

# Toplinsko modeliranje električnih komponenti i uređaja

---

**Mamuzić, Andrea**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:987621>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH**  
**TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijskih tehnologija**

**TOPLINSKO MODELIRANJE ELEKTRIČNIH**  
**KOMPONENTI I UREĐAJA**

**Završni rad**

**Andrea Mamuzić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Andrea Mamuzić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4987, 27.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165089782
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Toplinsko modeliranje električnih komponenti i uređaja
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	U završnom radu potrebno je izložiti teoriju prijenosa topline: kondukcijom, konvekcijom i zračenjem. Opisati utjecaj temperature na životni vijek uređaja i njegovih komponenti, njihovu pouzdanost i promjenu parametara. Opisati toplinske modele električnih strojeva, komponenti i uređaja zasnovane na toplinskim poljima te na mrežnim ekvivalentima (Kirchhoffovim toplinskim shemama). Prikazanim toplinskim modelima potrebno je pokriti vladanje strojeva, uređaja i komponenti u ustaljenom toplinskom stanju te tijekom toplinske prijelazne pojave. U dogovoru s mentorom odabrati primjer za kojega će biti proveden
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	04.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	11.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	13.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 13.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Andrea Mamuzić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4987, 27.07.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Toplinsko modeliranje električnih komponenti i uređaja**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Tomislav Barić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
1.1.	Zadatak završnog rada.....	2
2.	Pregled literature .....	3
3.	Fizikalne i teorijske osnove prijenosa topline .....	4
3.1.	Važnost prijenosa topline i toplinskih proračuna .....	4
3.1.1.	Utjecaj temperature na promjenu radnog vijeka .....	4
3.1.2.	Utjecaj temperature na promjenu stupnja korisnosti.....	6
3.1.3.	Utjecaj temperature na rad električnog stroja .....	7
3.2.	Fizikalne osnove zračenja topline .....	7
3.2.1.	Elektromagnetsko zračenje .....	7
3.2.2.	Zračenje topline kao oblika EM zračenja.....	8
3.2.3.	Toplinsko zračenje.....	9
4.	Mehanizmi prijenosa topline.....	10
4.1.	Teorijske osnove.....	10
4.2.	Kondukcija .....	11
4.3.	Konvekcija .....	13
4.4.	Radijacija (zračenje).....	17
4.5.	Kontaktni otpor .....	18
4.6.	Hlađenje zrakom .....	19
5.	Hlađenje električnih strojeva.....	22
5.1.	Toplinske cijevi .....	22
5.2.	Građa toplinske cijevi.....	24
5.3.	Metode toplinske zaštite električnih strojeva .....	25
5.4.	Hlađenje električnih komponenata i uređaja.....	27
6.	Toplinski model električnog stroja .....	28
7.	Primjeri praktičnih izvedbi prijenosa ili zadržavanja topline.....	30

7.1. Rebrasti pasivni hladnjaci .....	30
7.2. Sustav hlađenja u motoru automobila .....	31
7.3. Sustav hlađenja u elektranama .....	33
8. Laboratorijska mjerenja.....	35
9. Zaključak.....	40
LITERATURA: .....	41
SAŽETAK.....	45
ŽIVOTOPIS .....	46
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA .....	47

## 1. Uvod

Svaki stroj ima određen raspon temperature pri kojim radi u normalnim okolnostima i bez nekih većih problema, a tijekom rada dolazi do izmjene topline između pojedinih dijelova. Pojava spontanog prijenosa topline u smjeru temperaturnog pada omogućava nam razne mogućnosti primjene prijenosa topline. Mijenjanjem određenih svojstava od kojih je stroj građen, te koja su temperaturno ovisna dolazi do promjene radnog vijeka stroja na koje u većini slučajeva možemo utjecati.

Postoji više mehanizama prijenosa topline koja će se opisati detaljnije u radu, a svi načini se oslanjaju na osnovno načelo da kinetička energija ili toplina želi biti u ravnoteži tj. u jednakim energetske stanjima. Također, jedna od bitnijih stvari za svaki stroj je njegovo hlađenje gdje postoji više različitih načina, a sam doprinos ima i toplinska cijev. Toplinska cijev nam služi kao komponenta za hlađenje elektroničkih uređaja. Učinkovit rad stroja omogućava toplinsko modeliranje, a projektiran je s određenim granicama temperature koje ovise o izvedbi, snazi, materijalu, kao i o mjestu gdje se nalazi.

U ovom završnom radu istražena je povezanost između temperature i životnog vijeka stroja odnosno na njegovu trajnost, kao i teorije prijenosa topline te princip hlađenja električnih strojeva. Na samom kraju navedene su i praktične izvedbe prijenosa ili zadržavanja topline, te njihovo hlađenje.

Mjerenja koja će se provesti su sa limenom posudom s vodom koja predstavlja homogeno tijelo, te će se pokušati uočiti prijelazna pojava zagrijavanja istog homogenog tijela.

### **1.1. Zadatak završnog rada**

U završnom radu potrebno je izložiti teoriju prijenosa topline: kondukcijom, konvekcijom i zračenjem. Opisati utjecaj temperature na životni vijek uređaja i njegovih komponenti, njihovu pouzdanost i promjenu parametara. Opisati toplinske modele električnih strojeva, komponenti i uređaja zasnovane na toplinskim poljima te na mrežnim ekvivalentima (Kirchhoffovim toplinskim shemama). Prikazanim toplinskim modelima potrebno je pokriti vladanje strojeva, uređaja i komponenti u ustaljenom toplinskom stanju te tijekom toplinske prijelazne pojave.

U dogovoru s mentorom odabrati primjer za kojega će biti proveden toplinski proračun. Valjanost toplinskog proračuna treba potvrditi provedbom laboratorijskih mjerenja, ili simulacijom na računalu, ili empirijskim analitičkim izrazima. Izlaganje u završnom radu je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima i shema.



## 2. Pregled literature

U literaturi [2] opisan je prijenos topline, te vrste prijenosa topline. Spomenuti su kondukcija i konvekcija, gdje kondukcija se prenosi od molekule na molekula, a konvekcija nastaje strujanjem fluida.

U literaturi [5] analiziraju se načini hlađenja električnih strojeva koji su nam ključni kako bi stroj mogao davati što veću snagu, te je analizirano više načina hlađenja. Također, u istoj literaturi su objašnjene i vrste zaštite električnih strojeva, budući da su postojenja podvrgnuta različitim utjecajima okoline.

U literaturi [27] opisane su glavne vrste konvekcije, a to su prisilna i prirodna konvekcija. Slučaj kada se prirodna i prisilna konvekcija odvijaju zajedno nazivamo mješovita konvekcija. Prirodna konvekcija nastaje zbog razlike u temperaturi, dok je prisilna konvekcija vrsta prijenosa topline u kojoj se kretanje medija inicira vanjskim uređajima, poput pumpi, kompresora i sličnih sredstava.

U literaturi [31] imamo prikaz slike fizičkog kontakta koja nam prikazuje kontaktni otpor, u slučaju da je savršen kontakt onda se kontaktni otpor približava nuli i ne postoji razlika u temperaturi, a kod nesavršenog kontakta nastaje razlika u temperaturi.

U literaturi [34] saznajemo na koji način toplinska cijev funkcionira, te od čega je građena. Svaka komponenta ima bitnu ulogu, te je svaka posebno opisana. Glavni zadatak toplinske cijevi je prijenos topline od izvora topline do hladnjaka, a može prenijeti puno topline iako je temperaturna razlika minimalna.

U literaturi [35] opisuje se sustav toplinske zaštite koja sadrži dvije glavne jedinice, a to su jedinica za nadzor i izvršna jedinica. Izvršna jedinica sadrži elektromehaničke i logičke blokove, dok ključni problemi sustava za toplinsku zaštitu leže u implementaciji nadzorne jedinice.

### **3. Fizikalne i teorijske osnove prijenosa topline**

#### **3.1. Važnost prijenosa topline i toplinskih proračuna**

Termodinamika je grana fizike koja proučava izmjenu topline i prijenos, kao i utjecaj temperature, te opisuje osnovne fizičke veličine povezane s prijenosom topline [1].

Pojava spontanog prijenosa topline odnosi se na proces u kojem toplina prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature, slijedeći smjer temperaturnog pada [2]. Igra ključnu ulogu u raznim industrijama, uključujući inženjerstvo, proizvodnju, pa čak i svakodnevni život. Neki od primjera primjene prijenosa topline: izmjenjivači topline, hlađenje električnih strojeva, klimatizacija prostora, medicinska industrija za očuvanje temperature tkiva ili organa, itd. [3].

Uz pomoć Kirchoffovih toplinskih shema, odnosno Kirchoffovih električnih shema računamo toplinske otpore koji modeliraju prijenos topline. Toplinski otpor je fizikalna veličina koja opisuje opiranje tijela prijenosu topline, a točno računanje je teško jer je ovisi o materijalu, strukturi i drugim elementima. Što je veći toplinski otpor, manji je prijenos topline. Ključnu ulogu ima u razvoju i poboljšanju sustava upravljanja toplinom namijenjenih izbjegavanju pregrijavanja i povećanju energetske učinkovitosti [4].

##### **3.1.1. Utjecaj temperature na promjenu radnog vijeka**

Zagrijavanje stroja i njegovih komponenti uzrokovano je radom stroja. Promjenom kemijskih, električnih i mehaničkih svojstava od kojih je stroj građen, te koja su temperaturno ovisna, dolazi do promjene radnog vijeka stroja [5].

Analiza utjecaja navedenih karakteristika na radni vijek stroja temelji se na razmatranju pojedinačnih utjecaja promjena u ovisnosti o temperaturi na radni vijek stroja. Ova analiza se zasniva na empirijskim izrazima, dok se analitički proračuni rijetko provode [5].

##### **Utjecaj starenja materijala na promjenu radnog vijeka**

Pod pojmom starenja materijala podrazumijevamo promjenu njegovih fizikalnih, kemijskih i drugih svojstava uslijed protoka vremena. Kod svakog materijala koji se nalazi na termodinamičkoj temperaturi iznad apsolutne nule, odnosno kod kojeg ne postoji mehanizam regeneracije, tijekom određenog vremena odvijaju se kemijski procesi koji mijenjaju početni sastav samog materijala, pa dolazi i do promjene njegovih fizikalnih, kemijskih i drugih svojstava [5].

Kemijske reakcije su sve brže što je temperatura viša, pa tako dolazi brže do tzv. starenja materijala, pa dolazimo do zaključka da „starenje“ materijala ovisi o temperaturi. Dozvoljene maksimalne temperature određene su propisima, a ovise i o kvaliteti i klasi izolacije, pa postoje određene temperature kod kojih kemijske reakcije se mogu odviti dovoljno brzo da budu vidljive golim okom kao što je topljenje, isparavanje, itd. [5].

Općenito se smatralo da do neke određene granične temperature, svaka izolacija može beskonačno dugo izdržati grijanje, ali da će relativno brzo dotrajati ako se ta temperatura prekorači. Međutim, ovo mišljenje nije odgovaralo stvarnosti, zbog čega je 1930. godine uveden pojam „životni vijek izolacije“ kao veličine koja ovisi o temperaturi [5].

Na osnovu velikog broja pokusa provedenih na transformatorima, američki znanstvenik Montsinger postavio je jednadžbu koja opisuje ovisnost životnog vijeka o temperaturi [5]:

$$Z = Z_0 \cdot 2^{\frac{-(\vartheta - \vartheta_0)}{\Delta_0}}, \quad (2-1)$$

gdje je [5]:

- $\vartheta$  – temperatura materijala,
- $\vartheta_0$  – temperatura za koju materijal ima referentni životni vijek,
- $Z$  – životni vijek,
- $Z_0$  – referentni životni vijek,
- $\Delta_0$  - povišenje ili sniženje temperature pri kojem se životni vijek smanjuje na polovicu ili se udvostručuje u odnosu na referentni vijek.

#### Utjecaj temperature na svojstva materijala

Često se susrećemo sa problemom trošenja materijala, a pod tim smatramo dugotrajne fizikalne i kemijske procese. Zbog utjecaja temperature dolazi do promjena kao što su [5]:

- Promjena stupnja djelovanja – Niti jedan stroj ne može postići veću učinkovitost od stroja koji radi prema Carnotovom ciklusu, niti može potpuno pretvoriti svu toplinu u mehanički rad.

