

# Višecijevni izmjenjivač topline (tip 1-2) s učvršćenim snopom cijevi

---

Galić, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

*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:167:546805>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**VIŠECIJEVNI IZMJENJIVAČ TOPLINE (TIP 1-2) S UČVRŠĆENIM**  
**SNOPOM CIJEVI**

**ZAVRŠNI RAD**

**JOSIP GALIĆ**

**Matični broj: 905**

**Split, rujan 2019.**



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

**VIŠECIJEVNI IZMJENJIVAČ TOPLINE (TIP 1-2) S UČVRŠĆENIM  
SNOPOM CIJEVI**

**ZAVRŠNI RAD**

**JOSIP GALIĆ**

**Matični broj: 905**

**Split, rujan 2019.**

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

**FIXED TUBE BUNDLE HEAT EXCHANGER, TYPE 1-2**

**BACHELOR THESIS**

**JOSIP GALIĆ**

**Parent number: 905**

**Split, September 2019.**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

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

**Znanstveno područje:** Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:** Kemijsko inženjerstvo

**Tema rada** je prihvaćena na 3. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta održanoj dana 29. studenog 2017. god.

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Miroslav Labor

**Pomoć pri izradi:** dr. sc. Jelena Jakić

### VIŠECIJEVNI IZMJENJIVAČ TOPLINE (TIP 1-2) S UČVRŠĆENIM SNOPOM CIJEVI

Josip Galić, 905

**Sažetak:**

Cilj ovog završnog rada je ispitati da li se višecijevni izmjenjivač topline (tip 1-2) s učvršćenim snopom cijevi može primijeniti u cementnoj industriji za hlađenje mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći u tehnološkom procesu proizvodnje cementa. Mineralno ulje potrebno je ohladiti od 35 °C na 31 °C. Ulje struji oko cijevi u plaštu volumnim protokom 10 L/min. Kroz cijevni snop od 44 bakrene cijevi vanjskog promjera 10 x 1 mm i duljine 840 mm struji rashladna voda ulazne temperature 28 °C uz različite volumne protoke od 1; 1,5 i 2 m<sup>3</sup>/h. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Rezultati proračuna pokazuju da je potrebna površina za izmjenjivač topline manja u odnosu na raspoloživu iz čega se zaključuje da je moguće primijeniti navedeni tip izmjenjivača. Sva tri ispitivana volumna protoka rashladne vode u cijevnom snopu uzrokuju prijelazno područje strujanja ( $2300 < Re < 10\ 000$ ), dok je strujanje ulja u plaštu laminarno ( $Re < 2300$ ).

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

**Rad sadrži:** 43 stranice, 6 slika, 7 tablica, 12 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Sastav Povjerenstva za obranu:**

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

**Datum obrane:**

**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 Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 03. (November 29<sup>th</sup> 2017.).

**Mentor:** Miroslav Labor, Ph. D., associate prof.

**Technical assistance:** Jelena Jakić, Ph. D.

### **FIXED TUBE BUNDLE HEAT EXCHANGER, TYPE 1-2**

Josip Galić, parent number 905

#### **Abstract:**

Main purpose of this bachelor thesis is to determine is it possible to utilize fixed tube bundle heat exchanger (type 1-2) for cooling mineral oil which lubricates sliding bearings of rotary kiln in technological process of cement production. Mineral oil should be cooled from 35 °C to 31 °C. The oil flows around the pipe in the sheath at a volume flow of 10 L / min. Cooling water of inlet temperature of 28 °C flows through a bundle of 44 copper tubes with an external diameter of 10 x 1 mm and a length of 840 mm with different volume flows of 1; 1,5 and 2 m<sup>3</sup>/h. The arrangement of the pipes is in a triangle with a step of 13 mm, and the number of baffles inside the sheath is 9. The results of the examination show that the required surface area for the heat exchanger is smaller than that available, from which it is concluded that it is possible to apply the said type of exchanger. All three test volumes of cooling water flow in the tube bundle cause a transient flow area ( $2300 < Re < 10\ 000$ ), while the oil flow in the sheath is laminar ( $Re < 2300$ ).

**Keywords:** bundle heat exchanger, overall heat transfer coefficient, heat transfer surface area

**Thesis contains:** 43 pages, 6 figures, 8 tables, 12 references

**Original in:** Croatian

#### **Defence committee:**

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

#### **Defence date:**

**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 izv. prof. dr. sc. Miroslava Labora tijekom rujna 2018.*



*Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Miroslavu Laboru na profesionalnoj pomoći, nadzoru i upućivanju u problematiku Završnog rada. Zahvaljujem se svim djelatnicima Zavoda za termodinamiku na pruženoj prilici za suradnju.*

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Izvršiti proračun protusmjernog izmjenjivača topline za hlađenje mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći u cementnoj industriji. Ulje temperature  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  i volumnog protoka  $10\text{ L/min}$ , potrebno je ohladiti za  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za hlađenje se koristi voda temperature  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  uz različite volumne protoke:  $1; 1,5$  i  $2\text{ m}^3/\text{h}$ .

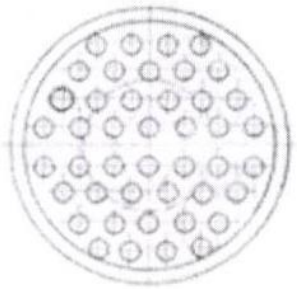
Izmjenjivač topline je višecijevni s učvršćenim snopom cijevi u plaštu, tipa 1-2.

Raspored cijevi (Slika 1.) je u trokutu s korakom od  $13\text{ mm}$ . Broj pregrada u plaštu je  $9$ .

Rashladna voda protječe kroz snop od  $44$  bakrene cijevi,  $\lambda(\text{Cu}) = 386,12\text{ W/(m K)}$ , vanjskog promjera  $10 \times 1\text{ mm}$  i duljine  $840\text{ mm}$ , a ulje kroz plašt.

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

Odrediti mogućnost primjene navedenog izmjenjivača topline.



Slika 1. Raspored cijevi u cijevnom snopu.

## SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je ispitati da li se višecijevni izmjenjivač topline (tip 1-2) s učvršćenim snopom cijevi može primijeniti u cementnoj industriji za hlađenje mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći u tehnološkom procesu proizvodnje cementa.

Mineralno ulje potrebno je ohladiti od 35 °C na 31 °C. Ulje struji oko cijevi u plaštu volumnim protokom 10 L/min. Kroz cijevni snop od 44 bakrene cijevi vanjskog promjera 10 x 1 mm i duljine 840 mm struji rashladna voda ulazne temperature 28 °C uz različite protoke od 1; 1,5 i 2 m<sup>3</sup>/h. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Rezultati proračuna pokazuju da je potrebna površina za izmjenjivač topline manja u odnosu na raspoloživu iz čega se zaključuje da je moguće primijeniti navedeni tip izmjenjivača. Sva tri ispitivana protoka rashladne vode u cijevnom snopu uzrokuju prijelazno područje strujanja ( $2300 < Re < 10\ 000$ ), dok je strujanje ulja u plaštu laminarno ( $Re < 2300$ ).

