

# Izmjenjivači topline u brodskim rashladnim uređajima

---

**Dželalija, Ante**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Dubrovnik / Sveučilište u Dubrovniku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:527426>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-24**



**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
UNIVERSITY OF DUBROVNIK

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
POMORSKI ODJEL**

**ANTE DŽELALIJA**

**IZMJENJIVAČI TOPLINE U BRODSKIM  
RASHLADNIM UREĐAJIMA**

**ZAVRŠNI RAD**

**DUBROVNIK, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
**POMORSKI ODJEL**  
**BRODOSTROJARSKI STUDIJ**

**IZMJENJIVAČI TOPLINE U BRODSKIM  
RASHLADNIM UREĐAJIMA**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

**doc. dr. sc. MATKO BUPIĆ**

Pristupnik:

**ANTE DŽELALIJA**

**DUBROVNIK, 2020.**

Republika Hrvatska

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**

**POMORSKI ODJEL**

**Preddiplomski sveučilišni studij brodstrojarstva**

Ur. broj.

Dubrovnik, 4. veljače 2020.

Kolegij: BRODSKI RASHLADNI UREĐAJI

Mentor: doc. dr. sc. MATKO BUPIĆ

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Pristupnik: **ANTE DŽELALIJA**, student III. god.

Zadatak: **IZMJENJIVAČI TOPLINE U BRODSKIM RASHLADNIM UREĐAJIMA**  
***HEAT EXCHANGERS IN MARINE REFRIGERATION EQUIPMENT***

Zadatak treba sadržavati:

1. Općenito o prostiranju topline i izmjenjivačima topline.
2. Opis i izvedbe kondenzatora.
3. Opis i izvedbe isparivača.

Osnovna literatura:

1. O. Fabris: Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet u Dubrovniku, Dubrovnik, 1994.
2. B. Pavković: Tehnika hlađenja, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2011.
3. ASHRAE: 2010 ASHRAE Handbook – Refrigeration, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Georgia, 2010

Zadatak uručen pristupniku: 4. veljače 2020.

Rok za predaju završnog rada: 4. svibnja 2020.

Mentor:

Pročelnik odjela:

**doc. dr. sc. MATKO BUPIĆ**

**doc. dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ**

Izjavljujem da sam ovaj izradio samostalno  
koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se obitelji na bezuvjetnoj potpori tokom studiranja te mentoru  
dr. sc. Matku Bupiću na pruženoj pomoći i savjetima tokom pisanja završnog rada.

*Ante Dželalija*

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	7
<b>2. IZMJENJIVAČI TOPLINE</b> .....	8
2.1. Podjela izmjenjivača topline .....	8
2.1.1. Rekuperativni izmjenjivači topline .....	9
2.1.2. Regenerativni izmjenjivači topline.....	12
2.1.3. Izmjenjivači topline s miješanjem.....	15
2.1.4. Podjela izmjenjivača topline s obzirom na: .....	15
<b>3. PROSTIRANJE TOPLINE</b> .....	20
3.1. Načini prostiranja topline .....	20
3.2. Koeficijent prolaza topline .....	21
3.3. Stupanj djelovanja izmjenjivača.....	21
3.4. Toplinski tok u izmjenjivaču topline.....	22
<b>4.KONDENZATORI</b> .....	28
4.1. Zrakom hlađeni kondenzatori.....	29
4.2. Vodom hlađeni kondenzatori .....	30
4.2.1. Kondenzator s cijevnom zavojnicom u bubnju („shell and coil“).....	30
4.2.2. Kondenzator cijev u cijevi.....	31
4.2.3. Kondenzator s cijevima u plaštu („Shell and tube kondenzator“).....	32
4.2.4. Pločasti kondenzatori .....	33
4.3. Kondenzatori hlađeni vodom i zrakom .....	34
4.3.1. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode.....	34
4.3.2. Evaporativni kondenzator.....	36
<b>5. ISPARIVAČI</b> .....	37
5.1. Suhi isparivači.....	37
5.2. Potopljeni isparivač .....	38
5.3. Suhi isparivač s cijevima u plaštu .....	39
5.4. Pločasti isparivači za hlađenje kapljevina.....	40
5.5. Pločasti isparivač za tekućine.....	40
5.6. Problemi kod pločastog izmjenjivača.....	41
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	42
<b>POPIS SLIKA</b> .....	43
<b>LITERATURA</b> .....	45

# IZMJENJIVAČI TOPLINE U BRODSKIM RASHLADNIM SUSTAVIMA

## *HEAT EXCHANGERS IN SHIP COOLING SYSTEMS*

### **SAŽETAK**

U ovom završnom radu opisani su izmjenjivači topline u brodskim rashladnim sustavima, s naglaskom na opis i podjelu kondenzatora i isparivača jer danas su to dva najčešća tipa izmjenjivača na brodu. Opisana je načelna podjela, kao i klasifikacija izmjenjivača topline. Rad sadrži postupak proračuna izmjenjivača topline. Zahtjevi klasifikacijskog zavoda za izmjenjivače topline također su objašnjeni u radu.

### **ABSTRACT**

*This paper describes the heat exchangers in the ship cooling systems, with the accent on description and classification of condensers and evaporators because these two are the most common types of the heat exchangers on the ship today. Principle division and the classification are also described. The paper consists of the procedure of calculation of the heat exchanger. Classification society requirements for the heat exchangers are explained, too.*

### **Ključne riječi:**

Izmjenjivači topline, kondenzator, isparivač, proračun izmjenjivača topline, zahtjevi klasifikacijskog društva

### **Keywords:**

*Heat exchangers, condenser, evaporator, calculation of heat exchanger, classification society requirement*

# 1. UVOD

Izmjenjivači topline su vrlo važan dio opreme u brodskim strojnim uređajima. Oni osiguravaju prijelaz topline u pojedinim sustavima, s medija više temperature na mediji niže temperature.

Rashladnici služe za oduzimanje topline ugrijanom mediju, a tu toplinu preuzima na sebe drugi hladniji medij. Izmjenjivači topline mogu biti pločastog oblika i prikladne izvedbe, gdje nanizane ploče preuzimaju ulogu izmjene topline. Dva fluida, između kojih se vrši izmjena topline, potpuno su jedan od drugog odijeljeni.

Izmjena topline povezana je s gibanjem čestica. Viša temperatura uzrokuje brže, a niža temperatura sporije gibanje čestica. Poznata je činjenica da toplina uvijek prelazi s tijela više na tijelo niže temperature. Tijela ili dijelovi tijela različitih temperatura koja su u međusobnom dodiru nastoje postići temperaturnu ravnotežu izjednačavanjem svojih temperatura. Kao što je poznato, toplina prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature. Rad svakog izmjenjivača topline temelji se upravo na ovim, već poznatim, zakonitostima. Izmjenjivači topline nalaze vrlo široku primjenu u tehnici grijanja, hlađenja i klimatizacije, energetske, prehrambene, prerađivačkoj, autoindustriji, elektrici, svemirskoj tehnici itd. Razlikujemo tri vrste izmjene topline: kondukcija ili provođenje, konvekcija ili strujanje i zračenje.

Izmjena topline između tijela različite temperature vrši se provođenjem i konvekcijom što je vezano za tvar kao posrednika te izmjena topline toplinskim zračenjem što nije vezano za tvar. Prijenos topline zračenjem odvija se u obliku toplinskih zraka koje se prenose u obliku elektromagnetskih valova. Naime, svako tijelo zadane temperature zrači toplinu, koja se u obliku elektromagnetskih valova širi do drugog tijela. Kad se toplina prostire tako da se ona s jednog fluida prenosi na neku pregradnu stijenku, zatim se provodi kroz stijenku i konačno s druge strane stijenke prenosi na neki drugi fluid, tada se takva kombinacija naziva prolaz topline. Ti primjeri su vrlo česti u toplinskim uređajima koje nazivamo izmjenjivačima topline.



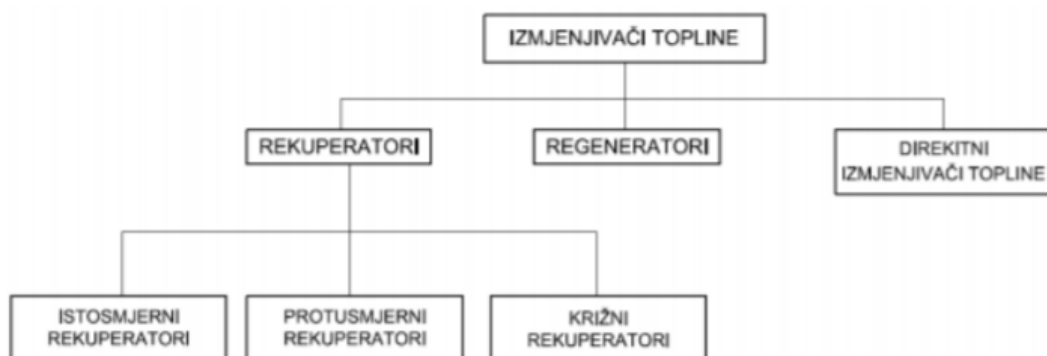
## 2. IZMJENJIVAČI TOPLINE

Izmjenjivači topline su uređaji koji se koriste za izmjenu topline između dviju ili više tekućina koje imaju različitu temperaturu, krutih površina i kapljevina. Prilikom izmjene topline u pravilu nema vanjskog dovođenja topline niti trošenja odnosno obavljanja rada. Uobičajene primjene uključuje zagrijavanje ili hlađenje struje tekućine, isparavanja ili kondenzacija jednokomponentnih ili višekomponentnih struja tekućina.

Imaju vrlo široku primjenu i to u: postrojenjima centralnog grijanja (bojleri, radijatori), postrojenjima za pripremu potrošne tople vode, rashladnim sustavima (isparivači, kondenzatori), kemijskoj i prehrambenoj industriji kao zagrijači, kondenzatori, kristalizatori, sušionice itd. Također veliku primjenu imaju u termoenergetskim postrojenjima kao parni kotlovi, pregrijači pare, zagrijači zraka, ekonomajzeri itd.

### 2.1. Podjela izmjenjivača topline

Izmjenjivači se dijele na *regeneratore*, *direktne* i *rekuperatore*. Od navedenih *rekuperatori* su najzastupljeniji u upotrebi.

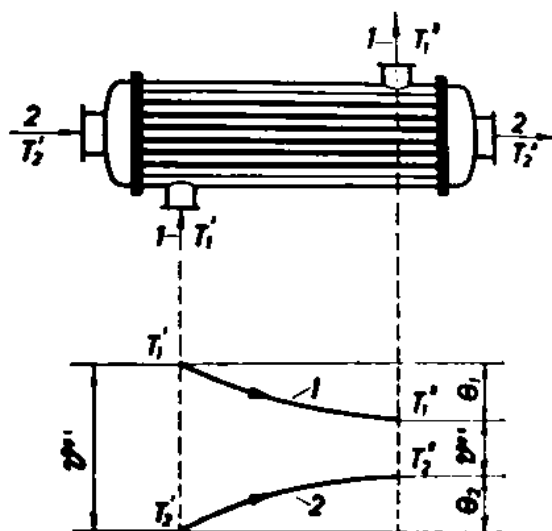


Slika 1. Načelna podjela izmjenjivača topline

## 2.1.1. Rekuperativni izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline kod kojih su struje (tekućine, fluidi) međusobno razdvojeni čvrstom stijenkom nazivaju se rekuperativnim toplinskim aparatima ili, kraće, rekuperatorima. Kod takvih je aparata razdjelna stijenka rashladna odnosno ogrijevna površina, koja ne propušta međusobni izravni dodir struja. Razdjelna stijenka može biti cijevnog ili pločastog oblika, a s obzirom na konstruktivnu izvedbu rekuperatori mogu biti različito izvedeni. Osnovna podjela rekuperatora prema međusobnom strujanju fluida kroz rekuperator:

a) Istosmjerni je izmjenjivač topline naznačen time što obje struje ulaze na njegovoj istoj strani, a smjer im je strujanja duž njegove površine jednak. Izlazna ( najviša) temperatura hladnije struje uvijek je niža od izlazne (najniže) temperature toplije struje ( $T''_2 < T''_1$ ). Te bi se dvije temperature mogle izjednačiti samo teorijski kad bi površina izmjenjivača bila beskonačno velika ( $A_0 = \infty$ ). [5]



- a)  $W_1 < W_2$   
 $\rightarrow \theta_1 > \theta_2$
- b)  $W_1 > W_2$   
 $\rightarrow \theta_1 < \theta_2$
- c)  $W_1 = W_2$   
 $\rightarrow \theta_1 = \theta_2$

Slika 2. istosmjerni izmjenjivač topline [5]

Uvijek je prirast ili pad temperature slabije struje veći od odgovarajuće promjene jače struje (slučajevi a, b, i c na slici 2.)

