

Tip 1-2 višecijevnog izmjenjivača topline u sustavu hlađenja rotacijskih peći

Kosić, Marko

Master's thesis / Diplomski 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:167:340149>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

TIP 1-2 VIŠECIJEVNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE U SUSTAVU
HLAĐENJA ROTACIJSKIH PEĆI

DIPLOMSKI RAD

MARKO KOSIĆ
Matični broj: 307
Split, listopad 2021.

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

TIP 1-2 VIŠECIJEVNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE U SUSTAVU
HLAĐENJA ROTACIJSKIH PEĆI

DIPLOMSKI RAD

MARKO KOSIĆ

Matični broj: 307

Split, listopad 2021.

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

**TYPE 1-2 SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS IN COOLING SYSTEM
OF ROTARY KILNS**

DIPLOMA THESIS

MARKO KOSIĆ
Parent number: 307
Split, October 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Sveučilišni diplomski studij kemijske tehnologije: Zaštita okoliša

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: Izv. prof. dr. sc. Miroslav Labor

TIP 1-2 VIŠECIJEVNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE U SUSTAVU HLAĐENJA ROTACIJSKIH PEĆI

Marko Kosić, matični broj: 307

Sažetak:

Tema ovog diplomskog rada je rješavanje sustava hlađenja rotacijske peći koja služi za proizvodnju Portland cementa na izlaznom bloku peći. Na raspolaganju je bila serija industrijskih višecijevnih (**engl. shell and tube**) izmjenjivača topline (tip 1-2) s učvršćenim snopom cijevi koje je bilo potrebno ispitati te ustanoviti mogu li se upotrijebiti za hlađenje mineralnog ulja koje podmazuje klizne ležajeve na izlaznom bloku peći. Broj pregrada za svaki od zadanih MITova iznosi 9. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm. Iz rezultata ispitivanja uočljivo je kako je režim strujanja vode u cijevima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$) pri svim ispitivanim protocima, dok je režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{kr}$). Rezultati proračuna također pokazuju kako je za svaki od ispitivanih MITova dobivena vrijednost površine za izmjenu topline bila manja u odnosu na raspoloživu površinu ispitivanih izmjenjivača navedenih karakteristika. Iz toga se zaključuje kako je moguće primjeniti svaki od navedenih tipova izmjenjivača za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.

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

Rad sadrži: 65 stranica, 13 slika, 17 tablica, 14 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav povjerenstva za obranu:

1. Prof. dr. sc. Vanja Martinac – predsjednik
2. Doc. dr. sc. Mario Nikola Mužek – član
3. Izv. prof. dr. sc. Miroslav Labor – član, mentor

Datum obrane: 15.10.2021.

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

BASIC DOCUMENTATION CARD

DIPLOMA THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology in Split
Graduate study of Chemical Technology: Environmental protection

Scientific area: Technical Sciences

Scientific field: Chemical engineering

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

Supervisor: Miroslav Labor, Ph. D., associate prof.

TYPE 1-2 SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS IN COOLING SYSTEM OF ROTARY KILNS

Marko Kosić, parent number: 307

Abstract:

The topic of this thesis is the solution of the cooling system of a rotary kiln used for the production of Portland cement on the output block of the kiln. There were available a series of industrial shell and tube heat exchangers (type 1-2) with a fixed bundle of tubes that needed to be tested to determine if they could be used to cool the mineral oil that lubricates the plain bearings on the furnace outlet block. The number of baffles for each of the given MITs is 9. The tube arrangement is in a triangle with a step of 13 mm. From the test results, it is noticeable that the flow regime of water in the tubes is in the transition region ($2300 < Re < 10\ 000$) at all tested flows, while the flow regime in the shell is laminar ($Re < Re_{cr}$). The calculation results also show that for each of the tested MITs the obtained value of the heat exchange surface was lower in relation to the available area of the tested heat exchangers of the stated characteristics. All of the mentioned information lead to a conclusion that it is possible to use each of the above types of heat exchangers for cooling the plain bearings of a rotary kiln.

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

Thesis contains: 65 pages, 13 figures, 17 tables, 14 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Ph. D. Vanja Martinac, full prof. – Chair person
2. Ph. D. Mario Nikola Mužek, Assistant professor – Member
3. Ph. D. Miroslav Labor, Associate professor – Member, supervisor

Defence date: October 15th 2021.

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

Diplomski rad izrađen je u Zavodu za termodinamiku Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Miroslava Labora u razdoblju od srpnja do listopada 2021. godine.

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Miroslavu Laboru na stručnim savjetima i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

Najveća hvala mojoj obitelji na bezuvjetnoj potpori tijekom studiranja.

Marko Kosić

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

Zadatak diplomskog rada očituje se u rješavanju sustava hlađenja rotacijske peći, koja služi za proizvodnju Portland cementa, na izlaznom bloku peći u smjeru istoka, prema priloženoj shemi i karakterističnim podacima za hladni (rashladna voda) i topli (mineralno ulje) fluid na određenoj poziciji mjerenja.

Ispitati seriju od pet (5) protusmjernih industrijskih izmjenjivača tipa cijevni snop u plaštu s jednim (1) prolazom fluida kroz plašt i dva (2) prolaza fluida kroz cijevi te procijeniti jesu li dani izmjenjivači pogodni za hlađenje mineralnog ulja pri zadanim radnim uvjetima na izlaznom bloku peći. Cijevni snop u plaštu sastoji se od 44 bakrene cijevi, $\lambda_c = 386,12 \text{ W/(mK)}$, vanjskog promjera $10 \times 1 \text{ mm}$. Vanjski promjer plašta iznosi $114,3 \times 3,6 \text{ mm}$. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm .

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je rješavanje sustava hlađenja rotacijske peći koja služi za proizvodnju Portland cementa na izlaznom bloku peći. Na raspolaganju je bila serija industrijskih višecijevnih (**engl. shell and tube**) izmjenjivača topline (tip 1-2) s učvršćenim snopom cijevi koje je bilo potrebno ispitati te ustanoviti mogu li se upotrijebiti za hlađenje mineralnog ulja koje podmazuje klizne ležajeve na izlaznom bloku peći. Broj pregrada za svaki od zadanih MITova iznosi 9. Raspored cijevi je u trokutu s korakom od 13 mm. Iz rezultata ispitivanja uočljivo je kako je režim strujanja vode u cijevima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$) pri svim ispitivanim protocima, dok je režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{kr}$). Rezultati proračuna također pokazuju kako je za svaki od ispitivanih MITova dobivena vrijednost površine za izmjenu topline bila manja u odnosu na raspoloživu površinu ispitivanih izmjenjivača navedenih karakteristika. Iz toga se zaključuje kako je moguće primjeniti svaki od navedenih tipova izmjenjivača za hlađenje kliznih ležajeva rotacijske peći.

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

SUMMARY

The topic of this thesis is the solution of the cooling system of a rotary kiln used for the production of Portland cement on the output block of the kiln. There were available a series of industrial shell and tube heat exchangers (type 1-2) with a fixed bundle of tubes that needed to be tested to determine if they could be used to cool the mineral oil that lubricates the plain bearings on the furnace outlet block. The number of baffles for each of the given MITs is 9. The tube arrangement is in a triangle with a step of 13 mm. From the test results, it is noticeable that the flow regime of water in the tubes is in the transition region ($2300 < Re < 10\ 000$) at all tested flows, while the flow regime in the shell is laminar ($Re < Re_{cr}$). The calculation results also show that for each of the tested MITs the obtained value of the heat exchange surface was lower in relation to the available area of the tested heat exchangers of the stated characteristics. All of the mentioned information lead to a conclusion that it is possible to use each of the above types of heat exchangers for cooling the plain bearings of a rotary kiln.

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

SADRŽAJ

UVOD	1
1. OPĆI DIO	3
1.1. IZMJENJIVAČI TOPLINE	4
1.1.1. IZMJENJIVAČI TOPLINE TIPRA CIJEVNI SNOP U PLAŠTU	7
1.2. PREGRADE U PLAŠTU	10
1.3. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE.....	12
1.3.1. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJE FLUIDA	12
1.3.2. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE NA STIJKAMA CIJEVI.....	16
1.3.3. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU	18
2. EKSPERIMENTALNI DIO	20
2.1. IZLAZNI BLOK PEĆI – ISTOČNA STRANA.....	26
2.1.1. UNUTARNJA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (3).....	26
2.1.1.1 IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (3).....	26
2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA ULJA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (3).....	28
2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (3).....	29
2.1.1.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI – (IZLAZNI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (3) –UNUTARNJI IT) 30	
2.1.1.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU (IZLAZNI BLOK. PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (3) UNUTARNJI IT) .	32
2.1.2. VANJSKA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (3).....	40
2.1.3. UNUTARNJA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (4).....	45
2.1.4. VANJSKA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (4).....	50
3. REZULTATI I RASPRAVA	54
4. ZAKLJUČAK	58
5. LITERATURA	60
6. POPIS SIMBOLA	62

UVOD

Kemijsko inženjerstvo je inženjerska disciplina koja se oslanja na osnovna znanja iz područja kemije, fizike i matematike. Ono što kemijsko inženjerstvo čini drugačijim od ostalih inženjerskih disciplina je rješavanje problematike kemijskih procesa.

Postoje tri tipična problema s kojima se kemijski inženjeri najčešće susreću, koji se često i ne mogu jasno odvojiti. Prvi je bilanciranje procesa koje podrazumijeva bilance mase unutar procesa, bilance količine kretanja i bilance topline. Ovakvi problemi prvenstveno ovise od stupnja aproksimacije. Sljedeći problem je predviđanje fazne i/ili reakcijske ravnoteže u homogenim ili heterogenim sustavima. Treći problem kemijskog inženjerstva je projektiranje ili vođenje reaktora i separatora na osnovu proračuna prethodno navedenih dvaju problema i empirijskih korelacija.

Tematika ovog rada očituje se u rješavanju sustava hlađenja rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa. Prilikom rada rotacijske peći dolazi do gubitaka uslijed dinamičkih opterećenja same težine peći, rotacije peći i temperaturnih gradijenata. Navedeni procesi uzrokuju zagrijavanje mineralnog ulja koje podmazuje klizne ležajeve.

Dakle, potrebno je proučiti te ispitati seriju industrijskih višecijevnih izmjenjivača topline, tip 1 – 2, u svrhu hlađenja mineralnog ulja rotacijske peći na izlaznom bloku peći.

1. OPĆI DIO

1.1. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline¹⁻⁵ su uređaji u kojima se toplinska energija prenosi od toplijeg ka hladnijem fluidu bez međusobnog miješanja ta dva fluida. Najčešće se upotrebljavaju za grijanje ili hlađenje radnog medija u rashladnoj i procesnoj tehnici, nuklearnim i termoenergetskim postrojenjima, pripravi potrošne tople vode, centralnom grijanju i sl. Mogu biti različitih konstrukcija i tipova izvedbe, a prema namjeni se naziva grijač, radiator, konvektor, hladnjak, isparivač, kondenzator itd. Veličina i vrsta izmjenjivača ovisi o vrsti fluida, njegovoj temperaturi, agregatnom stanju, gustoći tlakovima, kemijskoj strukturi, viskoznosti i drugim termodinamičkim svojstvima.