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

## **ABSTRACT**

Main purpose of this bachelor thesis is to determine is it possible to utilize fixed tube bundle heat exchanger (type 1-2) for cooling mineral oil which lubricates sliding bearings of rotary kiln in technological process of cement production. Mineral oil should be cooled from 35 °C to 31 °C. The oil flows around the pipe in the sheath at a volume flow of 10 L / min. Cooling water of inlet temperature of 28 °C flows through a bundle of 44 copper tubes with an external diameter of 10 x 1 mm and a length of 840 mm with different volume flows of 1; 1,5 and 2 m<sup>3</sup>/h. The arrangement of the pipes is in a triangle with a step of 13 mm, and the number of baffles inside the sheath is 9. The results of the examination show that the required surface area for the heat exchanger is smaller than that available, from which it is concluded that it is possible to apply the said type of exchanger. All three test volumes of cooling water flow in the tube bundle cause a transient flow area ( $2300 < Re < 10\ 000$ ), while the oil flow in the sheath is laminar ( $Re < 2300$ ).

**Keywords:** bundle heat exchanger, overall heat transfer coefficient, heat transfer surface area

## SADRŽAJ

|  |                              |
|--|------------------------------|
| UVOD .....   | 1                            |
| 1. OPĆI DIO .....  | 2                            |
| 1.1. PROCES PROIZVODNJE PORTLAND CEMENTA.....  | 2                            |
| 1.2. ROTACIJSKA PEĆ.....   | 3                            |
| 1.3. IZMJENJIVAČI TOPLINE.....   | 4                            |
| 1.4. REKUPERATOR.....  | 6                            |
| 1.5. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE .....   | 7                            |
| 1.5.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE .....  | 7                            |
| 1.5.2. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE.....  | 10                           |
| 1.5.3. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJKAMA CIJEVI.....                                  | 11                           |
| 2.EKSPERIMENTALNI DIO.....   | 15                           |
| 2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA .....  | 15                           |
| 2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE.....   | 18                           |
| 2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA.....   | 22                           |
| 2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F.....  | Error! Bookmark not defined. |
| 2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI .....                                    | 25                           |
| 2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU .....                                    | 31                           |
| 2.7. PRORAČUN KOEFICIJENTA PROLAZA TOPLINE ILI UKUPNOG<br>KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE ..... | 33                           |
| 2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE .....                                      | 35                           |
| 3. RASPRAVA .....  | 37                           |
| 4. ZAKLJUČCI .....   | 39                           |
| 5. LITERATURA .....  | 40                           |
| 6. POPIS SIMBOLA .....   | 41                           |

## UVOD

Inženjerstvo je korištenje znanosti i tehnike za potrebe čovječanstva. To se ostvaruje znanjem, matematikom i iskustvom te primjenjuje kroz projektiranje procesa i objekata. Zadatak inženjera je pronaći optimalno rješenje za svaki problem u industriji.

Toplina ili toplinska energija je fizikalna veličina kojom se opisuje energija koja prelazi s toplijeg na hladnije tijelo uslijed razlike njihovih temperatura. To je u skladu s II zakonom termodinamike, prema Clausiusu, koji glasi „Toplina ne može ni neposredno ni posredno sama od sebe prijeći s hladnijeg na toplije tijelo“. Prijelaz topline je učestala pojava kod većine uređaja kemijske procesne industrije. Uređaji upotrijebljeni u tu svrhu moraju biti što manjih dimenzija iz ekonomičnih razloga.

Postoje tri vrste izmjene topline između tijela različitih temperatura, tj. tri mehanizma prijenosa topline: kondukcija (vođenje topline), konvekcija (strujanje topline) i radijacija (toplinsko zračenje).

Ukoliko se toplina prenosi s jednog fluida na drugi koji su međusobno odijeljeni čvrstom stijenkom, govori se o prolazu topline (prijenos topline, tj. kombinacija konvekcije i kondukcije). Toplina prelazi s toplijeg fluida na pregradnu stijenku, provodi se kroz nju i na kraju se prenosi sa stijenke na hladniji fluid. Takav princip je osnova toplinskih uređaja koji se nazivaju izmjenjivači topline.

Industrija pred inženjere postavlja brojne zahtjeve, a među njima i ubrzanje prijenosa topline ili sprječavanje prijelaza topline tamo gdje je on nepoželjan i time smanjiti gubitke. Zadatak inženjera je da zahtjeve ispuni, a to je moguće uz dobro poznavanje svih oblika i zakona prijenosa topline.

Svrha ovog završnog rada je proučiti te ispitati karakteristike višecijevnog izmjenjivača topline, tip 1-2, u svrhu hlađenja mineralnog ulja kojim se podmazuju klizni ležajevi rotacijske peći u tehnološkom procesu proizvodnje cementa.

## 1. OPĆI DIO

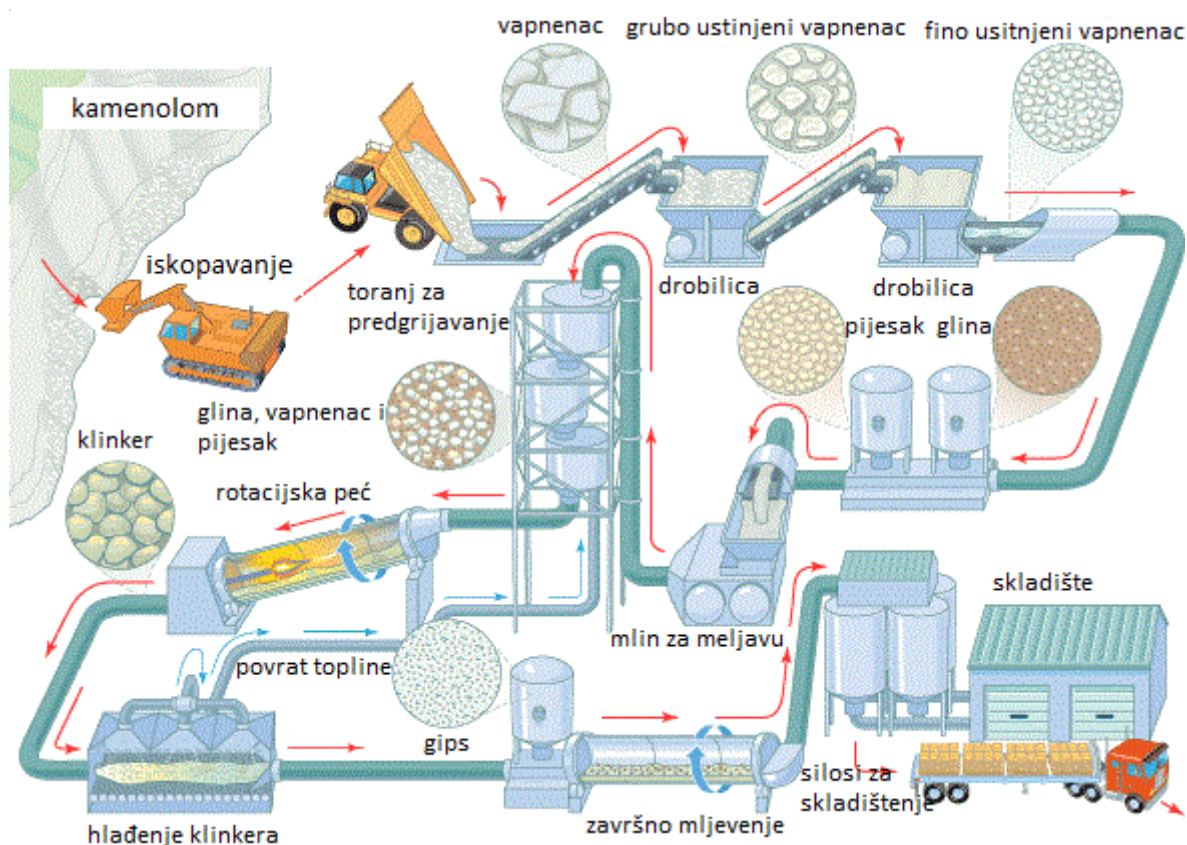
### 1.1. PROCES PROIZVODNJE PORTLAND CEMENTA

