

# Primjena višecijevnih izmjenjivača u hlađenju kliznih ležajeva rotacijskih peći

---

**Barbarić, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:670953>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**PRIMJENA VIŠECIJEVNIH IZMJENJIVAČA U HLAĐENJU  
KLIZNIH LEŽAJEVA ROTACIJSKIH PEĆI**

**ZAVRŠNI RAD**

**MARKO BARBARIĆ**

**Mat.br. 1303**

**Split, rujan 2021.**

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

**PRIMJENA VIŠECIJEVNIH IZMJENJIVAČA U HLAĐENJU**  
**KLIZNIH LEŽAJEVA ROTACIJSKIH PEĆI**

**ZAVRŠNI RAD**

**MARKO BARBARIĆ**

**Mat.br. 1303**

**Split, rujan 2021.**

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

**APPLICATION OF SHELL&TUBE EXCHANGERS IN COOLING OF**  
**THE PLAIN BEARINGS OF ROTARY KILNS**

**BACHELOR THESIS**

**MARKO BARBARIĆ**

**Parent number:1303**

**Split, September 2021.**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

### ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu

Preddiplomski studij kemijske tehnologije

**Znanstveno područje:** Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:** Kemijsko inženjerstvo

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

**Mentor:** prof. dr. sc. Vanja Martinac

**Pomoć pri izradi:**

## PRIMJENA VIŠECIJEVNIH IZMJENJIVAČA U HLAĐENJU KLIZNIH LEŽAJEVA ROTACIJSKIH PEĆI

**Marko Barbarić, broj indeksa 1303**

### Sažetak:

Završni rad predstavlja proračun industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline (MIT05 i MIT06) u svrhu hlađenja kliznih ležajeva rotacijskih peći. U razmatranje su uzete karakteristične veličine hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida na srednjem bloku rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na istočnoj strani peći na sjevernom kućištu (pozicija 7) s vanjske i unutarnje strane kućišta. Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskih MIT05 i MIT06 izmjenjivača topline, duljine cijevi 400 i/ili 540 mm kako bi se isti mogli primijeniti za hlađenje mineralnog ulja temperature 39 °C, koje u prostor plašta dostrojava volumnim protokom od 0,60 m<sup>3</sup>/h na unutarnjoj te 0,72 m<sup>3</sup>/h na vanjskoj strani kućišta. Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda volumnim protokom 1,3 m<sup>3</sup>/h i ulazne temperature 25,1 °C. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 6 (MIT05) i 9 (MIT06). Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran ( $Re < Re_{kr}$ ), dok je strujanje vode u cijevima u prijelaznom području ( $2300 < Re < 10\ 000$ ). Rezultati ispitivanja također potvrđuju da ispitivani višecijevni izmjenjivač MIT06 zadovoljava za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći budući je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu navedenog izmjenjivača.

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

**Rad sadrži:** 48 stranica, 5 slika, 8 tablica, 19 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Sastav Povjerenstva za obranu:**

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

**Datum obrane:** 21.09.2021.

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

## **BASIC DOCUMENTATION CARD**

### **BACHELOR THESIS**

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

**Scientific area:** Technical sciences

**Scientific field:** Chemical engineering

**Thesis subject** was approved by electronic Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, November 15<sup>th</sup> and 16<sup>th</sup> 2020.

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

**Technical assistance:**

## **APPLICATION OF SHELL&TUBE EXCHANGERS IN COOLING OF THE PLAIN BEARINGS OF ROTARY KILNS**

**Marko Barbarić, parent number 1303**

### **Abstract:**

Main purpose of this bachelor thesis is to estimate industrial shell&tube heat exchangers (MIT05 and MIT06) in purpose of cooling the plain bearing of rotary kiln. Properties of cold (cooling water) and warm (mineral oil) fluid on the middle block of rotary kiln for production of Portland cement on the eastern side of kiln on the northern side on the outside and inside of basis were taken in consideration. The aim of this bachelor thesis is to examine the characteristics of industrial MIT05 and MIT06 heat exchangers, length of pipes 400 and/or 540 mm, so that can be used for cooling mineral oil initial temperature of 39 °C, which flows inside the sheath at volume flow 0.6 m<sup>3</sup>/h on the inside of the basis, and 0.72 m<sup>3</sup>/h on the outside of the basis. Through the tube bundle, in two passes, streaming cooling water at volume flow 1.3 m<sup>3</sup>/h and inlet temperature 25.1 °C. Pipes are laid out in a triangular fashion and pitched 13 mm apart with 6 baffles inside the shell for MIT05 and 9 for MIT06. The results of examination indicate the laminar flow inside the shell ( $Re < Re_{cr}$ ) and the transitional flow in the tube ( $2300 < Re < 10\,000$ ). Tested shell&tube heat exchanger MIT06 satisfies for cooling down the bearing of rotary kiln, because the required surface to exchange heat is lower compared to available surface.

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

**Thesis contains:** 48 pages, 5 figures, 8 tables, 19 references

**Original in:** Croatian

### **Defence committee:**

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

**Defence date:** September 21<sup>st</sup> 2021.

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

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

*Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Vanji Martinac na ukazanoj i nesebičnoj pomoći kod izrade završnog rada.*

*Također želim zahvaliti svojoj obitelji koja mi je pružala podršku tokom studija i koja me je bodrila slušajući moje probleme uz bezuvjetnu ljubav i poštovanje.*

*Posebna zahvala ide mojim kolegama i dragim prijateljima uz koje sam stvarao lijepe uspomene i uz koje sam proveo svoje najljepše trenutke.*

*Marko Barbarić*



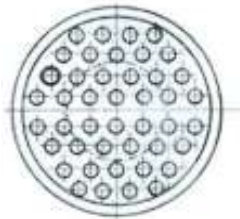
## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Potrebno je izvršiti hlađenje srednjeg bloka rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na istočnoj strani peći na sjevernom kućištu (pozicija 7) s vanjske i unutarnje strane kućišta korištenjem industrijskih MIT05 i MIT06 izmjenjivača topline. MIT05 i MIT06 su horizontalni višecijevni rekuperatori, tipa 1-2. U prostor oko cijevi dostrujava mineralno ulje, a kroz cijevni snop struji rashladna voda u dva prolaza. Cijevni snop u plaštu izmjenjivača unutarnjeg promjera 107 mm sastoji se od 44 bakrene cijevi,  $\lambda_c = 386,12 \text{ W/(m K)}$ , vanjskog promjera 10 x 1 mm. Duljina cijevi u cijevnom snopu iznosi 400 mm (MIT05) i 540 mm (MIT06), a broj pregrada u plaštu je 6 (MIT05) i 9 (MIT06).

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

| Pozicija mjerenja |                      |               |               | Izmjerene vrijednosti    |                   |  |  |                          |
|-------------------|----------------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|--|--|--------------------------|
| Blok peći         | Položaj izmjenjivača | Kućište (br.) | Vodena strana | Temp. ulja na ulazu / °C | $\Delta t_u$ / °C | Protok ulja / $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ | Protok vode / $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ | Temp. vode na ulazu / °C |
| Srednji blok peći | Istočna strana       | sjeverno (7)  | Unutarnja     | 39                       | 7                 | 0,60                                     | 1,3                                      | 25,1                     |
|                   |                      |               | Vanjska       |                          |                   | 0,72                                     |  |                          |

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



Odrediti potrebnu površinu prijenosa topline za industrijske MIT05 i MIT06 izmjenjivače topline i navedene uvjete rada.

## SAŽETAK

Završni rad predstavlja proračun industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline (MIT05 i MIT06) u svrhu hlađenja kliznih ležajeva rotacijskih peći. U razmatranje su uzete karakteristične veličine hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida na srednjem bloku rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na istočnoj strani peći na sjevernom kućištu (pozicija 7) s vanjske i unutarnje strane kućišta. Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskih MIT05 i MIT06 izmjenjivača topline, duljine cijevi 400 i/ili 540 mm kako bi se isti mogli primijeniti za hlađenje mineralnog ulja temperature 39 °C, koje u prostor plašta dostrujava volumnim protokom od 0,6 m<sup>3</sup>/h na unutarnjoj te 0,72 m<sup>3</sup>/h na vanjskoj strani kućišta. Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda volumnim protokom 1,3 m<sup>3</sup>/h i ulazne temperature 25,1 °C. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 6 (MIT05) i 9 (MIT06). Rezultati ispitivanja ukazuju da je režim strujanja u plaštu laminaran ( $Re < Re_{kr}$ ), dok je strujanje vode u cijevima u prijelaznom području ( $2300 < Re < 10\ 000$ ). Rezultati ispitivanja također potvrđuju da ispitivani višecijevni izmjenjivač MIT06 zadovoljava za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći budući je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu navedenog izmjenjivača.

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

## SUMMARY

Main purpose of this bachelor thesis is to estimate industrial shell&tube heat exchangers (MIT05 and MIT06) in purpose of cooling the plain bearing of rotary kiln. Properties of cold (cooling water) and warm (mineral oil) fluid on the middle block of rotary kiln for production of Portland cement on the eastern side of kiln on the northern side on the outside and inside of basis were taken in consideration. The aim of this bachelor thesis is to examine the characteristics of industrial MIT05 and MIT06 heat exchangers, length of pipes 400 and/or 540 mm, so that can be used for cooling mineral oil initial temperature of 39 °C, which flows inside the sheath at volume flow 0.6 m<sup>3</sup>/h on the inside of the basis, and 0.72 m<sup>3</sup>/h on the outside of the basis. Through the tube bundle, in two passes, streaming cooling water at volume flow 1.3 m<sup>3</sup>/h and inlet temperature 25.1 °C. Pipes are laid out in a triangular fashion and pitched 13 mm apart with 6 baffles inside the shell for MIT05 and 9 for MIT06. The results of examination indicate the laminar flow inside the shell ( $Re < Re_{cr}$ ) and the transitional flow in the tube ( $2300 < Re < 10\ 000$ ). Tested shell&tube heat exchanger MIT06 satisfies for cooling down the bearing of rotarykiln, because the required surface to exchange heat is lower compared to available surface.