Srednja je logaritamska temperaturna razlika ( za sve slučajeve istosmjernih izmjenjivača ):

$$\Delta T_m = \frac{\vartheta' - \vartheta''}{\ln \frac{\vartheta'}{\vartheta''}} = \frac{(T_1' - T_2') - (T_1'' - T_2'')}{\ln \frac{T_1' - T_2'}{T_1'' - T_2''}}$$

Tu je  $\vartheta' > \vartheta''$  uvijek na ulazu izmjenjivača.

Proračun se izrađuje ili pomoću veličine  $\Delta T_m$ , ili pomoću funkcije  $\Phi_i$  ( sa značajkom  $\frac{W_1}{W_2}$  i  $\frac{kA}{W_1}$  ) s čijim se dijagramom mogu izračunati temperature medija na bilo kojem mjestu izmjenjivača.

b) Protusmjerni izmjenjivač (slika 3.) topline naznačen je time što struje ulaze na njegovim suprotnim stranama a suprotan im je i smjer strujanja duž njegove površine.

Izlazna (najviša) temperatura hladnije struje može biti manja, jednaka ili veća od izlazne (najniže) temperature toplije struje ( $T_2'' \lesseqgtr T_1''$ ).

Ako je toplija struja slabija ( $W_1 < W_2$ ), bit će temperaturni tok (a) sasvim drugačiji od onog kad je toplija struja jača ( $W_1 > W_2 - b$ ). Promjena temperature slabije struje uvijek je veća pa je za slučaj a)  $\Theta_1 > \Theta_2$ , a za slučaj b)  $\Theta_1 < \Theta_2$ .

Ako su vodene vrijednosti obiju struja jednake (  $W_1 = W_2$ ), temperaturne će promjene obiju struja biti jednake ( $\Theta_1 = \Theta_2 - c$ ).

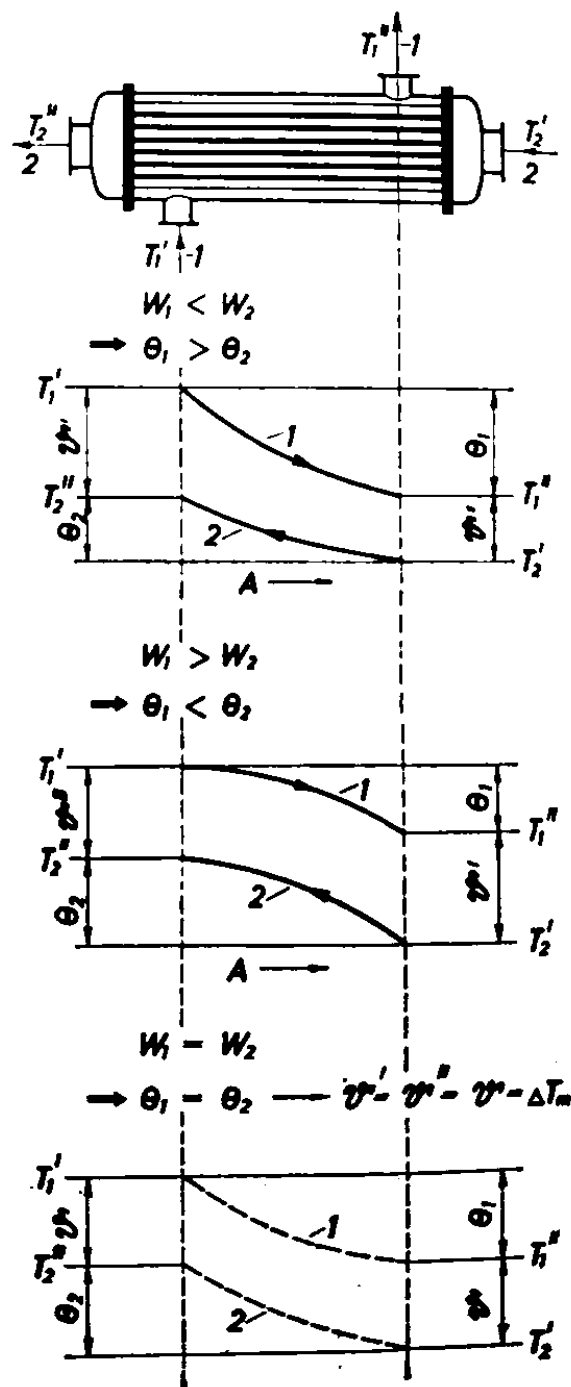
Srednja je logaritamska temperaturna razlika: za slučajeve a) i b)

$$\Delta T_m = \frac{\vartheta' - \vartheta''}{\ln \frac{\vartheta'}{\vartheta''}}$$

Za a) je  $\vartheta' = T_1' - T_2''$ , a za b) je  $\vartheta' = T_1'' - T_2'$ .

Za slučaj c)  $\Delta T_m = \vartheta_m = \vartheta = T_1' - T_2'' = T_1'' - T_2'$

jer je  $\vartheta' = \vartheta'' = \vartheta$  pa bi računski vrijednost logaritamske temperaturne razlike bila jednaka nuli, što ne odgovara stvarnosti. [5]



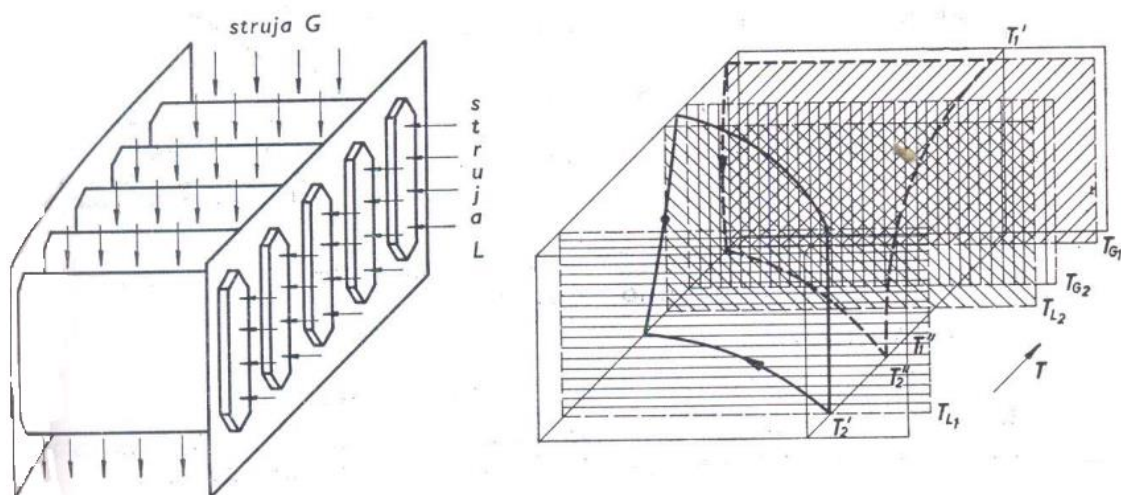
Slika 3. protusmjerni izmjenjivač topline [5]

c) Križni (unakrsni) izmjenjivač (slika 4.) topline naznačen je time što se dvije struje medija međusobno sijeku pod pravim kutom.

Točan proračun takvih izmjenjivača topline vrlo je složen jer se temperature mijenjaju duž površine u smjeru dviju koordinata. [5]

Kod križnih izmjenjivača su ulazne temperature  $T_1'$  i  $T_2'$  određene konstantne vrijednosti (kao i kod ostalih izmjenjivača), dok su izlazne temperature  $T_1''$  i  $T_2''$  srednje vrijednosti.

Proračun se može izvršiti pomoću funkcije  $\Phi_k$  i njenog dijagrama sa značajkama  $\frac{W_1}{W_2}$  i  $\frac{k \cdot A}{W_1}$ . [5]



Slika 4. križni izmjenjivač topline [5]

### 2.1.2. Regenerativni izmjenjivači topline

Regeneratori topline (slika 5.) primjenjuju se za izmjenu topline između dviju plinskih struja. Kao posrednik za prijenos topline služi šupljikava (porozna) akumulacijska masa, koja se naizmjenično dovodi u dodir s toplijom strujom od koje preuzima toplinu grijući se, i hladnijom strujom, kojoj predaje tu akumuliranu toplinu, hladeći se. Proces je izrazito nestacionaran sa stajališta akumulacijske mase.

Prednosti su regeneratora u odnosu na rekuperatore:

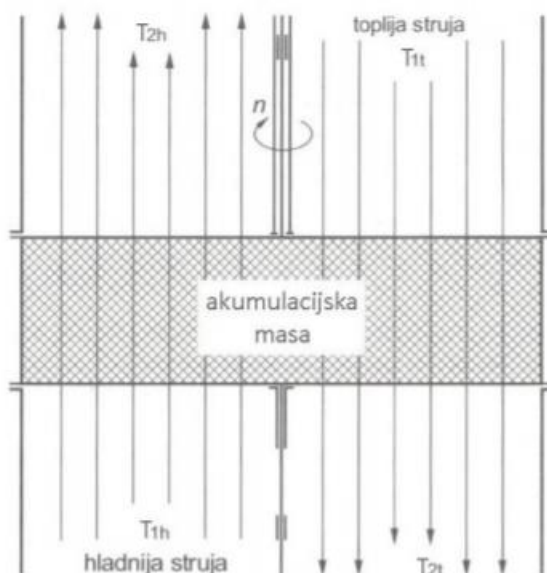
- mogućnost postizanja velike dodirne površine mase s plinskom strujom (npr. nekoliko stotina do čak nekoliko tisuća  $m^2$  po  $m^3$  volumena mase)
- sama masa nije mehanički opterećena ni kod različitih tlakova plinskih struja, pa dolaze u obzir i ugradbeni elementi manje čvrstoće (staklo, keramika,

šamot), ako imaju neka druga komparabilna svojstva, npr. otpornost na visoke temperature ili nagrivanja (koroziiju) itd.

