

Materijali za izmjenjivače topline

Žigo, Ena

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:231:402417>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka University Studies, Centers and Services - RICENT Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

Studij politehnike

Preddiplomski sveučilišni studij politehnike

Ena Žigo

Materijali za izmjenjivače topline

Završni rad

Mentor: Doc. dr .sc. Mateja Šnajdar

Rijeka, 2022. godina

UNIVERSITY OF RIJEKA
School of Polytechnics

Undergraduate study of Polytechnics

Ena Žigo
Heat exchanger materials
Bachelor thesis

Supervisor: Doc. dr .sc . Mateja Šnajdar

Rijeka, 2022.

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

Zahvaljujem se mentorici Doc. dr. sc. Mateji Šnajdar što je prihvatila mentorstvo, utrošila svoje vrijeme, strpljenje i razumijevanje kako bi sa mnom rad dovela do savršenstva.

Posebno hvala mojim roditeljima, Franki i Tomislavu što su mi omogućili bezbrižno školovanje i zajedno s mojim sestrama, Antonijom, Miom, Karlom i Larom imali puno razumijevanja i strpljenja tijekom mog životnog obrazovanja.

Također se zahvaljujem svom zaručniku Filipu Boriću na neizmjerne podršci i razumijevanju tijekom mog studiranja.

Zahvaljujem se svim kolegama s kojima surađivala tijekom studija, a posebno hvala bratu Maji Borić što je sve ove godine muke i patnje prolazila zajedno sa mnom i što ćemo Bogu hvala završiti ovaj studij.

Ena Žigo

SVEUČILIŠTE U RIJECI
Studij politehnike
Rijeka, 17.02.2022.

Zadatak za završni rad

Pristupnik: Ena Žigo

Naziv završnog rada: Materijali za izmjenjivače topline

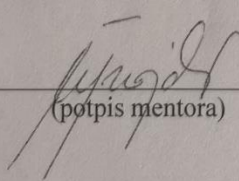
Naziv završnog rada na eng. jeziku: Heat exchanger materials

Sadržaj zadatka:

Objasniti funkciju izmjenjivača topline te napraviti pregled njihovog povijesnog razvoja. Analizirati ključne termodinamičke principe na kojima se temelji njihova primjena. Dati analizu svojstava koji se očekuju za navedenu specifičnu primjenu i dati pregled konkretnih primjera primjene u različitim područjima tehnike. Predstaviti trenutna istraživanja na području razvoja novih tipova materijala za izmjenjivače topline te potencijalne smjerove i područja njihovog razvoja u budućnosti.

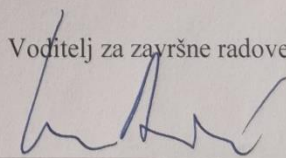
U završnom zadatku treba slijediti **Upute o izradi završnog rada.**

Mentor: Doc. dr.sc. Mateja Šnajdar Musa




(potpis mentora)

Voditelj za završne radove



Zadatak preuzet: 14. 3. 2022.



(potpis pristupnika)

Sadržaj

1. UVOD	1
1. IZMJENJIVAČI TOPLINE	2
1.1. Općenito.....	2
1.2. Podjela izmjenjivača topline.....	2
1.2.1. Rekuperativni izmjenjivači topline	2
1.2.2. Regenerativni izmjenjivači topline.....	4
1.2.3. Direktni ili izravni izmjenjivači topline	5
1.3. Vrste izmjenjivača topline	5
1.3.1. „Shell and tube“ izmjenjivač topline.....	5
1.3.2. Pločasti izmjenjivač topline	6
1.3.3. Okvirno-pločasti izmjenjivač topline (Plate and Frame)	6
1.3.4. Lamelni izmjenjivač topline.....	7
1.3.5. Spiralni izmjenjivač topline	7
3. TERMODINAMIČKI PRINCIPI PROVOĐENJA TOPLINE.....	9
3.1. Kondukcija	9
3.2. Konvekcija	10
3.3. Zračenje.....	10
4. MATERIJALI	12
4.1. Aluminij	14
4.1.1. Primjena aluminijskih izmjenjivača topline.....	15
4.2. Bakar	18
4.2.1. Primjena bakra i njegov legura.....	19
4.3. Titan	22
4.3.1. Primjena titana.....	23
4.4. Nehrđajući čelik	26
4.1. Primjena nehrđajućih čelika	28
5. NOVI MATERIJALI	30
5.1. Polimeri	30
5.1.1. Polimerni kompoziti.....	31
5.1.2. Primjena polimernih izmjenjivača topline	32
5.2. Keramika i keramički kompoziti	34
5. ZAKLJUČAK	36
LITERATURA.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela izmjenjivača topline

Slika 2. Shematski prikaz istosmjernog izmjenjivača topline

Slika 3. Shematski prikaz protusmjernog izmjenjivača topline

Slika 4. Shematski prikaz križnog izmjenjivača topline

Slika 5. Prikaz 3 osnovna načina prijenosa topline

Slika 6. Primjer radijatora a) potpuno od aluminija, b) s plastičnim spremnikom

Slika 7. Primjer aluminijskih jezgri grijača

Slika 8. Presjek plinskog bojlera

Slika 9. Presjek dizalice topline

Slika 10. Izmjenjivač topline od titana

Slika 11. Hladnjak ulja

Slika 12. Rekuperator

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled svojstava aluminija

Tablica 2. Pregled naziva i karakteristika austenitnog nehrđajućeg čelika

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina poprečnog presjeka
d	mm	Debljina materijala
dT	F, °C, K	Temperaturna razlika između fluida i površine
g	W/m^2	Gustoća toplinskog toka
h_c, h_r	$W/m^2 K$	Koeficijent prijenosa topline
k	/	konstanta
T_1	K, °C	Temperatura vrućeg predmeta
T_2	K, °C	Temperatura hladnog predmeta
t	sec, min	vrijeme
ΔT	K, °C	Temperaturna razlika
Q, q	w/m^2	Količina topline koja se prenosi

SAŽETAK

Tema završnog rada su materijali za izmjenjivače topline te njihovih karakteristika i primjena u različitim primjenama industrije. Cilj ovog završnog rada je da se predoči i pojasni što su izmjenjivači topline, koje vrste izmjenjivača topline postoje i da se objasne materijali koji se koriste za njihovu primjenu.

Izmjenjivači topline služe za prijenos topline između dva ili više medija. Svaki izmjenjivač topline karakterističan je na svoj način i ima svoja svojstva koja utječu na primjenu. Potrebno je znati za koju primjenu se koristi kako bi se što lakše odredio materijal od kojeg će biti izrađen.

Ključne riječi: izmjenjivači topline, materijali, toplina.

SUMMARY

The subject of the final paper is the material for heat exchangers and their characteristics and application in various industrial applications. The aim of this thesis is to present and explain what heat exchangers are, what types of heat exchangers exist and to explain the materials used for their application.

Heat exchangers are used to transfer heat between two or more fluids to heat or cool each other. Each heat exchanger is characteristic in its own way and has its own properties related to the application. It is necessary to know for which application it is used in order to more easily determine the material from which it will be made.

Keywords: heat exchangers, materials, heat.

1. UVOD

Izmjenjivači topline utječu na ukupnu učinkovitost postrojenja te su sastavni dio svakog proizvodnog pogona. Mogu biti zasebni uređaji poput grijača, hladnjaka, kondenzatora ali i komponenti procesne opreme.

Izmjenjivači topline pojavljuju se već oko 1880-ih godina kada je Albrecht Drackeu, (Njemačka, 1878.) patentirao pločasti izmjenjivač topline kojem je glavna primjena u industriji hrane i pića. Početkom 1900-ih otkriveni su prvi primjeri modernih i komercijalnih izmjenjivača topline. Cjevasti izmjenjivači topline razvijeni 1900-ih koriste se kao kondenzatori i grijači napojne vode u elektranama. Dolaskom 1920-ih prvi pločasti izmjenjivači topline počeli su se koristiti u prehrambenoj industriji. To je izmjenjivač topline napravljen od ploča umjesto cijevi, s dobrim učinkom prijenosa topline i kompaktne strukture. Prvi spiralni pločasti izmjenjivač topline predstavljen je u Švedskoj početkom 1930-ih, a krajem 1930-ih predstavljaju prve pločaste izmjenjivače topline za primjenu u tvornicama celuloze. Uz Švedsku, Velika Britanija je također počela koristiti metode zavarivanja za proizvodnju pločastih izmjenjivača topline od bakra i bakrenih legura za primjenu u zrakoplovstvu (avio motori). Zbog brzog razvoja zrakoplovne i svemirske tehnologije bilo je potrebno razviti učinkovite i kompaktne izmjenjivače topline. Šezdesetih godina prošlog stoljeća, kako bi se zadovoljile potrebe izmjene topline i ušteda energije u uvjetima visoke temperature i visokog tlaka, nastaju izmjenjivači topline s omotačem (školjkasti izmjenjivači).