Proizvodnja cementa ubraja se u sustav građevinarstva što nije sasvim u skladu sa reakcijama koje se tijekom proizvodnje odvijaju. Bolje je kazati da je to kemijska grana gdje su zastupljene mnoge fizikalne i vrlo složene kemijske reakcije.<sup>1</sup>

Proces proizvodnje obuhvaća sljedeće glavne operacije proizvodnje Portland cementa<sup>1</sup>:

- Eksploatacija sirovine u rudniku (bušenje, miniranje, utovar, transport i primarno drobljenje)
- Sušenje i mljevenje sirovine (sekundarno drobljenje i mljevenje)
- Proizvodnja klinkera (nastajanje minerala klinkera u rotacijskoj peći)
- Mljevenje cementa (sa dodacima gipsa, troske, aditiva)
- Planirano održavanje (prati sve faze proizvodnje).

Shema procesa proizvodnje cementa<sup>2</sup> prikazana je na slici 1.



Slika 1.1. Shema procesa proizvodnje cementa.<sup>2</sup>

## 1.2. ROTACIJSKA PEĆ

Rotacijska peć je veoma važan dio cjelokupnog postrojenja u procesu proizvodnje portland cementa. Pečenje homogenizirane sirovinske smjese u portland klinker odvija se suhim postupkom u sustavu rotacijske peći s izmjenjivačima topline.<sup>1</sup> Rotacijska peć predstavlja cilindar od 30 do 50 m dužine, promjera od 1 do 4,7 m. Vanjska stijenka peći građena je od čelika, a unutrašnja stijenka od vatrostalne opeke debljine do 0,5 m. Tijekom obrade, bitno je vrijeme postizanja temperature klinkera od 1370 °C. Novije konstrukcije postrojenja, imaju ugrađene ciklonske predgrijače za povećanje temperature ulazne sirovine čime se skraćuje duljina rotacijske peći.<sup>3</sup>

Izgled rotacijske peći<sup>4</sup> prikazan je na slici 2.



Slika 1.2. Rotacijska peć.<sup>4</sup>



### 1.3. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline<sup>5-8</sup> su uređaji u kojima se toplinska energija izmjenjuje između dva fluida. Imaju vrlo široku primjenu u postrojenjima centralnog grijanja, postrojenjima za pripremu potrošne tople vode (bojleri, radijatori, kaloriferi) te kod postrojenja koja se primjenjuju u rashladnoj tehnici.

Prema načinu izmjene topline mogu se podijeliti na:

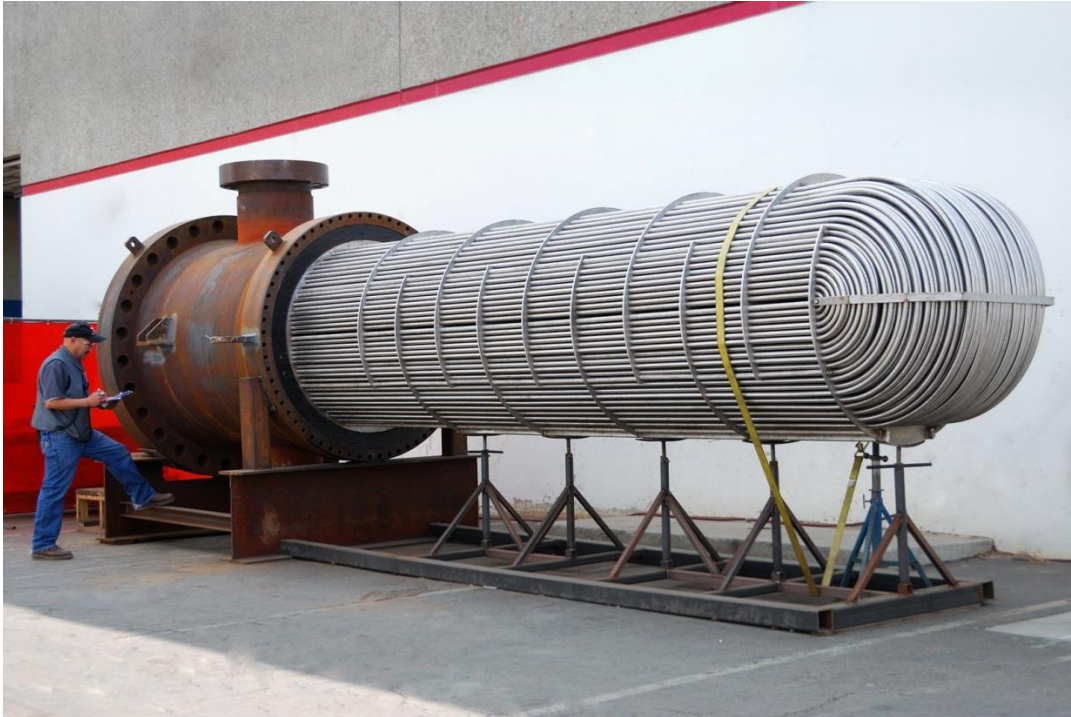
- izmjenjivače topline s direktnim kontaktom fluida – u ovom slučaju topline se izmjenjuju direktnim kontaktom toplijeg i hladnijeg fluida, a nakon izmjene topline fluidi se relativno lako mogu odvojiti
- izmjenjivače topline s indirektnim kontaktom fluida – toplina se najprije izmjenjuje između toplijeg fluida i čvrste površine za toplinsku izmjenu, a zatim između površine za toplinsku izmjenu i hladnijeg fluida.

Podjela izmjenjivača topline vrši se prema:

- načinu izmjene topline
- načinu protjecanja fluida kroz izmjenjivač.

Razlikujemo više tipova višecijevnih izmjenjivača topline, koji se primjenjuju ovisno o industrijskoj namjeni:

- U-cijevni izmjenjivači (Slika 3)<sup>9</sup>
- izmjenjivači sa učvršćenim snopom cijevi (Slika 4)<sup>10</sup>
- izmjenjivači s plivajućom glavom, te
- kotlasti izmjenjivači (rebojleri).



**Slika 1.3.** U-cijevni izmjenjivač.<sup>9</sup>



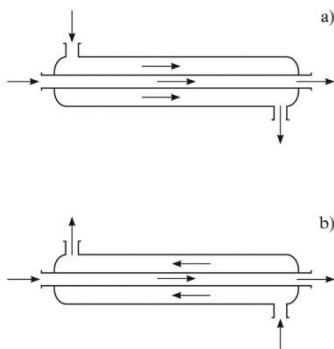
**Slika 1.4.** Izmjenjivač s učvršćenim snopom cijevi.<sup>10</sup>

## 1.4. REKUPERATOR

Izmjenjivači topline kod kojih su struje fluida međusobno razdvojene čvrstom stijenkom nazivaju se rekuperatorima. Razdjelna stijenka je rashladna, odnosno ogrjevnna površina, koja može biti cijevnog ili pločastog oblika. Razdjelna stijenka ne dopušta međusobni izravni dodir fluida.