**Keywords:** shell&tube heat exchanger, overall heat transfer coefficient, heat transfer surfacearea

# SADRŽAJ

|  |           |
|--|-----------|
| 1. OPĆI DIO .....  | 2         |
| <b>1.1. ROTACIJSKA PEĆ ZA PEČENJE CEMENTNOG KLINKERA .....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>1.2. PRIJENOS TOPLINE .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1.3. IZMJENJIVAČI TOPLINE.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1.4. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>1.4.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>1.4.2. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.4.3. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJKAMA CIJEVI ....</b>   | <b>12</b> |
| 2. EKSPERIMENTALNI DIO.....  | 16        |
| <b>2.1. SREDNJI BLOK ROTACIJSKE PEĆI – ISTOČNA STRANA.....</b>   | <b>18</b> |
| <b>2.1.1. UNUTARNJA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (7).....</b>   | <b>18</b> |
| 2.1.1.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER –<br>KUĆIŠTE (7) .....   | 18        |
| 2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER –<br>KUĆIŠTE (7) .....   | 21        |
| 2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA<br>UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (7) .....                                    | 22        |
| 2.1.1.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI,<br>ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ)..... | 23        |
| 2.1.1.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI,<br>ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ)..... | 25        |
| <b>2.1.2. VANJSKA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (7).....</b>   | <b>29</b> |
| 2.1.2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA VANJSKOJ STRANI – SJEVER –<br>KUĆIŠTE (7) .....   | 29        |
| 2.1.2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA VANJSKOJ STRANI – SJEVER –<br>KUĆIŠTE (7) .....   | 30        |
| 2.1.2.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA VANJSKOJ<br>STRUJI – SJEVER – KUĆIŠTE (7).....                                       | 31        |
| 2.1.2.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI,<br>ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), VANJSKI IZMJENJIVAČ).....   | 32        |
| 2.1.2.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI,<br>ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), VANJSKI IZMJENJIVAČ).....   | 34        |
| 3. RASPRAVA .....  | 39        |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 4. ZAKLJUČCI.....     | 43 |
| 5. LITERATURA.....    | 44 |
| 6. POPIS SIMBOLA..... | 46 |

## UVOD

Poznato je da nijedan toplinski stroj ne radi sa 100% iskorištenjem, uslijed djelovanja trenja, gubitaka topline, načina dizajniranja, načina vođenja i regulacije procesa što za posljedicu ima povećane utroške energije te naposljetku i manju ekonomičnost procesa. Iz tog saznanja proizlazi težnja da se proces vodi na što bolji i povoljniji način, a upravo je to ono što kemijski inženjeri rade.

Glavna zadaća kemijskog inženjera je poboljšati proces prema zahtjevima industrije i postrojenja u kojem se nalaze i smanjiti gubitke pravilnim izborom parametara koji utječu na sam proces. Primjenom stečenih kemijsko-inženjerskih znanja inženjeri rješavaju različite probleme koje industrija stavi pred njih, između ostalog rješavanje prijenosa topline u različitim uređajima kemijske procesne industrije. Veliku važnost u industriji proizvodnje cementa zauzima rotacijska peć i sve njezine komponente jer upravo su one od velikog značaja za poboljšanje procesa.

Rotacijska peć je veoma složena termoprocesna jedinica koja se koristi u mnogim postrojenjima gdje je potrebno zagrijati materijal do visoke temperature. Glavni nedostaci rotacijske peći jesu gubitci topline, degradacija materijala od kojeg je izrađen plašt peći te pucanje kliznih ležajeva uslijed trenja i visoke temperature maziva. U svrhu podmazivanja kliznih ležajeva koristi se mineralno ulje te izmjenjivači topline za hlađenje mineralnog ulja. Za odabir pogodnih izmjenjivača topline potrebno je provesti proračune i odraditi određena ispitivanja mjerenja ulaznih i vanjskih parametara.

Glavni cilj ovog završnog rada je ispitati industrijske višecijevne izmjenjivače topline (MIT05 i MIT06) u svrhu hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći u industriji proizvodnje Portland cementa.

# 1.OPĆI DIO

## 1.1. ROTACIJSKA PEĆ ZA PEČENJE CEMENTNOG KLINKERA

Rotacijska peć (slika 1) se u osnovi sastoji od sljedećih elemenata: sustava za dodavanje sirovinskog brašna u peć, plašta peći, zupčastog vijenca s pogonom i nosećim sustavom, radijalnih i aksijalnih rolni, žarne glave s gorioničkim postrojenjem, platforme s nosećom konstrukcijom žarne glave i sustava za odvođenje klinkera u hladnjak.<sup>1</sup> Proces dobivanja klinkera u rotacijskoj peći je kontinuirani proces te da bi se održali željeni uvjeti u peći i kvaliteta klinkera potreban je stabilan rad, stalna kvaliteta klinkera, maksimalno iskorištenje topline te sigurnost i zaštita osoblja i opreme. Prikaz rotacijske peći<sup>2</sup> dan je na slici 1.

Rotacijska peć<sup>1,3</sup> za proizvodnju cementnog klinkera je čelični cilindar promjera od nekoliko metara (2,5–6,5m) i dužine (50–200) m, iznutra obložen vatrostalnom opekom (vrsta vatrostalnog ozida ovisi o zonama u rotacijskoj peći). Debljina vatrostalnog ozida ovisi o promjeru peći (npr. za promjer peći 5,20 i više m debljina ozida iznosi 250 mm).

Gornji kraj peći služi za ulaz sirovine dok se na donjem kraju nalazi plamenik za zagrijavanje smjese i optimalno sagorijevanje. U rotacijskoj peći mogu se, po pravilu, upotrijebiti sve vrste goriva koje postižu temperaturu plamena od najmanje 1700 °C.<sup>2</sup> Blago je nagnuta u jednu stranu što olakšava rotaciju oko uzdužne osi. Nagib rotacijskih peći obično se kreće u granicama od (2–6)%.<sup>2</sup> Rotacija oko uzdužne osi uzrokuje postupno gibanje materijala s višeg, hladnijeg kraja, prema nižem, gdje se na koncu ispušta i hladi.<sup>3</sup> Peć se oslanja na tri oslonca koje čine prstenovi i valjci, raspoređeni duž peći. Noseći prstenovi i valjci su elementi na koje se oslanja rotacijska peć i uslijed toga su izloženi različitim dinamičkim opterećenjima.<sup>4</sup>

Osovine i vratila imaju oslonce u kliznim ili valjnim ležajima. Ležaji se podmazuju da bi gubici trenja, a time i zagrijavanje, bili što manji. Radi olakšanja klizanja površina nalijeganja, te radi smanjivanja ili čak sprječavanja trošenja, upotrebljavaju se maziva. Maziva se nanose na klizna mjesta, prijanjaju uz materijale, razdvajaju hrapavošću izazvane međusobne neravnosti površina nalijeganja, imaju nisku unutarnju žilavost, ne nagrjavaju

materijale i štite ih od korozije. Maziva po mogućnosti hlade, prenose pritisak, brtve i štite maziva mjesta od nečistoća i vode. Kao maziva najčešće se koriste tekuća maziva (ulja). Podmazivanje uljem se koristi za ležajeve s velikim površinskim tlakovima i višim temperaturama.<sup>5</sup>



**Slika 1.** Prikaz rotacijske peći<sup>1</sup> za proizvodnju portland cementa

Uslijed trenja na kliznim ležajevima dolazi do zagrijavanja mazivog ulja koje je potrebno ohladiti. Sva tekuća maziva s porastom temperature postaju rjeđa, što znači da im se smanjuje viskozitet. Najkorištenije podmazivanje je optočno podmazivanje uljem koje istodobno cirkulira i hladi ležajeve. Podmazivanje se provodi pomoću uljne pumpe preko sustava cijevi. Ulje koje otječe, filtrira se, u određenim slučajevima hladi i sakuplja u spremnike. Sakupljeno ulje se ponovno pumpa u sustav te se osigurava stalna recirkulacija ulja.<sup>5</sup>

## **1.2. PRIJENOS TOPLINE**

Do prijenosa topline<sup>6</sup> dolazi čim postoji razlika temperatura  $\Delta T$  unutar tijela ili između dva tijela. Za kvantitativno određivanje prijenosa topline potrebno je utvrditi čimbenike koji uvjetuju izmjenu energije u jedinici vremena između dva tijela ili tijela i fluida na način da



se predvidi raspodjela temperature i brzina prijenosa energije u termodinamičkim sustavima.

Prema načinu prijenosa topline razlikuje se (slika 2):

1. **Kondukcija** (provođenje) je prijenos topline kroz samu tvar u mirovanju, od atoma do atoma ili od molekule do molekule, a prouzročen je razlikom u temperaturi. Prijenos topline kondukcijom odvija se kada su tijela u dodiru.

2. **Konvekcija** (strujanje) je prijenos topline koji se javlja na granici između čvrste stijenke i fluida ili površine tekućine i drugoga plinovitog fluida. Fluid pri tom struji uz površinu drugoga tijela ili fluida i putem strujanja i interakcija u graničnom sloju prenosi toplinu. Prijenos topline konvekcijom se odvija kada tijela nisu u izravnom dodiru nego postoji treće tijelo (medij) koje omogućava prijenos topline.