Sredinom 1970-ih, na temelju istraživanja i razvoja toplinskih cijevi, izumljen je izmjenjivač topline s toplinskim cijevima za poboljšanje prijenosa topline. Osamdesetih godina u Kini se pojavljuje trend samostalnog razvoja tehnologije prijenosa topline, a na tržište je uveden veliki broj poboljšanih elemenata za prijenos topline, što je dovelo do razvoja izmjenjivača topline s pregradnim šipkama, visokoučinkovitih izmjenjivača topline novijih struktura, visokoučinkovitih hladnjaka, površinskih hladnjaka zraka, pločastih izmjenjivača topline, dvo-prolaznih izmjenjivača, itd. Ulaskom u 21. stoljeće, veliki broj poboljšanih tehnologija prijenosa topline primijenjen je na industrijske uređaje, dok je kineska industrija izmjenjivača topline postigla vrlo brz tehnološki napredak i veliki napredak u proizvodnji školjkastih izmjenjivača topline, učinkovitih i ekonomičnih pločastih izmjenjivača topline i visokotlačnih izmjenjivačima s navojnim prstenom velikog promjera. [1]

1. IZMJENJIVAČI TOPLINE

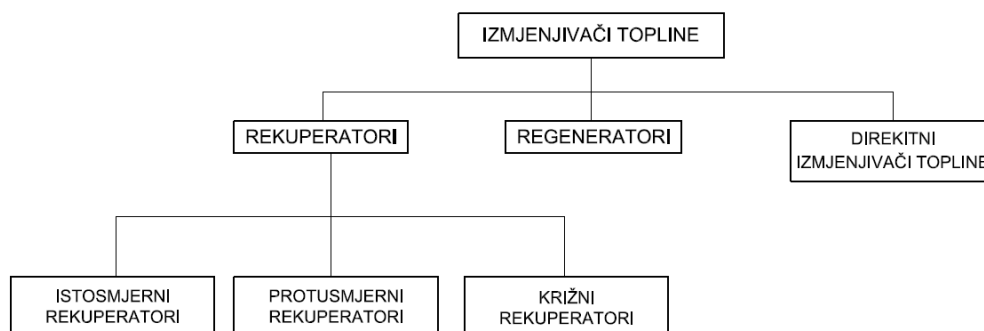
1.1. Općenito

Izmjenjivač topline je toplinski uređaj koji izmjenjuje toplinu između dvije ili više tekućina za zagrijavanje ili hlađenje jedne tekućine drugom. Kako bi se spriječio njihov izravan kontakt, tekućine u izmjenjivaču mogu biti odvojene stjenkama ili zidom, ali mogu doći i u izravan kontakt.

Izmjenjivači topline imaju široku primjenu: u postrojenjima za pripremu potrošnje tople vode, rashladnim sustavima (isparivači, kondenzatori), opremi za centralno grijanje (bojleri, radijatori), termoenergetskim postrojenjima (parni kotlovi, grijači zraka), te u kemijskoj i prehrambenoj industriji kao kondenzatori i grijači. [2]

1.2. Podjela izmjenjivača topline

Prema principu rada, izmjenjivači topline mogu se podijeliti na rekuperatore, regeneratore i direktne izmjenjivače topline. Na slici 1. nalazi se podjela izmjenjivača topline.



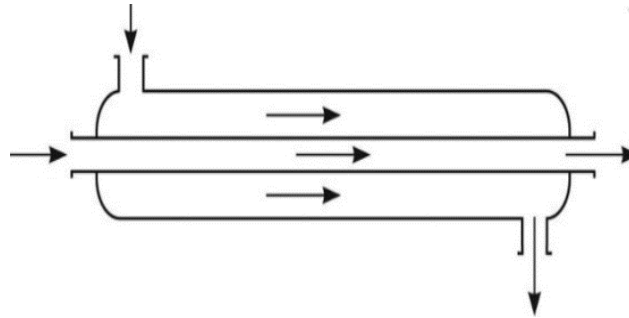
Slika 1. Podjela izmjenjivača topline [3]

1.2.1. Rekuperativni izmjenjivači topline

Rekuperativni izmjenjivač topline ili rekuperator najčešći je tip izmjenjivača topline u kojem su tekućine različitih temperatura odvojene krutim stjenkama. Toplina se prenosi prolaskom topline konvencijom (s površinom stijenke) i provođenjem (kroz stijenku).

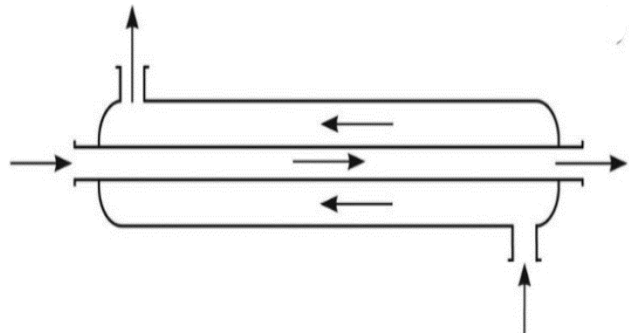
Prema konstrukciji mogu biti cjevasti, pločasti i konveksni (rebrasti), a prema međusobnom strujanju fluida dijelimo ih na istosmjerne, protusmjerne i križne rekuperatore.

- a) Istosmjerni rekuperator, koji je prikazan na slici 2. je izmjenjivač u kojem tekućine teku paralelno jedna s drugom u istom smjeru.



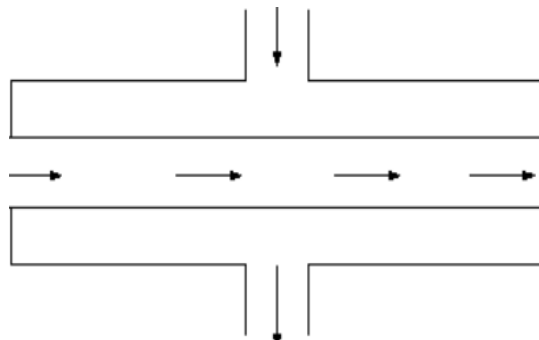
Slika 2. Shematski prikaz istosmjernog izmjenjivača topline [3]

- b) Protusmjerni rekuperator, kao što je prikazano na slici 3., je izmjenjivač u kojem tekućine teku u paralelnim, ali u suprotnim smjerovima. Ova konfiguracija toka fluida je najučinkovitija jer omogućuje maksimalnu promjenu temperature oba fluida.



Slika 3. Shematski prikaz protusmjernog izmjenjivača topline [3]

- c) Križni ili unakrsni rekuperatori, prikazan na slici 4. je izmjenjivač topline kroz koji se dva toka tekućine sijeku pod pravim kutom.



Slika 4. Shematski prikaz križnog izmjenjivača topline [3]

Iako su rekuperativni izmjenjivači topline danas najzastupljeniji, oni također imaju svoje prednosti i nedostatke. Prednost je što se mogu koristiti različiti mediji poput vode, zraka, te mogućnost razdvajanja medija, odnosno mogućnost da svaki medij teče svojim tokom bez dodira s drugim, dok su nedostaci veće dimenzije i veći pad tlaka, ali i niži stupanj iskoristivosti.

1.2.2. Regenerativni izmjenjivači topline

Regenerativni izmjenjivač topline ili regeneratore je izmjenjivač topline koji se koristi za izmjenjivanje topline između dvije struje plina kroz čvrstu tvar. U tim sustavima plin je topli i hladni tok, dok se čvrsta tvar sastoji od rotirajuće akumulirane (porozne) mase. Izmjena topline nastaje kada topla struja u jednom vremenskom intervalu dođe u dodir s akumulacijskom masom koja preuzima toplinu grijući se, a u sljedećem vremenskom intervalu akumulacijska masa dolazi do hladnije struje i predaje joj toplinu, pri čemu se hladi.

Regeneratori se mogu podijeliti u dvije skupine:

- a) Rotirajući regeneratore – izmjena topline dolazi kroz sačasti oblik akumulacijske mase koja se rotira oko vertikalne osovine. S jedne strane teče topla struja koja prenosi toplinu na rotirajuću masu, koja se pri tome hladi. S druge strane struji hladna struja koja iz akumulacijske mase upija toplinu i tako se zagrijava. Postoje dvije osnovne vrste ovog regeneratore, sorpcijski i kondenzacijski. Razlika između ova dva tipa je u tome što je u sorpcijskim regeneratorema tijelo saća presvučeno higroskopskim materijalom koji prikuplja vlagu iz mokrog toka i prenosi je na suhi mlaz, dobivajući tako osjetnu i latentnu toplinu zimi, dok se hlađenje i odvlaživanje dobiva ljeti. Kod kondenzacijskih regeneratore saće imaju glatku površinu obloženu aluminijem ili čelikom tako da se latentna toplina vraća samo zimi kada se ohladi temperatura ispod rosišta.
- b) Regeneratori s akumulirajućim pločama- je izmjenjivač topline koji se sastoji od dva seta akumulacijskih ploča. Ovi regeneratore rade tako što sustav zaklopki usmjerava povratni zrak kroz jedan paket ploča i puni ga, odnosno zagrijava i hladi, dok s druge strane preko drugog para ploča struji svježi zrak koji se grije ili hladi. Nakon nekog vremena zaklopka se okreće i počinje novi ciklus.

U usporedbi regeneratora i rekuperatora, prednost regeneratora je veći stupanj iskorištenja, te se vlaga i toplota mogu vratiti, ali nedostatak je što se izmjena topline može vršiti samo između plinova.

1.2.3. Direktni ili izravni izmjenjivači topline

U izravnom izmjenjivaču topline izmjena topline se odvija izravnim miješanjem vruće i hladne tekućine, dok se u isto vrijeme odvija prijenos topline. Protok može biti kombinacija dvaju tokova, kao što su plin-krutina, plin-tekućina, tekućina-tekućina, tekućina-krutina.

Primjeri izravnih izmjenjivača topline su rashladni tornjevi, mlazni kondenzatori, dovodni grijači.

1.3. Vrste izmjenjivača topline

U nastavku su ukratko objašnjene najčešće vrste izmjenjivača topline.

1.3.1. „Shell and tube“ izmjenjivač topline

Ovaj tip izmjenjivača topline i njegove različite konstrukcijske modifikacije su najrašireniji i najčešće korišteni izmjenjivači topline u industriji. Zbog svog oblika, školjkasto-cijevni izmjenjivači topline mogu izdržati visoke tlakove jer se sastoje od nekoliko malih povratnih cijevi smještenih između dvije cijevne ploče kroz koje se kreće primarna tekućina. Cijevni snop smješten je unutar kućišta, dok sekundarna tekućina prolazi kroz kućište i kreće se po površini cijevi. Područje izmjene topline maksimalno je povećano kako bi se povećala prenesena toplota i proizvedena energija.