- Promjena otpora – otpornost materijala varira s promjenom temperature: kod metala, otpor se povećava s porastom temperature, dok kod nemetala otpor opada s porastom temperature.
- Promjena dimenzija – dolazi do promjene stanja materijala, poput linearne i volumenske rastezljivosti, kao i do promjene mehaničkih svojstava, uključujući čvrstoću materijala
- Promjena magnetskih svojstava – Povećanjem temperature dolazi do promjene u magnetizaciji, pri čemu se gustoća magnetskog toka smanjuje za istu jačinu magnetskog polja.
- Promjena mehaničkih svojstava – s porastom temperature, naprezanje materijala opada, dok istežanje raste.

### 3.1.2. Utjecaj temperature na promjenu stupnja korisnosti

Promjena temperature utječe i na stupanj djelovanja stroja, te se lako može izraziti općom formulom na primjeru Carnotova procesa toplinskog stroja, kod kojeg promjena temperatura utječe i na stupanj djelovanja. Stupanj djelovanja toplinskog stroja, koji radi između dvije energetske razine, definiran je pomoću apsolutne temperature [6]:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}, \quad (2-2)$$

gdje je:

- $\eta$  - korisnosti,
- $T_h$  - viša temperaturna razina (K),
- $T_c$  - niža temperaturna razina (K) [6].

Iz izraza (2-2) možemo vidjeti da ukoliko želimo što viši stupanj djelovanja, temperatura  $T_c$  mora biti što niža, odnosno za učinkovitost od 100 %, ona bi morala iznositi 0 K, što je praktički nemoguće izvesti, pa je stupanj djelovanja stroja uvijek manji od 100 %.

### 3.1.3. Utjecaj temperature na rad električnog stroja

Kako temperatura raste, naprezanje materijala se smanjuje, dok istežanje materijala raste. Ova toplina uzrokuje zagrijavanje stroja, najprije se zagrijavaju dijelovi stroja na mjestima gdje toplina nastaje, a zatim se prijenosom topline zagrijavaju i drugi dijelovi stroja. Toplina se potom odvodi sa stroja prema okolini i sredstvima za hlađenje. Za računanje prenesenih toplinskih učinaka i promjena temperature koriste se zakoni za prijenos topline, uključujući kondukciju, konvekciju i zračenje (radijaciju) [5].

Najveći toplinski učinci generiraju se u namotajni vodič i prenose na njihovu izolaciju. Iz razloga što su izolacijski materijali namota manje ili više neotporni na povišene temperature, temperatura namota mora se održavati ispod određene granice putem konstruktivnih mjera i hlađenja stroja [5].

### 3.2. Fizikalne osnove zračenja topline

Zračenje izražava toplinski prijenos elektromagnetskim zračenjem između površina različitih temperatura koje su odvojene medijem koji omogućuje toplinski prijenos zračenjem [7]. Intenzitet toplinskog zračenja ovisno je o valnoj duljini, strukturi materijala površine sa koje se emitira energija kao i o temperaturi, a najveći dio zračenja nalazi se u infracrvenom dijelu spektra.

U ovom završnom radu proizvoljno je napravljena podjela teorije na: elektromagnetsko (EM) zračenje, zračenje topline kao oblika EM zračenja, te toplinsko zračenje.

#### 3.2.1. Elektromagnetsko zračenje

Energija isporučena sustavu uzrokuje promjene na nivou atoma i molekula, čime se podižu na uzvišeni energetske stupanj. Zbog prirodne sklonosti molekula da se vrate na nivo niže energije, dolazi do emisije energije, što rezultira elektromagnetskim zračenjem. To zračenje obuhvaća sve oblike energije koji se prenose valovima, poput svjetlosnog, toplinskog, X-zračenja, radio valova, ultraljubičastih i mikrovalova [7]. U okviru kvantne teorije, elektromagnetsko zračenje predstavlja strujanje fotona kroz prostor, pri čemu su fotoni energetske paketi koji se kreću brzinom svjetlosti [8].

Opća svojstva svih elektromagnetskih zračenja:

- EM zračenje može putovati kroz prazan prostor dok većina drugih valova mora putovati kroz neku vrstu tvari.
- Brzina svjetlosti je uvijek konstanta
- Valne duljine se mjere između udaljenosti vrhova ili dolina [9].

J.C. Maxwell izradio je znanstvenu teoriju za prikaz elektromagnetskih valova. Primijetio je da se električna i magnetska polja mogu i u elektromagnetske valove, te je odnos između magnetizma i elektriciteta objasnio Maxwellovim jednadžbama [10].

Prema Maxwellovim jednadžbama, magnetsko polje stvara vremenski promjenjivo električno polje i obrnuto. Kao što oscilirajuće električno polje stvara oscilirajuće magnetsko polje, magnetsko polje zauzvat stvara oscilirajuće električno polje itd. Ova oscilirajuća polja zajedno tvore elektromagnetski val.

Prema teoriji polja i matematički iskazanim Maxwellovim jednadžbama uzrok EM zračenja je svaka akceleracija ili deakceleracija nositelja naboja (proton, elektron, ion, nabijena čestica). Teorijom polja nije moguće objasniti neke jednostavne pojave vezane uz EM zračenje kao na primjer da svaki elektron u orbiti atoma zbog kružno eliptičnih putanja (promjene smjera kretanja) podvrgnut je akceleriranju, te bi morao zračiti EM zračenje u okolni prostor. Takvim zračenjem koje bi imalo kontinuirani spektar gubio bi energiju, te bi se u konačnici spojio s jezgrom atoma. EM spektar, prema teoriji polja, pri prolasku iz više orbite u nižu orbitu je kontinuiran, a EM spektar kojeg emitiraju elektroni je diskretan. Ono što je zajedničko u obje teorije je električni naboj [11].

#### **3.2.2. Zračenje topline kao oblika EM zračenja**

Detaljnije stvaranje umne predodžbe o zračenju topline kao obliku (EM) zračenja određenih svojstava (frekvencije, oblika spektra, itd.) započinje razlikovanjem od ostalih vrsta EM zračenja (po frekvenciji, obliku spektra i uzrocima).

Kada EM zračenje udari u materiju, stvara osciliranje nabijenih čestica i apsorpciju energije. Ova energija može se ponovo zračiti i pojaviti kao raspršeno ili reflektirano zračenje, ili može postići i toplinsku ravnotežu i manifestirati se kao toplinska energija ili kao kinetička energija unutar materijala. Bilo koja vrsta EM energije može se pretvoriti u toplinsku energiju prilikom interakcije s materijom. EM zračenje unutar neprozirne šupljine u toplinskoj ravnoteži predstavlja oblik toplinske energije, pri čemu je entropija zračenja maksimalna [12].

#### 3.2.3. Toplinsko zračenje

Toplinsko zračenje je proces u kojem energija, u obliku EM zračenja, emitira zagrijana površina u svim smjerovima i putuje izravno do svoje točke apsorpcije brzinom svjetlosti, te ne zahtijeva posredni medij da ga nosi. Svaka tvar koja je zagrijana na temperaturu iznad apsolutne nule emitira toplinsko zračenje, a svaka tvar zagrijana na temperaturu iznad termodinamičke nule sadrži čestice koje imaju kinetičku energiju, a koje su u međudjelovanju jedna s drugom [13].

Toplinsko zračenje pokriva raspon valnih duljina od otprilike 0,75  $\mu\text{m}$  do 1000  $\mu\text{m}$ . Temperatura nekog tijela ovisna je o utjecaju drugih tijela iz okoline. Kada energija dođe u kontakt s određenim objektom, dio nje se reflektira, dio se apsorbira, a dio prolazi kroz objekt [14].

Spektar toplinskog zračenja obuhvaća dio frekvencijskog pojasa elektromagnetskog spektra koji uključuje infracrveno, vidljivo i ultraljubičasto zračenje [15]. Pretpostavlja se da su toplinska zračenja za većinu čvrstih tijela i tekućina površinski fenomen iz razloga što zračenja koja emitiraju unutarnje molekule snažno apsorbiraju druge molekule i neće reagirati s okolinom. Osobine toplinskog zračenja ovise o različitim osobinama površine zagrijanog tijela iz kojeg potječu, a to su temperatura tijela, spektralna apsorptivnost, te spektralna emisijska snaga. Dobri emiteri su dobri apsorberi. Kad god govorimo o toplinsko zračenju moramo znati o crnim tijelima, a crna tijela su materijali koji mogu apsorbirati sva zračenja koja padaju na njih [16].

Razlika između pojmova „toplinsko zračenje“ i „infracrveno zračenje“ postoji. „Toplinsko zračenje“ je elektromagnetsko zračenje bilo koje frekvencije koje nastaje procesom toplinske emisije, dok je „infracrveno zračenje“ elektromagnetsko zračenje s frekvencijom u rasponu od 0,3THz do 400THz koje nastaje bilo kojim procesom [17].

## 4. Mehanizmi prijenosa topline

Mehanizmi prijenosa topline su načini na koje se toplinska energije prenosi između objekata, a svi se oslanjaju na osnovno načelo da kinetička energija ili toplina želi biti u ravnoteži odnosno u jednakim energetske stanjima [18]. Prijenos mase, prijenos topline i mehanički rad su tri glavna načina na koje se energija može razmjenjivati između sustava. Toplina se može definirati kao promjena toplinske energije zbog temperaturne razlike između sustava, a mehanički rad se definira kao promjena potencijalne ili kinetičke energije (veća i bolje organizirana verzija toplinske energije). Toplina se izmjenjuje između sustava kada među njima postoji temperaturna razlika tj. sve dok sustav ne postigne ravnotežu s ostalima [19].

### 4.1. Teorijske osnove

Temperatura je jedna od osnovnih fizikalnih veličina u međunarodnom sustavu jedinica, koja opisuje sposobnost tijela ili tvari i toplinsko stanje da dođe do promjene topline. Oznaka za temperaturu je T, a najčešće korištene mjerne jedinice su K (kelvin) i °C (stupanj Celzijev), pri čemu vrijedi sljedeća relacija [20]:

$$T(\text{K}) = 273,15 + t (\text{°C}) \quad (4-1)$$

Temperatura od 0K ili – 273,15 °C je temperatura pri kojoj prestaje kretanje čestica i naziva se apsolutnom nulom [20].

Toplina je fizikalna veličina koja predstavlja energiju prenesenu s tijela na višoj temperaturi na tijelo na nižoj temperaturi. Toplina se označava sa Q, a mjerna jedinica za toplinu je džul (J). Količina topline koja se izmjenjuje pri dodiru dva tijela koja su različitih temperatura ovisi o toplinskom kapacitetu tijela C, odnosno o masi tijela m, o specifičnom toplinskom kapacitetu koji se označava sa c materijala od kojeg je tijelo sastavljeno, i temperaturnoj razlici  $\Delta T$  [21].

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (4-2)$$

Toplinski kapacitet je fizikalna veličina koja opisuje sposobnost tijela da mu se pri primanju ili predaji topline mijenja temperatura. Oznaka za toplinski kapacitet je C, a mjerna jedinica je džul po kelvinu (J/K).



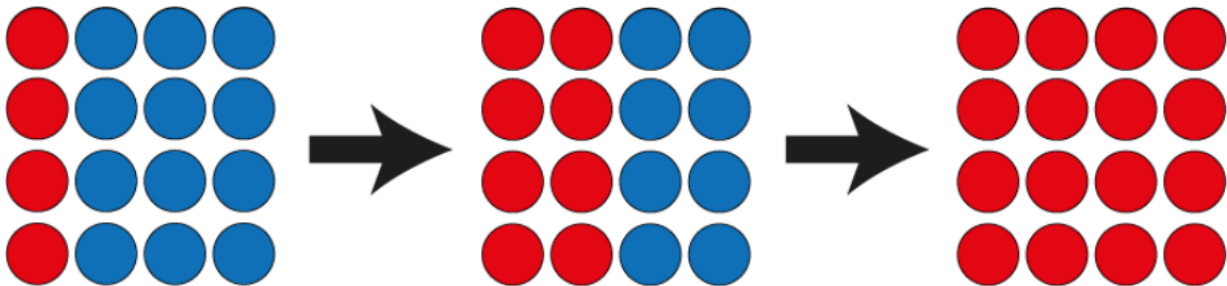
Jednaka je količniku topline  $Q$  predane okolini hlađenjem ili dovedene zagrijavanjem i promjene temperature  $\Delta T$ .

$$C_t = \frac{Q}{\Delta T} \quad (4-3)$$

Toplinski kapacitet ovisi o masi tijela i o materijalu od kojeg je napravljeno tijelo, a često i o strukturi tijela [22].