- zbog obavezno protusmjernog strujanja plinova, smanjenja je opasnost od začepjenja šupljina u masi možebitnim taloženjem čestica iz jedne struje plina, jer ih druga struja odnese (ispere) kao npr. leteći pepeo kod *Ljungströмова* regeneratora u generatoru pare. [5]

Nedostatak je regeneratora:

- neizbježno je, makar i malo, miješanje dvaju plinova prenošenjem u šupljinu akumulacijske mase i prodiranjem kroz brtve, posebice ako se tlakovi plinova znatnije razlikuju

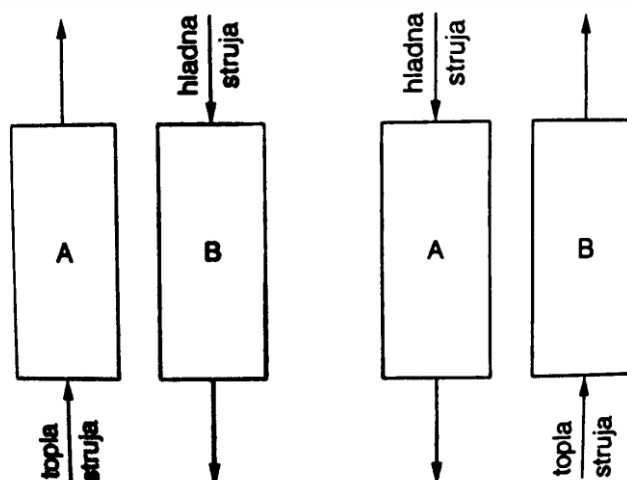


**Slika 5. Regenerativni izmjenjivač topline [6]**

Dvije su osnovne skupine regeneratora:

- Regeneratori s dvije nepomične mase, kod kojih se naizmjenični dodir svake mase s toplijom i hladnijom strujom ostvaruje prespajanjem (u pravilnim vremenskim razmacima – intervalima) sustava kanala za protok plinova, slika 6.a. Izlazne se temperature obiju struja svakako s vremenom mijenjaju. Tu se promjena može smanjiti

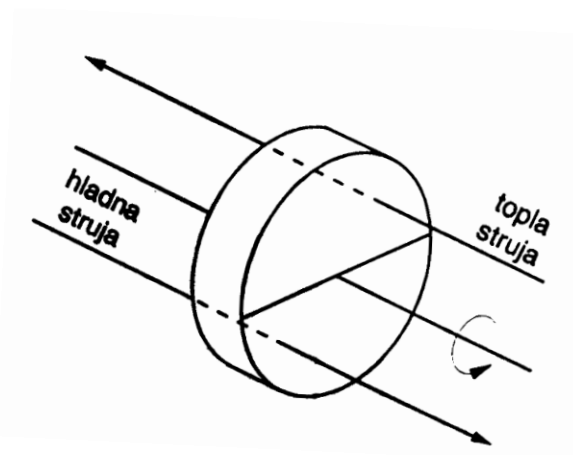
uporabom više od dviju masa i pogodnim vremenskim pomakom i njihovom radu.



Slika 6.a. Regenerator s dvije nepomične mase [5]

- b) Regeneratori s (jednom) rotirajućom matricom u obliku diska ili šupljeg valjka. Plinske struje dolaze i odlaze stalno kroz iste kanale, a masa se rotira poprijeko na smjer plinova i svaki njezin element naizmjenično prolazi kroz topliju i kroz hladniju plinsku struju, (slika 6.b.).

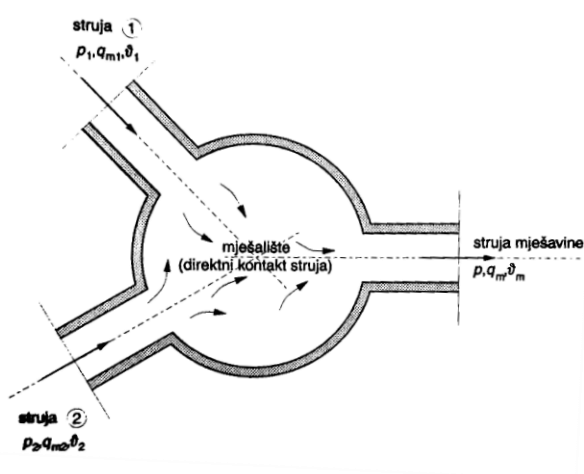
Ovdje svaka plinska struja na izlazu ima drukčiju temperaturu, ali se čestice poslije izmiješaju, pa je takva srednja izlazna temperatura vremenski stalna. [5]



Slika 6.b. Regenerator s rotirajućom masom (matricom) [5]

### 2.1.3. Izmjenjivači topline s miješanjem

To su posude u kojima se izmjena topline između dva fluida odvija njihovim neposrednim miješanjem (slika 7.). Površina potrebna za izmjenu topline ne može se točno izračunati. Prema iskustvenim podacima određuje se potreban radni prostor posude jer izmjena topline ovisi u prvom redu o njegovu toplinskom opterećenju. Površina je izmjene topline suma površina svih filmskih slojeva preko krutih ugradnji i svih površina raspršenih čestica. Površina se povećava ugradnjom komadnih elemenata (pregrade, Rašing – prstenovi, folije i sl.) i ugradnjom uređaja za raspršivanje (perforirane tave, kaskade, mlaznice, itd.).



Slika 7. Mješalište, kao izravni izmjenjivač topline [6]

### 2.1.4. Podjela izmjenjivača topline s obzirom na:

Podjela izmjenjivača topline s obzirom na:

- ostvarivanje kontakta fluida
- konstrukcijske karakteristike
- konfiguracija tokova fluida
- broj prolaza fluida
- stupanj kompaktnosti



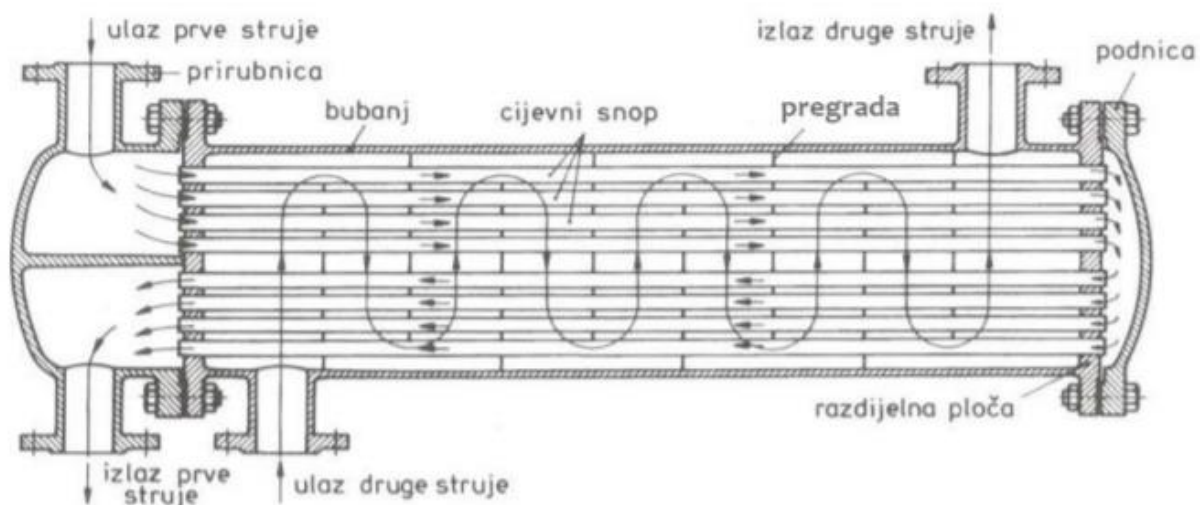
1. Način ostvarivanja kontakta fluida, odnosno postojanje ili ne postojanje razdjelne stijenke između toplije i hladnije struje:

- izmjenjivači topline s izravnim kontaktom fluida
- izmjenjivači topline s neizravnim kontaktom fluida

2. Konstrukcijske karakteristike: proučavajući geometriju konstrukcije, postoji gruba podjela izmjenjivača topline u dvije grupe koje se mogu dalje dijeliti.

Cijevni izmjenjivači topline izrađeni su od cijevi pri čemu jedan fluid struji unutar, a drugi izvan cijevi. Promjer, duljina, raspodjela, debljina stijenke i broj cijevi mogu se mijenjati čime se postižu različita svojstva izmjenjivača topline. Daljnja podjela cijevnih izmjenjivača topline slijedi:

- Koaksijalni izmjenjivači topline – jedna ili više cijevi smještene su koncentrično unutar druge cijevi, većeg promjera. Koriste se kod osjetljivog grijanja i hlađenja procesnih fluida gdje se zahtjeva mala površina izmjene topline
- "Shell and tube" izmjenjivači topline (slika 8.) – sastoje se od snopova cijevi smještenih unutar bubnja. Mogu biti horizontalne ili vertikalne izvedbe, s pregradama ili bez, s jednim ili više prolaza fluida. Koriste se za hlađenje ulja, kao generatori pare u nuklearnim elektranama, u kemijskoj industriji itd.



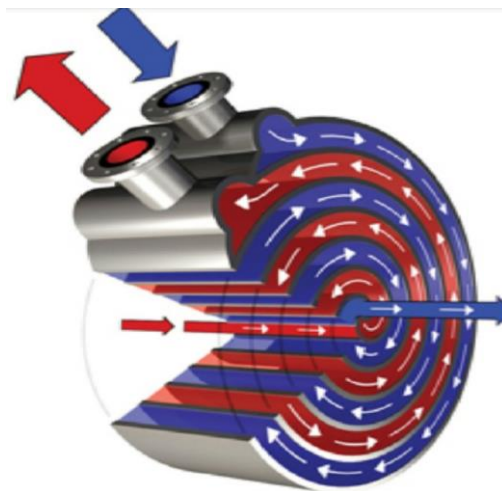
**Slika 8. Shell and tube cijevni izmjenjivač topline [6]**

- Spiralni izmjenjivači topline (slika 9.) – Kućište izmjenjivača je cilindričnog oblika, izvodi se u zavarenoj izvedbi ili iz čelične bešavne cijevi s prirubnicama na oba kraja. Cijevni snop je izveden iz fleksibilnih metalnih cijevi što onemogućuje stvaranje kamenca. Pri prijelazu topline turbulencija nastaje sama po sebi, a cijevi se mogu nesmetano toplinski rastezati bez nastajanja unutarnjih naprezanja. [9]



**Slika 9. Spiralni izmjenjivač topline [9]**

- Orebreni pločasti izmjenjivači topline – sadrže paket tankih valovitih ili orebrenih ploča koje odvajaju fluide. Strujanje može biti istosmjerno ili protusmjerno. Upotrebljavaju se za izmjenu topline između dva tekuća fluida, ali su zbog konstrukcije ograničeni visinom tlaka i temperature.
- Spiralni pločasti izmjenjivači topline (slika 10.) – dvije paralelne ploče formirane su u spiralu tvoreći dva kanala koji najčešće rade na protusmjernom načelu. Svaki od kanala ima jedan dugi zakrivljeni prolaz. Kompaktni su i skupi.

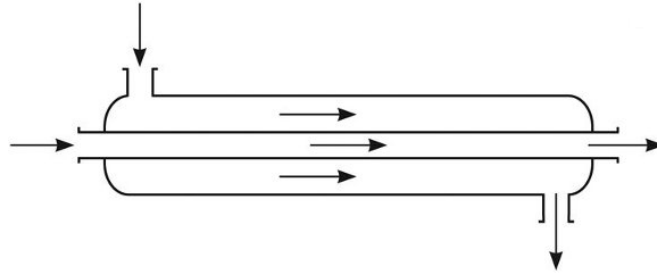


**Slika 10. Spiralni pločasti izmjenjivač topline [10]**

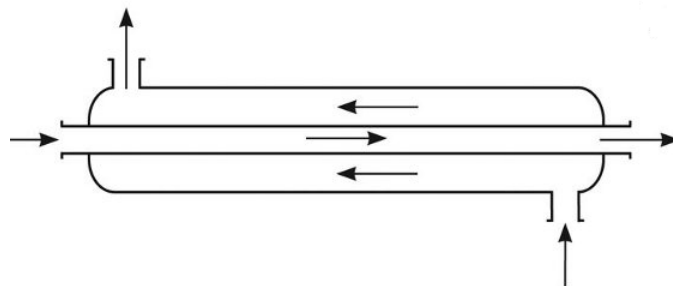
- Lamelni izmjenjivači topline – sadrže set paralelnih i tankih lamela koje se profilirane i zavarene zajedno. Postiže se veća efektivnost i manja masa te veća površina prijelaza topline.