Podjela rekuperatora ovisi o odnosu strujanja dvaju fluida pa shodno tome se dijele na:

- istosmjerne (struje fluida teku u istom smjeru, Slika 5a)<sup>11</sup>
- protusmjerne (struje fluida teku u suprotnim smjerovima, Slika 5b)<sup>11</sup>
- unakrsne (struje fluida su unakrsne)



**Slika 1.5.** Istosmjerni (a) i protusmjerni (b) tok strujanja fluida u rekuperatoru.<sup>11</sup>

U praksi je kod velikog broja rekuperatora agregatno stanje fluida na ulazu i izlazu iz uređaja isto. Uslijed toga, pri izmjeni topline, temperatura toplijeg fluida opada, a hladnijeg raste.

## 1.5. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE

### 1.5.1. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Izmijenjeni toplinski tok u rekuperator<sup>7,8</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

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

- za hladni fluid

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

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

gdje je:

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

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

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

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

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

Odnosno, dobije se omjer kapacitivnih brzina:

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

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:

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

gdje je:

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

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

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

$$\delta\Phi = \delta\dot{Q} = k \cdot (T_T - T_H) \cdot dA = \delta\dot{Q}_T = \delta\dot{Q}_H \quad (11)$$

$$\delta\dot{Q}_T = -C_T \cdot dT_T \quad (12)$$

$$\delta\dot{Q}_H = C_H \cdot dT_H \quad (13)$$

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:

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

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 faktorom  $F$ . Isti se može očitati iz dijagrama ovisnosti  $F = f(P, R)$ , gdje parametar  $P$  predstavlja toplinsku efikasnost hladnog fluida, a parametar  $R$  omjer kapacitivnih brzina.

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, će biti:

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

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

### 1.5.2. 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>7</sup>:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_1 + \frac{A_o}{A_1} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{A_o}{A_1}} \quad (18)$$

gdje je:

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

$\alpha_o$  – 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)

$r_o$  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>12</sup> Stoga je potrebno izračunati srednju temperaturu fluida koja predstavlja aritmetičku sredinu ulazne i izlazne temperature, odnosno:

$$t_m = \frac{t' + t''}{2} \quad (19)$$

gdje je:

$t_m$  – aritmetička sredina, °C

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

### 1.5.3. KOEFICIJENTI PRIJENOSA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI

Za koeficijent prijenosa topline<sup>7</sup> kada ne dolazi do promjene faza, u praksi se najčešće uzima da se radi o laminarnom strujanju. Osim laminarnog strujanja, postoji još turbulentno i prijelazno područje.

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

$$Nu = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 1,86 \cdot (Pe \cdot \frac{d_i}{L})^{\frac{1}{3}} \cdot (\frac{\mu}{\mu_s})^{0,14} \quad (20)$$

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (21)$$

$$Re = \frac{\omega \cdot d_i \cdot \rho}{\mu} = \frac{q_m \cdot d_i}{\mu} \quad (22)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (23)$$

gdje je:

Nu – Nusseltova značajka



$\alpha_i$  – koeficijent prijenosa topline na unutarnjoj strani stijenke,  $\text{kJ}/(\text{h m}^2 \text{K})$

$d_i$  – unutarnji promjer cijevi, m

$\lambda$  – toplinska vodljivost fluida,  $\text{kJ}/\text{mK}$

Pe – Pecletova značajka

Re – Reynoldsova značajka

Pr – Prandtlova značajka

L – duljina cijevi, m

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

$\mu$  – 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,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{h})$

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

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 0,027 \cdot (\text{Re})^{0,8} \cdot (\text{Pr})^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (24)$$

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

$$\frac{\alpha_i}{c_p \cdot q_m} = \frac{0,166 \cdot (\text{Re}^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right]}{\text{Re}} \cdot \text{Pr}^{-2/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (25)$$

Raspored cijevi u cijevnom snopu<sup>7</sup> može biti različit i to:

- raspored u obliku trokuta
- kvadratni raspored
- 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:

$$d_e = \frac{4 \cdot \left( c^2 - \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} \right)}{d_0 \cdot \pi} \quad (26)$$

Za raspored cijevi u trokutu izraz glasi:

$$d_e = \frac{1.1 \cdot (c^2 - 0.917 \cdot d_0^2)}{d_0} \quad (27)$$

Masena brzina fluida u plaštu iznosi:

$$q_m = \frac{Q_m}{A_s} \quad (28)$$

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:

$$A_s = \frac{d_{pl} \cdot l_{pr} \cdot (c - d_0)}{c} \quad (29)$$

gdje je:

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

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

$c$  – korak cijevi, m

$d_0$  – vanjski promjer cijevi, m

Za strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu<sup>8</sup> koeficijent prijenosa topline dan je jednadžbom:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_i}{\lambda} = C \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^m \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (30)$$

Vrijednost za konstante C, n i m ovise od rasporeda cijevi i režima strujanja.

Za šahovski raspored cijevi i laminarno strujanje fluida konstante iznose:

$$C = 0,56; n = 0,50 \text{ i } m = 0,36.$$

Koeficijent prijenosa topline izračunat iz jednadžbe (30) 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>8</sup> za snop od N redova u pravcu strujanja računa se iz odnosa:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot \alpha_0 \cdot N_1 + 0,7 \cdot \alpha_0 \cdot N_2 + \alpha_0 \cdot [N - (N_1 + N_2)]}{N} \quad (31)$$

gdje je:

$N_1$  – broj cijevi u prvom redu

$N_2$  – broj cijevi u drugom redu

$N$  – ukupan broj cijevi

## 2. EKSPERIMENTALNI DIO

### 2.1. IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA

Iz zadanih podataka u zadatku slijedi:

Toplija struja (fluid) – ulje koje dotiče volumnom brzinom  $Q_{v,U} = 10 \frac{\text{L}}{\text{min}}$ .

Temperatura ulja na ulazu u plašt izmjenjivača,  $t' = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Razlika temperature ulja na ulazu i izlazu iz izmjenjivača iznosi,  $\Delta t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta t = t' - t''$$

Temperature ulja na izlazu iz plašta,  $t'' = t' - \Delta t = 35 - 4 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$

Fizikalna svojstva ulja<sup>12</sup> uzimaju se za srednju temperaturu ulja izračunatu prema jednadžbi (19):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{35 + 31}{2} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$$

Obzirom da se temperatura  $33 \text{ }^\circ\text{C}$  ne nalazi u tablicama<sup>12</sup>, potrebno je izvršiti interpolaciju unutar vrijednosti  $20$  i  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  koje se nalaze u tablicama. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Fizikalna svojstva mineralnog ulja pri srednjoj temperaturi  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ .

| Fizikalna svojstva mineralnog ulja | $t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$ |
|------------------------------------|------------------------------------|
|                                    | 33                                 |
| $\rho_U / \text{ kg/m}^3$          | 863                                |
| $c_{p,U} / \text{ J/(kg K)}$       | 1879                               |
| $\lambda_U / \text{ W/(m K)}$      | 0,143                              |
| $\nu_U / \text{ m}^2/\text{s}$     | $10,40 \cdot 10^{-6}$              |
| * $\mu_U / \text{ (N s)/m}^2$      | $8975 \cdot 10^{-6}$               |

\*  $\mu_U = \nu_U \cdot \rho_U$

Hladniji fluid je voda koja dotječe u cijevni snop volumnom brzinom:

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

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

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

Temperatura vode na ulazu u cijevni snop iznosi 28 °C.

Fizikalna svojstva vode uzimaju se za navedenu ulaznu temperature vode od 28 °C.