#### 4.2. Kondukcija

Kondukcija je toplinski prijenos koji se odvija u kontaktu dva tijela ili unutar elemenata istog tijela koji imaju različite temperature, putem susjednih molekula koje titraju različitim brzinama oko svojih ravnotežnih položaja. Kinetička energija molekula raste s porastom temperature tvari, stoga kondukcija predstavlja prenošenje kinetičke energije s jedne molekule na drugu (Sl. 4.1.) [2].



Slika 4.1. Prijenos topline kondukcijom.

Molekule u toplijem dijelu objekta vibriraju brže nego molekule u hladnijim dijelovima. Molekule koje se kreću brže prenose dio energije svojim susjedima koji se kreću sporije odnosno prijenos topline kroz objekt. „Stabilno stanje“ se postiže kada se toplina koja ulazi u objekt s jedne strane uravnoteži toplinom koja se emitira s druge strane, a tijekom cijelog vremenskog razdoblja toplina objekta ostaje konstantna. Plinovi nisu vodljivi, dok su metali vrlo vodljivi [24].

Dva mehanizma objašnjavaju kako se toplina prenosi kondukcijom: sudar čestica i vibracija rešetke. Provođenje kroz čvrste tvari događa se kombinacijom dvaju mehanizama: toplina se provodi kroz stacionarne tekućine prvenstveno molekularnim sudarima. U čvrstim tijelima atomi su međusobno povezani vezama, a analogno i oprugama. Kada postoji temperaturna

razlika u krutom tijelu, vruća strana krutog tijela doživljava snažnija atomska kretanja, te se vibracije preko opruga prenose na hladniju stranu krutine. Na kraju postižu ravnotežu, gdje svi atomi vibriraju jednakom energijom [25].

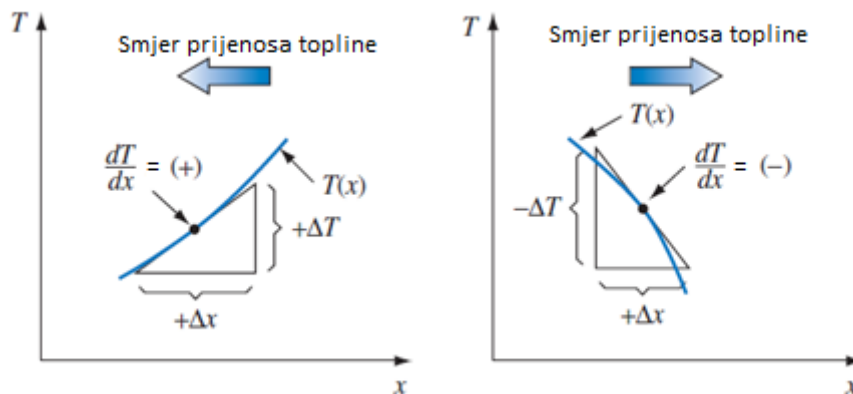
Kad god postoji temperaturni gradijent u čvrstom mediju, toplina će teći iz područja više temperature u područje niže temperature. Brzina prijenosa topline uzrokovana kondukcijom,  $q_k$ , proporcionalna je temperaturnom gradijentu  $\frac{dT}{dx}$  kroz koji se toplina prenosi [28].

$$q_k \sim A \frac{dT}{dx} \quad (4-4)$$

U ovom odnosu,  $T(x)$  je lokalna temperatura, a  $x$  je udaljenost u smjeru protoka topline. Stvarna brzina protoka topline ovisi o toplinskoj vodljivosti  $k$ , što je fizičko svojstvo medija. Za provođenje kroz homogeni medij, brzina prijenosa topline tada je [28]:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx}. \quad (4-5)$$

Znak minus posljedica je drugog zakona termodinamike, koji zahtijeva da toplina teče u smjeru od više prema nižoj temperaturi. Kako se može vidjeti prema slici 4.2 [28], s porastom vrijednosti  $x$ , temperatura opada, a onda će temperaturni gradijent biti negativan. Stoga, ako prijenos topline u pozitivnom smjeru  $x$  mora biti pozitivna količina, onda mora biti negativan predznak umetnut na desnu stranu jednadžbe [28].



Slika 4.2. Predznak u jednadžbi (4-5) koji je ovisan o smjeru toplinskog protoka

Kako vidimo prema Fourierovom zakonu (4-5) možemo izraziti toplinsku kondukciju na sljedeći način [28]:

$$k \equiv \frac{q_k/A}{|dT/dx|} \quad (4-6)$$

Mjerna jedinica toplinske kondukcije biti će W/(m K), jer se površina A procjenjuje u m<sup>2</sup>, toplinski tok  $q_k$  se procjenjuje u W, x u metrima i temperatura T u K.

### 4.3. Konvekcija

Konvekcija je prijelaz topline koji nastaje usmjerenim gibanjem, tj. strujanjem fluida. Ovaj proces nastaje kada fluid, u dodiru s izvorom topline, postane zagrijan, smanji mu se gustoća i počne se kretati prema gore, suprotno od smjera gravitacije, te se udaljava od izvora topline. Proces se odvija u protoku tekućina i plinova, gdje postoji termalna ravnoteža unutar česticama, a temelji se na mehanizmu provođenja [2].

Postoje glavne vrste konvekcije:

- Kada toplina uzrokuje kretanje fluida putem širenja i sile uzgona, pri čemu se toplina prenosi tim kretanjem fluida, taj proces se naziva prirodna konvekcija.
- Kada toplina uzrokuje kretanje fluida zbog širenja i sile uzgona, pri čemu se toplina prenosi tim kretanjem fluida, taj proces naziva se prirodna konvekcija. Prisilna konvekcija, s druge strane, nastaje kada se fluid aktivno pomiče uz pomoć vanjskih sredstava, kao što su pumpe ili ventilatori, kako bi se poboljšao prijenos topline.

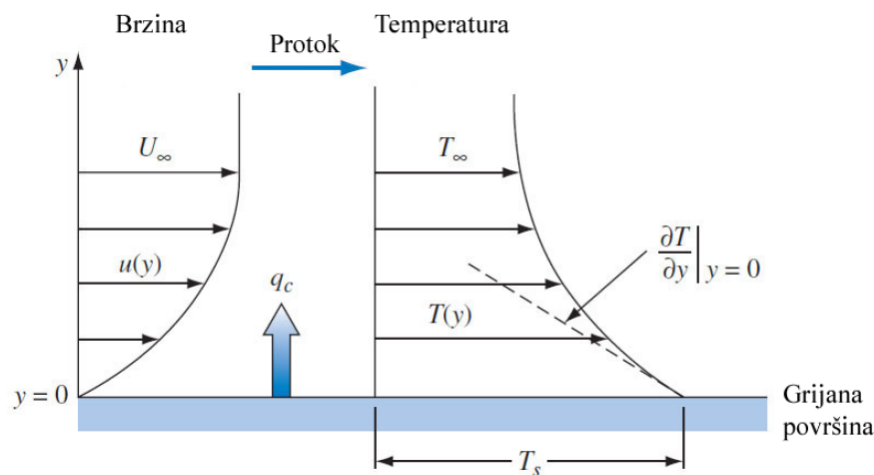
Ove dvije vrste konvekcije mogu se odvijati zajedno, pri čemu se nazivaju mješovitom konvekcijom.

Prirodna konvekcija nastaje uslijed temperaturne razlike između dvaju mjesta unutar fluida, pri čemu je brzina strujanja relativno mala. Kada se toplina prenosi kroz fluid koji se kreće zbog uzgona izazvanog zagrijavanjem i promjenom gustoće tog fluida, taj proces nazivamo prirodnom konvekcijom. Kao najpoznatiji primjer može se navesti kotlove za toplu vodu. Ovakvi

kotlovi obično imaju ulaz hladne vode koja se mora zagrijati sa donje strane, a zagrijana voda se potom kreće prema gornjoj stijenci kotla dok se ne postigne željena temperatura [27].

Prijenos topline u kojem gibanje medija uzrokuje vanjski uređaj naziva se prisilna konvekcija, što uključuje upotrebu pumpi, lopatica turbine, kompresora i sličnih uređaja. Inženjeri koji projektiraju ili analiziraju izmjenjivače topline, cijevne protoke i slične uređaje najčešće se susreću s prisilnom konvekcijom. Međutim, u svakoj situaciji koja uključuje prisilnu konvekciju, može se pojaviti i prirodna konvekcija u manjoj mjeri. U nekim slučajevima količina prirodne konvekcije može biti zanemariva, dok u drugim slučajevima nije zanemariva, što dovodi do procesa poznatog kao mješovita konvekcija [27].

Na slici 4.3. možemo vidjeti prikaz ploče na površinskoj temperaturi  $T_s$  i fluid na temperaturi  $T_\infty$  koji teče u paraleli sa pločom. Kao posljedica viskoznih sila, brzina tekućine bit će nula na stijenci i porast će na brzinu fluida  $U_\infty$  kao što je prikazano [28].



**Slika 4.3.** Raspodjela temperature i brzine prilikom prijenosa topline konvekcijom s zagrijane površine na fluid

Možemo zaključiti da prijenos topline konvekcijom zavisi o brzini fluida, njegovoj viskoznosti, gustoći, kao i o toplinskim svojstvima fluida, poput specifične topline i toplinske vodljivosti. U prisilnoj konvekciji, brzina fluida je obično regulirana pomoću pumpi ili ventilatora i može se izravno mjeriti. Nasuprot tome, u prirodnoj konvekciji, brzina fluida ovisi o temperaturnoj razlici između fluida i okolne površine, kao i o koeficijentu toplinskog širenja fluida. Brzina prijenosa topline konvekcijom može se izračunati [28]:

$$q_c = \bar{h}_c A \Delta T, \quad (4-7)$$

gdje su:  $A$  površina zagrijane ploče,

$\bar{h}_c$  koeficijent konvekcije,

$\Delta T$  razlika temperature fluida i površine na određenoj udaljenosti.

Jednadžbu (4-7) predložio je znanstvenik Isaac Newton. Primjećujemo da brojčana vrijednost  $\bar{h}_c$  u sustavu ovisi o brzini, fizikalnim svojstvima fluida i geometriji površine. S obzirom na to da ove količine nisu nužno konstantne na površini, koeficijent konvekcijskog prijenosa topline također može varirati od točke do točke. Iz tog razloga moramo razlikovati lokalni i prosječni koeficijent prijenosa topline konvekcijom. Izrazom (4-8) definiran je lokalni koeficijent [28]:

$$dq_c = h_c dA (T_s - T_\infty), \quad (4-8)$$

gdje je:  $A$  zagrijana površina,

$T_s$  temperatura određene zagrijane površine,

$T_\infty$  temperatura zraka koja je ustaljena,

$\bar{h}_c$  koji možemo definirati sljedećim izrazom [28]:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A} \iint_A h_c dA, \quad (4-9)$$

Možemo uvidjeti da koeficijenti konvekcije ovise o dodirnoj površini i o parametrima fluida, što otežava njihovo precizno određivanje. Međutim, mogu se upotrijebiti prosječne vrijednosti prikazane u tablici 4.1. [28].

**Tablica 4.1.** Koeficijent konvekcije za varijante faze fluida

		$\bar{h}_c$ [W/m <sup>2</sup> K]
<b>Slobodna konvekcija</b>	Plinovi	5-30
	Tekućine	20-1000
<b>Prisilna konvekcija</b>	Plinovi	20-300
	Tekućine	50-20.000
	Tekući metali	5.000-50.000
<b>Promjena agregatnog stanja</b>	Vrenje	2.000-100.000
	Kondenzacija	5.000-100.000

Postoji 5 metoda za analizu koeficijenata konveksijski prijenos topline [28]:

1. Približne analize jednadžbi graničnog sloja koristeći integralne metode
2. Numerička analiza ili modeliranje metodom računalne dinamike fluida.
3. Analogija između prijenosa impulsa i prijenosa topline
4. Precizna matematička rješenja jednadžbi graničnog sloja
5. Procjena dimenzija u kombinaciji s eksperimentima

Svaka od ovih pet tehnika ima svoja specifična ograničenja, stoga je za sveobuhvatnu određivanje konveksijski koeficijent potrebno primijeniti više metoda i postupaka. Ipak, ovih pet tehnika doprinosi boljem shvaćanju toplinskog prijenosa konveksijom [28].