Prednosti:

- Jeftiniji u usporedbi s pločastim izmjenjivačima
- Manji pad tlaka
- Ispitivanje tlaka jednostavno pa se curenje cijevi pronalazi bez napora
- Dug vijek trajanja

Nedostaci:

- Manja učinkovitost izmjene topline u usporedbi s pločastim
- Kapacitet cijevnog dijela se ne može proširiti
- Zahtjeva više prostora za razliku od pločastih izmjenjivača

Školjkasto-cijevni izmjenjivači topline izrađeni su od metala, ali za posebne primjene koje koriste farmaceutske jake kiseline mogu se koristiti i drugi materijali poput grafita i stakla. Ovi izmjenjivači topline imaju važnu ulogu u mnogim poljima kao što su brodska tehnologija, kemijska, prehrambena, naftna i plinska industrija, te se široko koriste u drugim industrijskim područjima kao isparivači i kondenzatori.

1.3.2. Pločasti izmjenjivač topline

Pločasti izmjenjivač topline koristi metalne ploče za prijenos topline između dvije tekućine. Ovu vrstu rasporeda koriste izmjenjivači topline koji koriste plin ili zrak, kao tekućine koje teku manjim brzinama.

Prednosti pločastih izmjenjivača topline :

- Jednostavni su i imaju kompaktnu veličinu
- Veća je učinkovitost izmjene topline
- Dodatni kapacitet se može proširiti uvođenjem ploča u paru
- Turbulentni tok pomaže u rušenju naslaga koje inače ometaju prijenos topline
- Održavanje i čišćenje je jednostavnije

Nedostaci :

- Vezni materijal između ploča ograničava radnu temperaturu
- Dugotrajna demontaža i montaža
- Zbog radnih uvjeta mogu ispasti zglobovi
- Različiti dijelovi rashladnog sustava izloženi eroziji

Snaga izmjenjivača topline određena je brojem ugrađenih ploča, a izbor materijala mora se provoditi ovisno o tehnološkom procesu, vrsti rashladnog sredstva u sustavu, temperaturnom opterećenju i tlaku. Ovi izmjenjivači topline obično su izrađeni od nehrđajućeg čelika i aluminija. Imaju primjenu u brodogradnji, metalurgiji, farmaceutskoj industriji, u stanovanju itd.

1.3.3. Okvirno-pločasti izmjenjivač topline (Plate and Frame)

Okvirno-pločasti izmjenjivač topline sastoji se od ploča koje su u obliku okvira pritisnute zaglavljem i spojnim šipkama.

Glavne karakteristike ovog tipa su brzo i jednostavno rastavljanje radi čišćenja i upravljanja, kako bi se modificirao toplinski protok prilagođava se promjenjivim i radnim uvjetima dodavanjem ili uklanjanjem toplinskih ploča, potencijalno su visoki troškovi zbog dizajna kalupa, preša i cijelog proizvodnog procesa, brtve ograničavaju maksimalne vrijednosti tlaka i temperature. Najčešće se koriste materijali koji su slabo prilagođeni lemljenju, poput titana.

1.3.4. Lamelni izmjenjivač topline

Lamelni izmjenjivači topline sastoje se od vanjske cjevaste školjke koja okružuje unutarnji snop elemenata (lamela) za prijenos topline. Lamele su složene jedna do druge kako bi se formirali uski kanali školjke. Umetnute su u krajnji spoj s brtvama kako bi spriječili istjecanje tekućine sa školjke na cijev ili obrnuto. Lamelni izmjenjivač topline je modificirani oblik izmjenjivača topline sa školjkom i cijevi s plutajućom glavom. Jedna tekućina teče unutar lamela, dok druga tekućina teče uzdužno između njih, bez pregrada na strani školjke.

Ovi izmjenjivači topline obično se koriste u industriji celuloze i papira gdje su potrebni veći protočni prolazi, kemijske i procesne industrije, te za druge industrijske primjene.

Prednosti lamelnih izmjenjivača topline:

- Visoka efikasnost prolaza topline
- Veće područje prolaza topline
- Lakši od izmjenjivača topline shell and tube
- Podnose visoke tlakove

Nedostaci lamelnih izmjenjivača topline:

- Zbog uskih prolaza može doći do pojavljivanja naslaga
- Često čišćenje i održavanje prolaza
- Slitine aluminijske sklone krutom lomu

1.3.5 Spiralni izmjenjivač topline

Spiralni izmjenjivači topline sastoje se od dvije relativno duge limene trake koje su spiralno omotane oko vretena kako bi se stvorio par spiralnih kanala za dvije tekućine. Kako su zatvoreni svi rubovi prolaza, svaka tekućina u uređenom kompaktnom paketu ima jedan prolaz. Sa svake strane kanala zavarena je osnovna spirala ili postavljena brtva kako bi se dobili alternativni načini rasporeda fluida. Prvi način je da oba fluida idu spiralnim protokom, a drugi način je da

jedan fluid ide spiralnim tokom, a drugi poprečnim tokom preko spirale, dok je treći način da jedan fluid ide spiralnim tokom, a drugi kombinacijom poprečnog i spiralnog toka. Cijeli ovaj spiralni sklop je smješten u cilindričnom obliku školjke koja je zatvorena sa kružnim završnim poklopcem.

Prednosti :

- Veći prijenos topline od shell and tube izmjenjivača
- Mali pad tlaka
- Dug vijek trajanja
- Lako održavanje i čišćenje jer se naslage mogu očistiti pranjem pod visokim tlakom

Nedostaci:

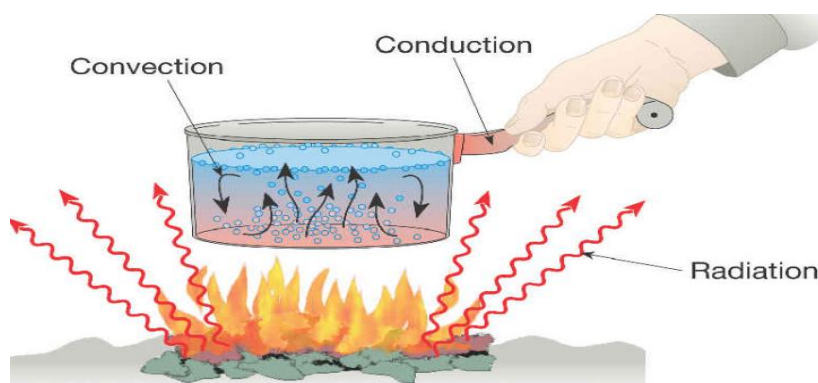
- Ograničena veličina
- Ograničena maksimalna radna temperatura
- Mali koeficijent prijenosa topline ukoliko ploče nisu valovite

Ovaj izmjenjivač topline koristi se kao reboiler ili kondenzator u celuloznoj industriji za čišćenje reljefnih para u mlinovima sulfata. Prikladan je za uklanjanje viskozne tekućine, mulja, kanalizacijskog mulja, i kontaminiranih industrijskih otpadnih voda.

3. TERMODINAMIČKI PRINCIPI PROVOĐENJA TOPLINE

Toplina je energija koja se prenosi s područja više temperature na područje niže temperature dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža. Toplina se prenosi na tri osnovna načina, slika 5.:

- Kondukcija- vođenjem čvrstih, plinovitih i tekućih materijala
- Konvekcija- strujanjem tekućih i plinovitih materijala
- Zračenje- radijacijom u plinovitim materijalima i u vakuumu.



Slika 5. Prikaz 3 osnovna načina prijenosa topline [4]

U nastavku rada objašnjena su sva tri načina provođenja topline na kojima se zasniva prijenos topline. [5,6,7]

3.1. Kondukcija

Kondukcija ili provođenje je prijenos toplinske energije između materijala koji se dodiruju jedan s drugim. Do provođenja toplinske energije između dva materijala dolazi kada se topliji predmet dovede u kontakt s hladnijim predmetom, pri čemu hladniji predmet postaje energetski topliji zbog tople energije, dok topli predmet zbog gubitka svoje topline postaje energetski hladniji. Proces traje sve dok se ne postigne toplinska ravnoteža između toplog i hladnog predmeta.

Brzinu kojom se toplinskom vodljivošću prenosi toplinska energija u materijalu dana je izrazom 1. :

$$\frac{Q}{t} = \frac{kA \Delta T}{d}$$

Gdje je :

Q -količina topline koja se prenosi ,

t - vrijeme u kojem se prenosi, min

ΔT - temperaturna razlika između jedne i druge strane materijala, ° C, K

A - Površina poprečnog presjeka, mm²

d - debljina materijala, mm

k -konstanta

3.2. Konvekcija

Konvekcija ili difuzija je prijenos toplinske energije između površine i tekućine koja se kreće pri različitim temperaturama. Do prijenosa topline dolazi kada se topli zrak u prostoriji podiže do stropa jer je topliji i manje gust, pa prenosi toplinsku energiju sudarajući se sa hladnim zrakom u prostoriji, te postaje gušći i ponovno pada na pod. Konvekcijski prijenos može biti prisilan (potpomognut) ili prirodni (slobodan). Do prisilne ili potpomognute konvekcije dolazi kada se topla voda pumpa kroz cijevi, kao u hidrauličkim sustavima grijanja, dok proces uzrokovan silama uzgona zbog razlike u gustoći, dovodi do prirodne ili slobodne konvekcija. Prijenos topline konvekcijom prvi je opisao Newton, Newtonovim zakonom hlađenja koji se može izraziti izrazom 2.:

$$q = h_c A dT$$

Gdje je :

q - prenesena topline u jedinici vremena, W/m²

h_c - koeficijent kovektivnog prijenosa topline, W/m²K

A -površina prijenosa topline, m²

dT - temperaturna razlika između površine i fluida, ° C, F

3.3. Zračenje

Zračenje ili radijacija je prijenos toplinske energije koji uključuje emisiju elektromagnetskih valova sa zagrijane površine ili predmeta. Ovaj način prijenosa toplinske energije ne zahtjeva među medij za prijenos energije vala kao što zahtijevaju prethodno spomenuti kondukcija i konvekcija. Predmeti koji imaju temperaturu iznad apsolutne nule (-273,15° C) emitiraju

toplinsko zračenje u širokom spektralnom rasponu, odnosno, svako tijelo ili predmet određene temperature zrači toplinu koja se u obliku elektromagnetskih valova širi prostorom do drugog tijela.