Prema načinu izmjene topline, izmjenjivači se dijele na:

- Izmjenjivači topline s izravnom izmjenom – dvije struje fluida međusobno se miješaju te se naposljetku dobiva struja čija je temperatura između temperatura toplije i hladnije struje. Ovakvi fluidi se nakon izmjene relativno lako mogu odvojiti.
- Izmjenjivač topline s neizravnom izmjenom – toplina se najprije izmjenjuje između toplog fluida i čvrste površine za prijenos topline, a zatim obrnuto.

Izmjenjivači topline s neizravnom izmjenom mogu biti izvedeni kao:

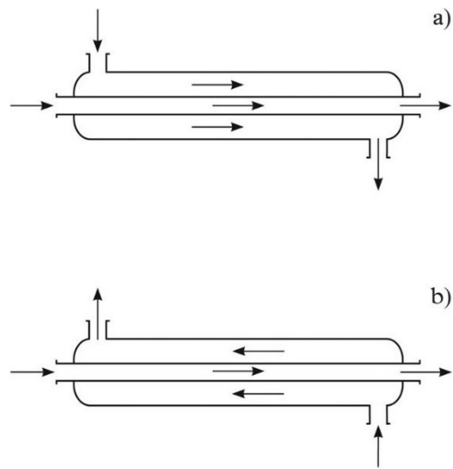
- rekuperatori
- regeneratori
- izmjenjivači s fluidiziranim slojem

U rekuperatoru izmjena topline obiju struja je istodobna, toplija struja grije pregradnu stijenku hladeći se, a hladnija struja istodobno hladi grijući se. Strujanje može biti:

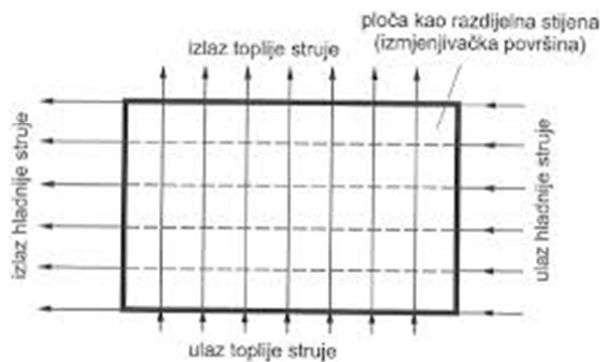
- istosmjerno (slika 1a)⁶
- protusmjerno (slika 1b)⁶
- križno (slika 2)⁵

Izlazna temperatura hladne struje protusmjernih izmjenjivača topline može biti viša od izlazne temperature tople struje, dok se izlazne temperature dviju struja križnog i istosmjernog izmjenjivača mogu tek teorijski označiti. Pregradna stijenka može biti

cijevnog ili pločastog oblika. S ciljem povećanja površine za izmjenu topline, a time i učinka izmjenjivača njezine se stijenke često orebruju.

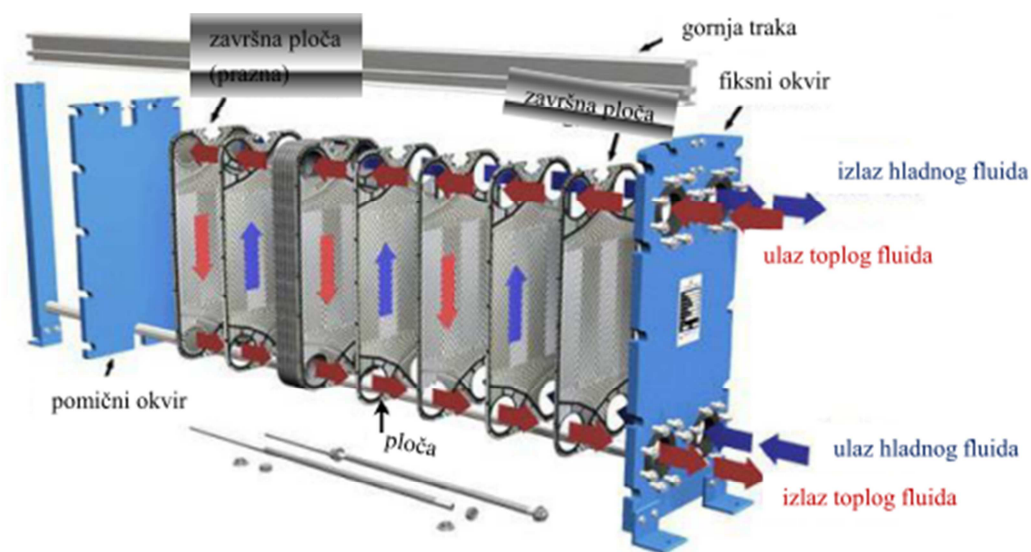


Slika 1. Istosmjerni (a) i protusmjerni (b) tip rekuperatora⁶



Slika 2. Križni tip rekuperatora⁷

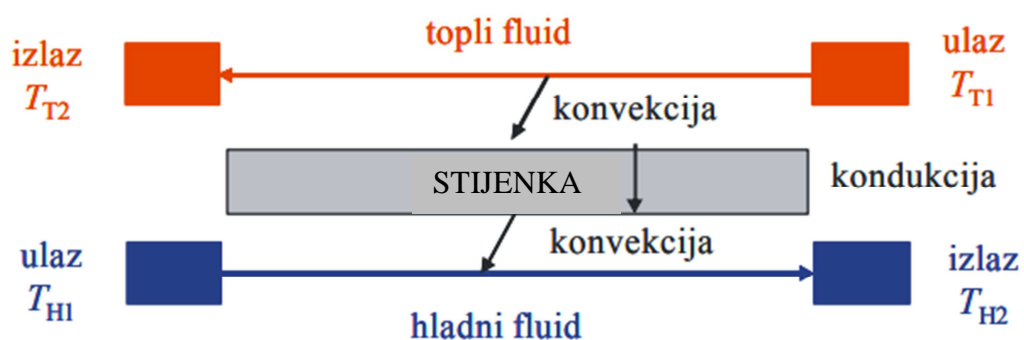
Regenerator je u većini slučajeva građen u obliku komore ispunjene materijalom velikog toplinskog kapaciteta. Struje se kroz regenerator puštaju naizmjenično. Najprije topla struja koja određeno vrijeme predaje toplinu materijalu regeneratora grijući ga, a zatim kroz iste kanale i hladna struja, koja se na njihovim površinama grije hladeći regenerator. Kada je potrebno omogućiti kontinuiranu dobavu hladne i tople struje, koristi se regenerator s parovima komora u kojima je preklop strujanja usklađen, ili rotacijski regenerator. Slika 3. prikazuje pločastu izvedbu regeneratorsa.⁸



Slika 3. Pločasta izvedba protusmjernog regeneratora⁸

Mehanizmi prijenosa topline u izmjenjivačima topline (rekuperatorima) (slika 4):

- konvekcija (prijelaz topline s toplijeg fluida na stijenku cijevi)
- kondukcija (provođenje topline kroz čvrstu stijenku)
- konvekcija (prijelaz topline sa stijenke cijevi na hladniji fluid)
- često i toplinsko zračenje ili radijacija.



Slika 4. Prijenos topline u protusmjernom rekuperatoru⁹

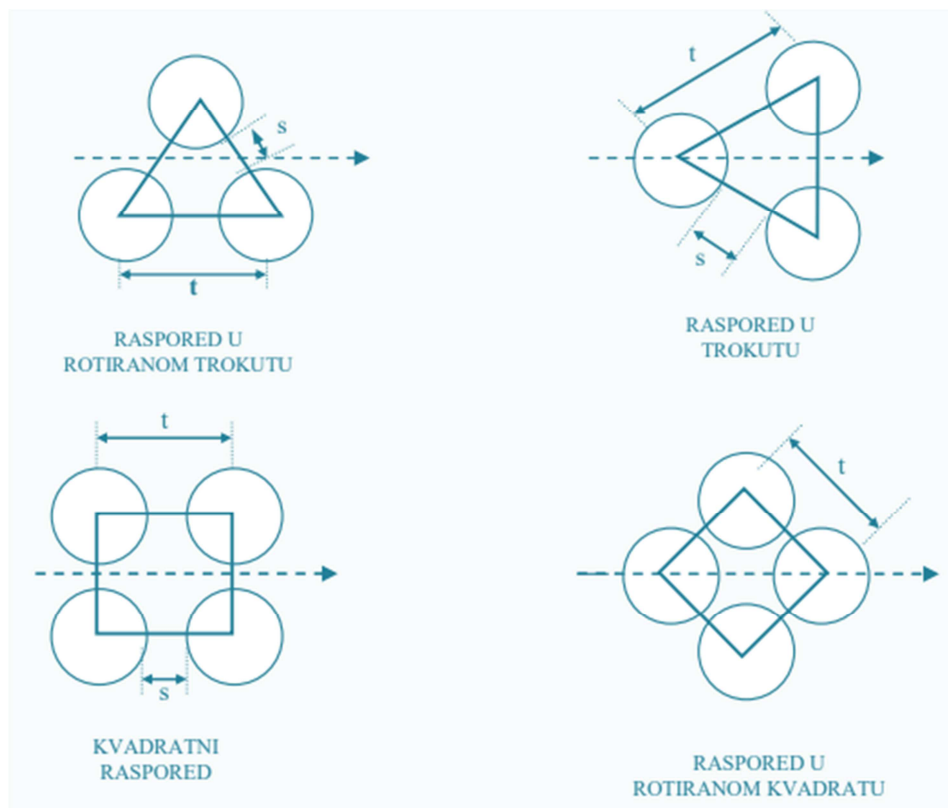
Prema stupnju kompaktnosti¹⁰ površine za izmjenu razlikuju se:

- kompaktni
- nekompaktni

Kompaktni izmjenjivači imaju veliku površinu za prijenos topline u odnosu na volumen. Kompaktnost se izražava stupnjem kompaktnosti β koji predstavlja omjer površine za prijenos topline i volumena izmjenjivača topline. Za kompaktne izmjenjivače $\beta > 700 \text{ m}^{-1}$.

1.1.1. IZMJENJIVAČI TOPLINE TIPA CIJEVNI SNOP U PLAŠTU

Izmjenjivači topline tipa cijevni snop u plaštu najznačajniji su predstavnici izmjenjivača topline. Sastoje se od cijevnog snopa, plašta, glave prednjeg i glave zadnjeg kraja izmjenjivača. Unutar cijevnog snopa izmjenjivača cijevi se ugrađuju na više načina (slika 5) u odnosu na smjer toka fluida.



Slika 5. Shematski prikaz rasporeda cijevi u snopu prema smjeru toka fluida¹⁰

Oznake na slici 5 su sljedeće:

t – korak cijevi, tj. udaljenost između osi susjednih cijevi

s – razmak između cijevi, tj. najmanja udaljenost između susjednih cijevi

Razlikuje se više tipova industrijskih višecjevnih izmjenjivača topline:

- Izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi (slika 6)¹¹
- U-cijevni izmjenjivači (slika 7)¹²
- Izmjenjivači s plutajućom glavom (slika 8)¹⁰
- Kotlasti isparivači (rebojleri) (slika 9)¹⁰



Slika 6. Izmjenjivač s učvršćenim snopom cijevi¹¹

Izmjenjivači s učvršćenim snopom cijevi posjeduju snop cijevi koji je učvršćen na oba kraja plašta. Konstrukcijom su vrlo jednostavni i najjeftiniji od svih drugih tipova višecjevnih izmjenjivača. Iako se unutrašnje stjenke cijevi mehanički lako čiste, praktički je nemoguće čistiti njihove vanjske površine, kao i unutrašnje stjenke plašta. Zbog toga ih se ne preporučuje za rad s onečišćenim i korozivnim fluidima.