Prva metoda za procjenu koeficijenata prijenosa topline konveksijom matematički je široko primjenjiva i jednostavna, no vezana je time što je neupotrebljiva ako nema podataka dobivenih eksperimentima koji se mogu usporediti s bezdimenzijskim grupama [28].

Metoda preciznih i točnih matematičkih rješenja jednadžbi graničnog sloja zahtijeva simultano rješavanje problema gibanja fluida i prijenosa energije unutar fluida u kretanju. Međutim, pretpostavka da se ti fizički procesi mogu u cijelosti opisati matematičkim postupcima ograničava opseg točnih rješenja, budući da matematika može precizno modelirati samo vrtložno strujanje fluida. Osim toga, ove metode često pojednostavljaju složene sustave na modele s ravnom pločom ili kružnim cilindrom, što može otežati njihovu primjenu u stvarnim uvjetima. Stoga su točna rješenja ona koja se mogu potvrditi eksperimentima [28].

Metoda približne analize jednadžbi graničnog sloja pomoću integralnih metoda fokusira se na protok u graničnom sloju fluida i unutar posude, te nije ograničena samo na vrtložni tok, već se

može primijeniti i na turbulentno gibanje fluida. Korištenjem jednostavnih jednadžbi za opis temperature i brzine u graničnom sloju, omogućuje dobivanje rješenja koja bi bila teško dostupna isključivo matematičkim proračunima [28].

Sljedeća metoda koristi analogiju između prijenosa momenta i topline, pri čemu osnovni model koji prikazuje gibanje molekula plina u kinetičkoj teoriji tretira toplinski prijenos kao prijenos momenta. Iako ovaj model nije u potpunosti prihvaćen, vrlo dobre rezultate pokazuje u praksi kada se uspoređuje s eksperimentalnim podacima [28].

Posljednja metoda numeričke analize bavi se rješavanjem jednadžbi gibanja fluida i koristi diskretne vremenske točke za pohranu rješenja, kao i za raščlanjivanje složenih slojeva fluida [28]. Iako su sve ove metode ograničene, kombiniranjem svih pristupa može se postići vrlo precizna određivanje matematičkih i eksperimentalnih vrijednosti koeficijenata konvekcije.

#### **4.4. Radijacija (zračenje)**

Radijacija predstavlja način prijenosa topline putem elektromagnetskih valova ili usmjerenih snopova subatomske čestice koji se kreću kroz prostor. Prostor kroz koji se zračenje širi ne mora biti ispunjeno plinomom, budući da zagrijani objekt u vakuumu također može prenijeti toplinu na okolinu u obliku unutarnje energije. Što znači da za prijenos topline radijacijom nije potreban medij, budući da prisutnost medija može usporiti zračenje.

Toplinsko zračenje nastaje zbog gibanja atoma i molekula sastavljenih od nabijenih čestica, pri čemu se ovo gibanje manifestira kao elektromagnetsko zračenje koje prenosi energiju s površine. Dok kod kondukcije i konvekcije količina prenesene topline ovisi o temperaturnoj razlici, kod zračenja se ta količina određuje i ovisno o apsolutnoj temperaturi i razlici temperatura [28]. Na temperaturama iznad apsolutne nule toplinsko zračenje emitiraju svi objekti zbog nepredvidljivog kretanja molekula i atoma u tvari. Ono što se zna je da se atomi sastoje od protona i elektrona, njihovo kretanje uzrokuje emitiranje EM zračenja koje prenosi energiju. Ovo kretanje je potpuno zaustavljeno na apsolutnoj nuli, zbog čega tijelo an apsolutnoj nuli ne propušta nikakvo zračenje, dok sve iznad apsolutne nule propušta.

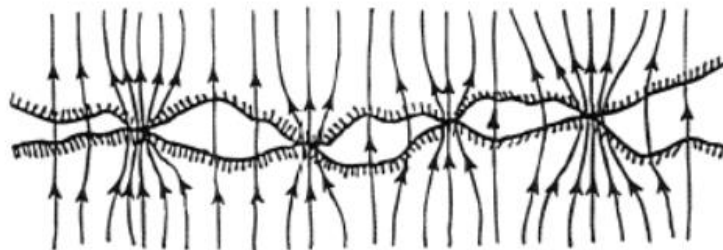
Četiri ključne karakteristike koje definiraju prijenos topline zračenjem su:

- Na bilo kojoj temperaturi, toplinsko zračenje tijela emitira različite frekvencije
- Kako temperatura odašiljača raste, primarni raspon frekvencija emitiranog zračenja pomiče se prema višim frekvencijama.

- Kako temperatura raste, ukupna količina zračenja svih frekvencija naglo raste; raste kao  $T^4$  gdje je T apsolutna temperatura tijela.
- Reciprocitet opisuje kako je brzina EM zračenja oslobođenog na određenoj frekvenciji povezana s količinom apsorpcije koju doživljava izvor. Kao rezultat toga, površina koja apsorbira više crvene svjetlosti emitirane više crvene svjetlosti kada se zagrije [29].

#### 4.5. Kontaktni otpor

Kada se spoj formira pritiskom dva slična ili različita metalna materijala zajedno, te između njih ostaje zarobljen tanki sloj fluida, gdje mali dio nominalne površine je zapravo u kontaktu zbog hrapavosti i neravnina dodirnih površina (Sl. 4.4. [27]). Ako je toplinski tok nametnut preko spoja, jednolik protok topline je ograničen na provođenje kroz kontaktne točke. Ograničen broj i veličina kontaktnih točaka rezultira stvarnim kontaktnim područjem koje je dosta manje od prividnog kontaktnog područja, te takvo ograničeno kontaktno područje uzrokuje toplinski otpor tj. kontaktni otpor [27].

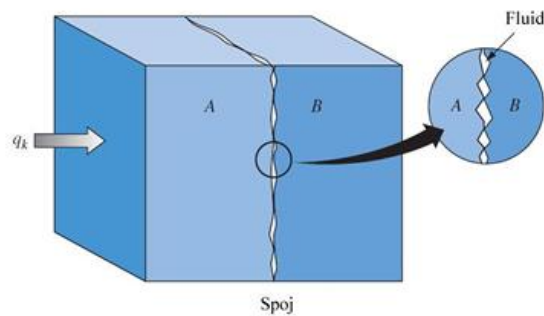


Slika 4.4. Uvećani prikaz dva materijala u kontaktu.

Prisutnost tekućeg ili krutog međuprostornog medija između dodirnih površina može pridonijeti ili ograničiti prijenos topline na spoju, ovisno o debljini i tvrdoći ( u slučaju krutine) međuprostornog medija i ovisno o toplinskoj vodljivosti. Ukoliko postoji značajna temperaturna razlika između površina koje sačinjavaju spoj, izmjena topline zračenjem također se može dogoditi preko razmaka između dodirnih površina. Kada se metalni spoj nalazi u vakuumu, provođenje kroz kontaktne točke primarni je način prijenosa topline, a kontaktni otpor općenito je veći nego kada je spoj u prisutnosti druge tekućine ili zraka [30].



Promatranjem uvećane slike spoja (Sl. 4.5. [31]) između dvije površine vidljivo je da se dva materijala dodiruju samo vrhovima na površini, te da su šupljine ispunjene fluidom (najvjerojatnije zrakom), tekućinom ili vakuumom. Kod samog kontakta, mehanizam prijenosa topline vrlo je složen. Kondukcija se provodi na točkama dodira, dok se toplina prenosi konvekcijom i radijacijom preko zarobljenog fluida [31].



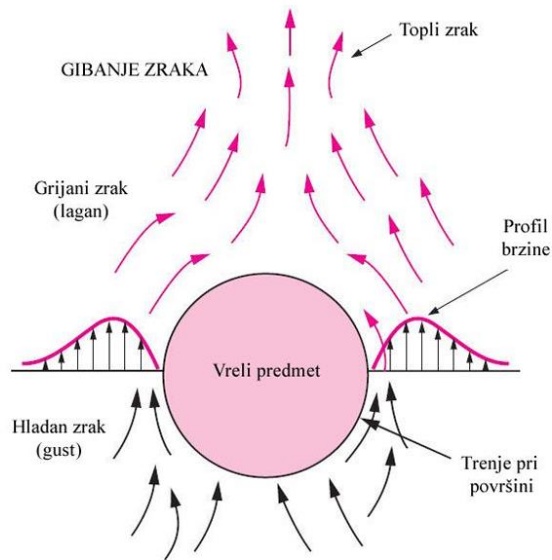
**Slika 4.5.** Prikaz fizičkog kontakta između dvije čvrste ploče A i B

Kada su dvije površine u savršenom toplinskom kontaktu, kontaktni otpor se približava nuli, te ne postoji razlika u temperaturi preko spoja, dok kod nesavršenog kontakta nastaje razlika u temperaturi [31].

#### 4.6. Hlađenje zrakom

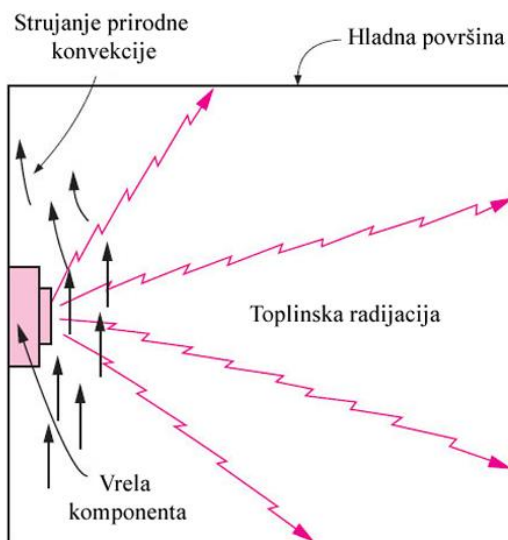
Elektronički sustavi manje potrošnje konvencijalno se hlade prirodnom konvekcijom te manjim dijelom i radijacijom. Sama prirodna konvekcija je vrlo poželjna iz razloga što ne uključuje ventilatore na kojima s vremenom mogu nastati kvarovi.

Kao što znamo prirodna konvekcija temelji se na razlici u gustoći fluida koja nastaje zbog temperaturne razlike. Kada je zagrijan, fluid se širi, te njegova gustoća postaje rjeđa. U gravitacijskom polju, lakši fluid se podiže te započinje gibanje u fluidu što nazivamo prirodna konvekcija (Sl. 4.6. [32]). Hlađenje prirodnom konvekcijom je najefikasnije, kada je na putanji samog fluida što manje prepreka, koje usporavaju fluid i samim tim je najmanje efikasno kada fluid mora prolaziti kroz uske presjeke i preko puno prepreka [32].



**Slika 4.6.** Struje prirodne konvekcije oko vrelog predmeta

Kada su tople površine okružene hladnijim površinama, poput stropova ili zidova, površine se također hlade i radijacijom (Sl. 4.7. [32]). Magnituda prijenosa topline radijacijom u cjelini je usporediva sa veličinom prirodnog prijenosa topline konvekcijom [32].



**Slika 4.7.** Istovremeni prijenos topline konvekcijom i radijacijom elektroničke komponente

Radijacija je ujedno i zanemariva za polirane metale zbog njihove niske emisije zračenja, te za tijela okružena površinama tijela približne temperature [32].

Brzine fluida koje su povezane sa prirodnom konvekcijom su relativno spore, stoga je hlađenje prirodnom konvekcijom ograničeno na elektroničke sisteme sa malom potrošnjom. Kada prirodna konvekcija nije dostatna, dodajemo ventilator, te se time postiže prisila konvekcija. Drugim riječima ventilator pojačava brzinu protoka fluida, a ujedno i prijenos topline. Ovisno o veličini ventilatora, koeficijent prijenosa topline može se uvećati čak za faktor 10, što znači da se toplina može prenijeti mnogo efikasnije. Prijenos topline prisilnom konvekcijom uglavnom je mnogo veći od onog od strane zračenja. S druge strane elektroničke komponente koje su hlađene konvekcijom postavljene su blizu jedna drugoj tako da je komponenta u potpunosti okružena drugim komponentama približno iste temperature, pa zaključujemo kako radijacije nema ili je zanemarivo mala [32].