3. **Radijacija** (zračenje) je prijenos topline između dva tijela različite temperature putem elektromagnetskog zračenja. Obzirom da se između dva tijela u ovom slučaju ne mora imati drugu tvar, ovaj prijenos se može odvijati i u vakuumu, za razliku od prve dvije vrste prijenosa topline.



Slika 2. Načini prijenosa topline<sup>7</sup>

### 1.3. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline<sup>8,9</sup> su uređaji u kojima se toplinska energija prenosi sa jednog fluida (više temperature) na drugi (fluid niže temperature) bez međusobnog miješanja ta dva fluida. Kod izmjenjivača topline, toplina se najčešće provodi konvekcijom uz postojanje temperaturnog gradijenta. Svoju primjenu pronalaze za grijanje ili hlađenje radnoga medija u rashladnoj i procesnoj tehnici, termoenergetskim i nuklearnim postrojenjima, centralnom grijanju i sl.

Izmjena topline može biti izravna i neizravna. U izravnoj izmjeni topline dvije se struje fluida međusobno miješaju, čime se dobiva struja kojoj je temperatura između temperatura toplije i hladnije struje. U izmjenjivaču topline s neizravnom izmjenom, struje fluida odvojene su stjenkom. Mehanizam izmjene topline kod neizravne izmjene je nešto složeniji; sastoji se od konvekcije topline s tople struje na stijenku, kondukcije kroz stijenku i konvekcije sa stijenke na hladnu struju. Izmjenjivači s neizravnom izmjenom topline se zovu rekuperatori.

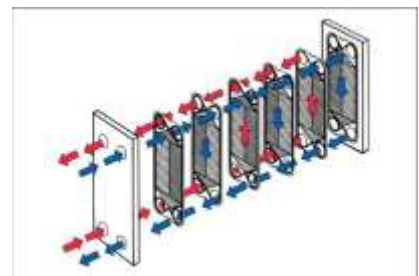
Prema konstrukciji (slika 3), izmjenjivači topline dijele se na spiralne (3a), cijevne (3b) i pločaste (3c).



(a)



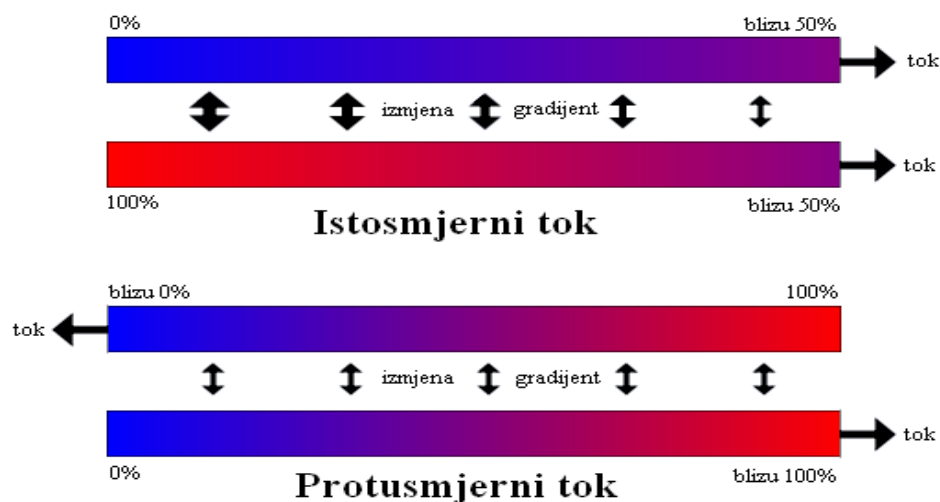
(b)



(c)

**Slika 3.** Izmjenjivači topline: (a) spiralni<sup>10</sup>, (b) cijevni<sup>11</sup> i (c) pločasti<sup>12</sup>

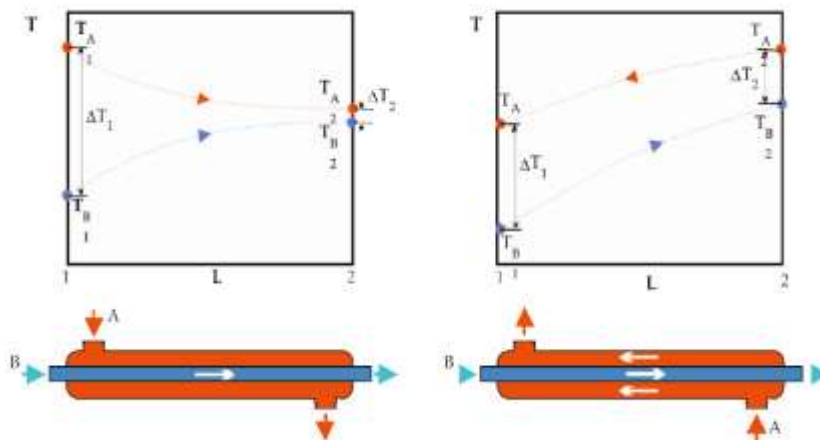
Prema smjeru strujanja fluida, rekuperatori se dijele na istosmjerne, protusmjerne i križne ili unakrsne. Prikaz istosmjernog i protusmjernog toka strujanja fluida prikazan je na slici 4.<sup>13</sup>



**Slika 4.** Prikaz smjera strujanja fluida<sup>13</sup>

Topliji fluid grije stjenku hladeći se, dok ju hladni fluid istodobno hladi grijući se. Izlazna temperatura hladnijeg fluida protusmjernih izmjenjivača topline može biti viša od izlazne temperature toplog, dok se izlazne temperature dvaju fluida istosmjernog i križnog izmjenjivača mogu tek teorijski izjednačiti. Izmjenjivačke površine rekuperatora grade se od cijevi, snopova cijevi ili ploča. Kako bi se povećala površina za izmjenu topline, a time i učinak izmjenjivača, njezine se stijenke često orebruju.

Prikaz ulaznih/izlaznih temperatura kod istosmjernih i protusmjernih izmjenjivača topline, kao i temperaturni pad kroz izmjenjivač prikazan je na slici 5.



**Slika 5.** Prikaz ulaznih/izlaznih temperatura kod istosmjernih i protusmjernih izmjenjivača<sup>14</sup>

## 1.4. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE

### 1.4.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Izmijenjeni toplinski tok u rekuperatoru<sup>9,15-17</sup> ovisi o sljedećim varijablama:

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

gdje je:

$\Phi$  – toplinski tok (toplina prenesena u izmjenjivaču), W

$K$  – koeficijent prolaza topline ili ukupni koeficijent prijenosa topline, W/(m<sup>2</sup> K)

$A_o$  – ukupna površina prijenosa topline, m<sup>2</sup>

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

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

$t_1'$  – ulazna temperature slabije struje, °C

$t_1''$  – izlazna temperature slabije struje, °C

$t_2'$  – ulazna temperature jače struje, °C

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

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

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

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

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

gdje je:

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

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

Prema tome vrijedi omjer :

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

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

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

- za topli fluid

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

- za hladni fluid

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

Dakle,

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

gdje je:

$Q_v$  – volumni protok fluida, m<sup>3</sup> /h

$\Delta T$  – razlika temperature koju doživi pojedini fluid, K

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

Ostale veličine imaju prije navedeno značenje. Uz pretpostavku da nema toplinskih gubitaka slijedi da je:

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

Odnosno, dobije se omjer kapacitivnih brzina:

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

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

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

$$\delta\Phi = K \cdot (T_T - T_H) \cdot dA \quad (10)$$

gdje je:

$K$  – koeficijent prolaza topline (ili ukupni koeficijent prijenosa topline) kroz diferencijalnu površinu  $dA$  izmjenjivača topline,  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

$T_T, T_H$  – temperature toplijeg i hladnijeg fluida na elementarnoj dužini uređaja, K.

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

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

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

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

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

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se prema izrazu:

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

Indeks 1 odnosi se na višu temperaturnu razliku između hladnog i toplog fluida na jednoj strani izmjenjivača. Indeks 2 odnosi se na manju temperaturnu razliku između hladnog i toplog fluida na drugoj strani izmjenjivača.

Kod višecijevnih izmjenjivača pristup je kompliciraniji jer tu dolazi do križanja temperatura te je potrebno uzeti u obzir korekcijski faktor  $F$ . Isti se može očitati iz dijagrama ovisnosti  $F = f(P, R)$ , gdje parametar  $P$  predstavlja toplinsku efikasnost hladnog fluida, a parametar  $R$  omjer kapacitivnih brzina. Korekcijski faktor ne smije biti manji od 0,75. Ukoliko je  $F < 0,75$  tada je potrebno pokušati s izmjenjivačem s više prolaza.

Stoga, korigirana srednja logaritamska razlika temperatura između toplog i hladnog fluida, nakon što se odredi korekcijski faktor, bit će:

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

Osnovna jednadžba za proračun izmjenjivača topline je:

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (16)$$

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

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta T_{m, kor} \quad (17)$$

gdje je:

$\Phi$  – toplinski tok ili fluks, kJ/h

$K$  – koeficijent prolaza topline ili ukupni koeficijent prijenosa topline, kJ/(m<sup>2</sup> h K)

$A$  – površina prijenosa topline, m<sup>2</sup>

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

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

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t'_1 - t''_1}{t''_2 - t'_2} \quad (18)$$

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

$$\frac{C_t}{C_h} = \frac{(T_{t,1} - T_{t,2})}{(T_{h,1} - T_{h,2})}$$

Oznaka  $t$  u indeksu odnosi se na toplu struju fluida, a  $h$  na hladnu struju fluida.