Slika 7. U-cijevni izmjenjivač¹²

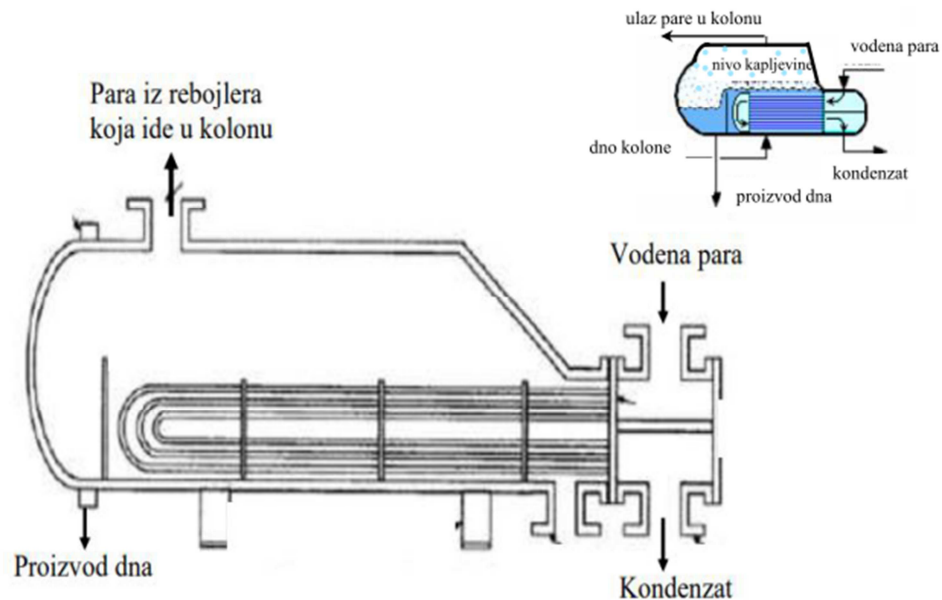
U-cijevni izmjenjivači imaju cijevni snop na jednom kraju slobodan. Na tom kraju savijanje cijevi treba biti propisno izvedeno. Snop se lako vadi iz plašta, te se jednostavno mogu očistiti njihove vanjske površine, kao i unutarnja površina plašta. Unutrašnje stjenke cijevi se teško čiste zbog savijanja cijevi u snopu i zbog njihove duljine.



Slika 8. Izmjenjivač s plutajućom glavom¹⁰

Kod izmjenjivača s plutajućom glavom snop cijevi je umjesto za stijenku plašta učvršćen za manju "glavu" koja slobodno pluta i time se izbjegavaju problemi naprezanja konstrukcijskog materijala. Iz tog razloga se ovaj tip izmjenjivača

primjenjuje u uvjetima većih razlika temperatura. Prikladni su i za rad s nečistim i agresivnim fluidima, jer je omogućeno mehaničko čišćenje unutrašnjih i vanjskih stjenki cijevi, kao i plašta.



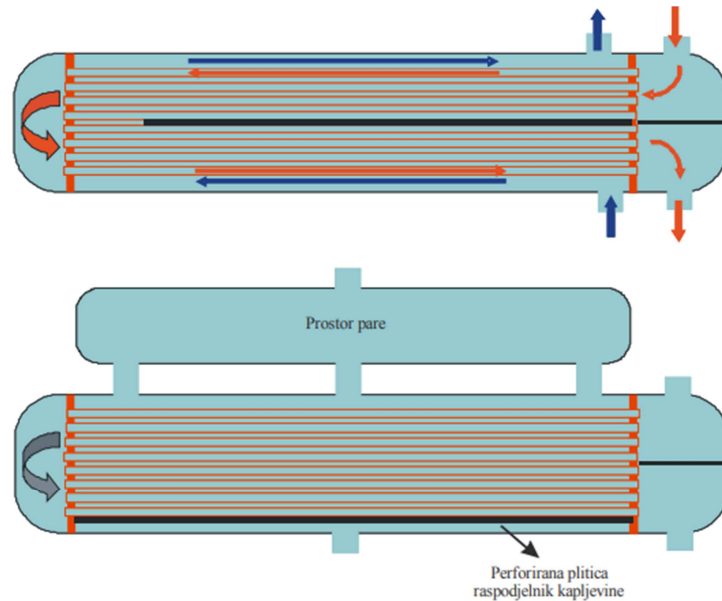
Slika 9. Kotlasti isparivač (rebojler)¹⁰

Rebojleri, odnosno kotlasti isparivači imaju plašt karakterističnog oblika unutar kojega se ugrađuje snop U-cijevi s plutajućom glavom. Najčešće se primjenjuje u sklopu rektifikacijskih kolona.

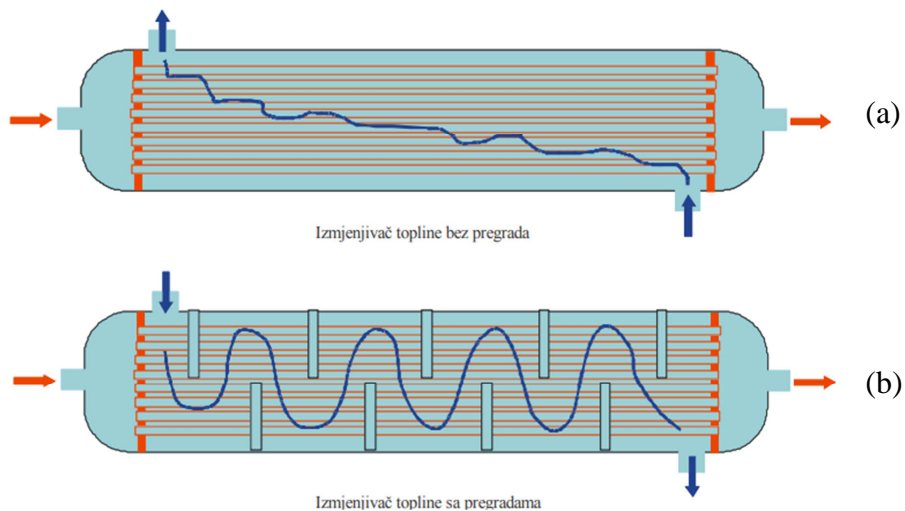
1.2. PREGRADE U PLAŠTU

Osnovna uloga pregrada u plaštu^{1,9,13} je: pridržavanje cijevi, održavanje cijevi na razmaku i usmjeravanje fluida na strani plašta. One ne ispunjavaju cijeli poprečni presjek plašta. Krivo odabran odsječak može rezultirati lošom raspodjelom fluida u plaštu, mrtvim zonama iza pregrada te većim padovima tlaka. Razmak između pregrada i odsječak pregrade biraju se tijekom dizajna izmjenjivača topline, kako bi se na taj način osigurala najveća brzina strujanja fluida te brzina prijenosa topline uz dopustivi pad tlaka.

Kod horizontalnih izmjenjivača topline, bitna je orijentacija reza pregrada. U slučaju da nema fazne promjene, rez mora biti horizontalan. Na taj način se omogućava strujanje fluida gore-dolje, čime se sprječava stvaranje slojeva, i to hladnijeg fluida na dnu, a toplijeg fluida pri vrhu. Vertikalni rez se koristi kada fluid u plaštu kondenzira, kako bi se na taj način osigurao tok kondenzata prema izlazu bez značajnog zadržavanja kapljevine pregradom. Ako se javlja vrenje, pregrade mogu biti i horizontalne i vertikalne.



Slika 10. Uzdužna pregrada⁹



Slika 11. Protusmjerni izmjenjivač topline bez pregrada (a) i istosmjerni izmjenjivač topline s pregradama (b)⁹

1.3. PRORAČUN IZMJENJIVAČA TOPLINE

1.3.1. OZNAČAVANJE TEMPERATURE STRUJE FLUIDA

Za identifikaciju pojedinih struja fluida, upotrebljava se vrijednost toplinskog kapaciteta, koji se računa pomoću sljedećeg izraza:

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

gdje je:

C – toplinski kapacitet, W/K

Q_m – maseni protok fluida, kg/s

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

Indeks 1 pripisuje se slabijoj struji fluida (manja vrijednost C), a indeks 2 jačoj struji (veća vrijednost C).

Prema gore navedenom, vrijedi omjer:

$$0 \leq \frac{C_1}{C_2} = \frac{Q_{m,1} \cdot c_{p1}}{Q_{m,2} \cdot c_{p2}} \leq 1 \quad (2)$$

Oznaka jednostrukog apostrofa (') koristi se za ulazne temperature, dok se za izlazne temperature koristi oznaka dvostrukog apostrofa ('').

1.3.2. TOPLINSKI TOK U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Toplinski tok u rekuperatoru^{2,5} funkcija je više varijabli. Može se napisati formalna matematička veza:

$$\Phi = f(K, A_o, t'_1, t''_1, t'_2, t''_2, C_1, C_2) \quad (3)$$

gdje je:

Φ – toplinski tok, W

K – koeficijent prolaza topline, W/(m² K)

A_o – ukupna površina prijenosa topline, m²

C_1 – toplinski kapacitet slabije struje, W/K

C_2 – toplinski kapacitet jače struje, W/K

t_1' – ulazna temperatura slabije struje, °C

t_1'' – izlazna temperatura slabije struje, °C

t_2' – ulazna temperatura jače struje, °C

t_2'' – izlazna temperatura jače struje, °C

Pri proračunu izmjenjivača topline koeficijent prolaza topline je vrlo važna veličina. Ova veličina sadrži sve relevantne toplinske otpore koji se javljaju na relaciji izmjene topline *fluid-stijenka-fluid*. Koeficijent prolaza topline ovisi o koeficijentima prijelaza topline s jedne i druge strane razdjelne stijenke, toplinskoj provodnosti te geometriji.

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + r_o + r_c + r_i \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_o}{A_i}} \quad (4)$$

gdje je:

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

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

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

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

U proračunu se uzima temperaturna ovisnost fizikalnih svojstava fluida koja se očitavaju iz tablica pri temperaturi, t_m koja predstavlja aritmetičku sredinu ulazne i izlazne vrijednosti temperature pojedine struje, tj.

$$t_m = \frac{t' + t''}{2} \quad (5)$$

gdje je:

t_m – aritmetička sredina promatrane struje fluida, °C

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

U obzir je također potrebno uzeti onečišćenja koja se mogu pojaviti na stijenkama cijevi. Odrediti ih je teško, a uzimaju se iskustveno ovisno o mediju koji struji kroz cijevi. Ukoliko se naslage nakon određenog vremenskog perioda pojave, mogu se uklanjati mehanički, kemijski ili ispiranjem.

Temeljni izraz za proračun bilo kojeg izmjenjivača topline je:

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (6)$$

gdje je:

Φ – toplinski tok, kJ/h

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

A – površina prijenosa topline, m²

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

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se na sljedeći način:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (7)$$

gdje je:

ΔT_1 – razlika temperatura „toplog“ i „hladnog“ fluida na jednoj strani izmjenjivača, gdje se indeks 1 odnosi na veću temperaturnu razliku.

ΔT_2 – razlika temperatura „toplog“ i „hladnog“ fluida na drugoj strani izmjenjivača, gdje se indeks 2 odnosi na manju temperaturnu razliku.