## 5. Hlađenje električnih strojeva

Snaga stroja određuje se samim zagrijavanjem, a mogućnost davanja veće snage povezana je s učinkovitijim hlađenjem. Većina strojeva koristi zrak za hlađenje, dok se veliki sinkroni kompenzatori i turbogeneratori hlade primjenom vodika, koji se koristi kao rashladni fluid. Nedavno su namoti velikih turbogeneratora i hidrogeneratora počeli su koristiti izravno hlađenje vodom koja teče kroz šuplje vodiče, čime su značajno poboljšali odvod topline.

*Hlađenje zrakom.* Toplina se u malim strojevima odvodi putem vanjske površine statora, a učinkovitost odvodnje može se poboljšati dodavanjem rebara. Za učinkovitije hlađenje, na vanjsku stranu statora može se namjestiti ventilator koji preko rebara usmjerava zrak. U strojevima srednjih snaga, ventilatori se koriste za usmjeravanje zraka kroz stroj kako bi se ohladili dijelovi koji se zagrijavaju. U velikim strojevima, struja zraka hladi se vodom uz pomoć ugrađenih hladnjaka, a zatim se vraća u stroj, čime se stvara zatvoreni ventilacijski krug i smanjuje mogućnost unošenja prašine ili drugih nečistoća u stroj.

*Hlađenje vodikom.* U velikim turbogeneratorima koristi se vodik zbog njegove male gustoće, koja rezultira niskim gubicima trenja i omogućuje cirkulaciju kroz vrlo uske kanale. Ova karakteristika vodika iskorištena je tako što su rotorski namoti i statorski namoti izvedeni u obliku cijevi kroz koje prolazi plin. Ovaj način hlađenja, poznat kao direktno hlađenje, omogućuje izuzetno učinkovito hlađenje jer rashladni plin dolazi u izravan kontakt s bakrom. Takav sustav hlađenja omogućuje proizvodnju strojeva vrlo visokih snaga, u rasponu od 600 do 1000 MW.

*Direktno hlađenje vodom.* Snažnije hlađenje dobijamo direktnim usmjeravanjem vode kroz bakrene komponente. Ovaj sustav hlađenja koristi se u sinkronim strojevima izuzetno visokih snaga. Destilirana ili omekšana voda pumpa se kroz namote, cjevovode i hladnjake. Namotaji su povezani s cjevovodima putem izolacijskih cijevi, koje su obično teflonske. Radi sigurnosti od proboja, vodljivost rashladne vode kontinuirano se prati. Hlađenjem vodom moguće je odvesti znatno veće količine topline iz stroja u usporedbi s hlađenjem zrakom. Kod ovakvog hlađenja, zagrijavanje stroja ne ograničava njegovu snagu; umjesto toga, snaga se određuje prema razini gubitaka koja je još uvijek prihvatljiva za ekonomičan rad stroja [5].

### 5.1. Toplinske cijevi

Toplinska cijev je tehnologija koja koristi isparavanje i kondenzaciju radne tekućine za prijenos topline s jednog mjesta na drugo mjesto unutar sustava zatvorene petlje. Koriste se kao

sustavi povrata topline, te kao komponente za hlađenje elektroničkih uređaja. Svaka toplinska cijev treba radni fluid (obično vodu ili rashladno sredstvo). Tekućina apsorbira toplinu, isparava, pa se pomiče do hladnijeg kraja cijevi gdje oslobađa toplinu kondenzirajući se natrag u tekućinu. Ovakav kontinuirani ciklus omogućuje prijenos topline na znatne udaljenosti [34].

Nekoliko čimbenika koji mogu utjecati na karakteristike toplinske cijevi:

- Unos topline – količina dovedene topline značajno utječe na karakteristike toplinske cijevi. Kada je ulaz previsok, toplinska cijev može postati zasićena, čineći je manje učinkovitom.
- Radna temperatura – količina topline koja se može prenijeti kroz cijev ovisi o njezinoj radnoj temperaturi, što utječe na rad cijevi u određenoj situaciji. Do određene točke, više temperature mogu poboljšati karakteristike, ali kada se prijeđe određena točka, učinkovitost počinje opadati.
- Dizajn hladnjaka – elementi poput razmaka rebara, debljine rebara i ukupne veličine i oblika hladnjaka mogu utjecati na sposobnost uređaja da odvodi toplinu.
- Orijehtacija – toplinske cijevi su obično okomito ili vodoravno orijentirane kako bi učinkovito funkcionirale. Izvedba cijevi neće moći učinkovito prenositi toplinu ako se koristi u položaju koji nije onaj za koji je namijenjena.
- Radna tekućina – raspon radne temperature, toplinska vodljivost i tlak pare toplinske cijevi su pod utjecajem radne tekućine, što utječe na to koliko dobro radi. Karakteristike različitih tekućina mogu poboljšati ili ograničiti sposobnost toplinske cijevi za prijenos topline.
- Struktura fitilja – utječe na izvedbu toplinske cijevi kontrolirajući protok radne tekućine, povećavajući njezinu površinu i poboljšavajući kapilarno djelovanje. Bitna je i sama struktura fitilja jer izravno utječe na to koliko se tekućine kreću unutar toplinske cijevi.
- Toplinska otpornost – može smanjiti sposobnost toplinske cijevi za prijenos topline. Niži toplinski otpor dovodi do poboljšanog prijenosa topline, te je to ključni čimbenik koji utječe na toplinsku vodljivost sustava toplinske cijevi.
- Veličina i oblik – utječu na funkcionalnost jer ti čimbenici određuju kapilarni tlak i područje prijenosa topline. Veće dimenzije i komplicirani oblici mogu poboljšati karakteristike, ali i stvoriti poteškoće u proizvodnji i radu.
- Čimbenici okoliša – varijable okoline poput temperature, tlaka i gravitacije utječu na to koliko dobro radi toplinska cijev mijenjajući svojstva tekućine i dinamiku

protoka unutar cijevi. Brzina prijenosa topline i učinkovitost rasipanja topline mogu se promijeniti kao rezultat ovih čimbenika.

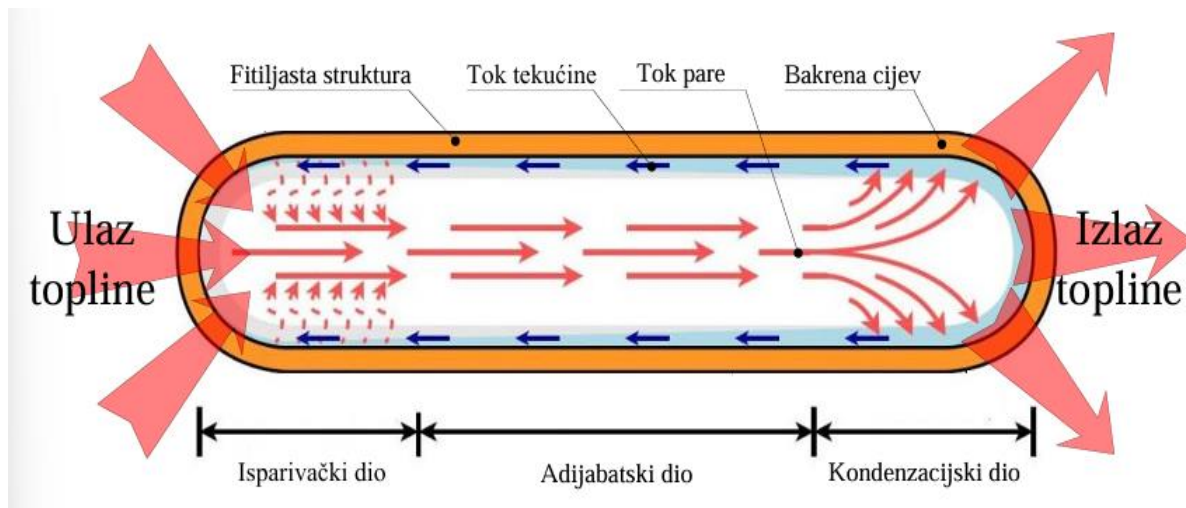
Toplinska cijev može prenijeti od 100 do 1000 puta više topline od krutog bakrenog tijela sličnih dimenzija. Međutim potrebno je biti jako oprezan, ukoliko temperatura prijeđe 250 °C tlak u cijevima postaje jako visok, te može doći do eksplozije [34].

### 5.2. Građa toplinske cijevi

Dijelovi koji čine toplinsku cijev (Sl. 5.1. [34]):

1. Isparivački dio – odgovorna je za apsorpciju topline iz izvora i za isparavanje radne tekućine. Ispareni radni fluid prenijet će toplinu od izvora do kondenzatora.
2. Kondenzacijski dio – kada radna tekućina otpusti toplinu i kondenzira se natrag u tekućinu, to čini u odjeljku kondenzatora toplinske cijevi koji je u kontaktu s hladnjakom.
3. Struktura fitilja – radna tekućina obično se prenosi od hladnijeg kraja toplinske cijevi do toplijeg kraja putem kapilarnog djelovanja uz pomoć strukture fitilja koja oblaže unutarnje stijenke toplinske cijevi. Primjeri tipičnih fitiljnih materijala su sinterirani metalni prah, tkana metalna mreža i porozna keramika.
4. Adijabatski dio – središnji dio gdje para i fluid u tekućem stanju teku u suprotnim smjerovima.

Toplinska cijev je zatvorena cilindrična metalna cijev koja je obično izrađena od bakra ili aluminija i koja sadrži strukturu fitilja, a toplina se učinkovito prenosi kada radni fluid teče s jednog kraja na drugi [34].



Slika 5.1. Građa toplinske cijevi

Proces prijenos topline počinje tako da toplina ulazi na isparivački kraj gdje radni fluid isparava, zatim od toplijeg dijela para prolazi kroz središnji, te se kondenzira na drugom, hladnom kraju toplinske cijevi. Kapilarnim gibanjem se kondenzirani fluid u tekućem stanju preko fitiljaste strukture vraća do isparivača i proces se ponavlja, a vrsta fluida i radni tlak unutar toplinske cijevi ovise o radnoj temperaturi toplinske cijevi [34].

### 5.3. Metode toplinske zaštite električnih strojeva

Općenito, svaki sustav toplinske zaštite sadrži dvije glavne jedinice:

- Jedinica za nadzor – čiji izlazni signal obavještava o trenutnoj temperaturi namota,
- Izvršna jedinica – obrađuje signal primljen od nadzorne jedinice i koristi vlastiti ulaz (oko maksimalno dopuštene granice zagrijavanja) za isključivanje elektromotora iz napajanja u slučaju neprihvatljivog pregrijavanja ili za davanje odgovarajuće signalizacije.

Tijekom hardverske izvedbe sustava toplinske zaštite, strukturno, ove dvije funkcionalne cjeline mogu se spojiti u jedan blok. Izvršna jedinica sadrži elektromehaničke i logičke blokove gdje se elektromehanički blok može izraditi u obliku relejne zaštitne jedinice koja se temelji na elektromehaničkim ili elektroničkim reljima i starterima. Ključni problemi u izradi sustava toplinske zaštite leže u implementaciji nadzorne jedinice, jer svojom pouzdanošću i preciznošću osigurava ispravnost i funkcionalnu pouzdanost cjelokupnog sustava EM toplinske zaštite u cjelini

[35]. S obzirom na to da je stroj u postrojenjima izložen različitim utjecajima okoline i različitoj razini pristupačnosti osobama koje njime upravljaju, potrebno ga je adekvatno zaštititi.

*Osnovna mehanička zaštita stroja* utvrđena je razinom zaštite koja pruža sigurnost od dodira s rotirajućim dijelovima i dijelovima pod naponom, zaštitom od ulaska čvrstih tijela te zaštitom od ulaska vode.

Različiti stupnjevi zaštite od prodiranja i dodira stranih tijela obuhvaćaju konstrukcija strojeva koje variraju od skroz otvorenih do potpuno zatvorenih. Ovi stupnjevi zaštite definirani su veličinom predmeta koji sprječava dodir s dijelovima stroja pod naponom, kao i dimenzija otvora na stroju.

Predviđeni su različiti stupnjevi zaštite od prodiranja vode, koji variraju od zaštite protiv kapljica ili prskanja vode do potpune zaštite od vode koja potpuno prekriva stroj. U tropskim klimatskim uvjetima, električni strojevi izloženi su vlazi i riziku od stvaranja plijesni, stoga je važno koristiti izolacione materijale koji nisu higroskopni. Također, kako bi se spriječila kondenzacija vlage tijekom mirovanja stroja, preporučuje se ugradnja grijača. Površinski premaz namota tretira se specijalnim lakovima kako bi se dodatno spriječilo stvaranje plijesni.