### 3. Konfiguraciju tokova radnih fluida:

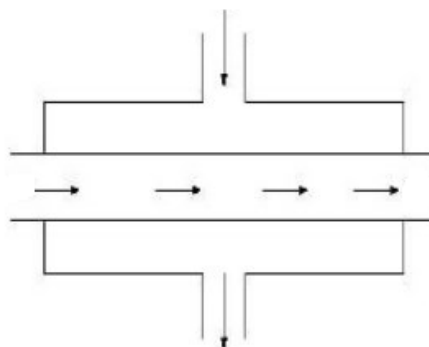
- istosmjerni



- protusmjerni



- križni (unakrsni)



4. Broj prolaza fluida:

- s jednim prolazom fluida
- s više prolaza fluida

5. S obzirom na stupanj kompaktnosti izmjenjivači topline se dijele na:

- kompaktne
- nekompaktne

Navedena podjela, odnosno klasifikacija izmjenjivača topline temelji se na njihovoj svrsi u brodskim sustavima, a to su:

1. Kondenzatori – u sustavima imaju ulogu da se rashladni medij u njima kondenzira. Kondenzacija se vrši na način da se sekundarnim medijem iz okoline (morska voda, slatka voda, zrak) toplina radnoj tvari odvodi te se dovodi iz plinovitog stanja u tekuće stanje.
2. Isparivači – imaju ulogu da se primarna tvar u sustavu ispari. Ovisno o konstrukciji isparivača, isparivanje se može odvijati u cijevima ili na ogrjevnoj površini (pločasti i3 isparivači). U oba slučaja isparivanje se može vršiti prirodnim ili prisilnim kretanjem radne tvari.
3. Zagrijači – uloga zagrijača je da se primarnoj tvari poveća temperatura, i to maksimalno do temperature isparivanja.
4. Hladnjaci – imaju ulogu da se temperatura primarnoj tvari snizi najmanje do temperature sekundarne tvari, ali da temperatura bude viša od okolne temperature.
5. Rashladnici – koriste se za snižavanje temperature primarnoj tvari do temperature niže od temperature okoline.

## **3. PROSTIRANJE TOPLINE**

### **3.1. Načini prostiranja topline**

Tri su osnovna načina prostiranja topline topline: provođenje (kondukcija), prijenos (konvekcija) i zračenje (radijacija).

Pri kondukciji toplina se prostire mehanizmom direktnog kontakta elementarnih čestica tijela, kao što su molekule, atomi ili slobodni elektroni, dok je istovremeno samo tijelo u stanju mirovanja. Naime, kod dijelova tijela s višom temperaturom elementarne čestice se brže gibaju (titraju), pa u sudarima sa susjednim sporijim česticama, hladnijeg dijela tijela, prve se usporavaju, a druge ubrzavaju. Istovremeno s tim, prisutan je i mehanizam prostiranja topline gibanjem slobodnih elektrona. Ovisno o svojstvima tijela, dominiraju jedan ili drugi način – kod električnih izolatora to je sudaranje atoma i molekula, a kod električnih vodiča to je gibanje elektrona. Kao u svakodnevni primjer tog načina prostiranja topline poslužiti će žlica uronjena u vruću kavu, kojoj slobodni kraj ima temperaturu gotovo jednaku kao i onaj dio uronjen u kavu.

Pri konvekciji toplina se prostire česticama koje se gibaju i prenose energiju iz toplijeg u hladnije područje. Taj oblik prostiranja topline, očito, moguć je samo kod tekućina i plinova (ili para), a ne i kod čvrstih tijela, ili tamo gdje je vakuum. Sam mehanizam tog oblika prostiranja topline ovisan je u prvom redu o intenzitetu miješanja, a zatim i o toplinskom kapacitetu čestica koje se gibaju. Primjer tog načina je grijanje prostorija upuhivanjem vrućeg zraka, nakon čega se sav zrak u prostoriji (a zatim i predmeti) zagrije do željene temperature.

Radijacija je proces prostiranja topline elektromagnetskim valovima kroz propustan mediji kao što su zrak ili vakuum. Za vrijeme tog procesa dio unutrašnje energije vrućeg tijela se pretvara u energiju zračenja koja se ponovno pretvara u toplinu kad padne na neko drugo, nepropusno, tijelo. Svakodnevni primjer tog načina prostiranja topline je Sunčeva radijacija na Zemlju.

### 3.2. Koeficijent prolaza topline

Koeficijent prolaza topline (ili ukupni koeficijent prijenosa topline) bitna je veličina pri proračunu izmjenjivača topline. Koeficijent prolaza topline ovisi o koeficijentima prijelaza topline s jedne i druge strane razdjelne stijenke, njenoj geometriji i njenoj toplinskoj provodnosti.

Ukupni koeficijent prijenosa topline, u praksi se računa prema izrazu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_0} + r_0 + r_c + r_i \cdot \frac{A_0}{A_i} + \frac{1}{a_i} + \frac{A_0}{A_i}}$$

gdje je:

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

$a_0$  – koeficijent prijenosa topline na vanjskoj stijenci cijevi,  $W/(m^2 K)$

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

$r_0, r_i$  – otpori prijenosu topline zbog onečišćenja unutarnje i vanjske stijenske cijevi,  $(m^2 K)/W$

Da bi se koeficijenti prijenosa topline i otpori sveli na istu površinu prijenosa topline,  $a_i$  i  $r_i$  množe se omjerom vanjske i unutarnje površine cijevi  $\frac{A_i}{A_0}$ . U izrazu za koeficijent prolaza topline, kao i u izrazima za toplinske kapacitete pojedinih strujaa javljaju se i fizikalna svojstva struja (fluida).

### 3.3. Stupanj djelovanja izmjenjivača

Stupanj djelovanja izmjenjivača jest omjer postignuta stupnja valjanosti  $\varepsilon$  i maksimalnog stupnja valjanosti  $\varepsilon_{max} = \varepsilon_\infty$ , koji bi se dobio u dotičnom izmjenjivaču ako bi mu površina  $A_0 \rightarrow \infty$ :

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_\infty} = \frac{\pi_1(A_0)}{\pi_1(A \rightarrow \infty)}$$

Za protusmjerni i križni izmjenjivač, zbog izjednačavanja ulazne temperature jedne s izlaznom temperaturom druge struje, ako ima  $A_0 \rightarrow \infty$ , jest  $\varepsilon = \eta = \pi_1$ , pa na slikama 11.8. i 11.10. ordinatna os ima trostruko značenje.

Zbog prirode istosmjernog izmjenjivača odnosno načina temperaturene promjene struja, njegov se stupanj djelovanja računa prema jednadžbi:

$$\eta_i = (1 + \pi_3)\pi_1 = (1 + \pi_3)\pi_{1i},$$

pa linije  $\eta_i = \text{konst.}$ , na slici 11. označuju pramen pravaca koji idu iz ishodišta navedenog dijagrama.

### 3.4. Toplinski tok u izmjenjivaču topline

Toplinski tok u izmjenjivaču ovisi o sljedećim varijablama:

$$\Phi = f(k, A_0, t_1', t_1'', t_2', t_2'', C_1, C_2)$$

gdje je:

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

$k$  - koeficijent prolaza topline,  $W/(m^2K)$

$A_0$  - ukupna površina prijenosa topline,  $m^2$

$t_1'$  - ulazna temperatura slabije struje

$t_1''$  - izlazna temperatura slabije struje

$t_2'$  - ulazna temperatura jače struje

$t_2''$  - izlazna temperatura jače struje

$C_1$  - toplinski kapacitet slabije struje, W/K

$C_2$  - toplinski kapacitet jače struje, W/K

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

$$C_1 = Q_{m,1} \cdot C_{p,1}$$

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

$$C_2 = Q_{m,2} \cdot C_{p,2}$$

gdje je:

$C$  - toplinski kapacitet struje fluida, W/K

$Q_m$  - maseni protok pojedine struje fluida, kg/s

$c_p$  - specifični toplinski kapacitet pojedine struje fluida pri konst. tlaku, J/(kgK),

prema tome vrijedi omjer:

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

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

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

- za topli fluid

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

- za hladni fluid

$$\Phi_H = Q_m = Q_{m,H} \cdot C_{p,H} \cdot (T_{H2} - T_{H1}) = Q_{v,H} \cdot \rho_H \cdot C_{p,H} \cdot \Delta T_H = C_H \cdot \Delta T_H$$

$$C = Q_v \cdot \rho \cdot C_p = q_m \cdot C_p$$

gdje je:

$Q_v$  - volumni protok fluida,  $m^3/h$

$\rho_m$  – masena brzina fluida,  $kg/(s \cdot m^2)$



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

Uz pretpostavku da nema toplinskih gubitaka slijedi da je:

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

Iz jednadžbe dalje proizlazi, 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 izraziti toplinsko – kinetičkom energijom

$$\delta \Phi = \delta Q = k \cdot (T_T - T_H) \cdot d_A$$

gdje je:

$k$  - koeficijent prolaza topline kroz diferencijalnu površinu  $dA$  izmjenjivača topline,  $W/(m^2k)$

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

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

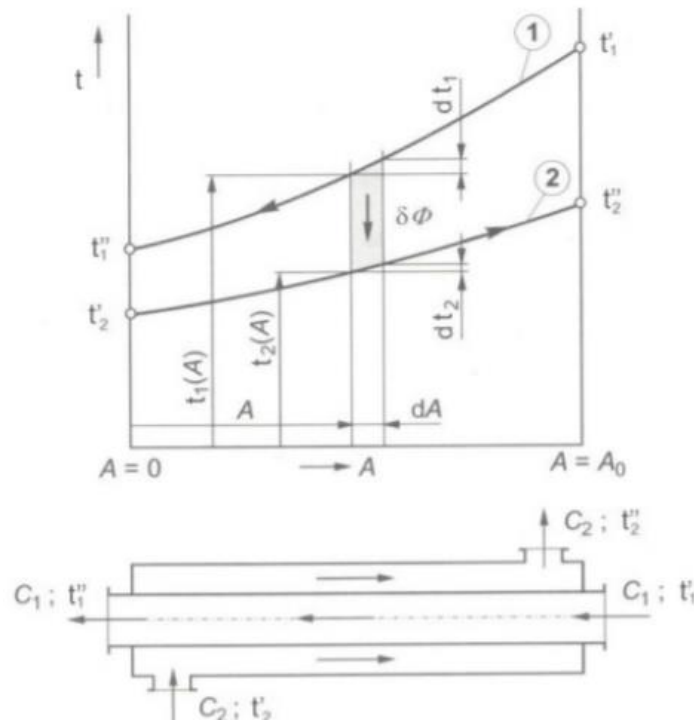
$$\delta \Phi = \delta Q = k \cdot (T_T - T_H) \cdot dA = \delta Q_T = \delta Q_H$$

$$\delta Q_T = -C_T \cdot dT_T$$

$$\delta Q_H = C_H \cdot dT_H$$

Prema tome za svaki fluid vrijede po dvije jednadžbe toplinskog toka.

Prikaz temperaturnog profila, za protustrujni izmjenjivač topline prikazan je na slici 11.