Parametar  $P$  je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} \quad (19)$$

Korekcijski faktor  $F$  može se odrediti korištenjem sljedećeg izraza

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

gdje je:

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

te  $n$  predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt.

#### 1.4.2. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE

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

Ukupni koeficijent se u praksi računa prema sljedećem izrazu<sup>15</sup>:

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

gdje je:

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



$\alpha_0$  – koeficijent prijenosa topline na vanjskoj stijenci cijevi, W/(m<sup>2</sup> K)

$\alpha_1$  – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj stijenci cijevi, W/(m<sup>2</sup> K)

$r_0$  i  $r_1$  – otpori uslijed onečišćenja unutarnje i vanjske stijenske, (m<sup>2</sup> K)/W

$r_c$  – otpor prijenosu topline stijenske cijevi, (m<sup>2</sup> K)/W

U proračunu je potrebno uzeti temperaturnu ovisnost za fizikalna svojstva fluida, koja se očitavaju iz toplinskih tablica<sup>18</sup>. Stoga je potrebno izračunati srednju temperaturu fluida koja predstavlja aritmetičku sredinu ulazne i izlazne temperature, odnosno:

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

gdje je:

$t_m$  – aritmetička sredina temperature fluida, °C

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

### 1.4.3. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI

Za koeficijent prijenosa topline<sup>15</sup> kada ne dolazi do promjene faza, u praksi se koriste odgovarajuće jednadžbe koje ovise o načinu strujanja fluida, tj. da li se radi o laminarnom, turbulentnom ili prijelaznom području.

Za laminarno strujanje vrijednost Reynoldsove značajke mora biti manja od 2300. Sukladno tome koristi se Sieder-Tateova jednadžba:

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

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

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

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

gdje je:

Nu – Nusseltova značajka

$\alpha_i$  – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj strani stijenke, kJ/(h m<sup>2</sup> K)

$d_i$  – unutarnji promjer cijevi, m

$\lambda$  – toplinska vodljivost fluida, kJ/mK

Pe – Pecletova značajka

Re – Reynoldsova značajka

Pr – Prandtlova značajka

$L$  – duljina cijevi, m

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

$\mu$  – viskoznost, Pa s

$\mu_s$  – viskoznost fluida pri temperaturi stijenke, Pa s

$\omega$  – brzina fluida u cijevi, m/s

$q_m$  – masena brzina fluida u cijevi, kg/(m<sup>2</sup> h)

Za turbulentno područje vrijednost Reynoldsove značajke mora biti veća od 10000 te se koristi sljedeći izraz:

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

Za prijelazno područje strujanje vrijednost Reynoldsove značajke mora biti između 2300 i 10000 pa se koristi Hausenova jednadžba:

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

Raspored cijevi u cijevnom snopu<sup>15,19</sup> može biti različit i to: raspored u obliku trokuta, kvadratni raspored te rotirani kvadratni raspored.

Duljina stranice trokuta ili kvadrata, koje čine tri ili četiri susjedne cijevi naziva se korak cijevi,  $c$ . Ekvivalentni promjer cijevi za kvadratni i rotirani kvadratni raspored cijevi u cijevnom snopu računa se prema izrazu:

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

Za raspored cijevi u trokutu izraz glasi:

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

Masena brzina fluida u plaštu iznosi:

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

gdje je:

$Q_m$  – maseni protok fluida, kg/h

$A_s$  – slobodna površina presjeka cijevnog snopa,  $m^2$

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa se računa iz izraza:

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

gdje je:

$d_{pl}$  – unutarnji promjer plašta, m

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

$c$  – korak cijevi, m

$d_o$  – vanjski promjer cijevi, m

Za laminarno strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu<sup>19</sup> koeficijent prijenosa topline dan je izrazom:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_i}{\lambda} = 0,56 \cdot (Re)^{0,50} \cdot (Pr)^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (34)$$

Koeficijent prijenosa topline izračunat iz jednadžbe (34) važi za treći i iduće redove u snopu cijevi. Razlog tomu je nedovoljno razvijeno strujanje i prijenos topline kod prvog i drugog reda. Stoga, srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline<sup>19</sup> za snop od N redova u pravcu strujanja računa se iz odnosa:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot \alpha_o \cdot N_1 + 0,7 \cdot \alpha_o \cdot N_2 + \alpha_o \cdot [N - (N_1 + N_2)]}{N} \quad (35)$$

gdje je:

$N_1$  – broj cijevi u prvom redu

$N_2$  – broj cijevi u drugom redu

$N$  – ukupan broj cijevi.

## 2. EKSPERIMENTALNI DIO

Primjena industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline MIT05 i MIT06 razmatra se za srednji blok rotacijske peći u smjeru istok i to s vanjske i unutarnje strane kućišta (kućište broj 7) po jedan izmjenjivač topline.

Razmatra se položaj izmjenjivača na sjevernom kućištu broj 7, srednjeg bloka rotacijske peći u smjeru istok i to s vanjske i unutarnje strane kućišta po jedan izmjenjivač topline.

Karakteristične veličine za pojedini ispitivani višecijevni izmjenjivač topline, tip 1-2, su sljedeće:

Poprečna površina presjeka cijevi,  $a_c$ , iznosi:

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

Ukupna poprečna površina presjeka cijevi,  $A_c$ , iznosi:

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

Ekvivalentni promjer cijevi,  $d_e$ , računa se prema izrazu (31):

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

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

Veličine:  $a_c$ ,  $A_c$  i  $d_e$  su u ispitivanim MITovima jednake.

Razmak između pregrada računa se iz odnosa:

$$l_{pr} = \frac{L}{N_{pr}} \tag{36}$$

gdje je:

$L$  – duljina cijevi u cijevnom snopu

$N_{pr}$ . – broj pregrada u plaštu.

U Tablici 1 prikazane su karakteristične veličine za pojedini ispitivani višecijevni izmjenjivač topline, tip 1-2.

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

| Tip izmjenjivača | Duljina cijevi u cijevnom snopu, $L/$ mm | Broj pregrada u plaštu, $N_{pr}$ | $l_{pr} /$ mm | $A_s /$ mm <sup>2</sup> | $A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c /$ m <sup>2</sup> |
|------------------|--|----------------------------------|---------------|-------------------------|--|
| MIT 05           | 400                                      | 6                                | 66,67         | 1646                    | 0,553  |
| MIT 06           | 540                                      | 9                                | 60,00         | 1482                    | 0,746  |

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

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

Vanjski promjer cijevi,  $d_o = 10$  mm

Debljina cijevi,  $\delta = 1$  mm

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

Broj cijevi u prvom redu,  $N_1 = 7$

Broj cijevi u drugom redu,  $N_2 = 6$

Karakteristične veličine hladnog i toplog fluida na srednjem bloku rotacijske peći prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Karakteristične veličine hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida na srednjem bloku rotacijske peći

| Pozicija mjerenja |                      |               |               | Izmjerene vrijednosti    |                   |                                   |                                   |                          |
|-------------------|----------------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Blok peći         | Položaj izmjenjivača | Kućište (br.) | Vodena strana | Temp. ulja na ulazu / °C | $\Delta t_u$ / °C | Protok ulja / (m <sup>3</sup> /h) | Protok vode / (m <sup>3</sup> /h) | Temp. vode na ulazu / °C |
| Srednji blok peći | Istočna strana       | sjeverno (7)  | unutarnja     | 39                       | 7                 | 0,60                              | 1,3                               | 25,1                     |
|                   |                      |               | vanjska       |                          |                   | 0,72                              |                                   |                          |

Topli fluid (mineralno ulje) temperature 39 °C u prostor plašta dostrujava volumnim protokom od 0,6 m<sup>3</sup>/h na unutarnjoj te 0,72 m<sup>3</sup>/h na vanjskoj strani kućišta.

Kroz cijevni snop, u dva prolaza, struji rashladna voda volumnim protokom 1,3 m<sup>3</sup>/h i ulazne temperature 25,1 °C.

## 2.1. SREDNJI BLOK ROTACIJSKE PEĆI – ISTOČNA STRANA

### 2.1.1. UNUTARNJA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (7)

#### 2.1.1.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (7)

Ulazna temperatura ulja,  $t_U' = 39$  °C

Sniženje temperature ulja,  $\Delta t_U = 7$  °C

Volumni protok ulja,  $Q_{v,U} = 0,60$  m<sup>3</sup>/h

Volumni protok rashladne vode,  $Q_{v,V} = 1,3$  m<sup>3</sup>/h

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

---

Izlazna temperatura ulja:

$$\Delta t_U = t_U' - t_U''$$

$$t_U'' = t_U' - \Delta t_U = 39 - 7 = 32$$
 °C

Fizikalna svojstva ulja<sup>18</sup> uzimaju se pri srednjoj temperaturi ulja

$$t_{m,U} = \frac{39 + 32}{2} = 35,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

i prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi 35,5 °C

|   |       |                         |         |
|---|-------|-------------------------|---------|
| $t / \text{ } ^\circ\text{C}$             | 20    | 35,5                    | 40      |
| $\rho_U / \text{kgm}^{-3}$                | 871   | 860,93                  | 858     |
| $c_{p,U} / \text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ | 1,850 | 1,915                   | 1,934   |
| $\lambda_U / \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ | 0,144 | 0,143                   | 0,143   |
| $\nu_U / \text{m}^2\text{s}^{-1}$         | 15    | $9,521 \cdot 10^{-6}$   | 7,93    |
| $\mu_U / \text{Nsm}^{-2}$                 | 13065 | $8196,91 \cdot 10^{-6}$ | 6803,94 |

Fizikalna svojstva vode pri temperaturi 25,1 °C, prikazana su u tablici 4.