Posebna pažnja također je potrebna u zaštiti od hrđe. Svi dijelovi koji se ne mogu zaštititi premazima trebaju biti zaštićeni galvanskim prevlakama ili izrađeni od nehrđajućih materijala.

U uvjetima zaprašene atmosfere, stroj mora biti potpuno zatvoren kako bi se spriječilo prodiranje prašine. U kemijski agresivnim okruženjima, potrebno je koristiti materijale koji su otporni na kemijske reakcije. Oblik, vrsta mehaničke zaštite i odabrani materijali ovise o specifičnim uvjetima okoline i konstrukciji stroja [5].



#### 5.4. Hlađenje električnih komponenata i uređaja

Kada govorimo o hlađenju električnih komponenti naprava ili drugih u osnovi neelektričnih strojeva i uređaja onda vršimo podjelu na: hlađenje prirodnim strujanjem i hlađenje prisilnim strujanjem [29].

Potrebno je znati da se ovakvom podjelom hlađenja ništa ne govori o tome što je rashladni fluid mjesta na kojemu se toplina razvila, je li na prirodni ili prisilni način taj fluid se odvodi do mjesta predaje topline u okolinu (izmjenjivač topline), te načinu na koji se toplina predaje u okolinu (prirodnim ili prisilnim strujanjem) i što je fluid koji iz okoline preuzima toplinu (zrak ili voda). Proces odvođenja topline iz zagrijanog dijela, pa sve do predaje u okolinu može se prikazati na sljedeći način (Sl 5.2.) [29].



**Slika 5.2.** Blok shema procesa odvođenja topline od izvora topline do okoline

## 6. Toplinski model električnog stroja

U primjenama visokih performansi postoji rastuća potreba za električnim strojevima s velikim okretnim momentom/snagom. Veća gustoća snage može se postići primjenom veće gustoće struje na namote električnog stroja i/ili radom stroja veće brzine. Visoka gustoća struje u namotu statora rezultira značajnim gubicima bakra, te visokim temperaturama vruće točke. Također, visoke brzine rotora dovode do viših frekvencija struje i napona koje povećavaju gubitke željeza u čeličnim pločama rotora i statora i dijelovima permanentnog magneta u strojevima s permanentnim magnetom. Povećanje gubitaka bakra i željeza može, ako se rezultirajuća toplina ne rasprši pravilno, uzrokovati povišene temperature koje mogu biti problematične u dijelovima stroja koji se teško hlade npr. rotor [36].

Za velike gustoće struje, hlađenje zrakom neće biti dovoljno i potreban je neki oblik hlađenja tekućinom. Vodeni omotač kućišta omogućuje učinkovit prijenos topline s aktivnog dijela namota statora na rashladno sredstvo. Vodeno hlađenje ne osigurava uspješno hlađenje krajnjih namota, što može biti problematično za strojeve s dugim krajevima namota, te se umjesto vode može koristiti ulje kao rashladni medij. U strojevima koji su izravno hlađeni uljem, ulje je u izravnom kontaktu s unutarnjim dijelovima stroja i može se ostvariti učinkovito hlađenje i statora i tijela krajnjeg motora [36].

Rješavanje toplinskog proračuna je kompleksno zbog potrebe za rješavanjem diferencijalnih jednadžbi. Stoga se toplinski procesi često modeliraju koristeći analogiju s električnim veličinama, što pojednostavljuje analizu. U tablici 6.1. [33] prikazana je ekvivalencija između toplinskih i električnih veličina.

**Tablica 6.1** Kirchoffove ekvivalentne električne i toplinske veličine

Toplinska veličina	Električna veličina
Količina topline $Q_t$ [J]	Električni naboj $Q$ [C]
Toplinski tok $q$ [W]	Električna struja $I$ [A]
Razlika temperatura $\Delta T$ [K]	Razlika potencijala $\Delta U$ [V]
Koeficijent kondukcije $k$ [W/(m K)]	Električna vodljivost $\sigma$ [S/m]
Toplinski kapacitet $C_t$ [J/K]	Električni kapacitet $C$ [F]
Toplinski otpor $R_t$ [K/W]	Električni otpor $R$ [ $\Omega = V/A$ ]

Između difuzije topline i električnog naboja postoji analogija. Kako je električni otpor povezan s provođenjem električne energije tako i toplinski otpor može biti povezan s provođenjem topline. Toplinski otpor kondukcije [36]:

$$R_{t,kond} = \frac{1}{k} \frac{L}{A}, \quad (6-1)$$

gdje je:

- L specifična duljina
- k specifična toplinska vodljivost ovisna o vrsti materijala
- A površina presjeka tijela kojim se provodi prijenos topline kondukcijom

Kod prijenosa topline konvekcijom, toplinski otpor se izražava kao:

$$R_{t,konv} = \frac{1}{h_c A}, \quad (6-2)$$

gdje je:

- $h_c$  koeficijent prijenosa topline kondukcijom
- A površina presjeka tijela kojim se provodi toplinski prijenos konvekcijom [36]

Toplinski otpor tijekom radijacije:

$$R_{t,rad} = \frac{1}{h_r A} \quad (6-3)$$

Toplinska Kirchhoffova shema predstavlja mrežu prikladnih toplinskih otpora i izvora topline koji ilustriraju temperaturne vrijednosti i geometriju sustava. Otpore u ovoj shemi čine toplinski otpori uslijed konvekcije, kondukcije i radijacije, dok izvore čine dijelovi volumena u kojima se toplina generira. U toplinskoj shemi, temperaturne vrijednosti čvorovi predstavljaju, a toplinski tok između dva čvora s temperaturama  $T_1$  i  $T_2$  računa se prema sljedećoj formuli [37]:

$$q_{12} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{12}} \quad (6-4)$$

## 7. Primjeri praktičnih izvedbi prijenosa ili zadržavanja topline

U ovom poglavlju navedeni su neki odabrani primjeri praktičnih izvedbi zadržavanja ili prijenosa topline kod strojeva ili složenijih sustava. Određeni toplinski proračuni kod strojeva provode se u svrhu poboljšavanja odvođenja topline, ali postoje i slučajevi kod kojih se namjerno toplinskim proračunima nastoji smanjiti odvođenje topline iz pojedinih dijelova stroja ili cijelog stroja ili sustava kao cjeline.

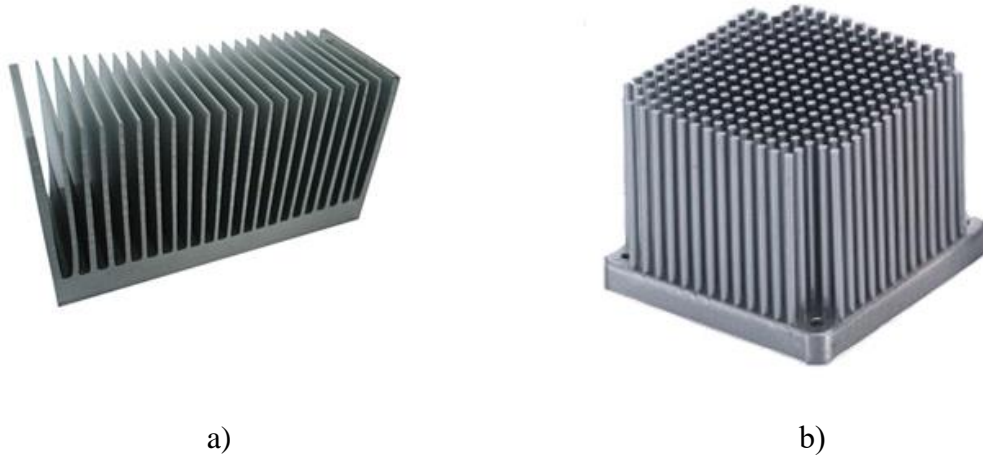
Razlikujemo dvije vrste tehnike prijenosa ili zadržavanja topline, međutim, u ovom poglavlju ćemo spomenuti samo jednu tehniku.

### 7.1. Rebrasti pasivni hladnjaci

Rebrasti hladnjak je uobičajeni tip radijatora koji se koristi za poboljšanje učinkovitosti hlađenja rashladne opreme, tako što se postavlja izravno na komponentu koju treba ohladiti. Sastoji se od metalne ploče koja je prekrivena velikim brojem rebara, obično izrađenih od aluminijske ili bakrene, zbog njihovih dobrih toplinskih svojstava. Ove peraje su često naborane kako bi se povećala površina i omogućio brži prijenos topline na okolni zrak, koristeći procese zračenja i konvekcije. Kako bi zrak mogao učinkovito prolaziti kroz peraje i uklanjati toplinu postoje razmaci između peraje koji stvaraju kanale za tekućinu. Toplina sa komponente prelazi na hladnjak i širi se kondukcijom, te hladnjak preuzetu toplinu rasprostire u okolni prostor putem slobodne konvekcije, i u određenoj mjeri radijacije [38]. Primjer pasivnog hladnjaka u računalu prikazan je na slici 7.1.a [40].

Efikasnost hladnjak je porasla izradom pin fin pasivnih hladnjaka koji su prikazani na slici 7.1.b [41]. Oni umjesto rebara imaju igličaste lamele koje se uzdižu iz baze. Lamelle su izrađene u obliku valjka ili kvadra, a razlikuju se od rebrastih pasivnih hladnjaka po tome što im je veća površina, pa je samim tim omogućen bolji protok zraka između lamela [39].

Rebrasti hladnjaci nalaze široku primjenu u elektroničkoj opremi, zrakoplovnoj i automobilske industriji, gdje se koriste za učinkovito odvođenje topline i zaštitu opreme od oštećenja uzrokovanih pregrijavanjem, a najčešće ih možemo susresti kod starijih računala i električne opreme koja radi u okruženju gdje je buka ventilatora nepoželjna [38].



Slika 7.1 Pasivni hladnjak u računalu: a)rebrasti, b)pin fin

## 7.2. Sustav hlađenja u motoru automobila

Sustav hlađenja je sustav u motoru vozila koji pomaže kontrolirati temperaturu motora kruženjem rashladne tekućine. Motor generira puno topline dok radi, a ako se temperatura ne rasprši na vrijeme onda može doći do pregrijavanja motora i oštećenja. Sustav hlađenja osigurava da motor ostane unutar odgovarajućeg raspona radne temperature raspršivanjem i odvođenjem topline koju stvara motor [38].

Princip rashladnog sustava temelji se na provođenju i konvekciji topline. Rashladna tekućina teče kroz motor, pa raspršuje toplinu kroz hladnjak, a zatim ponovo cirkulira. Moderan sustav hlađenja trebao bi osigurati hladnoću automobila pri temperaturi okoline od 115 °C [38].

Glavne komponente rashladnog sustava automobila su [39]:

- Radijator
- Rashladna tekućina
- Vodena pumpa
- Termostat
- Crijeva
- Ventilator hladnjaka

**Radijator** – djeluje kao izmjenjivač topline za motor. Obično je izrađen od aluminija i ima mnogo cijevi malog promjera s perajama pričvršćenim na njih. Izmjenjuje toplinu tople vode koja

dolazi iz motora sa okolnim zrakom, a sadrži i drenažni čep, ulazni otvor, zapečaćeni poklopac i izlazni otvor.

**Rashladna tekućina** – tekućina koja regulira temperaturu motora. Odnosi se na nisku točku ledišta tekućine koja sprječava njezino smrzavanje, čak i pri velikoj hladnoći, i izazivanje oštećenja motora. Rashladna tekućina je mješavina 50/50 glikola i vode i cirkulira se kroz male prolaze u motoru, gdje se višak topline prenosi s bloka motora na rashladnu tekućinu, podižući temperaturu te tekućine.

**Vodena pumpa** – rashladna tekućina se kreće okolo i kroz motor, do hladnjaka i natrag zahvaljujući vodenoj pumpi vozila i nešto gravitaciji. Na većini vozila vodena pumpa se nalazi ispod poklopca razvodnog remena i pokreće ju ili razvodni remen motora ili vijugasti remen spojen na remenicu pumpe. Pumpa cirkulira tekućinu kad god radi motor.

**Termostat** – smješten je između hladnjaka i obično je spojen na gornje ili donje crijevo hladnjaka. To je zapravo ventil koji se otvara i zatvara kako bi mogao omogućiti ili spriječiti protok rashladnog fluida u hladnjak. Iako se čini da je sprječavanje protoka rashladne tekućine suprotno od onoga što želimo, postoji razlog za to. Kad se motor prvi put pokrene, hladan je, te zatvoreni termostat sprječava kretanje rashladne tekućine do hladnjaka gdje se može ohladiti. Umjesto toga pomaže motoru da se brzo zagrije i da postigne svoju optimalnu radnu temperaturu, smanjujući trošenje motora i brže isporučujući toplinu u putnički prostor.