Obzirom da se temperatura 28 °C ne nalazi u tablicama<sup>12</sup>, potrebno je obaviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 °C koje se nalaze u tablicama. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Fizikalna svojstva rashladne vode pri 28 °C.

| Fizikalna svojstva<br>rashladne vode | $t_V / ^\circ\text{C}$ |
|--------------------------------------|------------------------|
|                                      | 28                     |
| $\rho_V / \text{kg/m}^3$             | 995,6                  |
| $c_{p,V} / \text{J}/(\text{kg K})$   | 4180                   |
| $\lambda_V / \text{W}/(\text{m K})$  | 0,610                  |
| $\nu_V / \text{m}^2/\text{s}$        | $0,869 \cdot 10^{-6}$  |
| * $\mu_V / (\text{N s})/\text{m}^2$  | $865 \cdot 10^{-6}$    |

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

Toplinski kapacitet ulja:

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

$$C_U = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{60} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 863 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1879 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_U = 270 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 270 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja:

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{60} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 863 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

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

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

$$C_V = \frac{1}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1156 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 1156 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{1}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,277 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

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

$$C_V = \frac{1,5}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 1734 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 1734 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{1,5}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,415 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

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

$$C_V = \frac{2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$C_V = 2312 \frac{\text{J}}{\text{s K}} = 2312 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok vode:

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = \frac{2}{3600} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 995,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,553 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Iz dobivenog proračuna slijedi da je  $C_U < C_V$ , tj.  $270 < 1156$ ;  $270 < 1734$  i  $270 < 2312$ .

Stoga ulju pripada značenje slabije struje i oznaka 1, a vodi pripada značenje jače struje i oznaka 2.

Oznake za toplinske kapacitete te ulazne i izlazne temperature ispitivanih fluida su, dakle, sljedeće:

$$C_U = C_1$$

$$C_V = C_2$$

$t_1'$  – ulazna temperatura ulja

$t_1''$  – izlazna temperatura ulja

$t_2'$  – ulazna temperatura vode

$t_2''$  – izlazna temperatura vode

Ulazna i izlazna temperatura mineralnog ulja koje nosi oznaku slabije struje, kao i volumni protok (10 L/min) mineralnog ulja ostaju konstantni.

Povećanjem volumnog protoka vode, mijenjat će se njena izlazna temperatura, dok ulazna temperatura jače struje ostaje konstantna i iznosi 28 °C.

## 2.2. IZLAZNA TEMPERATURA VODE

Na osnovu izraza (8) odnosno (17) slijedi da se toplinski tok u izmjenjivaču može se izračunati iz ohlađivanja ( $t_1' - t_1''$ ) slabije struje (mineralno ulje) ili iz zagrijavanja ( $t_2'' - t_2'$ ) jače struje (rashladna voda), pa je:

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

Izmijenjeni toplinski tok:

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 270 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 4 \text{ K} = 1080 \text{ W}$$

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Toplina koju daje ulje prima rashladna voda u cijevnom snopu:

$$\phi_V = \dot{Q}_V = C_2 \cdot (t_2'' - t_2') = C_2 \cdot \Delta t_V = 1080 \text{ W}$$

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

$$\Delta t_V = \frac{\dot{Q}_V}{C_2} = \frac{1080 \text{ W}}{1156 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 0,93 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_V = (t_2'' - 28) = 0,93 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura vode na izlazu uz volumni protok  $Q_{v,V} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ :

$$t_2'' = \Delta t_V + 28 = 0,93 + 28 = 28,93 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

$$\Delta t_V = \frac{\dot{Q}_V}{C_2} = \frac{1080 \text{ W}}{1734 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 0,62 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_V = (t_2'' - 28) = 0,62 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperature vode na izlazu, uz volumni protok  $Q_{v,V} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

$$t_2'' = \Delta t_V + 28 = 0,62 + 28 = 28,62 \text{ }^\circ\text{C}$$



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

$$\Delta t_V = \frac{\dot{Q}_V}{C_2} = \frac{1080 \text{ W}}{2312 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 0,47 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_V = (t_2'' - 28) = 0,47 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperature vode na izlazu uz volumni protok  $Q_{v,V} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ :

$$t_2'' = \Delta t_V + 28 = 0,47 + 28 = 28,47 \text{ }^\circ\text{C}$$

Iz dobivenih rezultata slijedi da uz istu vrijednost temperature ulazne rashladne vode od  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ , i povećanje volumnog protoka rashladne vode od 1 na 1,5 te  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ , dolazi do povećanja izlazne temperature rashladne vode.

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

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

|                                    |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| $Q_{v,U}$<br>L/min                 | 10    |       |       |
| $Q_{m,U}$<br>kg/s                  | 0,144 |       |       |
| $t_1' / \text{ }^\circ\text{C}$    | 35    |       |       |
| $t_1'' / \text{ }^\circ\text{C}$   | 31    |       |       |
| $Q_{v,V}$<br>$\text{m}^3/\text{h}$ | 1     | 1,5   | 2     |
| $Q_{m,V}$<br>kg/s                  | 0,277 | 0,415 | 0,553 |
| $t_2' / \text{ }^\circ\text{C}$    | 28    |       |       |
| $t_2'' / \text{ }^\circ\text{C}$   | 28,93 | 28,62 | 28,47 |
| $C_U = C_1$<br>W/K                 | 270   |       |       |
| $C_V = C_2$<br>W/K                 | 1156  | 1734  | 2312  |

Za daljnji proračun fizikalna svojstva vode, uzimaju se pri srednjoj temperaturi vode koristeći izraz 19.

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

$$t_{m,V} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{28 + 28,93}{2} = 28,47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

$$t_{m,V} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{28 + 28,62}{2} = 28,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

$$t_{m,V} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{28 + 28,47}{2} = 28,24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Navedene vrijednosti temperatura ne nalaze u tablicama<sup>12</sup>, te je potrebno izvršiti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 °C koje se nalaze u tablicama. Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva vode, prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Fizikalna svojstva vode pri srednjim temperaturama.

| Fizikalna svojstva vode             | $t_{m,V} / ^\circ\text{C}$ |                       |                       |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                     | 28,47                      | 28,31                 | 28,24                 |
| $\rho_V / \text{kg/m}^3$            | 994,54                     | 994,49                | 994,47                |
| $c_{p,V} / \text{J/(kg K)}$         | 4180                       | 4180                  | 4180                  |
| $\lambda_V / \text{W/(m K)}$        | 0,615                      | 0,615                 | 0,615                 |
| $\nu_V / \text{m}^2/\text{s}$       | $0,807 \cdot 10^{-6}$      | $0,804 \cdot 10^{-6}$ | $0,803 \cdot 10^{-6}$ |
| * $\mu_V / (\text{N s})/\text{m}^2$ | $803 \cdot 10^{-6}$        | $800 \cdot 10^{-6}$   | $799 \cdot 10^{-6}$   |

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

### 2.3. SREDNJA LOGARITAMSKA RAZLIKA TEMPERATURA

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

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

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

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 35 - 28,93 = 6,07 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 31 - 28 = 3 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{6,07 - 3}{\ln\left(\frac{6,07}{3}\right)} = 4,36 \text{ K}$$

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

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 35 - 28,62 = 6,38 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 3 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{6,38 - 3}{\ln\left(\frac{6,38}{3}\right)} = 4,48 \text{ K}$$

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

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 35 - 28,47 = 6,53 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 3 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \frac{6,53 - 3}{\ln\left(\frac{6,53}{3}\right)} = 4,54 \text{ K}$$