Srednja logaritamska razlika temperature izračunata na ovaj način vrijedi za izmjenjivače topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i kroz cijevi. Obzirom da se izmjenjivači najčešće konstruiraju tako da ima više prolaza kroz plašt i/ili cijevi, tada može doći do križanja temperatura, tj. u jednom dijelu cijevi i plašta „hladni“ fluid ima višu temperaturu od „toplog“ fluida, stoga je potrebno izvršiti korekciju srednje logaritamske razlike temperature, uzimajući u obzir faktor F .

Faktor F može se odrediti koristeći odgovarajuće dijagrame ovisnosti $F = f(P,R)$ ili računskim putem.

Množenjem faktora F s izračunatom vrijednošću ΔT_m iz jednadžbe (7) dobiva se korigirana srednja vrijednost, $\Delta T_{m, kor}$.

$$\Delta T_{m, kor} = \Delta T_m \cdot F \quad (8)$$

Proračun faktora F odvija se preko sljedećih korelacija:

$$F = \left[\frac{(R^2 + 1)^{1/2}}{R - 1} \right] \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - P_n}{1 - R \cdot P_n} \right)}{\ln \left[\frac{\left(\frac{2}{P_n} \right) - 1 - R + (R^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{P_n} \right) - 1 - R - (R^2 + 1)^{1/2}} \right]} \quad (9)$$

gdje je:

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1} \right)^{1/n}} \quad (10)$$

U prethodnoj jednadžbi (10) n predstavlja broj prolaza fluida kroz plašt

Parametar P jednak je toplinskoj efikasnosti hladnog fluida:

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} \quad (11)$$

Parametar R jednak je omjeru kapacitivnih brzina:

$$\frac{C_H}{C_T} = \frac{(T_{T1} - T_{T2})}{(T_{H2} - T_{H1})} \quad (12)$$

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

Korekcijski faktor² u pravilu ne bi smio biti manji od 0,75. U slučaju da se to dogodi odnosno da se dobije faktor korekcije manji od 0,75 potrebno je pokušati s više prolaza fluida kroz plašt dok se ne dobije zadovoljavajuća vrijednost korekcijskog faktora.

1.3.2. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE NA STIJENKAMA CIJEVI

Za koeficijent prijelaza topline^{2,5}, u slučaju kada nema promjene faza, za laminarno područje strujanja ($Re < 2300$) koristi se Sieder-Tateova jednačba:

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

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

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

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

gdje je:

Nu – Nusseltova značajka

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

d_i – unutarnji promjer cijevi, m

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

Pe – Pecletova značajka

Re – Reynoldsova značajka

Pr – Prandtlova značajka

L – duljina cijevi, m

c_p – specifični toplinski kapacitet fluida pri $p = \text{konst.}$, kJ/(kg K)

μ – viskoznost fluida, Pa s

μ_s – viskoznost fluida pri temperaturi stijenke, Pa s

ω – brzina fluida u cijevi, m/s

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

ρ – gustoća fluida u cijevi kg/m³

Pored laminarnog strujanja postoje još i turbulentno strujanje te prijelazno područje strujanja.

Za ova dva načina strujanja vrijede sljedeći izrazi:

$$Nu = \frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 0,027 \cdot (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (18)$$

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

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

Hausenova jednađžba (19) vrijedi za prijelazno područje strujanja u cijevima ($2300 < Re < 10\,000$)

1.3.3. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU

Iz slike 5 je vidljivo da raspored cijevi u cijevnom snopu izmjenjivača može biti u trokutu, zatim kvadratni raspored ili pak rotirani kvadratni raspored odnosno raspored u rotiranom trokutu.

Ekvivalentni promjer cijevi, d_e ; za kvadratni i rotirani kvadratni raspored cijevi u cijevnom snopu računa se koristeći sljedeći izraz:

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

Za raspored cijevi u trokutu izraz za d_e glasi:

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

gdje t predstavlja korak cijevi, tj. to je stranica trokuta ili kvadrata, koju čine tri ili četiri susjedne cijevi.

Masena brzina fluida u plaštu, q_m računa se na sljedeći način:

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

gdje je:

Q_m – maseni protok fluida, kg/h

A_s – slobodna površina presjeka cijevnog snopa, m^2

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa računa se pomoću izraza:

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

gdje je:

d_{pl} – unutarnji promjer plašta, m

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

t – korak cijevi, m

d_o – vanjski promjer cijevi, m

Za laminarno strujanje fluida preko snopa cijevi u šahovskom rasporedu koeficijent prijenosa topline⁴ računa se prema izrazu:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_i}{\lambda} = 0,56 \cdot (Re)^{0,50} \cdot (Pr)^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \quad (24)$$

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

Shodno tome, srednja vrijednost koeficijenta prijelaza topline⁴ za snop od N redova u pravcu strujanja je:

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

gdje je:

N_1 – broj cijevi u prvom redu

N_2 – broj cijevi u drugom redu

N – ukupan broj cijevi

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Na slici 12. je prikazana shema rotacijske peći s prikazom temperature, protoka rashladne vode te oznakama broja kućišta na izlaznom bloku rotacijske peći. Na slici je vidljivo kako su položaji izmjenjivača topline (IT) postavljeni na sjevernom i južnom kućištu izlaznog bloka – s unutarnje i vanjske strane kućišta u smjeru istok. Dakle, izlazni blok sadrži četiri izmjenjivača (2 unutarnja, 2 vanjska) u smjeru istok.

Potrebno je ispitati seriju industrijskih izmjenjivača topline, tip 1-2, s oznakama prikazanim u tablici 1.

Tablica 1. Oznake industrijskih izmjenjivača topline, tip 1-2

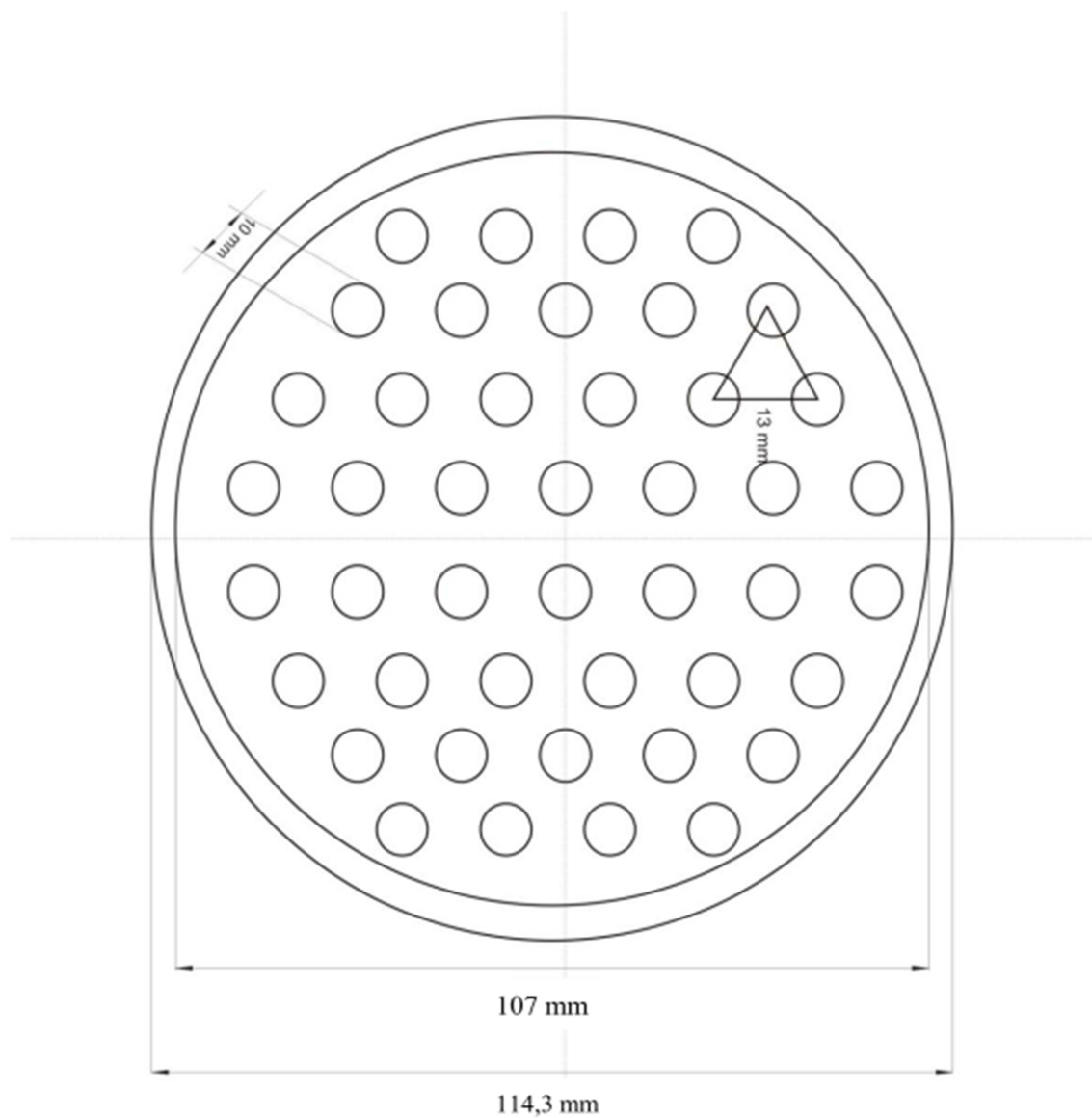
Tip izmjenjivača	Duljina cijevi u cijevnom snopu, $L/$ mm	Broj pregrada u plaštu, N_{pr}
MIT06	540	9
MIT07	610	9
MIT08	690	9
MIT09	770	9
MIT10	840	9

U tablici 2 prikazane su karakteristične veličine hladnog i toplog fluida na izlaznom bloku rotacijske peći.

Tablica 2. Karakteristične veličine hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida na izlaznom bloku rotacijske peći za proizvodnju Portland cementa

Pozicija mjerenja				Izmjerene vrijednosti				
Blok peći	Položaj izmjenjivača	Kućište (br.)	Vodena strana	Temp. ulja na ulazu / °C	Protok ulja / $m^3 h^{-1}$	Protok vode / $m^3 h^{-1}$	Temp. vode na izlazu / °C	Razlika u temp. vode / K
Izlazni blok peći	Istočna strana	sjeverno (3)	unutarnja	44	0,90	1,7	26,2	1,1
			vanjska		0,80		26,8	1,7
		južno (4)	unutarnja	42	0,80	1,7	26,4	1,3
			vanjska		0,90		26,8	1,7

Na slici 12 prikazana je shema cijevnog snopa u plaštu.