**Crijeva** – rashladna tekućina putuje od motora do hladnjaka i zatim natrag kroz gumena crijeva. Tijekom određenog vremena, guma stari i može oslabiti zbog stalne izloženosti toplini i okolišnim čimbenicima, pa su predmet održavanja i potrebno ih je povremeno provjeravati i mijenjati.

**Ventilator hladnjaka** - poput termostata, ventilator usmjerava zrak prema rebrima hladnjaka. Ventilatorom upravlja termostatski prekidač, koji ga uključuje kada temperatura rashladne tekućine premaši zadanu vrijednost. Ventilator igra važnu ulogu u uvlačenju hladnog, vanjskog zraka i njegovom strujanju preko površine hladnjaka, osobito kada vozilo miruje ili se sporo kreće.

### 7.3. Sustav hlađenja u elektranama

Oko 90% električne energije u zemlji dolazi iz termoelektrana, prirodnog plina, ugljena, nafte i nuklearne energije, a sve to zahtijeva hlađenje. Hlađenje elektrana je primjer hlađenja sa prisilnim strujanjem fluida unutar sustava [40].

Za proizvodnju struje termoelektrane kuhaju vodu, koja potom vrti turbine gdje izvor topline mogu biti podzemni geotermalni izvori, sunce ili nuklearne reakcije. Prije nego što se može ponovo upotrijebiti i proći kroz turbinu, u turbini se para mora ohladiti. Korištenje hladne vode je najučinkovitije, što omogućava učinkovitu proizvodnju električne energije. Dopuštanje nakupljanja topline može dovesti do ubrzanog trošenja i habanja turbina, a može ugroziti samu produktivnost elektrane. Stoga nam je bitno da je sustav hlađenja ispravan. Postoji više različitih metoda hlađenja, a odabir ovisi o nekoliko čimbenika [40].

Postoje tri načina hlađenja elektrane [40]:

1. Mokra recirkulacija ili zatvorena petlja
2. Jednokratni sustavi hlađenja
3. Suho hlađenje

**Mokra recirkulacija ili zatvorena petlja** – rashladna voda se ponovo koristi tijekom drugog ciklusa za sustave koji koriste ovu metodu hlađenja. Razlikuje se od većine drugih sustava po tome što drugi ispuštaju vodu u izvorni izvor. U sustavima mokre recirkulacije za izlaganje vode okolnom zraku koriste se rashladni tornjevi. Dok dio vode ispari, najveći dio vode se ponovno šalje u kondenzator elektrane. Mokri recirkulacijski sustavi koriste se samo za vraćanje vode koja je izgubljena tijekom isparavanja, u usporedbi s jednokratnim sustavima, imaju manje povlačenja vode, ali troše više vode. Najpopularniji sustavi hlađenja elektrana u zemlji su mokri recirkulacijski sustavi.

**Jednokratni sustavi hlađenja** – uzimaju vodu iz okolnih izvora uključujući jezera, rijeke i oceane i koriste je za hlađenje elektrana. Iz izvora vode, voda se provodi kroz cijevi i apsorbira toplinu od pare u kondenzatorima. Toplija voda se zatim spušta u izvor vode. Zbog niske cijene, mogućnosti i jednostavnosti postavljanja elektrana na lokacijama s puno izvora vode neki su od razloga zašto su ovi sustavi bili toliko popularni prije samo nekoliko desetljeća dok u današnje vrijeme postaje sve teže graditi elektrane u blizini izvora vode.

**Sustavi suhog hlađenja** – ovi sustavi umjesto vode za hlađenje koriste zrak za hlađenje pare iz turbina. Sustavi suhog hlađenja mogu učinkovito smanjiti potrošnju vode za gotovo 95%.

Iako se čini kao dobra stvar, ali može dovesti i do manje učinkovitosti, kao i do većih troškova što uključuje negativan utjecaj na okoliš zbog rudarenja, transporta goriva i prerade. Također, može doći i do povećanja zagađenja zraka. Sustavi suhog hlađenja se koriste samo u malim elektranama, a posebno u elektrana na prirodni plin s kombiniranim ciklusom.



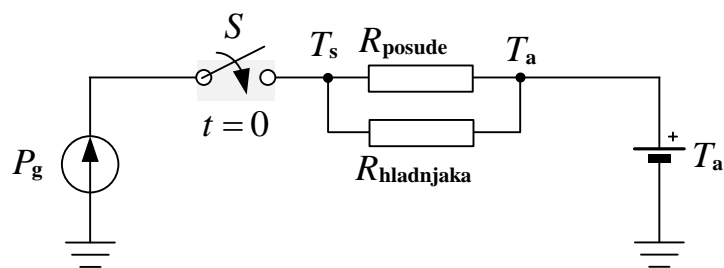
## 8. Laboratorijska mjerenja

Mjerenja su provedena 15. srpnja 2024. godine u laboratoriju T1-23 na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Cilj samog mjerenja je bio da uočimo prijelaznu pojavu zagrijavanja homogenog tijela. Homogeno tijelo je predstavljeno limenom posudom s vodom u koju smo uronili električni grijač. Mjerenja toplinskog otpora su provedena, a na temelju Kirchoffovih toplinskih shema, izračunavamo toplinske otpore pojedinih elemenata.



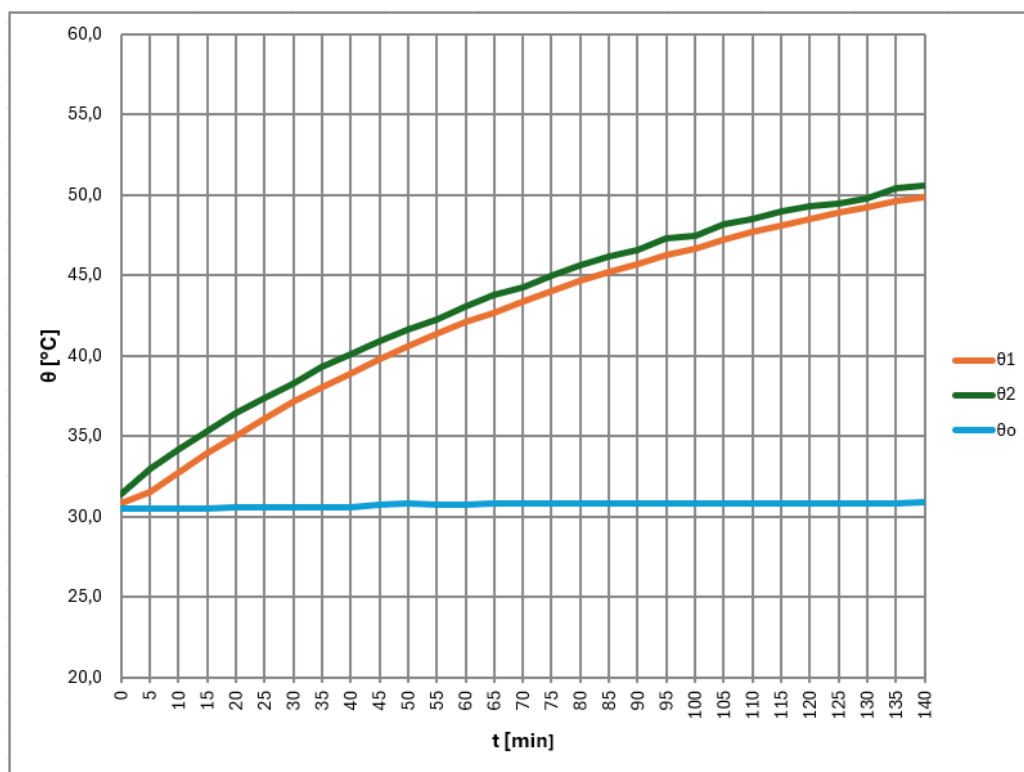
**Slika 8.1.** Prikaz limene posude s grijačem i termometrima

Prijenos topline od grijača do vode i od vode do posude možemo pojednostaviti tako što ćemo zanemariti konvekciju i kondukciju između vode i posude. Razlog tome je što je konvekcija između vanjske površine posude i okoline značajno veća u odnosu na konvekciju i kondukciju unutar sustava. Toplinski otpor uslijed konvekcije i grijač koji je izvor topline može se predstaviti toplinskom shemom 8.2.



Slika 8.2. Pojednostavljeni model toplinskog prijenosa

Mjerenje uključuje grijač snage  $P_g = 4,3 \text{ V} * 4,1 \text{ A} = 17,63 \text{ W}$  koji se koristi za zagrijavanje limene posude ispunjene vodom.



Slika 8.3. Proces zagrijavanja limene posude s vodom

Trajanje mjerenja iznosilo je 140 minuta, iz valnog oblika grafa prikazanog na slici 8.3. evidentno je da prijelazna pojava zagrijavanja posude i na njoj instaliranog hladnjaka nije završila. U literaturi [33] mjerenja su trajala 240 minuta te su se valni oblici mjerene temperatura u vremenskom intervalu od 140 minuta do 240 minuta promijenili 7 %. Stoga, rezultat (za ustaljeno

stanje) dobiven mjerenjem u okviru ovog završnog rada treba povećati za 7 %. Na slici 8.3.  $\vartheta_1$  predstavlja mjerenu temperaturu koja se nalazi na strani limene posude na kojoj je hladnjak, dok  $\vartheta_2$  predstavlja mjerenu temperaturu na suprotnoj strani limene posude od  $\vartheta_1$ . Također postoji i  $\vartheta_0$  koji predstavlja temperaturu okoline. Slika 8.4. prikazuje rad u laboratoriju.



Slika 8.4. Studentica Andrea Mamuzić tijekom mjerenja

Mjerenja su provedena za slučaj kada je na limenu posudu napunjenu vodom do vrha instaliran aluminijski rebrasti hladnjak. Prema teoriji, za precizno određivanje toplinskog otpora instaliranog hladnjaka, važno je prvo poznavati toplinski otpor posude kada hladnjak nije instaliran, podatak o toplinskom otporu posude preuzet je iz [33]. U [33] korištena je ista mjerna oprema i ista posuda. Prema [33] proračun toplinskog otpora limene posude s vodom s instaliranim hladnjakom se izračunava na sljedeći način:

$$R_{\text{posude i hladnjaka}} = \frac{(\vartheta_{\max} - T_a)}{P_g}, \quad (8-1)$$

gdje je:  $\vartheta_{\max}$  – maksimalna temperatura,

$T_a$  – temperatura okoline,

$P_g$  – snaga grijača.

Uvrštavanjem izmjerenih vrijednosti (Slika 8.3) u izraz (8-1) daje:

$$R_{\text{posude i hladnjaka}} = \frac{50-30}{17,63} = \frac{20}{17,63} = 1,134 \text{ K/W} \quad (8-2)$$

Prema slici 8.2. vrijedi:

$$R_{\text{posude i hladnjaka}} = \frac{R_{\text{posude}} \cdot R_{\text{hladnjaka}}}{R_{\text{posude}} + R_{\text{hladnjaka}}} \quad (8-3)$$

Za toplinski otpor hladnjaka dobiva se:

$$R_{\text{hladnjaka}} = \frac{R_{\text{posude i hladnjaka}} \cdot R_{\text{posude}}}{R_{\text{posude i hladnjaka}} - R_{\text{posude}}} \quad (8-4)$$

U okviru ovog završnog rada nije provedeno mjerenje toplinskog otpora posude. Toplinski otpor posude iznosi 1,0171 K/W [33]. Uvrštavanje brojčanih vrijednosti u prethodni izraz daje [33]:

$$R_{\text{hladnjaka}} = \frac{1,134 \cdot 1,0171}{1,134 - 1,0171} = \frac{1,153}{0,117} = 9,854 \text{ K/W} \quad (8-5)$$

Za mjerenje temperature korištena su dva različita tipa termometra. Prvi tip termometra koji je prikazan na slici 8.5. [41] je model G 1710 koji je koristio kako bi se izmjerila temperatura okoline. Drugi tip termometra koji je korišten je model GTH 175/Pt1000 prikazan na slici 8.6. [42]. To su bila druga dva termometra gdje je jedan mjerio temperaturu kod samog hladnjaka, a drugi je mjerio temperaturu na suprotnoj strani od hladnjaka.