Tablica 4. Fizikalna svojstva vode pri temperaturi 25,1 °C

|   |         |                        |        |
|---|---------|------------------------|--------|
| $t / \text{ } ^\circ\text{C}$             | 20      | 25,1                   | 40     |
| $\rho_V / \text{kgm}^{-3}$                | 998     | 996,47                 | 992    |
| $c_{p,V} / \text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ | 4,182   | 4,181                  | 4,178  |
| $\lambda_V / \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ | 0,598   | 0,605                  | 0,627  |
| $\nu_V / \text{m}^2\text{s}^{-1}$         | 1,01    | $0,920 \cdot 10^{-6}$  | 0,658  |
| $\mu_V / \text{Nsm}^{-2}$                 | 1007,98 | $916,75 \cdot 10^{-6}$ | 652,74 |

Toplinski kapacitet ulja (srednji blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – unutarnji izmjenjivač):

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

$$C_U = \frac{0,6 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 860,93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,915 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$



$$C_U = 0,275 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 275 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet vode (srednji blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – unutarnji izmjenjivač):

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

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

$$C_V = 1,504 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 1504 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Mineralnom ulju pripada značenje slabije struje, a rashladnoj vodi značenje jače struje ( $C_U < C_V$ , tj.  $275 \text{ W/K} < 1504 \text{ W/K}$ ).

Oznake su sljedeće:

$C_1$  – toplinski kapacitet struje ulja =  $275 \text{ W/K}$

$C_2$  – toplinski kapacitet struje rashladne vode =  $1504 \text{ W/K}$

$t_1'$  – ulazna temperatura ulja

$t_1''$  – izlazna temperatura ulja

$t_2'$  – ulazna temperatura rashladne vode

$t_2''$  – izlazna temperatura rashladne vode

Maseni protok ulja (srednji blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – unutarnji izmjenjivač):

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{0,6 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 860,93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,143 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (srednji blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – unutarnji izmjenjivač):

$$Q_{m,v} = Q_{v,v} \cdot \rho_v = \frac{1,3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,360 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### 2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (7)

Izmijenjeni toplinski tok (ulazni blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – unutarnji izmjenjivač), će biti:

$$\phi_U = C_1 \cdot (t_1'' - t_1') = C_1 \cdot \Delta T_U = 275 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (-7)\text{K} = -1925 \text{ W}$$

$$\phi_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = 1925 \text{ W}$$

$$\phi_V = 1504 \cdot (t_2'' - 25,1) = 1925 \text{ W}$$

$$t_2'' = 26,38 \text{ }^\circ\text{C}$$

Promjena temperature vode:

$$\Delta t_V = t_2'' - t_2' = 26,38 - 25,1 = 1,28 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva vode, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu vode:

$$t_{m,v} = \frac{26,38 + 25,1}{2} = 25,74 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti za fizikalne karakteristike vode pri srednjoj temperaturi 25,74 °C prikazane su u tablici 5.

Tablica 5. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperature 25,74 °C

| Fizikalna svojstva<br>rashladne vode | $t_{m,v} / ^\circ\text{C}$ |
|--------------------------------------|----------------------------|
|                                      | 25,74                      |
| $\rho_v / \text{kg/m}^3$             | 996,28                     |
| $c_{p,v} / \text{kJ/(kg K)}$         | 4,181                      |
| $\lambda_v / \text{W/(m K)}$         | 0,606                      |
| $\nu_v / \text{m}^2/\text{s}$        | $0,909 \cdot 10^{-6}$      |
| $\mu_v / (\text{N s})/\text{m}^2$    | $905,62 \cdot 10^{-6}$     |

### 2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (7)

Za protusmjerni tok fluida ( $Q_{v,v} = 1,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $Q_{v,u} = 0,60 \text{ m}^3/\text{h}$ ), za unutarnji izmjenjivač slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 39 - 26,38 = 12,62 \text{ K}$$

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

Srednja logaritamska razlika temperature:

$$\Delta T_m = \frac{12,62 - 6,9}{\ln\left(\frac{12,62}{6,9}\right)} = 9,47 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{39 - 32}{26,38 - 25,1} = 5,47$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,38 - 25,1}{39 - 25,1} = 0,092$$

Broj prolaza kroz plašt,  $n = 1$ .

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5,47 \cdot 0,092 - 1}{0,092 - 1}\right)^{1/1}}{5,47 - \left(\frac{5,47 \cdot 0,092 - 1}{0,092 - 1}\right)^{1/1}} = 0,092$$

$$F = \left[ \frac{(5,47^2 + 1)^{1/2}}{5,47 - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left( \frac{1-0,092}{1-5,47 \cdot 0,092} \right)}{\ln \left[ \frac{\left( \frac{2}{0,092} \right) - 1 - 5,47 + (5,47^2 + 1)^{1/2}}{\left( \frac{2}{0,092} \right) - 1 - 5,47 - (5,47^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,805$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F = 9,47 \cdot 0,805 = 7,62 \text{ K}$$

#### 2.1.1.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ)

Maseni protok,  $Q_{m,v}$ , rashladne vode (srednji blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – unutarnji izmjenjivač):

$$Q_{m,v} = Q_{v,v} \cdot \rho_v = \frac{1,3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,278 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,3597 = 0,36 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

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

$$q_{m,v} = \frac{Q_{m,v} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{0,36 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina,  $\omega_c$ , vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,v}}{\rho_v} = \frac{326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{996,278 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,327 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_v}{\mu_v} = \frac{q_{m,v} \cdot d_i}{\mu_v} = \frac{326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{905,5928 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 2880$$

$Re > Re_c$ , kr

$2880 > 2300$  prijelazno područje strujanja  $2300 < Re < 10\ 000$ , pa se koristi Hausenova jednažba:

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{905,9528 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2} \cdot 4180,852 \frac{J}{kg K}}{0,6063 \frac{W}{m K}} = 6,25$$

Za svaki ispitivani MIT računa se  $\alpha_i$ .

### MIT05

$L = 400$  mm

$$\frac{\alpha_i}{4180,852 \frac{J}{kg K} \cdot 326 \frac{kg}{s m^2}} = \frac{0,166 \cdot (2880^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{400}\right)^{2/3}\right]}{2880} \cdot 6,25^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 1925 \frac{W}{m^2 K} \text{ za MIT05}$$

### MIT06

$L = 540$  mm

$$\frac{\alpha_i}{4180,852 \frac{J}{kg K} \cdot 326 \frac{kg}{s m^2}} = \frac{0,166 \cdot (2880^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{540}\right)^{2/3}\right]}{2880} \cdot 6,25^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 1901 \frac{W}{m^2 K} \text{ za MIT06}$$

**2.1.1.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), UNUTARNJI IZMJENJIVAČ)**

Masena brzina ulja u plaštu, za **MIT05**:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{0,6 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 860,925 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1646 \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 87,17 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{87,17 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{8196,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 90,43$$

$Re < Re_c$ , kr

90,43 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{8196,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1915,1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,144 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 109$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,144 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (90,43)^{0,50} \cdot (109)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 488 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 488 \cdot 7 + 0,7 \cdot 488 \cdot 6 + 488 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 437 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \text{ za MIT05}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{437} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1925} \cdot \frac{10}{8}} = 340 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{1924 \text{ W}}{340 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 7,62 \text{ K}} = 0,743 \text{ m}^2$$

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

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{0,6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 860,925 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1482 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 96,82 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{96,82 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{8196,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 100,44$$

$Re < Re_c$ , kr

$100,44 < 2300$  laminarno strujanje u plaštu

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

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,144 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (100,44)^{0,50} \cdot (109)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 515 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 515 \cdot 7 + 0,7 \cdot 515 \cdot 6 + 515 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 461 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \text{ za MIT06}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{461} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1901} \cdot \frac{10}{8}} = 353 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1924 \text{ W}}{353 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 7,62 \text{ K}} = 0,715 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT06:

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

U Tablici 6. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače MIT05 i MIT06, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište sjeverno (7), unutarnji izmjenjivač topline.