Prema izrazu 3 možemo prikazati gustoću toplinskog toka, koji se prenosi zračenjem :

$$q = h_r(T_1 - T_2), \text{ W/m}^2$$

Gdje je :

q -gustoća toplinskog toka, w/m^2

h_r – koeficijent prijelaza topline, $\text{W/m}^2\text{K}$

T_1 – temperatura vrućeg predmeta, K

T_2 – temperatura hladne okoline, K

4. MATERIJALI

Kako bi se izabrao primjeren materijal za svaku vrstu izmjenjivača, inženjer koji vrši odabir materijala mora poznavati aspekte koji su uključeni u konstrukciju, rad i održavanje izmjenjivača topline.

Opće karakteristike odabira najprikladnijeg materijala za određenu primjenu izmjenjivača topline uključuju sljedeće korake [8]:

1. Potrebno definirati zahtjeve izmjenjivača topline, odnosno moraju se uzeti u obzir radni parametri, npr. Koja se tekućina koristi, brzina protoka, temperatura i tlak..
2. Utvrđivanje strategije za ocjenjivanje materijala odnosi se na glavne čimbenike koje treba uzeti u obzir, a to su minimalna cijena i maksimalna pouzdanost. Ukoliko je strategija minimalni troškovi, to znači da će se koristiti jeftiniji materijali i pojavljivanje problema će se otklanjati kako se pojave. Dok bi se kod strategije maksimalne pouzdanosti koristio pouzdani materijal bez obzira na cijenu. Prije same odluke treba odvagnuti koju strategiju uzeti u odnosu na početni trošak, gubitak zbog zastoja i popravaka.
3. U trećem koraku potrebno je suziti područje na mali broj materijala. Prvo se eliminiraju materijali koji su neprikladni za taj tip izmjenjivača topline, a zatim oni koji su pretjerano skupi. Ovaj korak zahtjeva korištenje priručnika i literatura o naprednim materijalima.
4. Nakon što se suzi popis mogućih materijala, potrebno je izvršiti projektiranje izmjenjivača topline s materijalima koji se preporučuju, kako bi se utvrdio početni trošak i uvidio mogući kvar i trošak popravka
5. Za kraj ostaje kriterij donošenja konačnog odabira koji uključuje ocjenu svakog prethodno navedenog kriterija

Posebna razmatranja koja utječu na odabir materijala su [8] :

- Fizikalna svojstva- potreban je visok koeficijent topline i koeficijent toplinske ekspanzije mora biti nizak
- Mehanička svojstva- vlačna svojstva, svojstva puzanja, dinamička izdržljivost, otpornost na lom i udarna čvrstoća

- Korozivna svojstva- otpornost na koroziju zbog curenja tekućina u izmjenjivačima topline
- Proizvodnja- lakoća izrade važan je pri odabiru materijala (savijanje, spajanje, valjanje, zavarivanje, oblikovanje)
- Operativno iskustvo

Jedan od glavnih čimbenika na koje treba obratiti pozornost pri odabiru materijala je korozivna postojanost. Korozivna postojanost je svojstvo otpornosti materijala na djelovanje okolnog medija. Korozivno postojan materijal je onaj materijal kod kojeg, u jednakim vanjskim uvjetima, dolazi do manjeg intenziteta razaranja na površini ili do neželjenih promjena mikrostrukture. Korozivna postojanost se mjeri i procjenjuje putem gubitka mase, odnosno debljine i volumena, promjene mehaničkih i drugih svojstava tijekom korozivnog djelovanja, strukturnih promjena i površinskih oštećenja. [9]

4.1. Aluminij

Današnji izmjenjivači topline moraju zadovoljiti niz vrlo zahtjevnih zahtjeva. Što se tiče tehničkih karakteristika, moraju osigurati maksimalni prijenos topline, a da pri tome zadrže minimalnu veličinu. Nadalje, izdržljivost izmjenjivača topline mora biti iznimno visoka, mora osigurati besprijekoran rad tijekom cijelog radnog vijeka uz niske troškove proizvodnje. Aluminij, u svojim različitim oblicima nudi jasne mogućnosti za postizanje ovih ciljeva te je dobro pozicioniran da odgovori na izazove sve većih tržišnih zahtjeva za isplativim, energetski učinkovitim proizvodima i novim inovativnim promjenama. To je omogućeno velikom raznolikošću materijala na bazi aluminijske i oblika proizvoda koji osnažuju dizajnere sustava i proizvođače s više opcija za poboljšanje dizajna i smanjenje troškova.

Aluminij je srebrnasto-bijela, meka i živa kovina male gustoće i visoke rastezljivosti. Otporan je na djelovanje atmosferskih uvjeta, kiselina i korozije. Poznat je po svojoj električnoj i toplinskoj vodljivosti što povećava njegovu uporabu u tehnici. Zbog velikog afiniteta prema kisiku, aluminij se u prirodi ne pojavljuje u elementarnom obliku, nego u obliku spojeva sa silicijem, sumporom i kisikom. Ti spojevi su rasprostranjeni i čine značajan sastav Zemljine kore, dostupni su pa se aluminij može izdvojiti iz bilo kojeg od njih. Većinom se koristi samo boksit, koji sadrži visok postotak (oko 50%) aluminijevog-oksida uz istovremeno nizak sadržaj silicijevog-oksida. [10]

Tablica 1. Osnovna svojstva aluminijske [11]

Talište	660°C
Gustoća, pri 20	2,70 g /cm ³
Koeficijent linearnog istezanja	23,5 10 ⁻⁶ C ⁻¹
Specifični toplinski kapacitet	920 Jkg ⁻¹ C ⁻¹
Toplinska vodljivost	240 Js ⁻¹ m ⁻¹
Specifični električni otpor	0,0269 Wmm ² m ⁻¹
Modul elastičnosti	71 900 MPa

Otpornost aluminijske prema koroziji ovisi o zaštitnom oksidnom filmu, koji nastaje u dodiru s vlažnom atmosferom, slatkoj vodi i u oksidirajućim anionskim otopinama. Također, aluminij je otporan prema koroziji u destiliranoj vodi, u neutralnim elektrolitima koji sadrže kisik, a nemaju otopljene anione (kloridi) ili katione teških ili plemenitih metala.

Osim na vodu, aluminij je otporan i na kiseline, kao što su sumporna, dušična, fosforna, octena i druge organske kiseline. Postojan je i prema nafti i njenim derivatima, ali i prema ostalim suhim plinovima. Aluminij nije otporan prema živi i u otopinama njenih soli, u morskoj vodi, u solnoj kiselini i lužinama. [12]

Aluminij nudi brojne karakteristike materijala za izmjenjivače topline:

- Značajan potencijal za lagani dizajn
- Visoko automatiziran i pouzdan proizvodni proces
- Visoka toplinska vodljivost
- Izvrsna otpornost na koroziju
- Zadovoljavajuća čvrstoća za otpornost na promjene temperature i pritiska
- širok spektar aluminijskih legura i oblika proizvoda

4.1.1. Primjena aluminijskih izmjenjivača topline

Aluminijski izmjenjivači topline se primjenjuju u raznim područjima tehnike, ali najveći napredak i primjenu imaju u automobilske industriji.

Primjena aluminijske u automobilske industriji je široka. Aluminijski izmjenjivači topline koriste se za [13]:

- Sustav hlađenja motora, kao radijatori koji su potrebni za hlađenje motora s unutarnjim izgaranjem. Radijator se sastoji od aluminijske jezgre i dva spremnika koji pokrivaju krajeve radijatora i svih potrebnih priključaka i elemenata za pričvršćivanje. Spremnici su uglavnom izrađeni od plastike (npr. poliamid ojačan staklenim vlaknima), ali postoje radijatori izrađeni potpuno od aluminijske koji su znatno lakša verzija nego plastični. Na slici (6), prikazani su radijator s plastičnim spremnikom i radijator izrađen potpuno od aluminijske.



Slika 6. Primjer radijatora a) potpuno od aluminija, b) s plastičnim spremnikom [13]

- Jezgra grijača, slika, koja se sastoji od sklopa cijevi i rebara sa spremnicima na obje strane je mali uređaj nalik na radijator koji se obično postavlja ispod ploče sa instrumentima. Spremnici su izrađeni od aluminija ili plastike i opremljeni su s ulaznim i izlaznim cijevima. Cijevi se proizvode od obloženih aluminijskih traka s lemljenim punilom na jednoj strani, dok druga strana može biti obložena legurom otpornom na koroziju. Najvažniji zahtjevi za aluminij kao materijal kod jezgre grijača je da ima odgovarajuću čvrstoću, izvrsnu otpornost na vanjsku i unutarnju koroziju i dobu izvedbu lemljenja.



Slika 7. Primjeri aluminijskih jezgri grijača [13]

- Klimatizacijski sustav se sastoji od jedinice za puhanje, jedinice za grijanje i jedinice za hlađenje. Jedinica za hlađenje se sastoji od isparivača, kompresora, kondenzatora, ekspanzijskog ventila i povezanih sustava upravljanja.

- Hladnjaci zraka za punjenje motora ili intercooler je izmjenjivač topline koji se koristi za hlađenje zraka punjenja motora s unutarnjim izgaranjem. Za ovu vrstu izmjenjivača topline koriste se zavarene aluminijske cijevi s umetcima ili velike višestruke ekstrudirane cijevi s unutarnjim mrežama.
- Hlađenje dizel goriva, u nekim sustavima ne sagorijeva pa se preostali dizel treba transportirati natrag u spremnik goriva. Ekstremno vruće povratno gorivo može oštetiti spremnik za gorivo i opremu za ubrizgavanje koji su često plastični. Kako bi se spriječio ovaj učinak razvijeni su različiti dizajni hladnjaka goriva. Aluminijski profili hladnjaka su ekstrudirani i oblikovani u jednom komadu čime eliminiraju potencijalna curenja goriva i agresivnu koroziju na spojevima.