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

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

| mineralno ulje                      | voda                                   |  |  |
|-------------------------------------|--|--|--|
| $Q_{v,U} = 10 \text{ L/min}$        | $Q_{v,V} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$     | $Q_{v,V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$   | $Q_{v,V} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$     |
| $t_1' = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  | $t_2' = 28 \text{ }^\circ\text{C}$     |  |  |
| $t_1'' = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_2'' = 28,93 \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_2'' = 28,62 \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_2'' = 28,47 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| $\Delta T_m / \text{K}$             | 4,36                                   | 4,48                                   | 4,54                                   |

#### 2.4. KOREKCIJSKI FAKTOR; F

Korekcijski faktorom F se izračunava koristeći jednadžbu:

$$F = \left[ \frac{(R^2 + 1)^{1/2}}{R - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left( \frac{1 - P_n}{1 - R \cdot P_n} \right)}{\ln \left[ \frac{\left( \frac{2}{P_n} \right) - 1 - R + (R^2 + 1)^{1/2}}{\left( \frac{2}{P_n} \right) - 1 - R - (R^2 + 1)^{1/2}} \right]} \quad (31)$$

Parametar  $P_n$  u jednadžbi (31) računa se prema izrazu (32):

$$P_n = \frac{1 - \left( \frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}}{R - \left( \frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}} \quad (32)$$

Parametar R jednak je omjeru kapacitivnih brzina i računa se prema izrazu (33) dok je parametar P jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida i računa se prema izrazu (34):

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} \quad (33)$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} \quad (34)$$

U jednadžbi (32) n predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt.

Dobivene vrijednosti za navedene parametre R, P i  $P_n$  iznose:

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}} = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_2 - t'_2} = \frac{35 - 31}{28,93 - 28} = 4,30$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t'_2} = \frac{28,93 - 28}{35 - 28} = 0,13$$

Broj prolaza kroz plašt,  $n = 1$ .

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,30 \cdot 0,13 - 1}{0,13 - 1}\right)^{1/1}}{4,30 - \left(\frac{4,30 \cdot 0,13 - 1}{0,13 - 1}\right)^{1/1}} = \frac{0,49}{3,79} = 0,129$$

$$F = \left[ \frac{(4,30^2 + 1)^{1/2}}{4,30 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,129}{1 - 4,30 \cdot 0,129}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,129}\right) - 1 - 4,30 + (4,30^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0,129}\right) - 1 - 4,30 - (4,30^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}\right]} = 0,964$$

Korigirana srednja logaritamska temperature fluida računa se iz jednadžbe (15), tj.

$$\Delta T_{m, kor} = F \cdot \Delta T_m = 0,964 \cdot 4,36 = 4,20 \text{ K}$$

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

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

| parametri               | $Q_{v, v} / (m^3/h)$ |       |       |
|-------------------------|----------------------|-------|-------|
|                         | 1                    | 1,5   | 2     |
| R                       | 4,30                 | 6,45  | 8,51  |
| P                       | 0,13                 | 0,089 | 0,067 |
| P <sub>n</sub>          | 0,129                | 0,089 | 0,067 |
| F                       | 0,964                | 0,978 | 0,984 |
| $\Delta T_m / K$        | 4,36                 | 4,48  | 4,54  |
| $\Delta T_{m, kor} / K$ | 4,20                 | 4,38  | 4,45  |

## 2.5. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U CIJEVI

Cijevi su vanjskog promjera  $d_o = 10$  mm, debljine  $\delta = 1$  mm i duljine  $L = 840$  mm.

Unutarnji promjer cijevi:

$$d_i = 10 - 2 \cdot 1 = 8 \text{ mm}$$

Poprečna površina presjeka cijevi 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:

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

gdje je  $N_c$  ukupan broj cijevi u cijevnom snopu.

**Masena brzina fluida (rashladna voda) u cijevi, uz volumni protok  $Q_{v,V} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ :**

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{3600 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 994,54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

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

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{994,54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{803 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 2491$$

$Re > Re_{kr}$

$2491 > 2300$

prijelazno područje strujanja  $2300 < Re < 10\,000$

Za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima tada se koristi Hausenova jednažba (25), tj.

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

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

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{803 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,615 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,46$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (2491^{2/3} - 125) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{8}{840} \right)^{2/3} \right]}{2491} \cdot 5,46^{-2/3}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,00132$$

$$\alpha_i = 0,00132 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 250 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 1379,40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

**Masena brzina fluida (rashladna voda) u cijevi, uz volumni protok  $Q_{v,V} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$**

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 994,49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_v} = \frac{375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{994,49 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Reynoldsova značajka:

$$\text{Re} = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{m}}{800 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 3750$$

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

$$3750 > 2300$$

prijelazno područje strujanja  $2300 < \text{Re} < 10\,000$

Koeficijent prijenosa topline u cijevima iznosi:

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

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

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{800 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,615 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,44$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3750^{2/3} - 125) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{8}{840} \right)^{2/3} \right]}{3750} \cdot 5,44^{-\frac{2}{3}}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,00174$$

$$\alpha_i = 0,00174 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 375 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 2727,45 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Masena brzina fluida (rashladna voda) u cijevi, uz volumni protok  $Q_{v,V} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ :

$$q_{m,V} = \frac{Q_{m,V} \cdot N_{pr}}{A_c} = \frac{2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 994,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 499,98 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

$$\omega_c = \frac{q_{m,V}}{\rho_V} = \frac{499,98 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}}{994,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m,V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{499,98 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{799 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 5006,06$$

$Re > Re_{kr}$

$5006,06 > 2300$

prijelazno područje  $2300 < Re < 10\ 000$

Koeficijent prijenosa topline u cijevima iznosi:

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{799 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,615 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 5,43$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 499,98 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = \frac{0,166 \cdot (5006,06^{2/3} - 125) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{8}{840} \right)^{2/3} \right]}{5006,06} \cdot 5,43^{-2/3}$$

$$\frac{\alpha_i}{4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 499,98 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}} = 0,00188$$

$$\alpha_i = 0,00188 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 499,98 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} = 3929,04 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

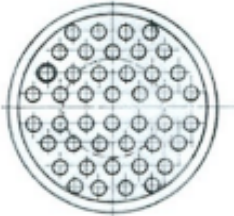
Postignute vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline u cijevi,  $\alpha_i$ , u ovisnosti o protočnim karakteristikama fluida (rashladne vode) u cijevnom snopu uz 2 prolaza fluida kroz cijevi prikazane su u tablici 7.

Tablica 7. Vrijednosti Re značajke i koeficijenta prijenosa topline u cijevi,  $\alpha_i$ , o protočnim karakteristikama fluida u cijevnom snopu ( $n = 2$ ).

| Re                                  | 2491  | 3750    | 5006,06 |
|-------------------------------------|---|---------|---------|
|                                     | prijelazno područje<br>(2300 < Re < 10 000) |         |         |
| $Q_{m,v}$<br>kg/s                   | 0,276                                       | 0,414   | 0,552   |
| $q_{m,v}$<br>kg/(s m <sup>2</sup> ) | 250   | 375     | 499,98  |
| $w_c$<br>m/s                        | 0,25  | 0,38    | 0,50    |
| $\alpha_i$<br>W/(m <sup>2</sup> K)  | 1379,40                                     | 2727,45 | 3929,04 |

## 2.6. PRORAČUN KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE U PLAŠTU

Raspored cijevi u cijevnom snopu je u trokutu s korakom od 13 mm, kako je prikazano u Zadatku ovog završnog rada (slika 1.).