Tablica 6. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače MIT05 i MIT06, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište sjeverno (7), unutarnji izmjenjivač topline.

|   |                            |                       |
|---|----------------------------|-----------------------|
| $Q_{v,v}$                               | 1,3 m <sup>3</sup> /h      |                       |
| $\phi_v$                                | 1924 W                     |                       |
| $Q_{m,v}$                               | 0,36 kg/s                  |                       |
| $q_{m,v}$                               | 326 kg/(s m <sup>2</sup> ) |                       |
| $\omega_c$                              | 0,327 m/s                  |                       |
| $\Delta t_v$                            | 1,28 °C                    |                       |
| $t_2''$                                 | 26,38 °C                   | $t_{m,v} = 25,74$ °C  |
| $t_2'$                                  | 25,1 °C                    |                       |
| $C_v = C_2$                             | 1504 W/K                   |                       |
| $Q_{v,u}$                               | 0,60 m <sup>3</sup> /h     |                       |
| $Q_{m,u}$                               | 0,143 kg/s                 |                       |
| $C_u = C_1$                             | 275 W/K                    |                       |
| $t_1'$                                  | 39 °C                      | $t_{m,u} = 35,5$ °C   |
| $t_1''$                                 | 32 °C                      |                       |
| $\Delta t_u$                            | 7 °C                       |                       |
| $\Delta T_m$                            | 9,47 K                     |                       |
| $F$                                     | 0,805                      |                       |
| $\Delta T_{m,kor}$                      | 7,62 K                     |                       |
|   | MIT05                      | MIT06                 |
| $Re$<br>(u cijevi)                      | 2880 (prijelazno područje) |                       |
| $\alpha_i$<br>W/(m <sup>2</sup> K)      | 1925                       | 1901                  |
| $q_{m,u}$<br>kg/(s m <sup>2</sup> )     | 87,17                      | 96,82                 |
| $Re$<br>(u plaštu)                      | 90,43<br>(laminarno)       | 100,44<br>(laminarno) |
| $\alpha_o$<br>W/(m <sup>2</sup> K)      | 488                        | 515                   |
| $\alpha_{o,sr}$<br>W/(m <sup>2</sup> K) | 437                        | 461                   |
| $K$<br>W/(m <sup>2</sup> K)             | 340                        | 353                   |
| $A$<br>m <sup>2</sup>                   | 0,743                      | 0,715                 |
| $A_o$<br>m <sup>2</sup>                 | 0,553                      | 0,746                 |
| $L$<br>M                                | 0,400                      | 0,540                 |

## 2.1.2. VANJSKA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (7)

### 2.1.2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA VANJSKOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (7)

Ulazna temperatura ulja,  $t_U' = 39 \text{ }^\circ\text{C}$

Sniženje temperature ulja,  $\Delta t_U = 7 \text{ }^\circ\text{C}$

Volumni protok ulja,  $Q_{v,U} = 0,72 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

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

Ulazna temperatura vode,  $t_V' = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$

---

Izlazna temperatura ulja:

$$\Delta t_U = t_U' - t_U''$$

$$t_U'' = t_U' - \Delta t_U = 39 - 7 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva mineralnog ulja<sup>17</sup> pri srednjoj temperaturi  $t_{m,U} = 35,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , prikazana su u tablici 3.

Fizikalna svojstva rashladne vode<sup>17</sup> pri temperaturi  $t_V' = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , prikazana su u tablici 4.

Toplinski kapacitet mineralnog ulja (srednji blok istočna strana, kućište sjever (7) – vanjski izmjenjivač):

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

$$C_U = \frac{0,72 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 860,93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,915 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_U = 0,3297 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 330 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet rashladne vode (srednji blok istočna strana, kućište sjever (7) – vanjski izmjenjivač):

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

$$C_V = \frac{1,3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1,504 \frac{\text{kJ}}{\text{s K}} = 1504 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

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

Stoga, oznake su sljedeće:

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

$$C_V = C_2 = 1504 \text{ W/K}$$

$t_1'$  – ulazna temperatura mineralnog ulja

$t_1''$  – izlazna temperature mineralnog ulja

$t_2'$  – ulazna temperatura rashladne vode

$t_2''$  – izlazna temperatura rashladne vode

Maseni protok ulja (srednji blok istočna strana, kućište sjever (7) – vanjski izmjenjivač):

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{0,72 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 860,93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,172 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (srednji blok istočna strana, kućište sjever (7) – vanjski izmjenjivač):

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{1,3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,360 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### **2.1.2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE NA VANJSKOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (7)**

Izmijenjeni toplinski tok (srednji blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – vanjski izmjenjivač), će biti:

$$\phi_U = C_1 \cdot (t_1'' - t_1') = C_1 \cdot \Delta T_U = 330 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (-7)\text{K} = -2308 \text{ W}$$

$$\phi_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = 2308 \text{ W}$$

$$\phi_V = 1504 \cdot (t_2'' - 25,1) = 2308 \text{ W}$$

$$t_2'' = 26,63 \text{ }^\circ\text{C}$$

Promjena temperature vode:

$$\Delta t_V = t_2'' - t_2' = 26,63 - 25,1 = 1,53 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva vode, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu vode:

$$t_{m,V} = \frac{26,63 + 25,1}{2} = 25,87 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti za fizikalne karakteristike vode pri srednjoj temperaturi 25,87 °C prikazane su u tablici 7.

Tablica 7. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi 25,87 °C

| Fizikalna svojstva             | $t_{m,V} / \text{ }^\circ\text{C}$ |
|--------------------------------|------------------------------------|
| rashladne vode                 | 25,87                              |
| $\rho_V / \text{ kg/m}^3$      | 996,24                             |
| $c_{p,V} / \text{ kJ/(kg K)}$  | 4,181                              |
| $\lambda_V / \text{ W/(m K)}$  | 0,607                              |
| $\nu_V / \text{ m}^2/\text{s}$ | $0,907 \cdot 10^{-6}$              |
| $\mu_V / \text{ (N s)/m}^2$    | $903,59 \cdot 10^{-6}$             |

### 2.1.2.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA VANJSKOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (7)

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

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 39 - 26,63 = 12,37 \text{ K}$$

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

Srednja logaritamska razlika temperature:

$$\Delta T_m = \frac{12,37 - 6,9}{\ln\left(\frac{12,37}{6,9}\right)} = 9,37 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t'_1 - t'_2}{t''_2 - t'_2} = \frac{39 - 32}{26,63 - 25,1} = 4,58$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t'_2} = \frac{26,63 - 25,1}{39 - 25,1} = 0,11$$

Broj prolaza kroz plašt,  $n = 1$ .

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,58 \cdot 0,11 - 1}{0,11 - 1}\right)^{1/1}}{4,58 - \left(\frac{4,58 \cdot 0,11 - 1}{0,11 - 1}\right)^{1/1}} = 0,11$$

$$F = \left[ \frac{(4,58^2 + 1)^{1/2}}{4,58 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,11}{1 - 4,58 \cdot 0,11}\right)}{\ln\left[ \frac{\left(\frac{2}{0,11}\right) - 1 - 4,58 + (4,58^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,11}\right) - 1 - 4,58 - (4,58^2 + 1)^{1/2}} \right]} = 0,979$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 9,37 \cdot 0,979 = 9,17 \text{ K}$$

#### **2.1.2.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), VANJSKI IZMJENJIVAČ)**

Maseni protok,  $Q_{m,v}$ , rashladne vode (srednji blok istočna strana, kućište sjeverno (7) – vanjski izmjenjivač):

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{1,3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,3597 = 0,36 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

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

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{0,36 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina,  $\omega_c$ , vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{996,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,327 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{903,59 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 2887$$

$Re > Re_c$ , kr

$2887 > 2300$  prijelazno područje strujanja  $2300 < Re < 10\,000$ , pa se koristi Hausenova jednačba:

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{903,59 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 4181 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,607 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 6,22$$

Za svaki ispitivani MIT računa se  $\alpha_i$ .

## MIT05

$L = 400 \text{ mm}$

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (2887^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{400}\right)^{2/3}\right]}{2887} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 1932 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \text{ za MIT05}$$

## MIT06

$L = 540 \text{ mm}$

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 326 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (2887^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{540}\right)^{2/3}\right]}{2887} \cdot 6,22^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 1908 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \text{ za MIT06}$$

### 2.1.2.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU – (SREDNJI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (7), VANJSKI IZMJENJIVAČ)

Masena brzina ulja u plaštu, za **MIT05**:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{0,72 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 860,93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1646 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 105 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{105 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{8196,91 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 109$$

$Re < Re_{kr}$

$109 < 2300$  laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{8196,91 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2} \cdot 1915 \frac{J}{kg K}}{0,143 \frac{W}{m K}} = 109$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,143 \frac{W}{m K}} = 0,56 \cdot (109)^{0,50} \cdot (109)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 536 \frac{W}{m^2 K}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 536 \cdot 7 + 0,7 \cdot 536 \cdot 6 + 536 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 480 \frac{W}{m^2 K} \text{ za MIT05}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{480} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1932} \cdot \frac{10}{8}} = 366 \frac{W}{m^2 K}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{2308 \text{ W}}{366 \frac{W}{m^2 K} \cdot 9,17 \text{ K}} = 0,688 \text{ m}^2$$

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

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{0,72 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 860,93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1482 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 116 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{116 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{8196,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 120,34$$

$Re < Re_c$ , kr

$120,34 < 2300$  laminarno strujanje u plaštu

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

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (120,34)^{0,50} \cdot (109)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 563 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 563 \cdot 7 + 0,7 \cdot 563 \cdot 6 + 563 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 504 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \text{ za MIT06}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{504} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1908} \cdot \frac{10}{8}} = 379 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,\text{kor}}} = \frac{2308 \text{ W}}{379 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 9,17 \text{ K}} = 0,664 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za MIT06:

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

U Tablici 8. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače MIT05 i MIT06, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište sjeverno (7), vanjski izmjenjivač topline.