4.2. Bakar

Bakar i aluminij su dva najčešće korištena metala za izradu izmjenjivača topline. Zahvaljujući svojim svojstvima, otpornosti prema koroziji i mehaničkim svojstvima, bakar ima veoma široku primjenu. Po raznovrsnosti primjene zauzima jedno od prvih mjesta u nizu tehničkih metala. Razvojem novih tehnologija, potrebe za bakrom uvelike rastu. Uporaba bakra temelji se na njegovom izvanrednoj i izuzetnoj toplinskoj i električnoj vodljivosti. Sve je više zastupljen u modernoj industriji, a posebno mjesto zauzima kod izrade izmjenjivača topline. Čisti bakar se koristi za izradu spremnika, grijača, isparivača, cijevi i kotlova industriji. [14]

Osnovni bakar je metal kubične plošno centrirane kristalne rešetke, Boja mu je sjajno svijetlo crvena. Jedan je od najpoznatijih obojenih metala koji je u čistom stanju relativno mekan, ali vrlo žilav i savitljiv. Zbog elektrokemijskog potencijala bakar ne korodira uz razvijanje vodika i zbog toga spada u materijale koji su korozijski otporni u neoksidirajućim kiselinama. U vlažnoj atmosferi, u vodi i tlu bakar se prekriva zelenkasto plavim slojem koji ga štiti od daljnje oksidacije, taj produkt korozije naziva se patina. Patina je smjesa bakrovog hidroksida i neke soli, ovisno u kojem se mediju nalazi. [15]

Glavna svojstva bakrenih izmjenjivača topline su [16]:

Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost bakra iznosi (401 W/Km^{-1}), što je više od ostalih metala. Bakar ima bolju toplinsku vodljivost od aluminija i bolju ocjenu od nehrđajućeg čelika.

Otpornost na koroziju

Bakar ima odličnu otpornost na koroziju koja je uvelike bitna u primjenama prijenosa topline gdje su uključene tekućine (spremnici tople vode, radijatori ...). Otpornost na koroziju se može povećati nanošenjem zaštitne folije na unutarnji dio cijevi od legura bakra.

Otpornost na bioobraštanje

Bakar i njegove legure imaju visoku prirodnu otpornost na rast bioobraštanje, odnosno otpornost na rast mikroorganizama, algi i malih životinja koje se nalaze u morskim vodama.

Antimikrobna svojstva

Površine bakrene legure imaju svojstva da unište bakterije, gljivice i viruse koji se nakupljaju u klimatizacijskim sustavima. Zato površine bakrenih izmjenjivača topline budu dulje vremena

čišće od izmjenjivača topline izrađenih od drugim metala. Svojim biološkim svojstvima dodatno štite kvalitetu pitke vode od razvoja i širenja raznih bakterija

4.2.1. Primjena bakra i njegov legura

Bakrene legure koriste se kao cijevi izmjenjivača topline u fosilnim i nuklearnim elektranama, kemijskim i petrokemijskim postrojenjima, pomorskim postrojenjima i postrojenjima za desalinizaciju. Najveća uporaba cijevi od bakrenih legura je u energetskim postrojenjima. Ova postrojenja uključuju kondenzatore, grijače i hladnjake koji sadržavaju bakrene cijevi.

Prednosti bakrenih cijevi su :

- Visoka toplinska provodljivost
- Visoka otpornost na koroziju
- Prirodan materijal za transport pitke vode
- Sigurnost u upotrebi jer ne stagniraju i ne gube svojstva
- Podnose niske/visoke temperature - -200°C do 200°C
- Visoka stopa protoka zbog unutarnje glatke površine
- Cijevi se lako montiraju jer se mogu savijati i oblikovati u hladnom ili toplom stanju

Bakar- nikal je legura koja je vrlo otporna na koroziju uzrokovanu slanom vodom pa se stoga koristi za izmjenjivače topline i kondenzatore u sustavima s morskom vodom. Također svoju primjenu nalazi i u postrojenjima procesne industrije, u termoelektranama za hlađenje zraka i visokotlačnim grijačima napojne vode na brodovima.

Solarni bojleri

Solarni bojler je isplativ način proizvodnje tople vode u domovima. Bakreni izmjenjivači topline važni su u solarno toplinskim sustavima grijanja i hlađenja zbog visoke toplinske vodljivosti, otpornosti na atmosfersku i vodenu koroziju, brtvljenja i spajanje lemljenjem i mehaničke čvrstoće. Bakrena cijev prenosi toplinsku energiju iz solarne cijevi u bakreni priključak i kako otopina cirkulira kroz bakreni kanal, temperatura raste. Osim solarnih bojlera u sustavima solarne termalne vode, bakar se koristi i u spremnicima za vodu, crpnim stanicama, zajedno s pumpama i regulatorima. [16]

Plinski bojleri

Izmjenjivači topline voda-plin koji prenose toplinu iz plinovitih goriva u vodu imaju široku primjenu u stambenim i komercijalnim upotrebama u aplikacijama kotlova za grijanje vode i grijanje. Bakreni izmjenjivači topline, slika 8., korisni su u ovim jedinicama zbog visoke toplinske vodljivosti i jednostavne izrade. [16]



Slika 8. Presjek plinskog bojlera [17]

HVAC sustavi

Bakrene cijevi se koriste u većini klimatizacijskih i rashladnih sustava. Osim bakrenog sastava u klimatizacijskim sustavima koriste se aluminijska rebra, ali oni mogu sadržavati bakterije i plijesan te mogu loše funkcionirati zbog nečistoća i mirisa koji se razvijaju. Zbog bakrenih antimikrobnih svojstava, zahtjeva se korištenje bakra u klimatizacijskim sustavima za povećanje učinkovitosti, smanjenja štetnih plinova i povećanje kvalitete zraka u zatvorenim prostorima. [16]

Dizalica topline

Dizalica topline je ekološki sustav grijanja i hlađenja stambenih prostorija koji djeluje tako da za grijanje upotrebljava toplinu iz okolnog zraka, zemlje ili podzemne vode. Bakar se kod dizalice topline koristi u dovodnom i povratnom razvodniku i u cijevima zavojnica, što se može vidjeti na slici 9.



Slika 9. Presjek dizalice topline[18]

4.3. Titan

Titan i njegove legure su sve zastupljeniji materijali koji svoju primjenu mogu pripisati odličnim svojstvima. To su materijali koji se prije svega upotrebljavaju u procesima gdje do izražaja dolaze njihove karakteristike, kao što su visokočvrste strukture i primjene gdje se zahtjeva odlična otpornost na koroziju. Titan se primjenjuje u izmjenjivačima topline morske vode, slane vode, u kemijskoj, prehrambenoj, farmaceutskoj industriji.

Titan je lagan i snažan metal, otporan na koroziju. U čvrstom stanju je crn ili siv metalni prah ili masivan metal sličan čeliku. Pojavljuje se u mnogim mineralima od kojih su dva najznačajnija izvora rutil i ilmenit, koji su široko rasprostranjeni u Zemljinoj kori. Jedna od najznačajnijih karakteristika titana je da ima čvrstoću kao čelik, a u isto vrijeme je dvostruko lakši od njega. [19]

Titan i njegove legure svoju komercijalnu primjenu mogu zahvaliti nizu odličnih svojstava:

- visokoj čvrstoći
- niskoj gustoći
- dobroj žilavosti
- odličnoj korozivnoj postojanosti pri niskim i povišenim temperaturama.

Zahvaljujući svojim svojstvima titanij se kao materijali uglavnom koriste u zrakoplovnoj industriji i proizvodnji različitih projektila, gdje predstavljaju tehnički superiorniji i isplativiji konstrukcijski materijal od čelika i niklovi legura. Visoka čvrstoća pri niskoj gustoći, omogućila je uporabu titanovih materijala u izradi mehaničkih i toplinskih opterećenih zrakoplovnih dijelova, koji istovremeno moraju biti i što manje mase.

Materijali od titana su odlične korozivne otpornosti. Visoko su postojani u različitim agresivnim medijima, kao što su kloridne otopine, morska voda i kiseline, zahvaljujući vrlo stabilnoj i postojanoj, čvrsto prionjivoj oksidnoj prevlaci koja se stvara na površini metala u oksidirajućoj okolini. Ovaj oksidni sloj nositelj je otpornosti na koroziju. Ako dođe do oštećenja zaštitnog sloja, on se iznova obnavlja.[19]

Otpornost titanovih materijala na kloridne soli, pogotovo natrijev klorid, postupno opada s porastom temperature, pa iznad 260 °C može doći do pojave rupičaste korozije ili čak do pucanja pod djelovanjem visokih tlačnih naprezanja. Podložnost napetosnoj koroziji određena je kemijskim sastavom materijala i postupkom naknadne toplinske obrade. [19]

Dodatak aluminijske općenito smanjuje otpornost prema ovom obliku korozije i legure koje sadrže više od 6 % aluminijske osjetljive su na napetosnu koroziju. Dodaci kositra, magnezija i kobalta su također štetni, dok molibden, vanadij i niobij poboljšavaju postojanost prema ovom obliku selektivne korozije. Kod kontaktne korozije koja nastupa u spoju titana s drugim metalima, titan obično ubrzano ne korodira osim u reducirajućoj okolini.