Korak cijevi,  $c = 13 \text{ mm}$

Ukupan broj cijevi,  $N_c = 44$

Broj cijevi u prvom redu,  $N_1 = 7$

Broj cijevi u drugom redu,  $N_2 = 6$

Dužina cijevi,  $L = 840 \text{ mm}$

Vanjski promjer plašta,  $d_{pl} = 114,3 \text{ mm}$

Debljina plašta,  $\delta = 3,6 \text{ mm}$

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

Broj pregrada u plaštu  $N_{pr} = 9$

Razmak između pregrada u plaštu,  $l_{pr}$ , računa se iz sljedećeg izraza:

$$l_{pr} = \frac{L}{N_{pr}} = \frac{840}{9} = 93,33 \text{ mm}$$

Za raspored cijevi u trokutu, ekvivalentni promjer cijevi,  $d_e$ , se računa iz jednadžbe (27):

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

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

Unutarnji promjer plašta:

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

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa računa se iz jednadžbe (29):

$$A_s = \frac{d_{pl} \cdot l_{pr} \cdot (c - d_o)}{c} = \frac{107,1 \cdot 93,33 \cdot (13 - 10)}{13} = 2306,69 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 0,00231 \text{ m}^2$$

Masena brzina fluida u plaštu (mineralno ulje) računa se iz jednadžbe (28):

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{60 \text{ s}} \cdot 863 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,00231 \text{ m}^2} = 62,27 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{62,27 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{8975 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}} = 58,99$$

$Re < Re_{kr}$

$58,99 < 2300$  laminarno strujanje u plaštu

Koeficijent prijenosa topline za laminarno strujanje fluida i šahovski raspored cijevi u plaštu računa se iz jednadžbe (30), gdje je  $C = 0,56$ ,  $n = 0,50$  i  $m = 0,36$ .

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

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{8975 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \cdot 1879 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 117,930$$

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 0,56 \cdot (58,99)^{0,50} \cdot (117,93)^{0,36} = 23,95$$

$$\alpha_o = \frac{0,143 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 23,95}{0,008503 \text{ m}} = 402,78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline za snop od N redova u pravcu strujanja računa se iz jednadžbe (31), tj.

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

Poznato je da je broj cijevi u prvom redu  $N_1 = 7$ , a broj cijevi u drugom redu  $N_2 = 6$ . Uvrštavanjem brojčanih vrijednosti u jednadžbu (30) slijedi:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 402,78 \cdot 7 + 0,7 \cdot 402,78 \cdot 6 + 402,78 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44} = 360,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

## 2.7. PRORAČUN KOEFICIJENTA PROLAZA TOPLINE ILI UKUPNOG KOEFICIJENTA PRIJENOSA TOPLINE

Ukupni koeficijent prijenosa topline računa se prema jednadžbi (18), koja kad se zanemare otpori prijenosu topline uslijed onečišćenja vanjske,  $r_o$  i unutarnje,  $r_i$  stijenke cijevi prelazi u oblik:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}} \quad (35)$$

Uzevši u obzir jednadžbu za raspoloživu vanjsku površinu cijevi za izmjenu topline

$$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c$$

te jednadžbu za raspoloživu unutarnju površinu cijevi za izmjenu topline

$$A_i = \pi \cdot d_i \cdot L \cdot N_c$$

slijedi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{d_o}{d_i}} \quad (36)$$

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

Ukupni koeficijent prijenosa topline za  $\alpha_i = 1379,40 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{360,67} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{1379,40} \cdot \frac{10}{8}} = 271,64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za  $\alpha_i = 2727,45 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{360,67} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2727,45} \cdot \frac{10}{8}} = 309,26 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline za  $\alpha_i = 3929,04 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{360,67} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{3929,04} \cdot \frac{10}{8}} = 323,27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

## 2.8. PRORAČUN POTREBNE POVRŠINE ZA PRIJENOS TOPLINE

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

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

**Potrebna površina za prijenos topline uz volumni protok rashladne vode  $Q_{v,V} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  iznosi:**

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1080 \text{ W}}{271,64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 4,20 \text{ K}} = 0,947 \text{ m}^2$$

**Potrebna površina za prijenos topline uz volumni protok rashladne vode  $Q_{v,V} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  iznosi:**

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1080 \text{ W}}{309,26 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 4,38 \text{ K}} = 0,797 \text{ m}^2$$

**Potrebna površina za prijenos topline uz volumni protok rashladne vode  $Q_{v,V} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  iznosi:**

$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{1080 \text{ W}}{323,27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \cdot 4,45 \text{ K}} = 0,751 \text{ m}^2$$

**Raspoloživa površina prijensa topline iznosi:**

$$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c = \pi \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,840 \text{ m} \cdot 44 = 1,161 \text{ m}^2$$



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

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

|   |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|
| $Q_{v,U}$<br>L/min                      | 10      |         |         |
| $Q_{m,U}$<br>kg/s                       | 0,144   |         |         |
| $t_1' / ^\circ\text{C}$                 | 35      |         |         |
| $t_1'' / ^\circ\text{C}$                | 31      |         |         |
| $\alpha_{o,sr}$<br>W/(m <sup>2</sup> K) | 360,67  |         |         |
| $Q_{v,V}$<br>m <sup>3</sup> /h          | 1       | 1,5     | 2       |
| $Q_{m,V}$<br>kg/s                       | 0,277   | 0,415   | 0,553   |
| $t_2' / ^\circ\text{C}$                 | 28      |         |         |
| $t_2'' / ^\circ\text{C}$                | 28,93   | 28,62   | 28,47   |
| $\alpha_i$<br>W/(m <sup>2</sup> K)      | 1379,40 | 2727,45 | 3929,04 |
| $k$<br>W/(m <sup>2</sup> K)             | 271,64  | 309,26  | 323,27  |
| $\Delta T_{m,kor}$<br>K                 | 4,20    | 4,38    | 4,45    |
| $A$<br>m <sup>2</sup>                   | 0,947   | 0,797   | 0,751   |
| $A_o$<br>m <sup>2</sup>                 | 1,161   |         |         |
| $L$<br>m                                | 0,840   |         |         |

### 3. RASPRAVA

Završni rad predstavlja proračun višecijevnog izmjenjivača topline (tip 1-2) s učvršćenim snopom cijevi, koji bi se koristio za hlađenje mineralnog ulja za podmazivanje kliznih ležajeva rotacijske peći u cementnoj industriji.

Cilj ovog završnog rada je ispitati karakteristike industrijskog višecijevnog izmjenjivača topline, vanjskog promjera plašta 114,3 x 3,6 mm. Raspored cijevi u cijevnom snopu je u trokutu s korakom od 13 mm, a broj pregrada u plaštu je 9. Kroz cijevni snop, koji se sastoji od 44 bakrene cijevi ( $\lambda(\text{Cu}) = 386,12 \text{ W}/(\text{m K})$ ), vanjskog promjera 10 x 1 mm i duljine 840 mm, u dva prolaza, struji rashladna voda ulazne temperature 28 °C. Ulje temperature 35 °C dostrujava u prostor plašta volumnim protokom  $Q_{v,U} = 10 \text{ L}/\text{min}$  i potrebno ga je ohladiti za  $\Delta t = 4 \text{ °C}$ .

