlađenja kliznih ležajeva.

6. LITERATURA

1. Z. Osmanović, J. Zelić, Proizvodnja portland cementa, Sveučilište u Tuzli, Lukavac, 2011., str. 5-7, str.138.
2. URL: <https://sustainableprofit.net/how-to-produce-greener-concrete-for-our-buildings/> (3.11.2019.).
3. URL: <http://ba.cicmk.com/rotary-kiln/high-quality-customed-cement-rotary-kiln.html> (31.8.2020.).
4. URL:
https://rudar.rgn.hr/~mklanfar/nids_mklanfar/TEHNOLOGIJA%20NEMETALA/Cementne%20sirovine.pdf (14.11.2011.)
5. K. H. Decker, Elementi strojeva, 3. Izdanje, Golden marketing, Tehnička knjiga, Zagreb, 2006., str. 188-239.
6. A. Galović, Termodinamika II, 5. Izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., str. 192.–238.
7. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994., str.149-200.
8. Handbook of Heat Transfer, Chapter 17., Heat Exchangers, Ed. by W. M. Rohsenow, J. P.Hartnett, Y. I. Cho, 3rd Ed., McGraw-Hill, 1998., p.p. 17.111-17.120.
9. O. Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet, Dubrovnik, 1994., str. 100-110.
10. URL: https://img.directindustry.com/images_di/photo-g/14017-15388361.jpg (31.8.2020.)
11. URL: <https://5.imimg.com/data5/YP/GR/MY-2732213/u-tube-bundle-heat-exchanger-500x500.jpg> (31.8.2020.)
12. URL: https://hr.srimathumitha.com/images/biznes/teploobmennik-plastinchatij-princip-raboti-teploobmenniki-plastinchatie-ustrojstvo_5.jpg (31.8.2020.)
13. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=28302> (31.8.2020.)
14. URL: <http://mit.com.hr/kontrolirana-fermentacija/cjevni-izmjenjivac-topline.php> (31.8.2020.)
15. G. Towler, R. Sinnott, Chemical Engineering Design, Chapter 12, Elsevier, London, 2008., p.p. 793-869.

16. URL:

<https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/izmjenjivacitopline%5B1%5D.pdf>

(31.8.2020.)

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

7. 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

IT – izmijenjivač topline

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

L – duljina cijevi, m

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

N – ukupan broj cijevi

N_c – ukupan broj cijevi u cijevnom snopu

N_{pr} – broj pregrada u plaštu

N_{prolaz} – broj prolaza fluida kroz cijevi

Nu – Nusseltova značajka

N_1 – broj cijevi u prvom redu cijevnog snopa

N_2 – broj cijevi u drugom redu cijevnog snopa

P – toplinska efikasnost hladnog fluida

Pe – Pecletova značajka

Pr – Prandtlova značajka

Q_m – maseni protok fluida, kg/s

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

R – omjer kapacitivnih brzina

Re – Reynoldsova značajka

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

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

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

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

t' – ulazna temperature struje fluida, °C

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

t_1' – ulazna temperature slabije struje, °C

t_1'' – izlazna temperature slabije struje, °C

t_2' – ulazna temperature jače struje, °C

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

t_m – aritmetička sredina temperature promatrane struje, °C

Grčka slova

α_i – koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi, W/(m² K)

α_o – koeficijent prijelaza topline na stijenku cijevi u plaštu, W/(m² K)

$\alpha_{o,sr}$ – srednja vrijednost koeficijenta prijelaza topline za snop od N redova u pravcu strujanja, W/(m² 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, m²/s

ρ – gustoća fluida, kg/m³

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

ω - brzina fluida u cijevi, m/s