U reducirajućim uvjetima, titan ima elektro potencijal sličan aluminijskom, te ubrzano korodira u spoju s više plemenitim metalima. U većini drugih otopina titan je katodni član galvanskog para koji usporeno korodira. Titan i njegove legure otporne su na koroziju erozijskog tipa. Materijali na bazi titana ne smiju se izlagati temperaturama višim od 950°C radi velikog afiniteta titanija prema kisiku, vodik, dušiku i ugljiku. Pri toplinskoj obradi ili obradi deformiranjem na zraku, površina metala prekriva se oksidnom prevlakom koju je potrebno mehanički ukloniti obradom odvajanjem čestica. Stoga se sitni dijelovi toplinski obrađuju u vakuumu ili zaštitnoj atmosferi inertnog plina.[19]

4.3.1. Primjena titana

Prednosti primjene izmjenjivača od titana su:

- titan ima visoku specifičnu čvrstoću, što je korisno za smanjenje volumena i težine opreme
- odlična otpornost na koroziju. Voda teško nagrizava titan pa se stoga stijenka cijevi može dizajnirati da bude tanja, što uvelike pomaže poboljšanju učinkovitosti prijenosa topline
- Zbog niske mogućnosti nagrizanja tekućine na titan, metoda kondenzacije na njegovoj površini je kondenzacija kap po kap koja održava površinu izmjene topline ažuriranom i uvelike doprinosi povećanju toplinskog koeficijenta.
- pružaju dug radni vijek u usporedbi s drugim materijalima izrade
- Titanska površina je glatka, stoga se lako čisti i nije lako proizvesti prljavštinu

Titanski izmjenjivači topline primjenjuju se na brodovima u grijačima isparivača, grijačima i predgrijačima slane vode za destilaciju, u kondenzatorima klima uređaja i hladnjacima motora. U nuklearnim elektranama i termoelektranama, titanski izmjenjivači topline koriste se od 1972. godine za kondenzatore parnih turbina i izmjenjivače topline vode za hlađenje opreme.

Titan se koristi u izmjenjivačima topline za [20]:

Brodski sustavi

U brodskim postrojenjima izmjenjivači topline od titana koriste se kao kondenzatori i isparivači, za hladnjake i hlađenje opreme te HVAC sustave. Titan koji se koristi za brodski izmjenjivač topline potpuno je otporan na koroziju i onečišćenja. Prijenos topline neće utjecati na rast vegetacije i skupljanje soli u teškim poslovima. Titan dopušta rad pod visokim temperaturama i visokim pritiskom. Brodski izmjenjivači topline proizvedeni su s prepoznatljivim dizajnom spiralne cijevi koji omogućava visok koeficijent prijenosa topline.

Bazenska oprema

Izmjenjivači topline za bazene dizajnirani su posebnim dizajnom cijevi, spiralno upletenim naborima na površini cijevi kako bi se iskoristila maksimalna toplina motora ili kotla. S tim se povećava ukupna toplinska učinkovitost sustava. Bazenski izmjenjivači su vrlo pouzdani, učinkoviti i isplativ način neizravnog prijenosa topline između bilo kojeg kruga tople vode ili parnog kruga.



Slika 10. Primjer izmjenjivača topline od titana [20]

Hladnjak ulja od titana

Hladnjaci ulja izrađeni su sa spiralnom cijevi. Njegova kompaktna struktura daje mu učinkovitu primjenu s velikim brzinama tekućine i niskim padom tlaka. Prikladan je za hlađenje ulja pretvarača zakretnog momenta, automatskih mjenjača i motora. Prednost ovih izmjenjivača topline je mogućnost bržeg zagrijavanja ulja što je itekako važno u hladnim klimatskim uvjetima. Snop cijevi koje se nalaze u tubi „plutaju“ pa se mogu lako ukloniti prilikom čišćenja.



Slika 11. Primjer hladnjaka ulja [20]

Nuklearna elektrana

U mnogim nuklearnim elektranama izmjenjivači od titana koriste se za kondenzatore parnih turbina i izmjenjivače topline vode za hlađenje opreme.

4.4. Nehrđajući čelik

Nehrđajući čelik ili korozijski postojan čelik je naziv za niz različitih čelika koji se koriste zbog svoje korozijske postojanosti za specifičnu primjenu.

Nehrđajući čelik je slitina željeza i najmanje 12% kroma (moderni čelici sadrže i do 30% kroma). Kako bi čelik bio korozijski postojan mora zadovoljavati još jedan uvjet, a to je postojanje homogene monofazne feritne, austenitne ili martenzitne mikrostrukture radi sprječavanja opasnosti od nastanka područja s različitim elektropotencijalom od potencijala njegove mase. Pored kroma postojanost prema koroziji povećava se dodatkom nikla, molibdena, titana i bakra. [21]

Nehrđajući čelici važni su zbog odlične korozijske i toplinske otpornosti, visokog odnosa čvrstoće s obzirom na masu, dobrih svojstava kod niskih temperatura, niske magnetne permeabilnosti i dr.

Prema mikrostrukturi nehrđajući čelik se može podijeliti u četiri grupe [22]:

1. Feritni nehrđajući čelik
2. Austenitni nehrđajući čelik
3. Duplex (austenitno-feritni) nehrđajući čelik i
4. Martenzitni nehrđajući čelik

Od navedenih grupa nehrđajućeg čelika, austenitni i duplex nehrđajući čelici nalaze svoju primjenu u izmjenjivačima topline.

Austenitni nehrđajući čelik je na prvom mjestu po ukupnoj proizvodnji i po broju različitih vrsta. Korozijski je postojan u puno različitih medija, ne može se toplinski obraditi, zadržava dobra svojstva na vrlo niskim temperaturama. Austenitni čelik ima odličnu korozijsku postojanost, obradljivost, izvrsnu zavarljivost i mehanička svojstva. Ova vrsta nehrđajućih čelika je osjetljiva na napetosnu koroziju, pa se ne primjenjuju u okruženjima s morskom vodom ili medijima koji sadrže kloride, te u jako korozivnim medijima. Primjenjuje se u uvjetima gdje se traži dobra postojanost na atmosfersku koroziju i koroziju na povišenoj temperaturi. [22]

Najčešće primjenjivi austenitni čelici i njihove karakteristike u primjeni izmjenjivača topline nalaze se u Tablica 2.

Tablica 2. Legure austenitnog nehrđajućeg čelika i njihove karakteristike [23]

LEGURA	KARAKTERISTIKE
Al Si 304	Najčešće korištena legura nehrđajućeg čelika, Vrlo otporna na oksidaciju do 400°C ,sadržava vrlo dobra mehanička svojstva
Al Si 304 L	Verzija legure Al Si 304 koja sadrži manje ugljika
AlSi 316	Postojan na zagrijavanje do 600°C. Nudi odličnu zaštitu protiv korozije te je otporan na veliku količinu kiselina.
Al Si316Ti	Verzija legure AlSi316 koja sadrži Titan i nudi još veću postojanost na zagrijavanje i otpornost na koroziju.
AlSi 310	Nudi vrlo visoku zaštitu protiv korozije i postojan je na temperaturi do 1100°C.

Duplex ili austenitno-feritni nehrđajući čelici dobili su ime po svojoj mikrostrukturi koja se sastoji od austenitne i feritne mikrostrukture. Otkriveni su 1930. godine, ali zbog problema sa zavarljivošću, krhošću i korozijskom postojanošću nisu bili naširoko primjenjivani. Svoju primjenu doživljavaju tek 80-tih godina prošlog stoljeća kada su im određeni nedostaci uklonjeni, dodavanjem dušika. Ovi čelici se primjenjuju zbog odlične korozijske postojanosti i dobrih mehaničkih svojstava. Zbog udjela ferita oni su feromagnetični i imaju višu toplinsku vodljivost od austenitnih čelika. [22]

Duplex nehrđajući čelici primjenjuju se u industriji nafte i plina za izradu crpki, destilatora, desalinizatora morske vode, cjevovoda, ventila itd. U petrokemijskoj industriji koriste se za cijevi izmjenjivača topline, cijevi dekompozera, separatora polipropilena. U brodogradnji se koriste kao dijelovi propelera, osovina, kormila, grijača napojne vode, ležajeva. U industriji celuloze i papira primjenjuje se za izmjenjivače topline za zagrijavanje kemikalija za proizvodnju celuloze, za kondenzaciju para u sustavima za kontrolu onečišćenja zraka i za povrat procesne topline. [22]

Neka od svojstava duplex čelika su [24]:

- Smanjenje težine konstrukcije
- Dobra otpornost na površinsku i pitting koroziju, na napetosnu i interkristalnu koroziju
- Dobra kombinacija mehaničkih i antikorozivnih svojstava
- Otpornost na umor i trošenje
- Deformabilna svojstva

Za odabir pravog nehrđajućeg čelika za izmjenjivače topline treba zadovoljiti četiri važna kriterija. To su otpornost na koroziju, troškovi izvedbe, mogućnost izrade i mehanička svojstva s naglaskom na prijenos topline.

4.1. Primjena nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici primjenjuju se u industriji celuloze i papira, u industriji prerade hrane, u kemijskoj industriji, kod visokotemperaturnih rekuperatora, za hlađenje statora.