Slika 12. Cijevni snop u plaštu

Poznavajući vanjski promjer cijevi, d_o te duljina cijevi u cijevnom snopu, L , može se odrediti raspoloživa površina, A_o , za prijenos topline za sve ispitivane tipove izmjenjivača. Rezultati su prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Raspoloživa površina, A_o , za prijenos topline

Tip izmjenjivača	Duljina cijevi u cijevnom snopu, $L/$ mm	$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot N_c$ /m ²
MIT 06	540	0,746
MIT 07	610	0,843
MIT 08	690	0,953
MIT 09	770	1,064
MIT 10	840	1,160

Vanjski promjer cijevi, $d_o = 10$ mm

Debljina cijevi, $\delta = 1$ mm

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

Poprečna površina presjeka cijevi, a_c : u svim MITovima ista

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

Ukupna poprečna površina presjeka cijevi, A_c : u svim MITovima ista

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

Broj cijevi u prvom redu, $N_1 = 7$

Broj cijevi u drugom redu, $N_2 = 6$

Vanjski promjer plašta 114,3 x 3,6 mm

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

U MITovima je isti broj pregrada u plaštu

MIT06 – MIT109 pregrada

Ekvivalentni promjer cijevi, d_e , izračunat prema izrazu (21) iznosi:

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

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

Slobodna površina presjeka cijevnog snopa, A_s , se mijenja u MITovima jer se mijenja razmak između pregrada, l_{pr} , ovisno o dužini cijevi L . Koristeći izraz (23) slijedi:

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

Razmak između pregrada, l_{pr} , računa se pomoću izraza:

$$l_{pr} = \frac{L}{N_{pr}} \quad (26)$$

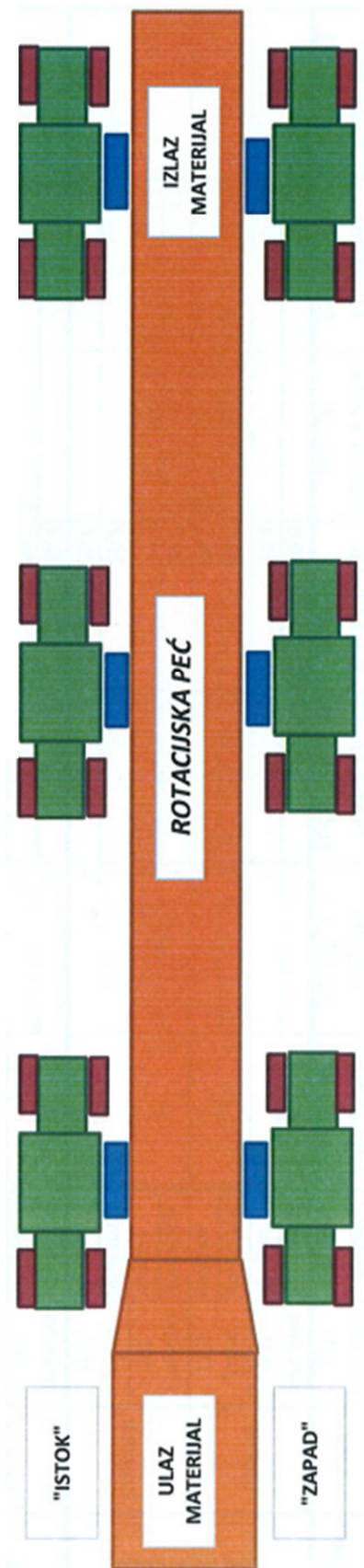
Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Razmak između pregrada, l_{pr} i slobodna površina presjeka cijevnog snopa, A_s

Tip izmjenjivača	l_{pr} / mm	A_s / mm^2
MIT 06	60,00	1482
MIT 07	67,78	1674
MIT 08	76,67	1745
MIT 09	85,56	2113
MIT 10	93,34	2305

**IZLAZNI
BLOK**

Broj kućišta 4
 Protok vode (m³/h) 1,7
 Temperatura ležaja (°C) 42



Slika 13. Prikaz temperature, protoka rashladne vode i broj kućišta rotacijske peći na izlaznom bloku

2.1. IZLAZNI BLOK PEĆI – ISTOČNA STRANA

2.1.1. UNUTARNJA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (3)

2.1.1.1 IDENTIFIKACIJA STRUJA FLUIDA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (3)

Identifikacija pojedine struje fluida vrši se prema kriteriju vrijednosti toplinskog kapaciteta (vodene vrijednosti), C .

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{V,U} = 0,90 \text{ m}^3/\text{h}$ na sjevernom (3) kućištu, na unutarnjoj strani.

Ulazna temperatura ulja $t'_U = 44 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

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

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{V,V} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁴ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 25,65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Obzirom da se temperatura $25,65 \text{ }^\circ\text{C}$ ne nalazi u tablicama¹⁴, potrebno je napraviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i $40 \text{ }^\circ\text{C}$ koje se nalaze u tablicama.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 5.

Tablica 5. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi $25,65 \text{ }^\circ\text{C}$

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_{m,V} / \text{ }^\circ\text{C}$
	25,65
$\rho_V / \text{ kg/m}^3$	996,3
$c_{p,V} / \text{ kJ/(kg K)}$	4,181
$\lambda_V / \text{ W/(m K)}$	0,6062
$\nu_V / \text{ m}^2/\text{s}$	$0,910 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / \text{ (N s)/m}^2$	$906,6 \cdot 10^{-6}$

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi 44 °C, prikazana su u tablici 6.

Tablica 6. Fizikalna svojstva ulja pri ulaznoj temperaturi 44 °C

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / ^\circ\text{C}$
	44 °C
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	855,4
$c_{p,U} / \text{kJ}/(\text{kg K})$	1,9508
$\lambda_U / \text{W}/(\text{m K})$	0,1428
$v_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,33 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6272 \cdot 10^{-6}$

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

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

Toplinski kapacitet vode (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT)

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

$$C_V = \frac{1,7 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$C_V = 1,967 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} = 1967 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT)

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

$$C_U = \frac{0,9 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 855,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9508 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$C_U = 0,4172 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} = 417,2 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = 0,214 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = 0,470 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

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

Shodno tome oznake su sljedeće:

$$C_U = C_1$$

$$C_V = C_2$$

t_1' – ulazna temperatura ulja

t_1'' – izlazna temperatura ulja

t_2' – ulazna temperatura rashladne vode

t_2'' – izlazna temperatura rashladne vode

2.1.1.2. IZLAZNA TEMPERATURA ULJA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (3)

Izmjenjeni toplinski tok (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT) odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

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

$$\phi_V = \dot{Q}_V = 1967 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,1 \text{ K} = 2164 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 2164 \text{ W}$$

$$\phi_U = \dot{Q}_U = 417,2 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (44 - t_1'') = 2164 \text{ W}$$

$$t_1'' = 38,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT) je 38,8 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 44 - 38,8 = 5,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu ulja koja se određuje prema izrazu 5.

Srednja temperatura ulja (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{44 + 38,8}{2} = 41,4 \text{ °C}$$

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

Tablica 7. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja 41,4 °C (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{°C}$
	41,4 °C
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	857,1
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,940
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,1429
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,72 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6617 \cdot 10^{-6}$

2.1.1.3. KORIGIRANA SREDNJA LOGARITAMSKA TEMPERATURA NA UNUTARNJOJ STRANI – SJEVER – KUĆIŠTE (3)

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,U} = 0,9 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t'_1 - t_2'' = 44 - 26,2 = 17,8 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t'_2 = 38,8 - 25,1 = 13,7 \text{ K}$$

Srednja logaritamska razlika temperature:

$$\Delta T_m = \frac{17,8 - 13,7}{\ln\left(\frac{17,8}{13,7}\right)} = 15,6 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{l,2} - T_{h,1}} = \frac{t'_1 - t_1''}{t_2'' - t'_2} = \frac{44 - 38,8}{26,2 - 25,1} = 4,72$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t'_1 - t_2'} = \frac{26,2 - 25,1}{44 - 25,1} = 0,06$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,72 \cdot 0,06 - 1}{0,06 - 1}\right)^{1/1}}{4,72 - \left(\frac{4,72 \cdot 0,06 - 1}{0,06 - 1}\right)^{1/1}} = 0,06$$

$$F = \left[\frac{(4,72^2 + 1)^{1/2}}{4,72 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,06}{1 - 4,72 \cdot 0,06}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,06}\right) - 1 - 4,72 + (4,72^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,06}\right) - 1 - 4,72 - (4,72^2 + 1)^{1/2}}\right]} = 0,996$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m, \text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 15,6 \cdot 0,996 = 15,54 \text{ K}$$

2.1.1.4. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVI – (IZLAZNI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (3) – UNUTARNJI IT)

Maseni protok rashladne vode (izlazni blok peći, istočna strana, kućište – sjeverno (3) – unutarnji IT)

$$Q_{m, V} = Q_{v, V} \cdot \rho_V = \frac{1,7 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,470 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Masena brzina rashladne vode u cijevi

$$q_{m, V} = \frac{Q_{m, V} \cdot N_{\text{prolaz}}}{A_c} = \frac{0,470 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2}{0,00221 \text{ m}^2} = 425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}$$

Brzina vode u cijevi:

$$\omega_c = \frac{q_{m, V}}{\rho_V} = \frac{425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}}{996,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,43 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{\omega_c \cdot d_i \cdot \rho_V}{\mu_V} = \frac{q_{m, V} \cdot d_i}{\mu_V} = \frac{425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{906,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 3757$$

$Re > Re_{kr}$

$3757 > 2300$ prijelazno područje strujanja $2300 < Re < 10\ 000$, pa se koristi Hausenova jednačba.

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

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

Za svaki od raspoloživih MITova računa se α_i .

MIT06

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{906,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 4181 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}}{0,606 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 6,25$$

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3757^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{540}\right)^{2/3}\right]}{3757} \cdot 6,25^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 2868 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

MIT07

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3757^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{610}\right)^{2/3}\right]}{3757} \cdot 6,25^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 2855 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

MIT08

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3757^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{690}\right)^{2/3}\right]}{3757} \cdot 6,25^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 2843 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

MIT09

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3757^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{770}\right)^{2/3}\right]}{3757} \cdot 6,25^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 2833 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

MIT10

$$\frac{\alpha_i}{4181 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 425,8 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}} = \frac{0,166 \cdot (3757^{2/3} - 125) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{840}\right)^{2/3}\right]}{3757} \cdot 6,25^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_i = 2826 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

2.1.1.5. KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU (IZLAZNI BLOK PEĆI, ISTOČNA STRANA, KUĆIŠTE – SJEVERNO (3) UNUTARNJI IT)

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

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{0,9 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 857,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1482 \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 144,6 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{144,6 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \cdot 0,008503 \text{m}}{6617 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 186$$

$Re < Re_{kr}$

$186 < 2300$ laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6617 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1940 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 89,8$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{m}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,56 \cdot (186)^{0,50} \cdot (89,8)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 648,2 \frac{W}{m^2K}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 648,2 \cdot 7 + 0,7 \cdot 648,2 \cdot 6 + 648,2 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 580,4 \frac{W}{m^2K}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{580,4} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2868} \cdot \frac{10}{8}} = 462,6 \frac{W}{m^2K}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{2164W}{462,6 \frac{W}{m^2K} \cdot 15,54K} = 0,301 m^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za **MIT06**:

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

Masena brzina ulja u plaštu za **MIT07**:

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{0,9}{3600} \frac{m^3}{s} \cdot 857,1 \frac{kg}{m^3}}{1674 \cdot 10^{-6} m^2} = 128,3 \frac{kg}{sm^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{128,3 \frac{kg}{sm^2} \cdot 0,008503m}{6617 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2}} = 164,9$$

$$Re < Re_{kr}$$

164,9 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6617 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1940 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 89,8$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503\text{m}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,56 \cdot (164,9)^{0,50} \cdot (89,8)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 610,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o,\text{sr}} = \frac{0,6 \cdot 610,2 \cdot 7 + 0,7 \cdot 610,2 \cdot 6 + 610,2 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,\text{sr}} = 546,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{546,4} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2855} \cdot \frac{10}{8}} = 440,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{\text{m,kor}}} = \frac{2164\text{W}}{440,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 15,54\text{K}} = 0,317 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za **MIT07**:

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

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

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{0,9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1893 \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 113,3 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$\text{Re} = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{113,3 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \cdot 0,008503 \text{m}}{6617 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 145,7$$

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

$145,7 < 2300$ laminarno strujanje u plaštu

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

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6617 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1940 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 89,8$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{m}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,56 \cdot (145,7)^{0,50} \cdot (89,8)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 573,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 573,6 \cdot 7 + 0,7 \cdot 573,6 \cdot 6 + 573,6 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 513,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{513,6} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2843} \cdot \frac{10}{8}} = 418,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m, \text{kor}}} = \frac{2164 \text{ W}}{418,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 15,54 \text{ K}} = 0,333 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za **MIT08**:

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

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

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{0,9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 857,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2113 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 101,5 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$\text{Re} = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{101,5 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \cdot 0,008503 \text{ m}}{6617 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 130,5$$

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

130,5 < 2300 laminarno strujanje u plaštu

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

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6617 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \cdot 1940 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 89,8$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503 \text{ m}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,56 \cdot (130,5)^{0,50} \cdot (89,8)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 542,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o, \text{sr}} = \frac{0,6 \cdot 542,8 \cdot 7 + 0,7 \cdot 542,8 \cdot 6 + 542,8 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 486,1 \frac{W}{m^2K}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{486,1} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2833} \cdot \frac{10}{8}} = 399,8 \frac{W}{m^2K}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{2164W}{399,8 \frac{W}{m^2K} \cdot 15,54K} = 0,348 m^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za **MIT09**:

$A_o = 1,064 m^2$ zadovoljava

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

$$q_{m,U} = \frac{Q_{m,U}}{A_s} = \frac{Q_{v,U} \cdot \rho_U}{A_s} = \frac{\frac{0,9 m^3}{3600 s} \cdot 857,1 \frac{kg}{m^3}}{2305 \cdot 10^{-6} m^2} = 93,1 \frac{kg}{sm^2}$$

Reynoldsova značajka:

$$Re = \frac{q_{m,U} \cdot d_e}{\mu_U} = \frac{93,1 \frac{kg}{sm^2} \cdot 0,008503m}{6617 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2}} = 119,7$$

$Re < Re_{kr}$

$119,7 < 2300$ laminarno strujanje u plaštu

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

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{6617 \cdot 10^{-6} \frac{Ns}{m^2} \cdot 1940 \frac{J}{kgK}}{0,1429 \frac{W}{mK}} = 89,8$$

$$\frac{\alpha_o \cdot 0,008503\text{m}}{0,1429 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,56 \cdot (119,7)^{0,50} \cdot (89,8)^{0,36}$$

$$\alpha_o = 520 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Srednja vrijednost koeficijenta prijenosa topline:

$$\alpha_{o,sr} = \frac{0,6 \cdot 520 \cdot 7 + 0,7 \cdot 520 \cdot 6 + 520 \cdot [44 - (7 + 6)]}{44}$$

$$\alpha_{o,sr} = 465,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Ukupni koeficijent prijenosa topline:

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{465,6} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{386,12} + \frac{1}{2826} \cdot \frac{10}{8}} = 385,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Potrebna površina za prijenos topline:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{m,kor}} = \frac{2164\text{W}}{385,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 15,54\text{K}} = 0,361 \text{ m}^2$$

Raspoloživa površina prijenosa topline za **MIT10**:

$A_o = 1,160 \text{ m}^2$ zadovoljava

U tablici 8 prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače topline, tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT.

Tablica 8. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače topline, tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (3) – unutarnji IT

$Q_{v,v}$	1,7 m ³ /h				
ϕ_V	2164 W				
$Q_{m,v}$	0,470 kg/s				
$q_{m,v}$	425,8 kg/(sm ²)				
ω_c	0,43 m/s				
Δt_V	1,1 °C				
t_2''	26,2 °C	$t_{m,v} = 25,65$ °C			
t_2'	25,1 °C				
$C_V = C_2$	1967 W/K				
$Q_{v,U}$	0,9 m ³ /h				
$Q_{m,U}$	0,214 kg/s				
$C_U = C_1$	417,8 W/K				
t_1'	44 °C	$t_{m,U} = 41,4$ °C			
t_1''	38,8 °C				
Δt_U	5,2 °C				
ΔT_m	15,6 °C				
F	0,996				
$\Delta T_{m,kor}$	15,54 °C				
	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	3757 (prijelazno područje)				
α_i W/(m ² K)	2868	2855	2843	2833	2826
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	144,8	128,3	113,3	101,5	93,1
Re (u plaštu)	186	164,9	145,7	130,5	119,7
α_o W/(m ² K)	648,2	610,2	573,6	542,8	520
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	580,4	546,4	513,6	486,1	465,6
A m ²	0,301	0,317	0,333	0,348	0,361
A_o m ²	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

2.1.2. VANJSKA STRANA – SJEVER – KUĆIŠTE (3)

Koristeći prethodno navedene jednadžbe i izvode u poglavlju 2.1.1. izračunate su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje *shell and tube* izmjenjivače, tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (3), vanjski IT.

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{V,U} = 0,80 \text{ m}^3/\text{h}$ na sjevernom (3) kućištu, na vanjskoj strani.

Ulazna temperature ulja $t'_U = 44 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

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

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{V,V} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁴ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 25,95 \text{ }^\circ\text{C}$.

Obzirom da se temperatura 25,95 °C ne nalazi u tablicama¹⁴, potrebno je izvršiti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 °C koje se nalaze u tablicama.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi 25,95 °C

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_{m,V} / \text{ }^\circ\text{C}$
	25,95
$\rho_V / \text{ kg/m}^3$	996,2
$c_{p,V} / \text{ kJ/(kg K)}$	4,181
$\lambda_V / \text{ W/(m K)}$	0,6066
$\nu_V / \text{ m}^2/\text{s}$	$0,905 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / \text{ (N s)/m}^2$	$901,5 \cdot 10^{-6}$

Fizikalna svojstva ulja pri temperaturi 44 °C, prikazana su u tablici 6.

Toplinski kapacitet vode (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$
$$C_2 = \frac{1,7 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$
$$C_2 = 1,967 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} = 1967 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Vidljivo je kako toplinski kapacitet vode (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT) ostaje nepromijenjen.

Toplinski kapacitet ulja (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$
$$C_1 = \frac{0,8 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 855,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9508 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$
$$C_1 = 0,3708 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} = 370,8 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT) se smanjio jer je smanjen volumni protok ulja u plaštu vanjskog izmjenjivača.

Maseni protok ulja (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = 0,190 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = 0,470 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode se ne mijenja.

Izmjenjeni toplinski tok (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT) odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

$$\phi_V = \dot{Q}_V = C_2 \cdot (t'_2 - t''_2) = C_2 \cdot \Delta t_V$$
$$\phi_V = \dot{Q}_V = 1967 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 3344 \text{ W}$$
$$\phi_U = \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t'_1 - t''_1) = 3344 \text{ W}$$
$$\phi_U = \dot{Q}_U = 370,8 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (44 - t''_1) = 3344 \text{ W}$$

$$t_1'' = 34,98 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura ulja na izlazu (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT) je 34,98 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 44 - 34,98 = 9,02 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu ulja (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{44 + 34,98}{2} = 39,49 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

Tablica 10. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja 39,49 °C (izlazni blok istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$
	39,49 °C
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	858,3
$c_{p,U} / \text{kJ/(kg K)}$	1,932
$\lambda_U / \text{W/(m K)}$	0,1430
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$8,11 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / \text{(N s)/m}^2$	$6961 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,U} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 44 - 26,8 = 17,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 34,98 - 25,1 = 9,88 \text{ K}$$

Srednja logaritamska razlika temperature:

$$\Delta T_m = \frac{17,2 - 9,88}{\ln\left(\frac{17,2}{9,88}\right)} = 13,2 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{l,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{44 - 34,9}{26,8 - 25,1} = 5,3$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,8 - 25,1}{44 - 25,1} = 0,09$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5,3 \cdot 0,09 - 1}{0,09 - 1}\right)^{1/1}}{5,3 - \left(\frac{5,3 \cdot 0,09 - 1}{0,09 - 1}\right)^{1/1}} = 0,09$$

$$F = \left[\frac{(5,3^2 + 1)^{1/2}}{5,3 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,09}{1 - 5,3 \cdot 0,09}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,09}\right) - 1 - 5,3 + (5,3^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,09}\right) - 1 - 5,3 - (5,3^2 + 1)^{1/2}}\right]} = 0,985$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m,kor} = \Delta T_m \cdot F = 13,2 \cdot 0,985 = 13,002 \text{ K}$$

U tablici 11. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače topline, tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT.

Tablica 11. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače topline, tip 1-2, istočna strana, kućište sjeverno (3) – vanjski IT

$Q_{v,v}$	1,7 m ³ /h				
ϕ_V	3344 W				
$Q_{m,v}$	0,470 kg/s				
$q_{m,v}$	425,8 kg/(sm ²)				
ω_c	0,43 m/s				
Δt_V	1,7 °C				
t_2''	26,8 °C	$t_{m,v} = 25,65$ °C			
t_2'	25,1 °C				
$C_V = C_2$	1967 W/K				
$Q_{v,U}$	0,8 m ³ /h				
$Q_{m,U}$	0,190 kg/s				
$C_U = C_1$	370,8 W/K				
t_1'	44 °C	$t_{m,U} = 39,49$ °C			
t_1''	34,98 °C				
Δt_U	9,02 °C				
ΔT_m	13,2 °C				
F	0,985				
$\Delta T_{m,kor}$	13,002 °C				
	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	3778 (prijelazno područje)				
α_i W/(m ² K)	2883	2870	2858	2848	2841
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	128,9	114,2	101	90,4	82,9
Re (u plaštu)	157,4	139,5	123,2	110,4	101,3
α_o W/(m ² K)	606,6	571	536,8	508	486,5
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	543,2	511,3	480,6	454,9	435,7
A m ²	0,585	0,615	0,648	0,679	0,704
A_o m ²	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

2.1.3. UNUTARNJA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (4)

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{v,U} = 0,80 \text{ m}^3/\text{h}$ na južnom (4) kućištu, na unutarnjoj strani.

Ulazna temperature ulja $t'_{U} = 42 \text{ °C}$

Hladniji fluid je voda, izlazne temperature $t''_{V} = 26,4 \text{ °C}$, a razlika u temperature vode iznosi 1,3 K.

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

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{v,V} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁴ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,V} = 25,75 \text{ °C}$.

Obzirom da se temperatura 25,75 °C ne nalazi u tablicama¹⁴, potrebno je napraviti interpolaciju unutar vrijednosti 20 i 40 °C koje se nalaze u tablicama.

Nakon izvršene interpolacije dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 12.

Tablica 12. Fizikalna svojstva vode pri srednjoj temperaturi 25,75 °C

Fizikalna svojstva rashladne vode	$t_{m,V} / \text{°C}$
	25,75
$\rho_V / \text{kg/m}^3$	996,275
$c_{p,V} / \text{kJ/(kg K)}$	4,1808
$\lambda_V / \text{W/(m K)}$	0,6063
$\nu_V / \text{m}^2/\text{s}$	$0,9088 \cdot 10^{-6}$
$\mu_V / (\text{N s})/\text{m}^2$	$905,4 \cdot 10^{-6}$

Fizikalna svojstva ulja pri ulaznoj temperaturi 42 °C, prikazana su u tablici 13.