Slika 11. Temperaturni tok struja uzduž protustrujnog izmjenjivača topline [11]

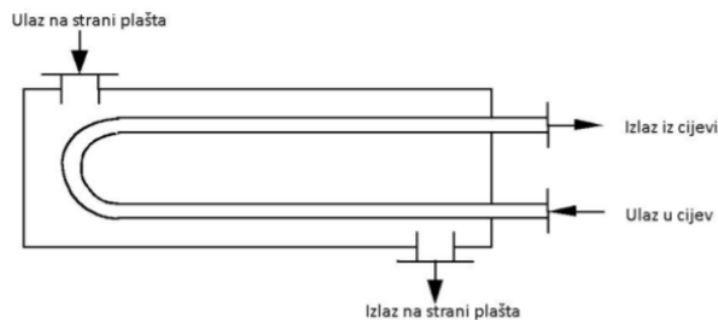
Srednja logaritamska razlika temperature, koja predstavlja pokretačku silu za izmjenu topline, definirana je izrazom:

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

gdje je:

$\Delta T_1, \Delta T_2$  - razlika temperatura hladnog i toplog fluida na jednoj i na drugoj strani izmjenjivača

Indeks 1 se odnosi na veću razliku, a indeks 2 na manju razliku



Slika 12. Shematski prikaz protusmjernog izmjenjivača topline [2]

Za protusmjerni tok fluida prikazan na slici 12., slijedi:

$$\Delta T_1 = T_{t1} - T_{h2} = t_1' - t_2''$$

$$\Delta T_2 = T_{t2} - T_{h1} = t_1'' - t_2'$$

Dakle izmjenjeni toplinski tok u izmjenjivačima protusmjernog i/ili istosmjernog toka može se prikazati konačnom toplinsko-kinetičkom jednadžbom:

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T_m$$

gdje je:

$\Delta T_m$  - srednja logaritamska pokretačka sila procesa, odnosno srednja logaritamska razlika temperatura između “toplog“ i “hladnog“ fluida.

Izraz vrijedi za izmjenjivače topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i jednim prolazom fluida kroz cijevi. Kod izmjenjivača s više prolaza fluida kroz cijevi i/ili plašt, istovremeno su prisutni istosmjerni, protusmjerni i unakrsni tok. U takvim slučajevima dolazi do križanja temperatura, tj. u jednom dijelu cijevi i plašta “hladni” fluid ima višu temperaturu od “toplog” fluida. Tada je omjer  $\Phi/(k \cdot A)$  mnogo složenija funkcija o ulaznim i izlaznim temperaturama fluida. Pokretačka sila procesa će biti manja  $\Delta T_m$  za iste razlike temperature na ulazu i izlazu iz izmjenjivača ( $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$ ) za faktor korekcije  $F$ .

$$\Delta T_{m,kor} = \Delta T_m \cdot F$$

Osnovna jednadžba za proračun izmjenjivača topline tada glasi:

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

gdje je:

$\Phi$  - toplinski tok (toplina prenesena u izmjenjivaču), kJ/h

$k$  - ukupni koeficijent prijenosa topline, kJ/(m<sup>2</sup>s K)

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

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

$$R = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}}$$

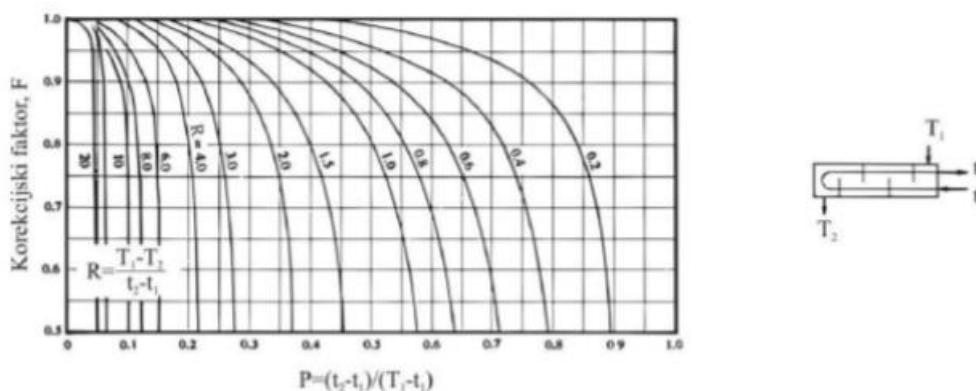
Parametar R je jednak omjeru kapacitivnih brzina  $\frac{C_H}{C_T} = \frac{(T_{T,1} - T_{T,2})}{(T_{H,2} - T_{H,1})}$ .

Parametar P je jednak toplinskoj efikasnosti hladnog fluida, tj.

$$P = \frac{T_{t,1} - T_{t,2}}{T_{h,2} - T_{h,1}}$$

Vrijednosti faktora F za izmjenjivače s cijevnim snopom i plaštem mogu se naći u TEMA standardima.

Korekcijski faktor F za izmjenjivač topline s jednim prolazom fluida kroz plašt i dva prolaza fluida kroz cijevi prikazan je na slici 13.

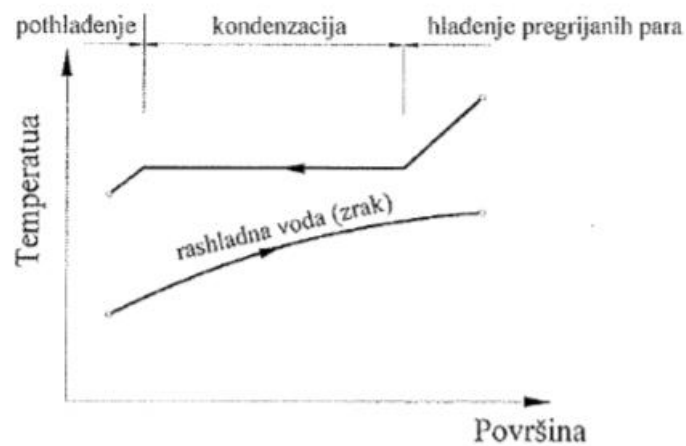


**Slika 13. Dijagram ovisnosti  $F = f(P, R)$  za protusmjerni izmjenjivač topline [12]**

Očitavanje F s ravnog dijela krivulje može dovesti do velike pogreške. Stoga se ne preporučuje računanje s F manjim od 0,75. Ukoliko se dobije faktor manji od 0,75 treba pokušati s izmjenjivačem s više prolaza kroz plašt dok se ne dobije zadovoljavajuća vrijednost korekcijskog faktora.

## 4.KONDENZATORI

Kondenzatori su izmjenjivači topline koji predaju toplinski tok iz rashladnog kruga ponoru topline koji je uvijek niže temperature. Radna tvar ulazi u kondenzator u pregrijanom stanju te se hladi do suhozasićene pare predavanjem toplinskog toka („desuperheating“). Kad radna tvar prelazi iz suhozasićene pare u vrelu kapljevину, ponoru topline se predaje toplinski tok kondenzacije. Kod kondenzacije se sadržaj pare u kondenzatoru smanjuje, a udio kapljevine raste. Hlađenjem radne tvari od stanja vrele kapljevine na temperaturu nižu za 3 do 5°C od temperature kondenzacije predaje se toplinski tok pothlađenja. Pothlađenje se uvodi da se poveća učinkovitost sustava. Najveći udio toplinskog toka u kondenzatoru predaje se upravo izmjenom latentne topline, a manji dio se predaje hlađenjem pregrijanih para i pothlađenjem. Idealna kondenzacija se odvija pri konstantnom tlaku.



Slika 14. Raspodjela temperatura u kondenzatoru [13]

Toplinski tok koji se izmijeni na izmjenjivaču topline iznosi:

$$\Phi_k = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad [W]$$

$k$  =koeficijent prolaza topline [W/m<sup>2</sup>K] -kod kondenzatora je veći u odnosu na ostale izmjenjivače zbog velikog koeficijenta prijelaza topline kondenzacije

$A$  = površina kondenzatora [m<sup>2</sup> ]

$\Delta\vartheta_m$  = srednja logaritamska razlika temperatura [°C] Učinak kondenzatora može se izračunati kao zbroj učinka isparivača i snage kompresora:

$$\Phi_k = \Phi_i + P_k \quad [W]$$

Kondenzatori se prema načinu hlađenja dijele na kondenzatore hlađene zrakom, kondenzatore hlađene vodom i na kondenzatore hlađene kombinirano (i zrakom i vodom). Kondenzatori se prema površini za prijenos topline dijele na glatkocijevne i na orebrene.

#### 4.1. Zrakom hlađeni kondenzatori

Zrakom hlađeni kondenzatori se upotrebljavaju u rashladnim postrojenjima malih i srednjih kapaciteta i na lokacijama gdje nema dovoljno vode s obzirom da je zrak vrlo dostupan toplinski punor. Također zrak ne zahtijeva veće ulaganje u samo održavanje kondenzatora. U manjim uređajima kondenzatori su često hlađeni zrakom i to bez prisilne cirkulacije zraka. Za veće i srednje kapacitete koristi se prisilna cirkulacija zraka da se poveća koeficijent prijelaza topline na strani zraka.



**Slika 15. Kondenzator s orebrenim cijevnim sekcijama [14]**

Opis rada: Ventilator se koristi tako da usisava uzduh preko orebrenih sekcija što povoljno utječe na ujednačenje strujanja preko lamelnih sekcija. Ulaz radne tvari mora biti obavezno s gornje strane, što olakšava otjecanje nastalog kondenzata. Treba postojati i odvod kondenzata za slučaj kada bi prekrenuli proces pa bi kondenzator radio kao isparivač. Najčešće se kao radna tvar koriste halogenirani ugljikovodici, čisti ugljikovodici, iznimno R717. Takvi kondenzatori primjenjuju se u svim postrojenjima. Mana ovakvog tipa kondenzatora je što ventilator proizvodi buku pa je pažljivo potrebno odabrati lokaciju smještanja kondenzatora.

Okvirni podaci:

$$k = 15 \div 30 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\Delta\vartheta_m = 8 \div 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_z = 2 \div 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

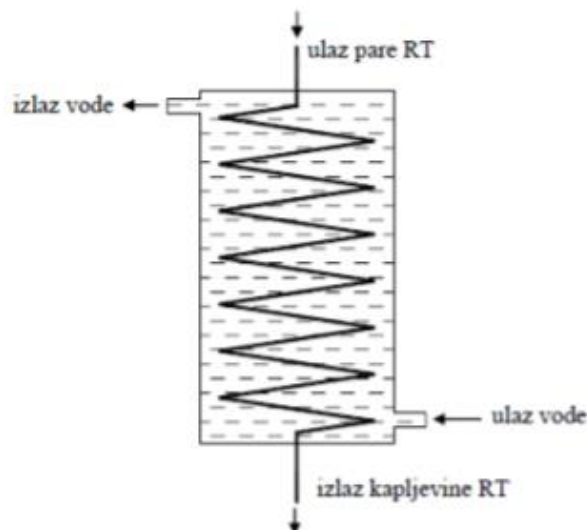
$$w_z = 2 \div 5 \text{ m/s [3]}$$

U odnosu na sustave s vodom, sustavi sa zrakom imaju višu temperaturu kondenzacije, ali je lakše održavanje. Prijelaz topline ostvaruje se filmskom kondenzacijom unutar cijevi te turbulentnim strujanjem na orebrenju oko cijevi.

## 4.2. Vodom hlađeni kondenzatori

Voda ima znatno veći specifični toplinski kapacitet od zraka i obične je niže temperature od zraka pa se kod vodom hlađenih kondenzatora postižu niže temperature kondenzacije što znači da je potrebna i manja energija za pogon kompresora.