Industrija celuloze i papira

Izmjenjivači topline važan su dio tvornica celuloze i papira. Uz pomoć njih tvornice su imale mnoge koristi u smislu uštede energije i zaštite okoliša. U mnogim procesima tvornica papira koristi izmjenjivače topline, osobito pločaste koji zauzimaju mali prostor, a imaju visoku učinkovitost povrata topline. Izmjenjivači topline koriste se za grijanje, predgrijavanje, hlađenje i kondenzaciju. Jedan od glavnih razloga korištenja nehrđajućih čelika u izmjenjivačima topline tvornice celuloze i papira je sprječavanje onečišćenja željezom ili promjene boje kemijske pulpe od koje se pravi papir. Nehrđajući čelici također se koriste zbog svoje otpornosti na oksidaciju pri povišenoj temperaturi, niske karakteristike iskrenje (posebno gdje su prisutne pare acetona, alkohola i drugih para) i potencijalne male težine. [25]

Prerada hrane

Kondenzatori i drugi sustavi izmjenjivača topline često su najkritičnije komponente u preradi hrane. Zavarene cijevi od nehrđajućeg čelika spašavaju mnoge pogone za preradu hrane od prekida proizvodnje i skupih popravaka zbog svoje sposobnosti na korozivna oštećenja. Materijali za izmjenjivače topline u rafinerijama šećera i šećerne trske bile su legure na bazi

bakra i ugljični čelik. Međutim, bakrene legure bile su podložne pucanju zbog amonijaka prisutnog u otopinama šećera. Kako bi se uklonili problemi, rafinerije šećera prelaze na ekonomične cijevi od nehrđajućih čelika, posebno antracitnog nehrđajućeg čelika tipa 304 ili 316 koje su otporne na prisutnost amonijaka i ugljičnog dioksida. [25]

Visokotemperaturni rekuperatori

Rekuperatori iza izmjenu topline izrađeni od nehrđajućeg čelika vraćaju korisnu procesnu toplinu iz vrućih plinova koji bi se inače pustili u atmosferu. Ovo je jako važno ne samo sa stajališta uštede goriva već u smislu kontrole onečišćenja. Najčešće korišteni nehrđajući čelici su Tip 309 ili Tip 310 za primjene na visokim temperaturama i Tip 304 za temperature od 650°C i niže. [25]



Slika 12. Rekuperator [26]

U kemijskim postrojenjima

Izmjenjivači topline koji se koriste u kemijskim postrojenjima za proizvodnju octene kiseline predstavljaju glavni trošak opreme. Ovi izmjenjivači topline uključuju kondenzatore, međuhladnjake, kotlove za otpadnu toplinu, hladnjake itd. Iako je nehrđajući čelik Tipa 304 koristan u određenim izmjenjivačima koji rade na nižim temperaturama, u industriji octene kiseline koristi se Tip 316 ili njegov konkurent Tip 316L. [25]

5. NOVI MATERIJALI

Današnja moderna tehnologija zahtjeva materijale s kombinacijama svojstava koju nemaju ni metali ni legure metala. U nastavku rada objašnjeni su novi materijali i njihova primjena u izmjenjivačima topline.

5.1. Polimeri

Polimeri su već dugi niz godina gotovo neizostavni u praktičnim dijelovima primjene materijala. To su kemijski sastojci koji se sastoje od makromolekula, a dobivaju se monomera sintetski ili preradom prirodnih tvari. U izradi proizvoda uključena je i kemijska reakcija polimerizacije sirovine, tj. monomera.

Polimeri se dijele na plastomere, duromere i elastomere. Plastomeri su mekši i taljivi pri povišenim temperaturama. Duromeri pri povišenim temperaturama ne mekšaju i ne tale se. Elastomeri mekšaju kada su kemijski umreženi ali nisu taljivi.

Toplinska i mehanika svojstva polimernih materijala važna su kada se razmatraju u novim izmjenjivačima topline. Ta svojstva uključuju toplinsku vodljivost, specifični toplinski kapacitet, maksimalnu radnu temperaturu, koeficijent toplinskog rastezanja, krajnju vlačnu čvrstoću, vlačni modul i gustoću.

Trenutno naširoko korišteni polimerni materijali u primjenama izmjenjivača topline su PVDF (poliviniliden fluorid), teflon i PTFE (politetrafluoretilen), PP (polipropilen), PE (polietilen), PC (polikarbonat), PPS (polifenilen sulfid), i PPO (polifenilen oksid). [27]

PTFE, politetrafluoretilen je bijela krutina na sobnoj temperaturi s točkom taljenja oko 320 °C. Zadržava visoku čvrstoću, žilavost i sposobnost samopodmazivanja na niskim temperaturama do -268,15 °C i dobru fleksibilnost na temperaturama iznad -79 °C. PTFE je kemijski otporan na sve osim na određene alkalne metale i sredstva za fluoriranje (ksenon difluorid i kobalt fluorid).

PP, polipropilen je netoksičan, ne stvara mrlje i ima široku primjenu u različitim primjenama uključujući pakiranje, tekstil, pribor za pisanje, laboratorijsku opremu, automobilske komponente. Unatoč krutoj strukturi polipropilen je podložan degradaciji zbog izlaganja toplini i zračenja poput onog prisutnog na sunčevoj svjetlosti.

PE, polietilen je termoplastični polimer koji se sastoji od dugih lanaca ugljikovodika. Talište prosječnog polietilena niske gustoće obično je 105°C do 115 °C. Polietilen ima izvrsnu kemijsku otpornost što znači da ga ne napadaju jake kiseline ili jake baze. Također je otporan na oksidante i redukcijske agense, ali je slabo otporan na jaka oksidirajuća sredstva, neka otapala će uzrokovati omekšavanje ili bubrenje.

PC, polikarbonat pruža dobru otpornost na kiseline, ali ima slabu otpornost na lužine i otapala. Radna temperatura mu je između -4°C i 135°C. Za razliku od većine termoplasta, PC može pretrpjeti velika plastična deformiranja bez pucanja ili lomljenja. Kao rezultat toga, može se obraditi ili oblikovati na sobnoj temperaturi.

PPS, polifenilen sulfid je poznat po svojoj izvrsnoj otpornosti na djelovanje kiselina.

PEEK, polietereterketom je polukristalna termoplastika s izvrsnim svojstvima mehaničke i kemijske otpornosti koja se zadržavaju na visokim temperaturama i preko 250°C.. Vrlo je otporan na toplinsku degradaciju, kao i na djelovanje organskih i vodenih sredina.

PSU, polisulfon je amorfna termoplastika, koja je kruta, visoke čvrstoće i prozirna, zadržavajući ta svojstva između -100°C i 150°C.. Ima vrlo visoku dimenzijsku stabilnost, promjena veličine pada kada je izložen kipućoj vodi ili zraku ili pari na 150°C. Polisulfon je jako otporan na mineralne kiseline, lužine, oksidirajuća sredstva i elektrolite.

5.1.1. Polimerni kompoziti

Nedavni razvoj znanosti o materijalima, posebice napredak u kompozitnim materijalima s polimernom matricom, ugljikovim nanocijevima i novim vlaknastim materijalima otvorio je nove mogućnosti stvaranja novih polimernih materijala, s poboljšanim svojstvima prijenosa topline koja se ne mogu postići pojedinačnim monolitnim materijalima. Posebna kemijska i fizikalna svojstva kompozitnih polimernih materijala predstavljaju obećanje za izmjenjivače topline koji se mogu prilagoditi zadovoljavanju primjene.

Kompozitni materijali izrađeni su od dva ili više materijala. Kompozit se sastoji od matrice i punila koji pojačava svojstva matrice. Glavna punila koja se koriste u strukturiranju kompozita su čestice, vlakna i ljuskice. Svojstva kompozita ovise o načinu na koji su sastojci spojen.

Kompozitni materijali mogu imati kombinirane karakteristike sastojaka ili imati drugačija svojstva po pojedinačnih sastojaka. Polimerni kompozitni materijali s poboljšanim česticama često imaju povećanu toplinsku vodljivost zbog činjenice da se u kompozitne materijale dodaju vodljive keramičke čestice kao što su aluminij, aluminijev nitrid i boroborov nitrid. Najčešće korištena vlaknasta punila za kompozite uključuju staklena, ugljična i aramidna vlakna. U usporedbi s kompozitima pojačanim česticama, kompoziti s ojačanim vlaknima uvelike se mogu prilagoditi odabranim vlaknima. Budući da je toplinska vodljivost glavno svojstvo, promjene u toplinskoj vodljivosti kompozita nisu tako dramatične kao kod električno vodljivih kompozita.

5.1.2. Primjena polimernih izmjenjivača topline

U prethodnim naslovima dan je kratak pregled karakteristika materijala polimera i polimernih kompozitnih materijala. U ovom odjeljku naglasak je na primjeni polimernog izmjenjivača topline u različitim područjima.

Sustav povrata topline

Rousse, D.R., Martin, D.Y., Therialut, R. , i ostali predstavili su teorijsku i eksperimentalnu analizu korištenja plastičnog izmjenjivača topline kao odvlaživača zraka u stakleniku za poljoprivrednu industriju. S ciljem povrata dijela topline iz ventilacijskog sustava, izmjenjivač topline je dizajniran kao valovita i fleksibilna termoplastična drenažna cijev s četiri termoplastične cijevi omotane oko središnje cijevi, kao to je prikazano na slici (). Rezultati testiranja su pokazali učinkovitost od 84% i 78% za stope promjene zraka. Zbog svojstava na koroziju, polimerni izmjenjivači topline se primjenjuju i za povrat dimnih plinova u procesima proizvodnje električne energije. Jia, L., Peng, X., Sun, J. & Chen, T. predstavili su eksperimentalnu studiju o učinku prijenosa topline mokrog sustava za povrat topline iz dimnih plinova koji koristi plastični uzdužni spiralni izmjenjivač topline. Plastični izmjenjivač topline korišten je kao predgrijač zraka čime je izbjegnuta kiselinska korozija u polju niskih temperatura za kotlove koji koriste gorivo koje sadrži sumpor. Eksperiment je pokazao da kondenzacija vodene pare značajno poboljšava karakteristike prijenosa topline, pri čemu se koeficijent prijenosa topline povećao oko 2 puta. [27]

Sustav hlađenja isparavanjem

Pescod, D. A predložio je jednostavnu metodu projektiranja za neizravni hladnjak isparavanja koristeći plastične ploče s malim izbočinama. Iako je toplinska vodljivost plastike niska, otpor prijenosu topline preko tanke plastične ploče bio bi manji od otpora između zraka i ploče u suhim uvjetima. Utvrđeno je da su predviđanja učinkovitosti pločastog izmjenjivača topline s mokrom površinom veća od eksperimentalnih podataka. Dartnall, W.J., Revel, A. & Giotis, V. predložili su neizravni sustav hlađenja isparavanjem koji koristi pločasti izmjenjivač topline. Taj izmjenjivač topline izrađen je od višeslojnih prozirnih polimernih plastičnih ploča koje su spojene pomoću procesa termoformiranja. Vanjski zrak prolazio je vodoravno kroz primarnu stranu, gdje se hladio prije nego što je doveden u klimatizacijski prostor. Autori su zaključili da u kombinaciji s konvencionalnim sustavom klimatizacije ovaj sustav hlađenja isparavanjem može učinkovito raditi u klimama s visokom vlagom. [27]