**Slika 8.5.** Prikaz termometra G 1710



**Slika 8.6.** Prikaz termometra GTH 175/Pt1000

## 9. Zaključak

Na osnovu ovog završnog rada može se utvrditi kako je bitno zadovoljiti mnoge uvjete kako bi stroj radio na ispravan način i bio dugotrajan. Pažnja je najviše usmjerena na mehanizme prijenosa topline tj. konvekciju i kondukciju koje su glavne sastavnice proračuna. Možemo vidjeti i kako je kod nekih izvedbi veoma važno odvođenje topline, ali postoje i slučajevi kod kojih je bitno da toplina bude zadržana npr. kod toplinskih cijevi.

Iz mjerenja na osnovi modela temelju homogenog tijela koji je predstavljala limena posuda s vodom i hladnjakom, te grijačem koji je bio uronjen u vodu, može se primijetiti da dolazi do prijelazne pojave zagrijavanja, te dosezanja maksimalne nadtemperature stroja. Također, bitan je ispravan i kvalitetan rad strojeva kao što je bitno i poznavati toplinski model stroja. Najbitnije je poznavati kako na učinkovit način ohladiti komponente ili uređaje i spriječiti njegovo pregrijavanje kako ne bi došlo do uništenja samih komponenti ili uređaja, a uz sve to potrebno je znati i toplinsko modeliranje samih uređaja.

**LITERATURA:**

- [1] Termodinamika, url: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/termodinamika> Pristupljeno 22.5.2024.
- [2] Prijenos topline, url:  
[https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/termodinamika\\_prijenos\\_topline.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/termodinamika_prijenos_topline.pdf)  
Pristupljeno 22.5.2024. [2]
- [3] Primjena prijenosa topline, url: <https://fastercapital.com/topics/introduction-to-heat-transfer-and-its-importance.html> Pristupljeno 25.5.2024
- [4] Toplinski otpor, url: <https://www.xometry.com/resources/materials/thermal-resistance/>  
Pristupljeno 25.5.2024
- [5] Utjecaj temperature na promjenu radnog vijeka, hlađenje električnih strojeva url:  
[https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricni\\_strojevi.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricni_strojevi.pdf)  
Pristupljeno 25.5.2024.
- [6] Učinkovitost toplinskog stroja, url:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/law-thermodynamics-d\\_94.html](https://www.engineeringtoolbox.com/law-thermodynamics-d_94.html)  
Pristupljeno 26.5.2024.
- [7] Zračenje, url: <https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/skripta1%5B1%5D.pdf>  
Pristupljeno 4.6.2024.
- [8] Elektromagnetsko zračenje, url:  
<https://www.britannica.com/science/electromagnetic-radiation> Pristupljeno 4.6.2024.
- [9] Elektromagnetska radijacija, url:  
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Spectroscopy/Fundamentals\\_of\\_Spectroscopy/Electromagnetic\\_Radiation](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation) Pristupljeno 4.6.2024.
- [10] Elektromagnetski valovi, url:  
[https://science.nasa.gov/ems/02\\_anatomy/](https://science.nasa.gov/ems/02_anatomy/) Pristupljeno 4.6.2024.

- [11] Elektromagnetsko zračenje, url:  
[https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Electromagnetic\\_radiation](https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Electromagnetic_radiation) Pristupljeno 5.6.2024.
- [12] Zračenje topline kao oblika EM zračenja, url:  
[file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/lucija\\_jajetic%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/lucija_jajetic%20(1).pdf) Pristupljeno 5.6.2024.
- [13] Toplinsko zračenje, url:  
<https://www.britannica.com/science/thermal-radiation> Pristupljeno 7.6.2024.
- [14] Toplinsko zračenje, url:  
[https://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/2\\_3\\_%20zracenje%20crnog%20tijela.pdf](https://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/2_3_%20zracenje%20crnog%20tijela.pdf) Pristupljeno 7.6.2024.
- [15] Toplinsko zračenje url:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/thermal-radiation>  
Pristupljeno 7.6.2024.
- [17] Toplinsko zračenje, url:  
<https://www.wtamu.edu/~cbaird/sq/2023/12/13/is-there-a-difference-between-thermal-radiation-and-infrared-radiation/> Pristupljeno 7.6.2024.
- [16] Toplinsko zračenje, url:  
<https://www.vedantu.com/physics/thermal-radiation> Pristupljeno 7.6.2024.
- [17] Mehanizmi prijenosa topline, url:  
[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Heat\\_transfer\\_mechanisms](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Heat_transfer_mechanisms)  
Pristupljeno 10.6.2024.
- [18] Mehanizmi prijenosa topline, url: <https://derangedphysiology.com/main/cicm-primary-exam/required-reading/thermoregulation/Chapter%20111/mechanisms-heat-transfer>  
Pristupljeno 10.6.2024.
- [19] Temperatura, url: <https://enciklopedija.hr/clanak/temperatura> Pristupljeno 10.6.2024.
- [20] Toplina, url: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/toplina> Pristupljeno 10.6.2024.



- [21] Toplinski kapacitet, url:  
<https://enciklopedija.hr/clanak/toplinski-kapacitet> Pristupljeno 10.6.2024.
- [22] Kondukcija, url:  
<https://www.greenspec.co.uk/building-design/heat-transfer-conduction-convection-radiation/>  
Pristupljeno 11.6.2024.
- [23] Kondukcija, url:  
<https://www.shobhituniversity.ac.in/pdf/econtent/Heat-Transfer-Rajkishor-Singh.pdf>  
Pristupljeno 11.6.2024.
- [24] Konvekcija, url: <https://www.wikiwand.com/sh/Konvekcija> Pristupljeno 11.6.2024.
- [25] Zračenje, url: [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/prijenosTopline.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/prijenosTopline.pdf)  
Pristupljeno 11.6.2024.
- [26] Zračenje, url:  
<https://byjusexamprep.com/gate-me/radiation-heat-transfer> Pristupljeno 11.6.2024
- [27] Toplinski kontaktni otpor, url:  
<https://www.thermopedia.com/content/1188> Pristupljeno 12.6.2024.
- [28] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, Cengage Learning, Inc.2011, Principles of Heat Transfer
- [29] Mirko Jelaš, diplomski rad „Numerički proračun hlađenja“
- [30] Toplinska cijev, url: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/what-is-heat-pipe/>  
Pristupljeno 12.6.2024.
- [31] Toplinska zaštita električnih strojeva, url:  
<https://www.mdpi.com/2075-1702/9/3/51> Pristupljeno 13.6.2024.

- [32] Toplinski model električnih strojeva, url:  
<https://dlib.hust.edu.vn/bitstream/HUST/19136/1/OER000000477.pdf>  
Pristupljeno 17.6.2024
- [33] Marija Bivolčević, završni rad „Toplinski model električnog stroja“
- [34] Rebrasti hladnjaci, url:  
<https://hr.zpheatsink.com/aluminum-heat-sinks/plate-fin-heat-sink.html>  
Pristupljeno 19.6.2024.
- [35] Jurica Nikšić, završni rad „Toplinski proračun stroja“
- [36] Rebrasti hladnjak, url:  
[https://image.made-in-china.com/2f0j00WvMQgZaGgsbh/Profile-\\_\\_\\_\\_\\_Type-Heat-Sink-high-Powered-Tooth-BX-Series.jpg](https://image.made-in-china.com/2f0j00WvMQgZaGgsbh/Profile-_____Type-Heat-Sink-high-Powered-Tooth-BX-Series.jpg) Pristupljeno 19.6.2024.
- [37] Pin fin pasivni hladnjaci, url:  
[https://image.made-in-china.com/2f0j00rvlEQujIYDqd/Pin-\\_\\_\\_\\_\\_Fin-Heat-Sink.jpg](https://image.made-in-china.com/2f0j00rvlEQujIYDqd/Pin-_____Fin-Heat-Sink.jpg)  
Pristupljeno 19.6.2024.
- [38] Sustav hlađenja u motoru automobila, url:  
<https://hr.parkingpreheater.com/info/introduction-to-cooling-system-and-its-princip-93493204.html> Pristupljeno 19.6.2024.
- [39] Glavne komponente rashladnog sustava, url:  
<https://germanauto.co.uk/how-a-vehicle-cooling-system-works/> Pristupljeno 19.6.2024.
- [40] Sustav hlađenja u elektranama, url:  
<https://towertech.com/power-plant-cooling> Pristupljeno 19.6.2024.
- [41] Termometar G1710  
<https://www.emi-lda.com/en/thermometers-without-probe/485-thermocouple-quick-response-thermometer-greisinger-g1200.html> Pristupljeno 31.8.2024.
- [42] Termometar GTH 175/Pt1000 <https://www.amazon.se/-/en/600224/dp/B00CSRTRE8>  
Pristupljeno 31.8.2024.

## SAŽETAK

U ovom završnom radu cilj je bio objasniti teoriju prijenosa topline, posebno kondukciju, konvekciju i zračenje. Kod kondukcije su se opisivala dva mehanizma koja objašnjavaju kako se toplina prenosi, dok kod konvekcije postoji podjela koja se dijeli na prirodnu konvekciju i prisilnu konvekciju. Također, cilj je bio opisati utjecaj temperature na životni vijek uređaja kao i njegovih komponenti, gdje na osnovu toga onda dolazi i do promjene parametara i same pouzdanosti uređaja. Velika pažnja se pridodaje hlađenju samih uređaja i strojeva gdje je u radu opisano više načina hlađenja. Pomoću našeg mjerenja može se zaključiti da nakon određenog vremena dolazi prijelazne pojave topline koja dosegne svoju maksimalnu nadtemperaturu.

**Ključne riječi:** hlađenje, kondukcija, konvekcija, prijenos topline, zračenje

## ABSTRACT

In this final paper, the aim was to explain the theory of heat transfer, especially conduction, convection and radiation. In the case of conduction, two mechanisms were described that explain how heat is transferred, while in the case of convection there is a division that is divided into natural convection and forced convection. Also, the goal was to describe the influence of temperature on the lifetime of the device as well as its components, where, based on this, there is a change in the parameters and the reliability of the device itself. We pay great attention to the cooling of the devices and machines themselves, where several methods of cooling are described in the paper. With the help of our measurement, we can conclude that after a certain time there is a transient occurrence of heat that reaches its maximum overtemperature.

**Key words:** cooling, conduction, convection, heat transfer, radiation,

## ŽIVOTOPIS

Andrea Mamuzić, rođena 26. srpnja 2002. godine u Orašju. Osnovnu školu „Braće Radića“ u Domaljevcu završava 2017. godine, te upisuje Elektrotehničku srednju školu u Orašju. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku upisuje 2021. godine. Na drugoj godini fakulteta odabire izborni blok elektroenergetika. Tijekom osnovne i srednje škole aktivno se bavila nogometom. Uz studiranje u slobodno vrijeme se bavi sviranjem gitare, te konobarenjem i pravljenjem koktela. Također imala je priliku raditi u tvornici sladoleda gdje je upravljala mašinama kao i pratila samu potrošnju cijele tvornice.

Nakon završenog preddiplomskog studija u planu je upisati diplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

U Osijeku, rujan 2024. godine

Andrea Mamuzić

Potpis: \_\_\_\_\_

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

Oznaka ili simbol	Naziv	Iznos	Mjerna jedinica
$A$	Površina presjeka	-	$m^2$
$C_t$	Toplinski kapacitet	-	J/K
$\Delta_0$	Promjena temperaure	-	K
$\eta$	Stupanj djelovanja	-	-
$h_c$	Lokalni koeficijent konvekcije	-	$W/(m^2K)$
$\overline{h_r}$	Koeficijent radijacije	-	$W/(m^2K)$
$k$	Koeficijent kondukcije	-	$\frac{W}{m^2K}$
$L$	Karakteristična duljina	-	m
$Q$	Toplina	-	J
$Q_t$	Količina topline	-	J
$q$	Toplinski tok	-	W
$R_t$	Toplinski otpor	-	K/W
$\vartheta$	Temperatura materijala	-	K
$\vartheta_0$	Temperatura za koju materijal ima referentni životni vijek	-	K
$T$	Temperatura	-	K
$\Delta T$	Temperaturna razlika	-	K
$T_c$	Niža temperaturna razlika	-	K
$T_h$	Viša temperaturna razlika	-	K
$Z$	Životni vijek	-	-
$Z_0$	Referentni životni vijek	-	-