Tablica 13. Fizikalna svojstva ulja pri ulaznoj temperaturi 42 °C

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / ^\circ\text{C}$
	42 °C
$\rho_U / \text{kg/m}^3$	856,7
$c_{p,U} / \text{kJ}/(\text{kg K})$	1,9424
$\lambda_U / \text{W}/(\text{m K})$	0,1429
$\nu_U / \text{m}^2/\text{s}$	$7,631 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / (\text{N s})/\text{m}^2$	$6537 \cdot 10^{-6}$

Toplinski kapacitet vode (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT)

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

$$C_2 = \frac{1,7 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,275 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,1808 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$C_2 = 1,967 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} = 1967 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Vidljivo je kako toplinski kapacitet vode (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT) ostaje nepromijenjen.

Toplinski kapacitet ulja (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT)

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

$$C_1 = \frac{0,8 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 856,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9424 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$C_1 = 0,369 \frac{\text{J}}{\text{sK}} = 369 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = 0,190 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = 0,470 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmjenjeni toplinski tok (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT) odnosno izlazna temperatura ulja na unutarnjoj strani će biti:

$$\begin{aligned}\phi_V &= \dot{Q}_V = C_2 \cdot (t'_2 - t''_2) = C_2 \cdot \Delta t_V \\ \phi_V &= \dot{Q}_V = 1967 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,3 \text{ K} = 2557 \text{ W} \\ \phi_U &= \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t'_1 - t''_1) = 2557 \text{ W} \\ \phi_U &= \dot{Q}_U = 369 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (44 - t''_1) = 3344 \text{ W} \\ t''_1 &= 35,1 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Temperatura ulja na izlazu (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT) je 35,1 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t'_1 - t''_1 = 42 - 35,1 = 6,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu ulja (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{42 + 35,1}{2} = 38,55 \text{ }^\circ\text{C}$$

Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva ulja, nakon izvršene interpolacije, prikazana su u tablici 14.

Tablica 14. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja 38,55 °C (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$
	38,55 °C
$\rho_U / \text{ kg/m}^3$	858,94
$c_{p,U} / \text{ kJ/(kg K)}$	1,928
$\lambda_U / \text{ W/(m K)}$	0,1431
$\nu_U / \text{ m}^2/\text{s}$	$8,44 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / \text{ (N s)/m}^2$	$7249,1 \cdot 10^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$), za unutarnji IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 42 - 26,4 = 15,6 \text{ K}$$

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

Srednja logaritamska razlika temperature:

$$\Delta T_m = \frac{15,6 - 10}{\ln\left(\frac{15,6}{10}\right)} = 12,6 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{l,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{42 - 35,1}{26,4 - 25,1} = 5,3$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,4 - 25,1}{42 - 25,1} = 0,077$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{5,3 \cdot 0,077 - 1}{0,077 - 1}\right)^{1/1}}{5,3 - \left(\frac{5,3 \cdot 0,077 - 1}{0,077 - 1}\right)^{1/1}} = 0,077$$

$$F = \left[\frac{(5,3^2 + 1)^{1/2}}{5,3 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,077}{1 - 5,3 \cdot 0,077}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,077}\right) - 1 - 5,3 + (5,3^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{2}{0,077}\right) - 1 - 5,3 - (5,3^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \right]} = 0,990$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m,\text{kor}} = \Delta T_m \cdot F = 12,6 \cdot 0,990 = 12,474 \text{ K}$$

U tablici 15. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače topline, tip 1-2, istočna strana, kućište jug (4) – unutarnji IT

Tablica 15. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače topline, tip 1-2., istočna strana, kućište jug (4), unutarnji IT

$Q_{v,V}$	1,7 m ³ /h				
ϕ_V	2557 W				
$Q_{m,V}$	0,470 kg/s				
$q_{m,V}$	425,3 kg/(sm ²)				
ω_c	0,427 m/s				
Δt_V	1,3 °C				
t_2''	26,4 °C	$t_{m,V} = 25,75$ °C			
t_2'	25,1 °C				
$C_V = C_2$	1967 W/K				
$Q_{v,U}$	0,8 m ³ /h				
$Q_{m,U}$	0,190 kg/s				
$C_U = C_1$	369 W/K				
t_1'	42 °C	$t_{m,U} = 38,55$ °C			
t_1''	35,1 °C				
Δt_U	6,9 °C				
ΔT_m	12,6 °C				
F	0,990				
$\Delta T_{m,kor}$	12,474 °C				
	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	3758 (prijelazno područje)				
α_i W/(m ² K)	2868	2855	2843	2833	2826
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	128,8	114	100,8	90,3	82,8
Re (u plaštu)	151	133,7	118,3	105,9	97,1
α_o W/(m ² K)	602,7	567,1	533,3	504,8	483,3
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	539,7	507,8	477,6	452	432,8
A m ²	0,469	0,619	0,652	0,683	0,708
A_o m ²	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

2.1.4. VANJSKA STRANA – JUG – KUĆIŠTE (4)

Toplija struja (fluid) je ulje koje dotiče volumnim protokom $Q_{v,U} = 0,90 \text{ m}^3/\text{h}$ na južnom (4) kućištu, na vanjskoj strani.

Ulazna temperature ulja $t'_U = 42 \text{ }^\circ\text{C}$

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

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

Rashladna voda dotiče volumnim protokom $Q_{v,V} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

Fizikalna svojstva vode¹⁴ uzimaju se za srednju temperaturu vode $t_{m,v} = 25,95 \text{ }^\circ\text{C}$ i prikazana su u tablici 9.

Fizikalna svojstva ulja pri ulaznoj temperaturi $42 \text{ }^\circ\text{C}$, prikazana su u tablici 13.

Toplinski kapacitet vode (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT)

$$C_V = C_2 = Q_{v,V} \cdot \rho_V \cdot c_{p,V}$$
$$C_2 = \frac{1,7 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 996,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$
$$C_2 = 1,966 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} = 1966 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Toplinski kapacitet ulja (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT)

$$C_U = C_1 = Q_{v,U} \cdot \rho_U \cdot c_{p,U}$$
$$C_1 = \frac{0,9 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 856,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,9424 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$
$$C_1 = 0,416 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} = 416 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Maseni protok ulja (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT)

$$Q_{m,U} = Q_{v,U} \cdot \rho_U = 0,214 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Maseni protok vode (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT)

$$Q_{m,V} = Q_{v,V} \cdot \rho_V = 0,470 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Izmjenjeni toplinski tok (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT) odnosno izlazna temperatura ulja na vanjskoj strani će biti:

$$\begin{aligned}\phi_V &= \dot{Q}_V = C_2 \cdot (t_2' - t_2'') = C_2 \cdot \Delta t_V \\ \phi_V &= \dot{Q}_V = 1966 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot 1,7 \text{ K} = 3342,2 \text{ W} \\ \phi_U &= \dot{Q}_U = C_1 \cdot (t_1' - t_1'') = 3342,2 \text{ W} \\ \phi_U &= \dot{Q}_U = 416 \frac{\text{W}}{\text{K}} \cdot (44 - t_1'') = 3342,2 \text{ W} \\ t_1'' &= 33,9 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Temperatura ulja na izlazu (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT) je 33,9 °C.

Promjena temperature ulja:

$$\Delta t_U = t_1' - t_1'' = 42 - 33,9 = 8,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fizikalna svojstva ulja, u daljnjem proračunu, uzimaju se za srednju temperaturu ulja (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT):

$$t_{m,U} = \frac{t' + t''}{2} = \frac{42 + 33,9}{2} = 37,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

Dobivene vrijednosti za fizikalna svojstva ulja, nakon izvršene interpolacije, prikazana su u tablici 16.

Tablica 16. Fizikalna svojstva ulja pri srednjoj temperaturi ulja 39,49 °C (izlazni blok istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT)

Fizikalna svojstva ulja	$t_{m,U} / \text{ }^\circ\text{C}$
	37,95 °C
$\rho_U / \text{ kg/m}^3$	859,3
$c_{p,U} / \text{ kJ/(kg K)}$	1,925
$\lambda_U / \text{ W/(m K)}$	0,1431
$\nu_U / \text{ m}^2/\text{s}$	$8,65 \cdot 10^{-6}$
$\mu_U / \text{ (N s)/m}^2$	$7432,910^{-6}$

Za protusmjerni tok fluida ($Q_{v,v} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{v,u} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$), za vanjski IT slijedi:

$$\Delta T_1 = t_1' - t_2'' = 42 - 26,8 = 15,2 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = t_1'' - t_2' = 33,9 - 25,1 = 8,8 \text{ K}$$

Srednja logaritamska razlika temperature:

$$\Delta T_m = \frac{15,2 - 8,8}{\ln\left(\frac{15,2}{8,8}\right)} = 11,7 \text{ K}$$

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{l,2} - T_{h,1}} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{42 - 33,9}{26,8 - 25,1} = 4,76$$

$$P = \frac{T_{h,2} - T_{h,1}}{T_{t,1} - T_{h,1}} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{26,8 - 25,1}{42 - 25,1} = 0,1$$

Broj prolaza kroz plašt, $n = 1$.

$$P_n = \frac{1 - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}}{R - \left(\frac{R \cdot P - 1}{P - 1}\right)^{1/n}} = \frac{1 - \left(\frac{4,76 \cdot 0,1 - 1}{0,1 - 1}\right)^{1/1}}{4,76 - \left(\frac{4,76 \cdot 0,1 - 1}{0,1 - 1}\right)^{1/1}} = 0,1$$

$$F = \left[\frac{(4,76^2 + 1)^{1/2}}{4,76 - 1} \right] \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - 0,1}{1 - 4,76 \cdot 0,1}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{0,1}\right) - 1 - 4,76 + (4,76^2 + 1)^{1/2}}{\left(\frac{2}{0,1}\right) - 1 - 4,76 - (4,76^2 + 1)^{1/2}}\right]} = 0,983$$

Korigirana srednja logaritamska temperatura iznosi:

$$\Delta T_{m,kor} = \Delta T_m \cdot F = 11,7 \cdot 0,983 = 11,5 \text{ K}$$

U tablici 17. prikazane su tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjerne izmjenjivače topline, tip 1-2, istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT.

Tablica 17. Tablične vrijednosti za ispitivane industrijske protusmjernje izmjenjivače topline, tip 1-2, istočna strana, kućište jug (4) – vanjski IT

$Q_{v,v}$	1,7 m ³ /h				
ϕ_V	3342,2 W				
$Q_{m,v}$	0,470 kg/s				
$q_{m,v}$	425,3 kg/(sm ²)				
ω_c	0,427 m/s				
Δt_V	1,7 °C				
t_2''	26,8 °C	$t_{m,v} = 25,95$ °C			
t_2'	25,1 °C				
$C_V = C_2$	1966 W/K				
$Q_{v,U}$	0,9 m ³ /h				
$Q_{m,U}$	0,214 kg/s				
$C_U = C_1$	416 W/K				
t_1'	42 °C	$t_{m,U} = 37,95$ °C			
t_1''	33,9 °C				
Δt_U	8,1 °C				
ΔT_m	11,7 °C				
F	0,983				
$\Delta T_{m,kor}$	11,5 °C				
	MIT06	MIT07	MIT08	MIT09	MIT10
Re (u cijevi)	3774 (prijelazno područje)				
α_i W/(m ² K)	2881	2869	2857	2847	2840
$q_{m,U}$ kg/(s m ²)	144,9	128,3	113,5	101,6	93,2
Re (u plaštu)	165,8	146,8	129,8	116,3	106,6
α_o W/(m ² K)	636,8	599,2	563,5	533,4	510,7
$\alpha_{o,sr}$ W/(m ² K)	570,3	536,6	504,6	477,6	457,3
A m ²	0,636	0,669	0,703	0,736	0,764
A_o m ²	0,746	0,843	0,953	1,064	1,160
L m	0,540	0,610	0,690	0,770	0,840

3. REZULTATI I RASPRAVA

Izmjenjivači topline značajno pridonose sustavima hlađenja rotacijskih peći u različitim tehnološkim procesima. Njihova uloga očituje se kod primjene rekuperatora u kojima su fluidi između kojih dolazi do izmjene topline međusobno odijeljeni čvrstom stijenkom. Prilikom rada rotacijske peći zbog gubitaka topline uslijed dinamičkih opterećenja same težine peći, rotacije peći i temperaturnih gradijenata, dolazi do zagrijavanja mineralnog ulja za podmazivanje kliznih ležajeva koje je potrebno na odgovarajući način ohladiti.