Primjena za hlađenje

Zbog dobre otpornosti na koroziju i niske cijene polimera, oni postaju alternativa drugim skupim legurama otpornim na koroziju koje se mogu koristiti u hlađenju morske vode. Grupa istraživača provela je parametarsko ispitivanje dvostruko rebrastog paralelnog protusmjernog izmjenjivača topline za ukapljivanje prirodnog plina na morskim platformama. Ukupni koeficijent učinkovitosti prototipa polimernog izmjenjivača topline procijenjen je variranjem polimernih materijala, geometrijskih parametara izmjenjivača topline. [27]

Primjena solarnog grijanja vode

Uz pokušaj zamjene tradicionalnih metalnih izmjenjivača topline jeftinijim polimernim izmjenjivačima topline u solarnim sustavima grijanja, skupina istraživača predstavila je dvije vrste izmjenjivača topline: cijev u školjki i uronjenu cijev. Izmjenjivači topline proizvedeni su ili od najlona ili od umreženom polietilena. Analiza toplinske učinkovitosti pokazala je da polimerni izmjenjivači topline mogu pružiti toplinske izlaze jednake konvencionalnim bakrenim izmjenjivačima topline. [27]

Električni uređaj za grijanje tekućine

Cjevasti izmjenjivač topline proizveden korištenjem vodljivih polimernih kompozida korišten je za zagrijavanje fluida. Dvije vrste polipropilenskih cijevi punjene su čađom i karbonskim vlaknima kako bi se poboljšala toplinska vodljivost. [27]

5.2. Keramika i keramički kompoziti

Čvrsti materijali koji obuhvaćaju upotrebu u izmjenjivačima topline mogu se podijeliti u četiri kategorije: metali, polimeri, keramike i karbonski materijali (materijali s udjelom ugljika). U mnogim primjenama izmjenjivača topline, ovi materijali se ponašaju zadovoljavajuće. Ali u nekim primjenama potrebni su napredni strukturni materijali kako bi bili jači, čvršći, lakši i otporniji na utjecaje. Kompozitni materijali nude mogućnost stvaranja novih sustava materijala koji imaju jedinstvena svojstva koja se ne mogu dobiti korištenjem homogenog materijala.

Keramički materijali su složeni kemijski spojevi, koji sadržavaju nemetalne tvari i anorganske elemente. Ovi materijali imaju široku primjenu, od izrade građevinskih opeka, crjepova, sanitarne opreme, alata za rezanje metala, vjetrobrana, kondenzatora. Većina keramičkim materijala je tvrda, porozna i lomljiva, pa se za uporabu keramike u primjeni često zahtijevaju metode ublažavanja problema povezanih s tim karakteristikama. Keramički materijali obično su ionski ili kovalentno vezani i mogu biti kristalne ili amorfne strukture. Keramika je sklona pucanju prije plastične deformacije, što često rezultira prilično niskom vlačnom čvrstoćom i slabom žilavošću materijala. Ipak, keramika pokazuje plastičnu deformaciju. U kristalnim materijalima proces deformacije odvija se sporo zbog krute strukture keramike i nedostatka sustava klizanja za pomicanje dislokacije. Za nekristalne keramičke materijale, viskozno strujanje je dominantni izvor plastične deformacije i plastična deformacija se odvija sporo.

Dvije glavne prednosti korištenja keramičkim materijala u konstrukciji izmjenjivača topline u odnosu na tradicionalnije metalne materijale su njihova temperaturna otpornost i otpornost na koroziju. Keramički materijali mogu izdržati temperature i do 1400°C što premašuje temperature tradicionalnih metalnih legura. Druga važna stavka je otpornost na koroziju i korozijsku eroziju.

Kako bi se ispunili specifični zahtjevi primjene, razvijeni su keramički matrični kompoziti (CMC) kako bi se nadvladala lomljivost i nedostatak trajnosti homogene keramike. Keramički matrični kompoziti kombiniraju ojačavajuće keramičke faze unutar keramičke matrice kako bi se stvorili materijali s poboljšanim svojstvima. Poželjne karakteristike ovim keramikama uključuju stabilnost pri visokim temperaturama, visoku otpornost na toplinski udar, otpornost na koroziju, visoku tvrdoću, nemagnetna i nevodljiva svojstva te veću svestranost u pružanju rješenja. Najčešće korišteni keramički matrični kompoziti su neoksidni CMS_{sd} (ugljik/ugljik), ugljik/silicijev karbid i silicijev karbid/silicijev karbid (SiC/SiC). [28]

Keramike i keramički matrični kompoziti obećavaju termostrukturni materijal za izmjenjivače topline (tekućina/tekućina, tekućina/plin, plin/plin) koji se koriste u teškim okruženjima kao što su raketni i mlazni motori, plinske turbine za elektrane, peći za toplinsku obradu i dr.

Korištenje keramičkim materijala u izmjenjivačima topline podijeljeno je u četiri kategorije na temelju mehanizama prijenosa topline:

1. Izmjenjivač topline tekućina-tekućina
2. Izmjenjivač topline tekućina-plin
3. Izmjenjivač topline plin-plin
4. Hladnjak

5. ZAKLJUČAK

Izmjenjivači topline od metalnih materijala su uređaji koji se koriste u mnogim industrijskim primjenama, ali napredak u procesu i tehnologiji „bacio“ je metalne izmjenjivače topline izvan granica njihovih karakteristika. Potrebni materijali za više temperature i korozivna radna okruženja povećavaju ukupne troškove i ugrožavaju trajnost sustava.

Razvojem i napretkom polimernih i keramičkih izmjenjivača topline mogu se smanjiti ili ukloniti uobičajeni problemi koji se pojavljuju kod metalnih izmjenjivača topline, poput nagrizanja lužina, klora, kiselina, mikroorganizama, bakterija i virusa, te pojavljivanja erozije i oksidacije na izmjenjivačima topline.

Polimerni i keramički materijali u današnje vrijeme su neizostavni materijali u svakodnevnom životu. Razlikuju se po svojim svojstvima i dodacima za poboljšavanje i zbog toga imaju široku primjenu u izmjenjivačima topline. U budućnosti je plan proširiti i razviti još više polimernih i keramičkim materijala kako bi se mogli postići još bolji i sigurniji materijali za prijenos topline.

LITERATURA

- [1] <https://kinam.in/evolution-of-heat-exchangers-2/>
- [2] Bertović, I.: Zagrijavanje zraka u lamelnim izmjenjivačima topline, Zagreb, 2017. [bertovic_iva_fsb_2017_predd_sveuc%20\(1\).pdf](http://bertovic.iva.fsb.2017.predd.sveuc%20(1).pdf)
- [3] Dželalija, A. : Izmjenjivači topline u brodskim rashladnim uređajima, Dubrovnik, 2020. <https://repozitorij.unidu.hr>
- [4] <https://www.stemlittleexplorers.com/hr/pokus-toplinske-kondukcije/>
- [5] <https://sh.wikipedia.org/wiki/Kondukcija>
- [6] https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html
- [7] <https://dokumen.tips/documents/kondukcija-konvekcija-zracenje.html?page=1>
- [8] Rodriguez, P.: Selection of Materials for Heat Exchangers , Egypt,1997. <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/615044>
- [9] Džoić, M. : Trajnost matrice za izvlačenje cijevi rashladnih uređaja, Zagreb, 2013. [Diplomski rad - Marko Dzoic.pdf](http://Diplomski_rad_-_Marko_Dzoic.pdf)
- [10] Ladavac, A. : Zaštitna svojstva praškaste prevlake na aluminiju, Zagreb, 2016. <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:3524/datastream/PDF>
- [11] Vaupotić, D.: Tople pukotine kod zavarivanja aluminijske legure AW6016, Varaždin, 2020. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/unin%3A3302/datastream/PDF/view>
- [12] Alar, V.: Kemijska postojanost metala, Zagreb, 2015. https://KEMIJSKA_POSTOJANOST.pdf
- [13] <https://aam-applications-power-train-7-heat-exchangers.pdf>
- [14] <https://mostarski.info/kemijski-element-bakar/>
- [15] Mašinovi, D.: Ispitivanje svojstava bakrene i aluminijske legure i njihova spoja za primjenu u elektrotehnici, Sisak, 2016. <https://repozitorij.simet.unizg.hr/islandora/>
- [16] https://hr.upwiki.one/wiki/Copper_in_heat_exchangers

- [17] <https://termometal.hr/>
- [18] <https://www.viessmann.hr/>
- [19] <https://hr.wikipedia.org/wiki?curid=16362>
- [20] https://www.termodinamicamarine.com/Termodinamica_heat_exchanger.pdf
- [21] Pavičić, K.: Utjecaj vremena žarenja na svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika, Sisak, 2019. <https://repositorij.unizg.hr/islandora/object/simet%3A267/datastream/PDF/view>
- [22] Barišić, M.: Svojstva nehrđajućeg čelika, Karlovac, 2015. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A75/datastream/PDF/view>
- [23] <https://soldometali.com/> (pogledano 30.08.2022)
- [24] Udbinac, D.: Primjena duplex čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Zagreb, 2017. <https://repositorij.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A3861/datastream/PDF/view>
- [25] https://nickelinstitute.org/media/4658/ni_aisi_9005_heatexchangers.pdf
- [26] <https://www.klima-uredaji.hr/rekuperatori/>
- [27] <https://core.ac.uk/download/pdf/162661542.pdf>
- [28] A. Sommers , Q. Wang , X. Han , C. T'Joen , Y. Park, A. Jacobi: Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systemsd- A review, 2010.