Tablica 8. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače MIT05 i MIT06, tip 1-2, istočna strana, srednji blok peći, kućište sjeverno (7), vanjski izmjenjivač topline

|   |                            |                      |
|---|----------------------------|----------------------|
| $Q_{v,V}$                               | 1,3 m <sup>3</sup> /h      |                      |
| $\phi_V$                                | 2308 W                     |                      |
| $Q_{m,V}$                               | 0,36 kg/s                  |                      |
| $q_{m,V}$                               | 326 kg/(s m <sup>2</sup> ) |                      |
| $\omega_c$                              | 0,327 m/s                  |                      |
| $\Delta t_V$                            | 1,53 °C                    |                      |
| $t_2''$                                 | 26,63 °C                   | $t_{m,V} = 25,87$ °C |
| $t_2'$                                  | 25,1 °C                    |                      |
| $C_V = C_2$                             | 1504 W/K                   |                      |
| $Q_{v,U}$                               | 0,72 m <sup>3</sup> /h     |                      |
| $Q_{m,U}$                               | 0,172 kg/s                 |                      |
| $C_U = C_1/$                            | 330 W/K                    |                      |
| $t_1'$                                  | 39 °C                      | $t_{m,U} = 35,5$ °C  |
| $t_1''$                                 | 32 °C                      |                      |
| $\Delta t_U$                            | 7 °C                       |                      |
| $\Delta T_m$                            | 9,37 K                     |                      |
| $F$                                     | 0,979                      |                      |
| $\Delta T_{m,kor}$                      | 9,17 K                     |                      |
|   | MIT05                      | MIT06                |
| $Re$<br>(u cijevi)                      | 2887 (prijelazno područje) |                      |
| $\alpha_i$<br>W/(m <sup>2</sup> K)      | 1932                       | 1908                 |
| $q_{m,U}$<br>kg/(s m <sup>2</sup> )     | 105                        | 116                  |
| $Re$<br>(u plaštu)                      | 109                        | 120,34               |
| $\alpha_o$<br>W/(m <sup>2</sup> K)      | 536                        | 563                  |
| $\alpha_{o,sr}$<br>W/(m <sup>2</sup> K) | 480                        | 504                  |
| $K$<br>W/(m <sup>2</sup> K)             | 366                        | 379                  |
| $A$<br>m <sup>2</sup>                   | 0,688                      | 0,664                |
| $A_o$<br>m <sup>2</sup>                 | 0,553                      | 0,746                |
| $L$<br>m                                | 0,400                      | 0,540                |

### 3.RASPRAVA

U ovom završnom radu obrađena je problematika hlađenja mineralnog ulja u kliznim ležajevima rotacijske peći. Naime, zbog visokih temperatura i tlakova pri radu rotacijske peći mineralnom ulju se smanjuje viskoznost što se negativno odražava na sposobnost podmazivanja kliznih ležajeva. Stoga je potrebno izvršiti hlađenje mineralnog ulja koristeći odgovarajuće izmjenjivače topline. U ovom radu ispitane su karakteristike industrijskih izmjenjivača topline MIT05 i MIT06, kako bi se moglo zaključiti o njihovoj primjenjivosti u procesu hlađenja mineralnog ulja. Ispitivanja su provedena u svrhu hlađenja mineralnog ulja na srednjem bloku rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa na istočnoj strani peći na sjevernom kućištu (pozicija 7) s vanjske i unutarnje strane kućišta.

Ispitivani MIT05 i MIT06 izmjenjivači topline su horizontalni višecijevni rekuperatori, tipa 1-2. U prostor plašta oko cijevnog snopa dostrujava mineralno ulje volumnom brzinom  $0,60 \text{ m}^3/\text{h}$  na unutarnjem izmjenjivaču te volumnom brzinom  $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$  na vanjskom izmjenjivaču. Kroz cijevni snop, u oba izmjenjivača (unutarnjem i vanjskom) struji rashladna voda u dva prolaza, volumnom brzinom  $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$  i i ulazne temperature  $25,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cijevni snop u plaštu izmjenjivača unutarnjeg promjera  $107 \text{ mm}$  sastoji se od 44 bakrene cijevi, raspored cijevi je u trokutu s korakom od  $13 \text{ mm}$ ,  $\lambda_c = 386,12 \text{ W}/(\text{m K})$ , vanjskog promjera  $10 \times 1 \text{ mm}$ . Duljina cijevi u cijevnom snopu iznosi  $400 \text{ mm}$  (MIT05) i  $540 \text{ mm}$  (MIT06), a broj pregrada u plaštu je 6 (MIT05) i 9 (MIT06). Mineralno ulje je ulazne temperature  $39 \text{ }^\circ\text{C}$  i na unutarnjem i na vanjskom izmjenjivaču na ispitivanoj poziciji te ga je potrebno ohladiti za  $\Delta t_u = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Iz poznatih karakteristika MIT05 i MIT06 industrijskih izmjenjivača topline, tj. poznavajući vanjski promjer cijevi,  $d_o$ , duljina cijevi u cijevnom snopu,  $L$  te broj cijevi u cijevnom snopu,  $N_c$  može se odrediti raspoloživa površina za izmjenu topline navedenih izmjenjivača. Rezultati (Tablica 1) ukazuju da je za MIT05 raspoloživa površina za izmjenu topline  $A_o = 0,553 \text{ m}^2$ , dok za MIT06 ista iznosi  $A_o = 0,746 \text{ m}^2$ .

Karakteristične veličine hladnog i toplog fluida na srednjem bloku rotacijske peći prikazane su u Tablici 2 i prema njima se proveo proračun.

Identificirajući ulazne struje hladnog (rashladna voda) i toplog fluida (mineralno ulje) prema vrijednostima toplinskog kapaciteta proizlazi da je slabija struja mineralno ulje (ima manju vrijednost toplinskog kapaciteta) i njoj se pridružuje indeks 1. Jača struja je rashladna voda i njoj se pridružuje indeks 2. Toplinski kapacitet mineralnog ulja na unutarnjoj sjevernoj strani kućišta iznosi  $C_1 = 275 \text{ W/K}$ . Toplinski kapacitet rashladne vode na istoj strani iznosi  $C_2 = 1504 \text{ W/K}$ . Na vanjskoj sjevernoj strani kućišta toplinski kapacitet mineralnog ulja se povećao i iznosi  $C_1 = 330 \text{ W/K}$ . Toplinski kapacitet rashladne vode na vanjskoj strani istog kućišta ostaje isti, tj.  $C_2 = 1504 \text{ W/K}$ .

Toplinski tok koji se ostvaruje u izmjenjivaču topline može se izračunati iz ohlađivanja toplije struje odnosno zagrijavanja hladnije struje. Na unutarnjoj strani kućišta iznosi  $\phi = 1924 \text{ W}$ , a na vanjskoj strani  $\phi = 2308 \text{ W}$ . Toplinu koju u jedinici vremena daje ulje, prima rashladna voda te se na osnovu toga može izračunati prirast temperature vode, odnosno temperatura vode na izlazu iz cijevi. Potrebno je uz srednju logaritamsku razliku temperatura izračunati i korekcijski faktor  $F$ , kako bi istu korigirali jer se radi o višecijevnom izmjenjivaču topline s učvršćenim snopom cijevi (tip 1-2). Rezultati ispitivanja ukazuju da je za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima potrebno primijeniti Hansenovu jednadžbu, jer pri brzini strujanja rashladne vode u cijevima,  $\omega_c = 0,327 \text{ m/s}$  vrijednosti Reynoldsove značajke spadaju u prijelazno područje strujanja ( $2300 < Re < 10000$ ), tj. na unutarnjem (MIT05 i MIT06) izmjenjivaču topline  $Re = 2880$ , a na vanjskom (MIT05 i MIT06) izmjenjivaču  $Re = 2887$ . Koeficijenti prijenosa topline u cijevima izmjenjivača MIT05 na unutarnjoj strani iznosi  $\alpha_i = 1925 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ , dok u cijevima izmjenjivača MIT06 iznosi  $\alpha_i = 1901 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  (Tablica 6).

Koeficijenti prijenosa topline u cijevima izmjenjivača MIT05 na vanjskoj strani iznosi  $\alpha_i = 1932 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ , dok u cijevima izmjenjivača MIT06 iznosi  $\alpha_i = 1908 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  (Tablica 8).

Za računanje koeficijenta prijenosa topline na strani ulja potrebno je uzeti u obzir ukupan broj cijevi, broj cijevi u prvom redu, broj cijevi u drugom redu, duljinu cijevi, broj pregrada, unutarnji promjer plašta, vanjski promjer cijevi, raspored cijevi u plaštu. Iz rezultata ispitivanja je vidljivo da je režim strujanja u plaštu laminaran, tj.

$Re < Re_{kr}$  ( $Re < 2300$ ), te da se vrijednosti  $Re$  značajke kod MIT05 i MIT06 izmjenjivača, na unutarnjoj i vanjskoj strani mijenjaju. Pri volumnom protoku ulja  $0,60 \text{ m}^3/\text{h}$  vrijednost  $Re$  značajke na unutarnjem (MIT05) izmjenjivaču iznosi  $Re = 90,43$ , a na unutarnjem (MIT06) izmjenjivaču iznosi  $Re = 100,44$ . Pri volumnom protoku ulja  $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$  vrijednost  $Re$  značajke na vanjskom (MIT05) izmjenjivaču iznosi  $Re = 109$ , a na vanjskom (MIT06) izmjenjivaču iznosi  $Re = 120,34$ .

Uz protok ulja,  $Q_{v,U}$ , u plaštu oko cijevnog snopa u izmjenjivaču s unutarnje strane kućišta od  $0,60 \text{ m}^3/\text{h}$ , koeficijenti prijenosa topline,  $\alpha_{o,sr}$ , za MIT05 iznose  $\alpha_{o,sr} = 437 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , a za MIT06  $\alpha_{o,sr} = 461 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  (Tablica 6).

Povećanjem protoka ulja,  $Q_{v,U}$ , u plaštu oko cijevnog snopa u izmjenjivaču s vanjske strane kućištana  $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$ , povećavaju se i koeficijenti prijenosa topline,  $\alpha_{o,sr}$ , za oba izmjenjivača topline (Tablica 8). Za MIT05  $\alpha_{o,sr} = 480 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , a za MIT06  $\alpha_{o,sr} = 504 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  (Tablica 8).