Svrha ovoga rada bila je ispitati seriju industrijskih višecijevnih (**engl. shell and tube**) izmjenjivača s učvršćenim cijevnim snopom u plaštu, s jednim (1) prolazom fluida kroz plašt i dva (2) prolaza fluida kroz cijevi. Ispitivani radni uvjeti prikazani su u tablici 2. Shema rotacijske peći prikazana je na slici 13. Iz sheme je vidljivo kako na izlaznom bloku peći ima ukupno četiri (4) izmjenjivača, na poziciji istok, koji su postavljeni na sjevernom i južnom kućištu peći, s unutarnje i vanjske strane.

Izrađen je proračun za pet (5) industrijskih rekuperatora oznake MIT06 do MIT10. MITovi se međusobno razlikuju po duljini cijevi u cijevnom snopu (tablica 1), dok je broj pregrada za svaki od MITova jednak i iznosi 9.

Slika 12 prikazuje cijevni snop u plaštu za sve ispitivane MITove. Svi MITovi imaju jednaku vrijednost poprečnog presjeka cijevi, $a_c = 50,24 \text{ mm}^2$, vrijednost ukupne poprečne površine presjeka cijevi, $A_c = 0,00221 \text{ m}^2$, kao i vrijednost ekvivalentnog promjera cijevi, $d_e = 8,503 \text{ mm}$. Slobodna površina presjeka cijevnog snopa, A_s mijenja se u odgovarajućim MITovima zbog promjene razmaka između pregrada, l_{pr} , ovisno o dužini cijevi L za isti broj pregrada, $N_{pr.} = 9$. Ukupan broj cijevi u cijevnom snopu je 44, broj cijevi u prvom redu iznosi $N_1 = 7$, a u drugom redu $N_2 = 6$. Raspored cijevi u cijevnom snopu je u trokutu s korakom od $t = 13 \text{ mm}$. Vanjski promjer plašta je $114,3 \times 3,6 \text{ m}$, pa je unutarnji promjer plašta $d_u = 107 \text{ mm}$.

Prilikom svih ispitivanih uvjeta rada na pojedinom kućištu izlaznog bloka primjetno je kako je kapacitet toplije struje (mineralnog ulja) C_U manji od kapaciteta hladnije struje (rashladna voda) C_V . Mineralnom ulju se kao slabijoj struji dodjeljuje indeks 1, dok rashladnoj vodi kao jačoj struji pripada indeks 2.

Temperatura ulazne vode u izmjenjivaču na svim pozicijama izlaznog bloka jednaka je i iznosi 25,1 °C. Toplinski tok koji se mora ostvariti na pojedinoj poziciji izlaznog bloka može se izračunati preko toplinskog kapaciteta vode, C_2 , i razlike temperatura vode na ulazu i izlazu izmjenjivača, Δt_v . Toplinu koju u jedinici vremena otpušta mineralno ulje odgovara toplini koju u jedinici vremena prima rashladna voda. Shodno tome, može se izračunati smanjenje temperature ulja, Δt_U , odnosno temperatura ulja na izlazu izmjenjivača t_1'' .

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

Fizikalne veličine ispitivanih fluida očitane su iz odgovarajućih tablica pri srednjoj aritmetičkoj temperaturi danog fluida na ulazu i izlazu iz izmjenjivača.

Rezultati ispitivanja ukazuju da je na svim ispitivanim kućištima režim strujanja vode u cijevima u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$) pri svim ispitivanim volumnim protocima. Stoga je za izračunavanje koeficijenta topline u cijevima potrebno primjeniti Hausenovu jednadžbu. Rezultati također pokazuju da je na svim ispitivanim kućištima režim strujanja u plaštu laminaran ($Re < Re_{kr}$).

Rezultati proračuna istočne strane izlaznog bloka, kućište sjeverno (3) unutarnji IT (tablica 8) pokazuju kako za radne uvjete volumnog protoka rashladne vode $Q_{V,V} = 1,7\ m^3/h$ i porast temperature vode $\Delta t_v = 1,1\ K$ te volumnog protoka mineralnog ulja $Q_{V,U} = 0,9\ m^3/h$ i smanjenja temperature ulja $\Delta t_U = 5,2\ K$ svi MITovi zadovoljavaju.

Rezultati proračuna istočne strane, kućište sjeverno (3) vanjski IT (tablica 11) pokazuju kako za radne uvjete volumnog protoka rashladne vode $Q_{V,V} = 1,7\ m^3/h$ i porast temperature vode $\Delta t_v = 1,7\ K$ te volumnog protoka mineralnog ulja $Q_{V,U} = 0,8\ m^3/h$ i smanjenja temperature ulja $\Delta t_U = 9,02\ K$ svi MITovi zadovoljavaju.

Rezultati proračuna istočne strane, kućište jug (4), unutarnji IT (tablica 15) pokazuju kako za radne uvjete volumnog protoka rashladne vode $Q_{V,V} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ i porast temperature vode $\Delta t_V = 1,3 \text{ K}$ te volumnog protoka mineralnog ulja $Q_{V,U} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ i smanjenja temperature ulja $\Delta t_U = 6,9 \text{ K}$ svi MITovi zadovoljavaju.

Rezultati proračuna istočne strane, kućište jug (4), vanjski IT (tablica 17) pokazuju kako za radne uvjete volumnog protoka rashladne vode $Q_{V,V} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ i porast temperature vode $\Delta t_V = 1,7 \text{ K}$ te volumnog protoka mineralnog ulja $Q_{V,U} = 0,9 \text{ m}^3/\text{h}$ i smanjenja temperature ulja $\Delta t_U = 8,1 \text{ K}$ svi MITovi zadovoljavaju.

Rezultati ispitivanja su pokazali kako na istočnoj strani izlaznog bloka rotacijske peći na unutarnjoj i vanjskoj poziciji kućišta (3) i (4) višecijevni izmjenjivači MIT06 do MIT10 zadovoljavaju postavljene uvjete rada. U svim ispitivanim slučajevima potrebna površina za izmjenu topline manja je u odnosu na raspoloživu, stoga ispitivani višecijevni izmjenjivači navedenih karakteristika zadovoljavaju.

4. ZAKLJUČAK

- Na svim ispitivanim kućištima izlaznog bloka na istočnoj strani rotacijske peći režim strujanja vode u cijevima je u prijelaznom području ($2300 < Re < 10\ 000$), dok je režim strujanja u plaštu izmjenjivača laminaran ($Re < Re_{kr}$) pri svim ispitivanim volumnim protocima hladnog (rashladna voda) i toplog (mineralno ulje) fluida.
- Iz svega navedenog dolazi se do zaključka kako na istočnoj strani izlaznog bloka rotacijske peći na unutarnjoj i vanjskoj poziciji kućišta (3) i (4) višecijevni izmjenjivači MIT06 do MIT10 zadovoljavaju postavljene uvjete rada budući je pri ispitivanim uvjetima rada potrebna površina za izmjenu topline manja u odnosu na raspoloživu.

5. LITERATURA

1. Handbook of Heat Transfer, Chapter 17., Heat Exchangers, Ed. by W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Y. I. Cho, 3rd Ed., McGraw-Hill, 1998., pp. 17. 111.-17.120.
2. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994., str. 149-200.
3. F. Bošnjaković, Nauka o toplini, 2. dio, 4. izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
4. O. Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet, Dubrovnik, 1994., str. 100-108.
5. A. Galović, Termodinamika II, 5. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., str. 192.-238.
6. URL:<https://www.enciklopedija.hr/Ilustracije/izmjenj%20topl%20i%20i%202.jpg> (15.9.2021.)
7. URL:https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSNJP1guRUDI8k8WYU28wFGB35ml_QiJU2cAQ&usqp=CAU (15.9.2021.)
8. URL: <https://i23.delachieve.com/image/ed23fe1570990eac.jpg> (20.9.2021.)
9. URL:<https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/izmjenjivacitopline%5B1%5D.pdf> (22.9.2021.)
10. URL:<https://www.ktf.unist.hr/index.php/nastavni-materijali-zio/nastavni-materijali/category/143-projektiranje-procesa?download=2386:poglavlje-9-uredaji-za-prijenos-topline%20ure%C4%91aji%20za%20prijenos%20topline> (22.9.2021.)
11. URL:<https://docplayer.gr/docs-images/62/47985332/images/11-0.jpg> (25.9.2021.)
12. URL:https://puntomariner.com/images/calculation-of-the-heat-exchanger_1.jpg (25.9.2021.)
13. G. Towler, R. Sinnott, Chemical Engineering Design, Chapter 12, Elsevier, London, 2008., p.p. 793-869.
14. 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

t – korak cijevi, m

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

d_e – ekvivalentni promjer plašta, m

d_i – unutarnji promjer cijevi, m

d_o – vanjski promjer cijevi, m

d_{pl} – unutarnji promjer plašta, m

F – korekcijski faktor

IT – izmjenjivač topline

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

L – duljina cijevi, m

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

N – ukupan broj cijevi

N_c – ukupan broj cijevi u cijevnom snopu

N_{pr} – broj pregrada u plaštu

N_{prolaz} – broj prolaza fluida kroz cijevi

N_u – Nusseltova značajka

N_1 – broj cijevi u prvom redu cijevnog snopa

N_2 – broj cijevi u drugom redu cijevnog snopa

P – toplinska efikasnost hladnog fluida

Pe – Pecletova značajka

Pr – Prandtlova značajka

Q_m – maseni protok fluida, kg/s

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

R – omjer kapacitivnih brzina

Re – Reynoldsova značajka

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

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

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

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

t' – ulazna temperatura struje fluida, °C

t'' – izlazna temperatura struje fluida, °C

t_1' – ulazna temperatura slabije struje, °C

t_1'' – izlazna temperatura slabije struje, °C

t_2' – ulazna temperatura jače struje, °C

t_2'' – izlazna temperatura jače struje, °C

t_m – aritmetička sredina temperature promatrane struje, °C

Grčka slova

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

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

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

δ – debljina cijevi, mm

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

μ – dinamička viskoznost fluida, Pa s

μ_s – dinamička viskoznost fluida pri temperaturi stijenke, Pa s

ν – kinematička viskoznost fluida, m²/s

ρ – gustoća fluida, kg/m³

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

ω – brzina fluida u cijevi, m/s