Ispitivana su tri volumna protoka rashladne vode,  $Q_{v,V}$  i to: 1; 1,5 i 2 m<sup>3</sup>/h.

Na osnovu zadanih karakteristika ispitivanih fluida (mineralno ulje, rashladna voda) proizilazi da je topliski kapacitet (vodena vrijednost) mineralnog ulja manji od toplinskog kapaciteta rashladne vode pri sva tri volumna protoka (Tablica 3.). Stoga mineralno ulje predstavlja slabiju struju fluida i pridružuje mu se indeks 1, a rashladna voda predstavlja jaču struju i pridružuje joj se indeks 2. Dakle,  $(C_U = C_1) < (C_V = C_2)$ .

Maseni protok ulja ( $Q_{m,U} = 0,144 \text{ kg}/\text{s}$ ) je znatno manji od masenih protoka rashladne vode koji iznose  $Q_{m,V} = 0,277; 0,415 \text{ i } 0,553 \text{ kg}/\text{s}$ .

Povećanjem volumnog protoka rashladne vode u cijevnom snopu izmjenjivača, za istu temperaturu (28 °C) rashladne vode na ulazu, dolazi do povećanja izlazne temperature rashladne vode, odnosno prirast temperature vode se smanjuje i iznosi  $\Delta t_V = 0,93; 0,62 \text{ i } 0,47 \text{ °C}$ .

Izmijenjena toplina u izmjenjivaču može se izračunati iz ohlađivanja toplije struje (mineralno ulje) odnosno zagrijavanja hladnije struje (rashladna voda). Izmijenjeni toplinski tok za ispitivane uvjete iznosi 1080 W. Budući se ovdje radi o višecijevnom izmijenjivaču topline s učvršćenim snopom cijevi (tip 1-2) potrebno je uz srednju logaritamsku razliku temperatura (Tablica 5) izračunati i korekcijski faktor F, kako bi istu korigirali. Naime, kod višecijevnih izmjenjivača pristup je kompliciraniji jer tu dolazi do križanja temperatura te je potrebno to uzeti u obzir. Rezultati su prikazani u Tablici 6.

Rezultati ispitivanja ukazuju da je za izračunavanje koeficijenta prijenosa topline u cijevima potrebno primijeniti Hansenovu jednadžbu, jer za sva tri ispitivana protoka rashladne vode vrijednosti Reynoldsove značajke spadaju u prijelazno područje strujanja ( $2300 < Re < 10000$ ). Povećanjem masene brzine,  $q_m, V$  rashladne vode u cijevima dolazi do povećanja  $Re$  značajke, a time i povećanja vrijednosti koeficijenta prijenosa topline u cijevima.

Za računanje koeficijenta prijenosa topline u plaštu, na strani mineralnog ulja, rezultati ispitivanja pokazuju da je u plaštu režim strujanja laminaran ( $Re < 2300$ ). Koeficijent prijenosa topline uzevši u obzir snop od  $N$  redova cijevi u pravcu strujanja iznosi  $\alpha_{o, sr} = 360,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Vrijednosti koeficijenta prolaza topline ili ukupnog koeficijenta prijenosa topline za ispitivane uvjete rada se povećavaju, čime se potrebna površina za prijenos topline s povećanjem volumnog protoka rashladne vode smanjuje od  $A = 0,947 \text{ m}^2$  na  $A = 0,797 \text{ m}^2$  odnosno  $A = 0,751 \text{ m}^2$ . Iz dobivenih rezultata (Tablica 8) je vidljivo da je pri najmanjem volumnom protoku rashladne vode od  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  potrebna površina za prijenos topline najveća ( $A = 0,947 \text{ m}^2$ ), dok je pri najvećem volumnom protoku rashladne vode od  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  potrebna površina za prijenos topline najmanja ( $A = 0,751 \text{ m}^2$ ).

Budući je raspoloživa površina prijenosa topline  $A_o = 1,161 \text{ m}^2$  može se zaključiti da ispitivani višecijevni izmjenjivač topline s učvršćenim snopom cijevi (tip 1-2) zadovoljava potrebe hlađenja mineralnog ulja sa  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ , koristeći rashladnu vodu ulazne temperature  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  i uz volumne protoke,  $Q_{v, v}$ , od  $1; 1,5$  i  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### 4. ZAKLJUČCI

- Iz svega dosad navedenog dolazi se do zaključka da je višecijevni izmjenjivač s učvršćenim snopom cijevi tipa 1-2 s duljinom cijevi od 840 mm i više nego dovoljan odnosno ima sve predispozicije za hlađenje mineralnog mazivog ulja sa temperature 35 °C na 31 °C.
- Re značajka spada u prijelazno područje strujanja fluida za sva 3 zadana protoka rashladne vode ( $2300 < Re < 10\ 000$ ).
- Povećanjem protoka rashladne vode dolazi do povećanja masene brzine vode u cijevima čime se povećava ukupni koeficijent prijelaza topline i smanjuje potrebna površina izmjenjivača za prijenos iste količine topline.

## 5. LITERATURA

1. I. Radić, Kemija i tehnologija proizvodnje portland cementa, Dalmacijapapir, Split, 2012.
2. Manufacturing process of cement, URL: <https://theconstructor.org/wp-content/uploads/2016/10/manufacturing-process-of-cement.jpg> (pristupljeno: 20.9.2018.)
3. H. R. Goshyeshi, F. K. Poor, Modeling of Rotary Kiln in Cement Industry, Open Access, Scientific Research, 8 (2016) 1 1-11, doi:10.4236/epe.2016.81003, URL: <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2016.81003> (pristupljeno: 20.9.2018.)
4. Rotary Kiln, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cement\\_kiln#/media/File:KilnBZ.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Cement_kiln#/media/File:KilnBZ.JPG) (pristupljeno 20.9.2018.)
5. F. Bošnjaković, Nauka o toplini, 2. dio, 4. izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
6. A. Galović, Termodinamika 2, 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. O. Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1994., str. 108.
9. U-cijevni izmjenjivač, URL: <http://www.titanmf.com/industries/oil-gas/> (pristupljeno: 21.9. 2018.)
10. Izmjenjivač s učvršćenim snopom cijevi, URL: <https://www.quora.com/What-is-a-counter-current-flow> (pristupljeno: 21.9.2018.)
11. Rekuperator, URL: <http://mit.com.hr/kontrolirana-fermentacija/cjevni-izmjenjivac-topline.php> (pristupljeno: 21.9.2018.)
12. B. Kraut, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982, str. 230.

## 6. POPIS SIMBOLA

### OZNAKE

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

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

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

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

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

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

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

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

$c$  – korak cijevi, m

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

$d_e$  – ekvivalentni promjer plašta, m

$d_i$  – unutarnji promjer cijevi, m

$d_o$  – vanjski promjer cijevi, m.

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

$F$  – korekcijski faktor

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

$L$  – duljina cijevi, m

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

$N$  – ukupan broj cijevi

$N_c$  – ukupan broj cijevi u cijevnom snopu

$N_{pr}$  – broj pregrada u plaštu

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

$Nu$  – Nusseltova značajka

$N_1$  – broj cijevi u prvom redu cijevnog snopa

$N_2$  – broj cijevi u drugom redu cijevnog snopa

$P$  – toplinska efikasnost hladnog fluida

$Pe$  – Pecletova značajka

$Pr$  – Prandtlova značajka

$Q_m$  – maseni protok fluida, kg/s

$q_m$  – masena brzina fluida u cijevi, kg/(s m<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