Time se mijenjaju i ukupni koeficijenti prijenosa topline. Iz Tablice 6 i Tablice 8 je vidljivo da se vrijednosti ukupnog koeficijenta prijenosa topline na unutarnjem MIT05 povećavaju od  $K = 340 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  na  $K = 366 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  na vanjskom MIT05. Također je vidljivo da se vrijednosti ukupnog koeficijenta prijenosa topline na unutarnjem MIT06 povećavaju od  $K = 353 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  na  $K = 379 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  na vanjskom MIT06.

Koristeći izraz (17) može se na osnovi dobivenih vrijednosti izračunati potrebna površina za prijenos topline ispitivanih MIT05 i MIT06 izmjenjivača topline.

Rezultati proračuna ukazuju da ispitivani MIT05 ne zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja ni na unutarnjoj ni na vanjskoj strani kućišta na srednjem bloku rotacijske peći. Uz volumni protok mineralnog ulja od  $0,60 \text{ m}^3/\text{h}$  na unutarnjem MIT05 izmjenjivaču potrebna površina iznosi  $A = 0,743 \text{ m}^2$ , dok uz volumni protok mineralnog ulja od  $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$  na vanjskom MIT05 izmjenjivaču potrebna površina iznosi  $A = 0,688 \text{ m}^2$ . Vidljivo je da je u oba slučaja potrebna površina za prijenos topline veća od raspoložive površine  $A_o = 0,553 \text{ m}^2$ .

Rezultati proračuna također ukazuju da ispitivani MIT06 zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja i na unutarnjoj i na vanjskoj strani kućišta na srednjem bloku rotacijske

peći. Uz volumni protok mineralnog ulja od  $0,60 \text{ m}^3/\text{h}$  na unutarnjem MIT06 izmjenjivaču potrebna površina iznosi  $A = 0,715 \text{ m}^2$ , dok uz volumni protok mineralnog ulja od  $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$  na vanjskom MIT05 izmjenjivaču potrebna površina iznosi  $A = 0,664 \text{ m}^2$ . Vidljivo je da je u oba slučaja potrebna površina za prijenos topline manja u odnosu na raspoloživu površinu  $A_o = 0,746 \text{ m}^2$ .

Također je uočljivo da se uz povećani protok mineralnog ulja u plaštu izmjenjivača potrebna površina za izmjenu topline smanjuje.

#### 4. ZAKLJUČCI

- Za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima potrebno je primijeniti Hansenovu jednadžbu, jer pri brzini strujanja rashladne vode u cijevima,  $w_c = 0,327$  m/s vrijednosti Reynoldsove značajke spadaju u prijelazno područje strujanja ( $2300 < Re < 10000$ ).
- Režim strujanja mineralnog ulja u plaštu je laminaran, tj.  $Re < Re_{kr}$  ( $Re < 2300$ ). Za računanje koeficijenta prijenosa topline na strani ulja potrebno je uzeti u obzir ukupan broj cijevi, broj cijevi u prvom redu, broj cijevi u drugom redu, duljinu cijevi, broj pregrada, unutarnji promjer plašta, vanjski promjer cijevi, raspored cijevi u plaštu.
- Ispitivani MIT06 izmjenjivač topline zadovoljava za hlađenje mineralnog ulja i na unutarnjoj i na vanjskoj strani kućišta na srednjem bloku rotacijske peći budući je potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu površinu navedenog izmjenjivača.



## 5.LITERATURA

1. Z. Osmanović, J. Zelić, Proizvodnja portland-cementa, Sveučilište u Tuzli, Lukavac, B-Eli-M, 2010.
2. Rotary kiln, URL:<http://www.maimaichina.com/products/rotary-kiln.html> (pristupljeno 20.07.2021.)
3. D. Vrkljan, M. Klanfar, Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, RGN-fakultet Zagreb, 2010.  
URL:[https://rudar.rgn.hr/~mklanfar/nids\\_mklanfar/TEHNOLOGIJA%20NEMETA LA/Cementne%20sirovine.pdf](https://rudar.rgn.hr/~mklanfar/nids_mklanfar/TEHNOLOGIJA%20NEMETA LA/Cementne%20sirovine.pdf)(pristupljeno 20.07.2021.)
4. A. Žiga, J.Kačkamarčik, Naponsko stanje u nosećim valjcima rotacione peći, Mašinstvo,1 (2017) 14, 3–10.
5. K. H. Decker, Elementi strojeva, 3.izdanje, Golden marketing, Tehnička knjiga, Zagreb, 2006., str. 237-250.
6. Pogonski i radni strojevi02, Prijenos topline, 12-1–12-8  
URL:<https://docplayer.gr/71861900-11-dinamika-kompresibilnih-fluida.html> (pristupljeno 25.07.2021.)
7. Prijelazi topline,  
URL:[https://mozks-zzh.com/mozks/wp-content/uploads/2020/05/FIZ\\_8\\_4sat\\_svibanj\\_prijelazi-topline.pdf](https://mozks-zzh.com/mozks/wp-content/uploads/2020/05/FIZ_8_4sat_svibanj_prijelazi-topline.pdf) (pristupljeno 25.07.2021.)
8. URL:<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=28302> (pristupljeno 25.07.2021.)
9. A. Galović, Termodinamika II, IV.nepromijenjeno izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2007., str. 192.-237.
10. Spiralni IT  
URL:<https://hr.erch2014.com/biznes/7015-teploobmennik-plastinchatyy-princip-raboty-teploobmenniki-plastinchatye-ustroystvo.html> (pristupljeno 25.07.2021.)
11. Cijevni IT  
URL:<https://www.asio.cz/hr/as-reheater> (pristupljeno 25.07.2021.)

12. Pločasti IT  
URL:[https://hr.wikipedia.org/wiki/Izmjenjiva%C4%8D\\_topline](https://hr.wikipedia.org/wiki/Izmjenjiva%C4%8D_topline)  
(pristupljeno 25.07.2021.)
13. Smjer ulaza fluida  
URL:[https://hr.wikipedia.org/wiki/Regenerativni\\_izmjenjiva%C4%8D\\_topline](https://hr.wikipedia.org/wiki/Regenerativni_izmjenjiva%C4%8D_topline)  
(pristupljeno 26.07.2021.)
14. M. Ćosić, Interni priručnik za laboratorijske vježbe iz Tehnoloških operacija, KTF, Split, 2020.
15. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994., str. 149-200.
16. G. Towler, R. Sinnott, in Chemical Engineering design, Principles, practice and economics of plant and process design, Elsevier, B/H, 2008, Chapter 12, Heat transfer equipmentin, 793-829.
17. J. E. Edwards, Design and rating shell and tube heat exchangers,  
URL:[http://www.cit-wulkow.chemstations.com/content/documents/Technical\\_Articles/shell.pdf](http://www.cit-wulkow.chemstations.com/content/documents/Technical_Articles/shell.pdf)  
(pristupljeno 26.07.2021.)
18. B. Kraut, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982, str. 230.
19. O. Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1994., str. 108.

## 6. POPIS SIMBOLA

### OZNAKE

$A$  – površina prijenosa topline,  $m^2$

$A_c$  – ukupna poprečna površina presjeka cijevi,  $m^2$

$A_o$  – raspoloživa površina prijenosa topline,  $m^2$

$A_s$  – slobodna površina presjeka cijevnog snopa,  $m^2$

$a_c$  – poprečna površina presjeka cijevi,  $m^2$

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

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

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

$c$  – korak cijevi, m

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

$d_e$  – ekvivalentni promjer plašta, m

$d_i$  – unutarnji promjer cijevi, m

$d_o$  – vanjski promjer cijevi, m

$d_{pl}$  – unutarnji promjer plašta, m

$F$  – korekcijski faktor

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

$L$  – duljina cijevi, m

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

$N$  – ukupan broj cijevi

$N_c$  – ukupan broj cijevi u cijevnom snopu

$N_{pr}$  – broj pregrada u plaštu

$N_{prolaz}$  – broj prolaza fluida kroz cijevi

$Nu$  – Nusseltova značajka

$N_1$  – broj cijevi u prvom redu cijevnog snopa

$N_2$  – broj cijevi u drugom redu cijevnog snopa

$P$  – toplinska efikasnost hladnog fluida

$Pe$  – Pecletova značajka

$Pr$  – Prandtlova značajka

$Q_m$  – maseni protok fluida, kg/s

$q_m$  – masena brzina fluida u cijevi, kg/(s m<sup>2</sup>)

$R$  – omjer kapacitivnih brzina

$Re$  – Reynoldsova značajka

$r_c$  – otpor prijenosu topline stijenke cijevi, (m<sup>2</sup> K)/W

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

$\Delta T_m$  – srednja logaritamska razlika temperatura između „toplog“ i „hladnog“ fluida, K

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

$t'$  – ulazna temperature struje fluida, °C

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

$t_1'$  – ulazna temperature slabije struje, °C

$t_1''$  – izlazna temperature slabije struje, °C

$t_2'$  – ulazna temperature jače struje, °C

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

$t_m$  – aritmetička sredina temperature promatrane struje, °C

### **Grčka slova**

$\alpha_i$  – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj strani cijevi, W/(m<sup>2</sup> K)

$\alpha_o$  – koeficijent prijenosa topline na stijenku cijevi u plaštu, W/(m<sup>2</sup> K)

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

$\delta$  – debljina cijevi, mm

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

$\mu$  – dinamička viskoznost fluida, Pa s

$\mu_s$  – dinamička viskoznost fluida pri temperature stijenke, Pa s

$\nu$  – kinematička viskoznost fluida, m<sup>2</sup>/s

$\rho$  – gustoća fluida, kg/m<sup>3</sup>

$\Phi$  – toplinski tok (toplina prenesena u izmjenjivaču), W

$\omega$  – brzina fluida u cijevi, m/s