### 4.2.1. Kondenzator s cijevnom zavojnicom u bubnju („shell and coil“)



Slika 16. „Shell and coil“ kondenzator [2]

Opis rada:

Ovakvi kondenzatori koriste se u jedinicama malih toplinskih učinaka i u jednostavnim rashladnim uređajima. Toplinu vode koja se ugrije u bubnju moguće je iskoristiti kao potrošnu toplu vodu ili za neki proces u industriji. Nedostaci ovakvih izvedbi su velik pad tlaka na strani radne tvari i mali koeficijent prijelaza topline na strani vode. Koeficijent prolaza topline može se povećati dodavanjem miješalice koja kružno cirkulira vodu. Tim postupkom moguće je povećati  $k$  do  $700 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Okvirni podaci:

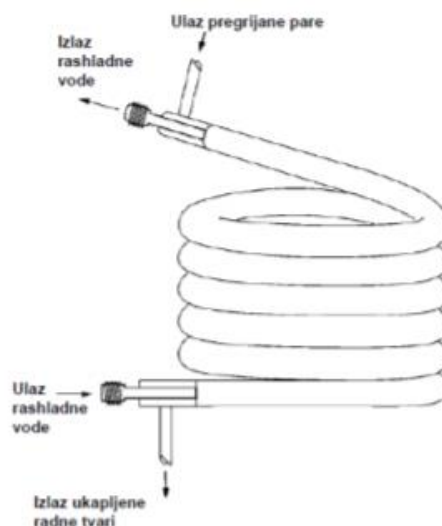
$$k = 150 \div 250 \text{ W/m}^2 \text{ K bez mješalice}$$

$$k = 400 \div 700 \text{ W/m}^2 \text{ K s mješalicom}$$

$$\Delta\vartheta_m = 10 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_w = 5 \div 20 \text{ }^\circ\text{C [3]}$$

#### 4.2.2. Kondenzator cijev u cijevi



Slika 17. Koaksijalni cijev u cijevi kondenzator [15]



Uobičajena izvedba je s glatkim cijevima, RT struji oko cijevi, voda u cijevima.

Koriste se za manje učine kondenzacije:  $\Phi_k = 0,5 \div 50 \text{ kW}$

Kao radna tvar koriste se ugljikovodici i halogenirani ugljikovodici („freoni“). Prijelaz topline obično se ostvaruje filmskom kondenzacijom na vodoravnoj cijevi ili u snopu cijevi, a turbulentnim strujanjem u cijevi. Prednost ovakvog tipa izmjenjivača je protusmjerno strujanje, koje omogućuje vrlo efektivnu izmjenu toplinskog toka.

Okvirni podaci:

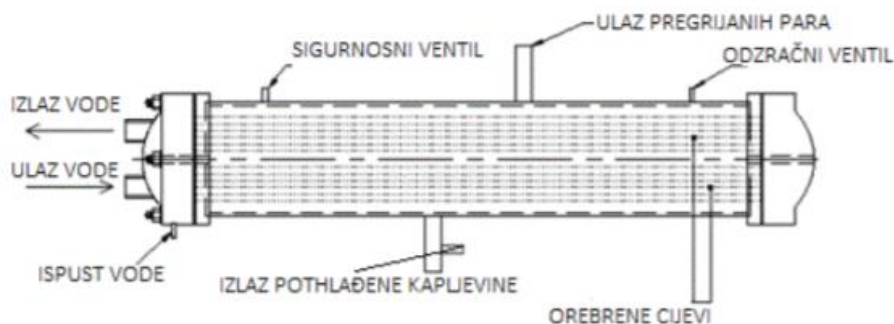
$$k = 300 \div 1000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\Delta\vartheta_m = 5 \div 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_w = 3 \div 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$w_w = 0,3 \div 1,5 \text{ m/s [3]}$$

#### 4.2.3. Kondenzator s cijevima u plaštu („Shell and tube kondenzator“)



Slika 18. Kondenzator s cijevima u plaštu [16]

„Shell and tube“ izmjenjivači su najčešće korišteni izmjenjivači u industriji. Izvedba je većinom glatkocijevna ali može biti i orebrana. Orebrana izvedba ima prednost jer ima veću površinu za izmjenu topline i razbija se granični sloj na kojem nastupa kondenzacija. Najčešće radna tvar struji oko cijevi, a voda struji u cijevima. Time se olakšava mehaničko i kemijsko čišćenje cijevi. Ulaz radne tvari je uvijek s gornje strane. Ulaz vode je s donje strane

zato da hladna voda pohladi radnu tvar u donjem dijelu kondenzatora. Kondenzatori s cijevima u plaštu se primjenjuju u industrijskim postrojenjima s protočnom ili optočnom vodom, te u sustavima industrijske klimatizacije, za učine kondenzacije:  $\Phi_k = 50 \div 2000 \text{ kW}$ . Kao radna tvar koriste se halogenirani ugljikovodici, R717 i ugljikovodici. Prijelaz topline događa se filmskom kondenzacijom na vodoravnom snopu cijevi u kondenzatorskom dijelu, a slobodnom konvekcijom na potopljenom snopu cijevi u pothlađivačkom dijelu – sve na strani radne tvari, a na strani vode turbulentno strujanje u cijevima.

Okvirni podaci:

$$k = 700 \div 1500 \text{ W/m}^2 \text{ K za kondenzator}$$

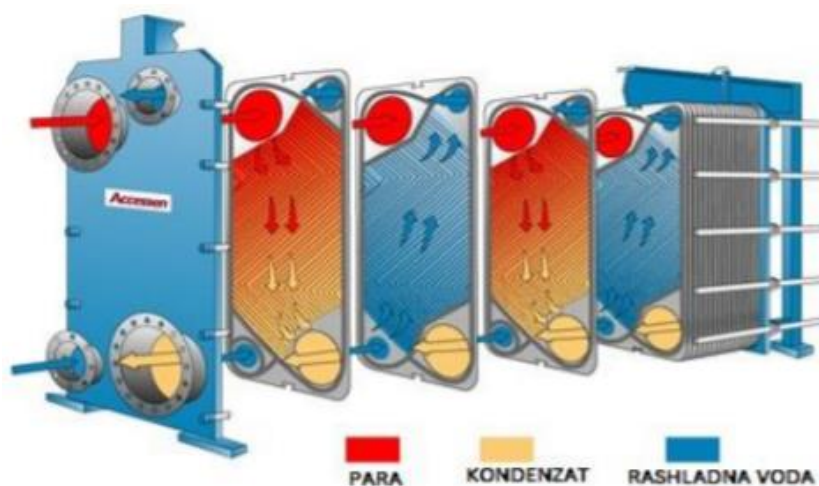
$$k = 150 \div 300 \text{ W/m}^2 \text{ K za pothlađivač}$$

$$\Delta\vartheta_m = 5 \div 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_w = 3 \div 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$w_w = 0,3 \div 1,5 \text{ m/s [3]}$$

#### 4.2.4. Pločasti kondenzatori



Slika 19. Pločasti kondenzator [16]

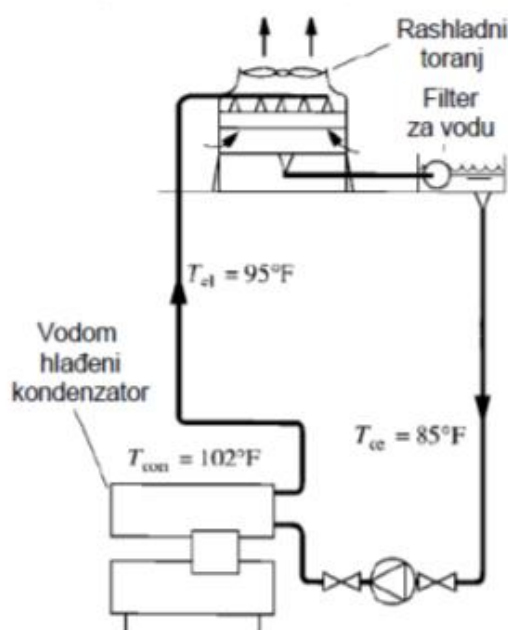
Ovakva vrsta izmjenjivača je vrlo kompaktna i ima veliku površinu za izmjenu topline. Sastoji se od mnogo tankih limenih ploča koje imaju veliku površinu. Ploče imaju

udubine koje služe za usmjeravanje tvari. Između ploča su brtve, osim brtvljenja služe i za distribuciju tvari. Postoji polu-zavarena i rastavljiva izvedba. Najveći problem ovakvog tipa izmjenjivača predstavlja održavanje.

### 4.3. Kondenzatori hladeni vodom i zrakom

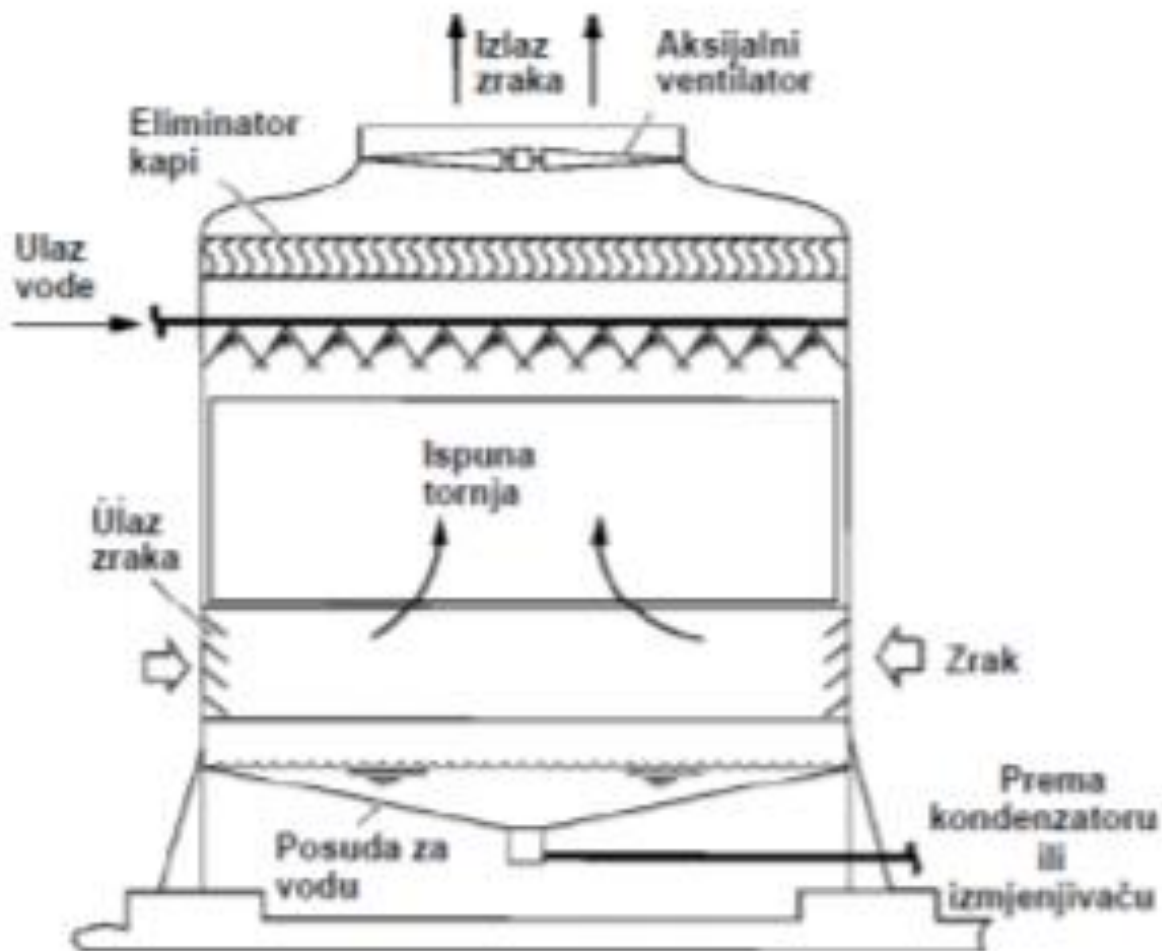
Kondenzatori hladeni zrakom i vodom koriste se kod sustava gdje postoje veća toplinska opterećenja. Evaporativni kondenzatori najčešće se upotrebljavaju u rashladnoj industriji, a rashladni tornjevi se koriste u većim klimatizacijskim sustavima. Ovakvi kondenzatori traže pažljivu kemijsku pripremu vode i veća sredstva za održavanje sustava zbog gubitaka optočne vode.

#### 4.3.1. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode



Slika 20. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode [15]

Voda koja se zagrijala u kondenzatoru odlazi u rashladni toranj i raspršuje se sapnicama preko punila s ciljem razbijanja u što finiju maglu što veće površine. Procesom ishlapljivanja voda se hladi na nižu temperaturu. Voda zatim prolazi kroz odvajač nečistoće i kemijski se obrađuje te se recirkulacijskom pumpom tjera natrag u kondenzator.



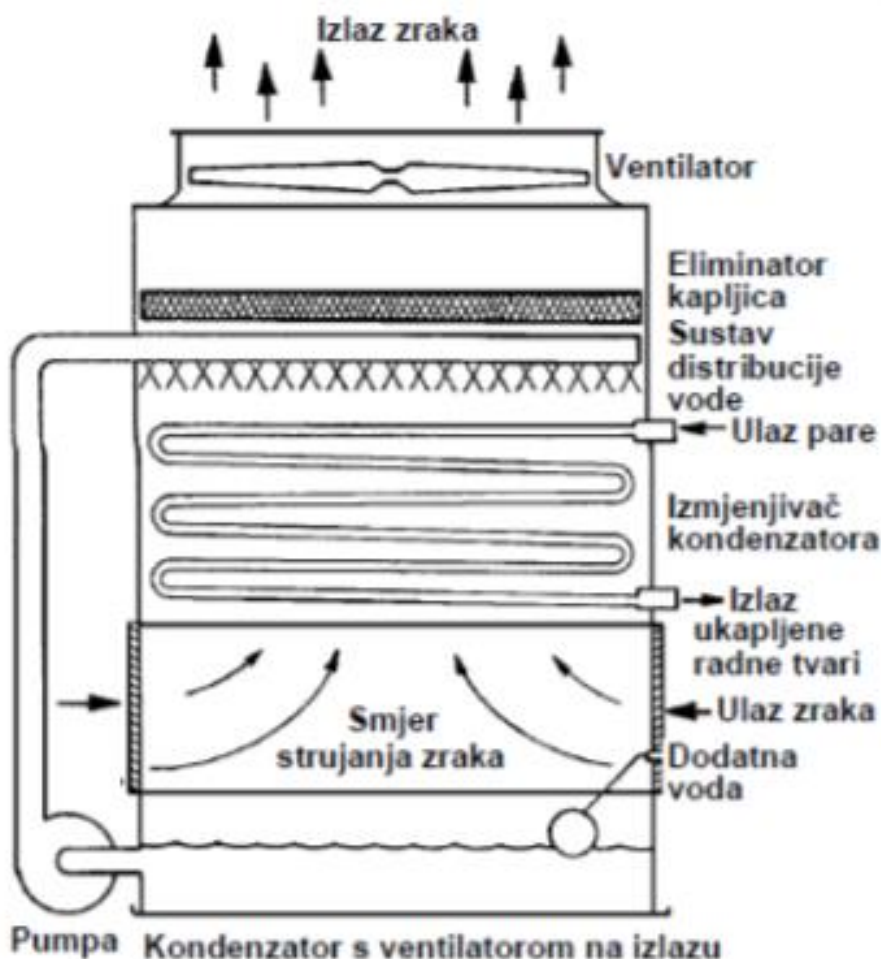
Slika 21. Rashladni toranj [15]

U ovakvim sustavima javljaju se gubici vode koji su zbroj mase vode koja je ishlapila, mase vode odnesene strujom zraka i masom vode potrebnom za odmuljivanje. Gubitke vode potrebno je nadoknaditi svježom vodom.

Tip kondenzatora u ovakvim sustavima je s glatkim cijevima u plaštu. Kao radna tvar koriste se i halogenirani ugljikovodici i R717. Primjenjuju se u industrijskoj klimatizaciji i u industrijskim postrojenjima. Vodu je potrebno kemijski obrađivati. Dodavanje svježe vode iznosi cca. 1 do 4%.

### 4.3.2. Evaporativni kondenzator

Ovakav sustav smanjuje potrebnu snagu pumpe za vodu uspoređujući ga s rashladnim tornjem u vezi s vodom hlađenim kondenzatorom. Potrebna je manja površina izmjenjivača i manji protok zraka da se odvede ista količina topline. Ovakvi sustavi su najkompaktnije izvedbe za neki rashladni kapacitet. Evaporativni kondenzator može raditi pri nižim temperaturama kondenzacije jer je ograničen temperaturom vlažnog termometra okoliša za razliku od zrakom hlađenog kondenzatora koji je ograničen temperaturom suhog termometra okoliša. Moguć tip kondenzatora je orebreni i glatkocijevni. Radna tvar (R717, iznimno halogenirani ugljikovodici) struji u cijevima, a voda i zrak oko cijevi. Koristi se u industrijskim postrojenjima. Prijelaz topline događa se filmskom kondenzacijom unutar cijevi i hlađenjem vode ishlapljivanjem.



Slika 22. Evaporativni kondenzator [15]

## 5. ISPARIVAČI

Ovisno o konstrukciji isparivača, isparivanje se može vršiti na ogrjevnoj površini u velikom volumenu (isparivanje u posudi) ili cijevima. U oba slučaja isparavanje se može odvijati u uvjetima slobodnog prirodnog ili prisilnog kretanja radne tvari. Mehanizam izmjene topline pri isparavanju je složen. Kod isparavanja u posudi velikog volumena iznad grijane površine, koeficijent prijelaza topline s unutrašnje stjenke isparivača na radnu tvar ovisi o toplinskim svojstvima radne tvari (gustoći, specifičnom toplinskom kapacitetu, viskoznosti, koeficijentu provođenja topline i dr.), o hrapavosti površine isparivača koja je u dodiru s radnom tvari, o tlaku odnosno temperaturi zasićenja, razlici temperatura stjenki i radnih tvari, o geometrijskom obliku površine isparivača te o nizu drugih faktora (čiji utjecaji imaju manje utjecaje).

Prema namjeni isparivači se mogu podijeliti na:

- isparivači za hlađenje kapljevina
- isparivači za hlađenje zraka (plinova)
- isparivači za hlađenje i smrzavanje proizvoda
- specijalni isparivači (npr. isparivači – kondezatori u kaskadnim rashladnim uređajima).

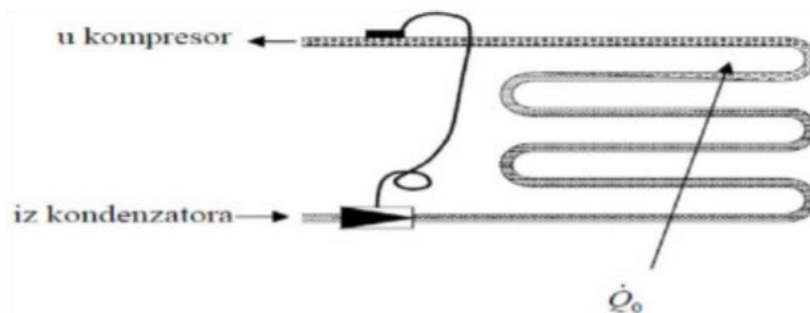
Prema načinu isparivanja i regulaciji napajanja radne tvari razlikuju se:

- suhi isparivači
- potopljeni isparivači

### 5.1. Suhi isparivači

Suhi isparivači koriste se za hlađenje zraka, kao i za hlađenje kapljevina. U njima radna tvar potpuno isparuje, a para se pregrijava u izlaznoj zoni isparivača. Odgovarajućim

načinom regulacije osigurava se da na izlazu iz isparivača para bude pregrijana. Prave se od glatkih ili orebrenih cijevi, kao isparivači s cijevima u plaštu, kao pločasti ili kao koaksijalni isparivači. Na slici 23. prikazana je jedna izvedba suhog isparivača.

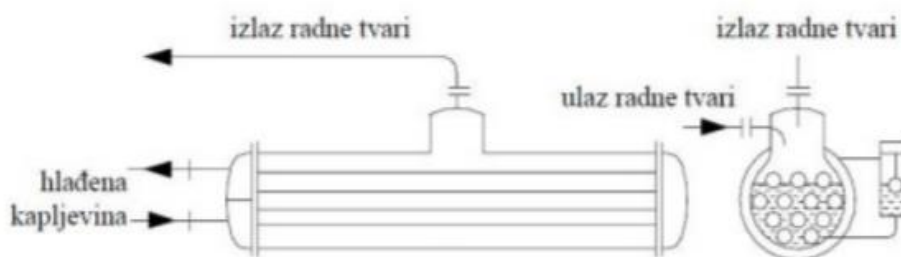


**Slika 23. Suhi isparivač [2]**

## 5.2. Potopljeni isparivač

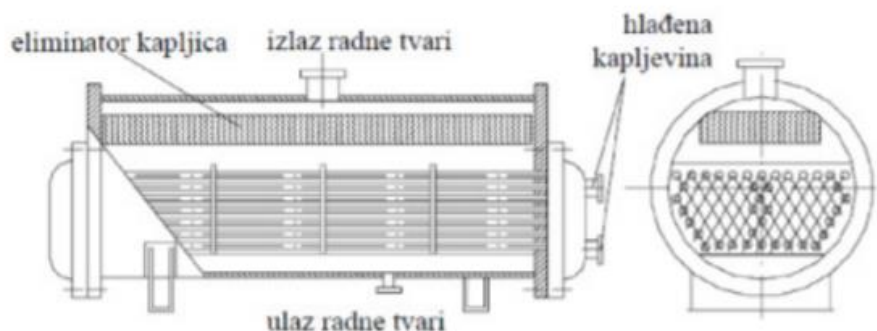
Potopljeni isparivači su skoro potpuno ispunjeni kapljevnom radne tvari. Izrađuju se u obliku cijevnih snopova od glatkih ili orebrenih cijevi, ili kao isparivači s cijevnim snopom u plaštu. Prijelaz topline na strani radne tvari je intenzivniji nego kod suhih isparivača, jer je cijela površina unutrašnjih stjenki u dodiru s kapljevnom. Cirkulacija radne tvari u potopljenim isparivačima može biti prirodna ili prisilna, kada kroz njih cirkulira nekoliko puta više kapljevne nego što ispari. Koriste se uglavnom u većim rashladnim instalacijama.

Na slici 24. prikazana je jedna od izvedbi potopljenog isparivača s cijevima u plaštu.



**Slika 24. Potopljeni isparivač s cijevima u plaštu [2]**

Na slici 25. prikazan je potopljeni isparivač s cijevima u plaštu s eliminatorom kapljica radne tvari.

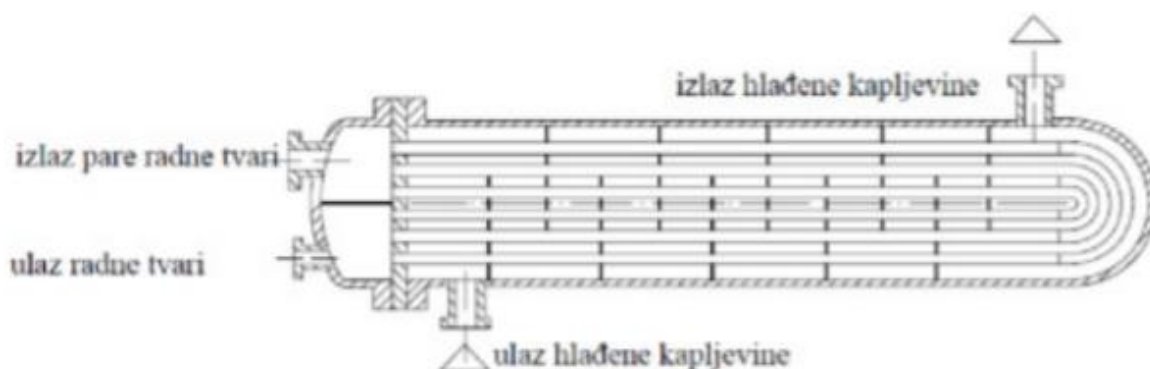


**Slika 25. Potopljeni isparivač s eliminatorom kapljica radne tvari [2]**

### 5.3. Suhi isparivač s cijevima u plaštu

Radna tvar isparuje u cijevima, hladena kapljevinna protječe oko snopa cijevi u plaštu. Koeficijent prijenosa topline je u granicama od 800 do 1500 W/(m<sup>2</sup> K), brzina gibanja tekućine kroz cijevi su od 0,15 do 0,3 m/s, dok je razlika primarne temperatura primarne tekućine od 5 do 15 K. Prigušivanje radne tvari je u termoekspanzijskom ventilu. Potrebno je osigurati pravilnu distribuciju radne tvari u cijevima.

Na slici 26. prikazana je jedna izvedba isparivača za hlađenje kapljevine sa suhim isparivanjem i cijevnim snopom u plaštu s dva prolaza radne tvari.



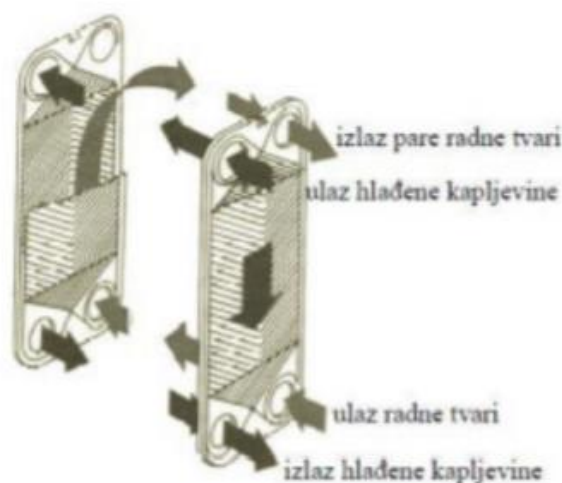
**Slika 26. Isparivač za hlađenje kapljevine sa suhim isparivanjem i cijevnim snopom [2]**



## 5.4. Pločasti isparivači za hlađenje kapljevina

Najviše se primjenjuju na brodovima zbog svog jednostavnog, kompaktnog i prilagodljivog dizajna. Isparivanje radne tvari se odvija u kanalima koje čine profilirane ploče. S jedne strane ploče protječe radna tvar koja isparuje, a s druge strane hlađena radna tvar. Krajnje ploče zatvaraju izmjenjivač. Ploče su obično izrađene iz nehrđajućeg čelika i zalemljene bakrom ili niklom (nema brtvi).

Slika 27. prikazuje izvedbu pločastog isparivača.



Slika 27. Pločasti isparivač [5]

## 5.5. Pločasti isparivač za tekućine

Oplata i okvir pločastog isparivača se sastoji od skupa modularnih ploča između kojih prolaze dvije vrste tekućina od kojih jedna predaje toplinu drugoj. Hladna i topla tekućina prolaze različitim smjerom i kanalom unutar izmjenjivača. Oplate služe kako bi odvojile hladnu i toplu tekućinu i time spriječili njihovo miješanje, ali i omogućile prijenos topline između te dvije tekućine. Oplate su valovitog oblika što uzrokuje stvaranje turbulentnog protoka što povećava prijenos topline i efikasnost izmjenjivača. Prednost pločastog izmjenjivača je ta što se rashladna površina može relativno jednostavno mijenjati ovisno o zahtjevima. Za povećavanje površine dodaje se veći broj ploča odnosno oduzima za smanjenje površine.

## 5.6. Problemi kod pločastog izmjenjivača

Kod korištenja pločastog izmjenjivača topline postoje tri problema koji se odnose na stvaranje taloga unutar izmjenjivača koji smanjuje protok i efikasnost izmjenjivača, a to su:

1. Biološki talog koji se pojavljuje kada se koristi prirodna voda (npr. voda iz rijeke). Takav talog može uzrokovati značajnu štetu, ako se ne čisti redovito.

2. Kemijski talog, odnosno kalcijev karbonat ili magnezijev karbonat setalože pri procesu hlađenja te se ta sol kristalizira na površini rashladnih ploča stvarajući talog

3. Korozija je najčešći problem kod izmjenjivača topline. Korozija se rješava korištenjem materijala koji su otporniji na koroziju, kao npr. nehrđajući čelik ili titan. Naravno cijena ovakvih materijala je skuplja.

Kako se talog unutar izmjenjivača nakuplja, efikasnost će opadati. Kako bi se to spriječilo izmjenjivači se moraju redovito tretirati s deterdžentima odnosno rastaviti i očistiti. Izmjenjivači su dizajnirani kako bi se proces čišćenja olakšao i bio što brži.

## 6. ZAKLJUČAK

Izmjenjivači topline su uređaji koji omogućuju izmjenu topline između dvije tekućine koje imaju različitu temperaturu dok ih u isto vrijeme sprječavaju da se miješaju (rekuperativni izmjenjivači topline). Izmjenjivači topline u praksi obično imaju široku primjenu, od grijanja i klimatizacijskih uređaja u kućanstvu, do kemijske obrade i proizvodnje električne energije u velikim postrojenjima. Prijenos topline u izmjenjivaču topline obično uključuje konvekciju s tekućine na stijenu i kondukciju (provođenje) kroz stjenku koja odvaja dva fluida. U analizi izmjenjivača topline, obično je prikladno raditi s srednjom logaritamskom temperaturnom razlikom, koja je ekvivalentna srednjoj razlici temperatura između dviju tekućina kroz cijeli izmjenjivač topline. Efektivnost je najvažniji čimbenik kod odabira izmjenjivača topline. Izmjenjivač topline treba biti sposoban za prijenos topline kako bi se postigla željena promjena temperature tekućine na određenom protoku.

Troškovi održavanja izmjenjivača topline također su važan čimbenik tijekom procjene ukupnog troška. Naravno i čimbenik veličine je vrlo bitan. Što je manji i lakši izmjenjivač topline, to je povoljnije s obzirom na troškove njegovog održavanja i smanjivanjem njihove veličine povećava se iskoristivost korisnog (nosivog) prostora na brodovima. Vrsta izmjenjivača topline koja će biti odabrana ovisi prvenstveno o vrsti fluida koji se koriste, zahtjevima veličina i težine i prisutnost bilo kojeg procesa promjene agregatnog stanja. Na primjer, izmjenjivač topline je pogodan da ohladi tekućinu sa plinom, ako je površina na plinskoj strani puno veća od strane tekućine. S druge strane, pločasti ili cijev u plaštu izmjenjivač topline je vrlo prikladan za hlađenje tekućina sa drugom tekućinom.

Materijali koji se koristi u izgradnji izmjenjivača topline mogu biti važan čimbenik u odabiru. Na primjer, u slučaju upotrebe korozivnih tekućina, biti će potrebno za izgradnju odabrati skupe nehrđajuće materijala poput nehrđajućeg čelika ili titana. Koeficijent prijelaza topline moguće je dodatno povećati promjenom geometrije izmjenjivača topline, npr. valovitim lamelama ili orebrenjem iza cijevi gdje se uglavnom javljaju vrtložnja i slabije je zagrijavanje zraka. Mogućnosti je mnogo i da bi se postigli što kvalitetniji rezultati, potrebno je izvršiti detaljnije usporedbe između pojedinih izvedbi izmjenjivača topline.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Načelna podjela izmjenjivača topline

Slika 2. istosmjerni izmjenjivač topline

Slika 3. protusmjerni izmjenjivač topline

Slika 4. križni izmjenjivač topline

Slika 5. Regenerativni izmjenjivač topline

Slika 6.a. Regenerator s dvije nepomične mase

Slika 6.b. Regenerator s rotirajućom masom (matricom)

Slika 7. Mješalište, kao izravni izmjenjivač topline

Slika 8. Shell and tube cijevni izmjenjivač topline

Slika 9. Spiralni izmjenjivač topline

Slika 10. Spiralni pločasti izmjenjivač topline

Slika 11. Temperaturni tok struja uzduž protustrujnog izmjenjivača topline

Slika 12. Shematski prikaz protusmjernog izmjenjivača topline

Slika 13. Dijagram ovisnosti  $F = f(P, R)$  za protusmjerni izmjenjivač topline

Slika 14. Raspodjela temperatura u kondenzatoru

Slika 15. Kondenzator s orebrenim cijevnim sekcijama

Slika 16. „Shell and coil“ kondenzator

Slika 17. Koaksijalni cijev u cijevi kondenzator

Slika 18. Kondenzator s cijevima u plaštu

Slika 19. Pločasti kondenzator

Slika 20. Protočni kondenzator s regenerativnim hlađenjem vode

Slika 21. Rashladni toranj

Slika 22. Evaporativni kondenzator

Slika 23. Suhi isparivač

Slika 24. Potopljeni isparivač s cijevima u plaštu

Slika 25. Potopljeni isparivač s eliminatorom kapljica radne tvari

Slika 26. Isparivač za hlađenje kapljevine sa suhim isparivanjem i cijevnim snopom

Slika 27. Pločasti isparivač

## LITERATURA

- [1] Orest Fabris, Osnove inženjerske termodinamike, Pomorski fakultet u Dubrovniku, Dubrovnik, 1994.
- [2] Branimir Pavković, Tehnika hlađenja, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka
- [3] ASHRAE: 2006 ASHRAE Handbook – Refrigeration, ASHRAE Atlanta GA, 2006
- [4] Grupa autora, Inženjerski priručnik, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [5] Grupa autora, Praktičar 3, Školska knjiga, Zagreb, 1973.
- [6] Antun Galović, Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [7] <mailto:https://www.slideserve.com/charliechong/understanding-heat-exchanger-the-very-basic> , veljača, 2020
- [8] <mailto:https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=28302> , veljača, 2020
- [9] <mailto:https://imptermo.hr/izmjenjivaci-topline/spiralni-izmjenjivaci-topline-s-cijevnim-snopom-iz-fleksibilnih-metalnih-cijevi/> , veljača, 2020
- [10] [mailto:https://www.researchgate.net/figure/Spiral-heat-exchanger-courtesy-of-Alfa-Laval\\_fig6\\_278695521](mailto:https://www.researchgate.net/figure/Spiral-heat-exchanger-courtesy-of-Alfa-Laval_fig6_278695521) , veljača, 2020
- [11] F. Bošnjaković, Nauka o toplini, II dio, IV izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [12] E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994
- [13] V. Soldo, Podloge za predavanja iz kolegija Hlađenje i dizalice topline
- [14] [mailto: https://www.alfalaval.com/products/](mailto:https://www.alfalaval.com/products/) , veljača, 2020
- [15] I. Balen, Podloge za predavanja iz kolegija Klimatizacija
- [16] [mailto: http://www.mesina.in/products.html](mailto:http://www.mesina.in/products.html) , veljača, 2020