

Ispitivanje i analiza toplinskih karakteristika podnog konvektora

Vrbanec, Vedran

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:703882>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vedran Vrbanec

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor :

Dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Vedran Vrbanec

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se prof. dr.sc Damiru Doviću te asistentu Ivanu Horvatu, mag, ing. na pomoći pri izradi ovog rada.

Vedran Vrbanec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Vedran Vrbanec

Mat. br.: 0035192798

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje i analiza toplinskih karakteristika podnog konvektora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing and analysis of trench convector thermal characteristics**

Opis zadatka:

U sklopu ovog završnog zadatka potrebno je provesti analizu toplinskih karakteristika podnog konvektora u režimu grijanja. Za potrebe analize provest će se u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje ispitivanja toplinskog učina podnog konvektora prema normi HRN EN 442-2 za tri različite temperature radnog medija. Pri tome je potrebno provesti mjerenja brzina i temperatura u istrujnom mlazu zraka iz konvektora pomoću anemometra sa žarnom niti i termoparova te dodatno pomoću termografske kamere, sve kako bi se dobili ulazni podaci za proračun toplinskog učina prema odabranoj metodi za orebrene površine. Također, uz to je potrebno provesti mjerenja površinske temperature zidova ispitne sobe i usporediti ih s onima dobivenim prilikom ispitivanja radijatora.

U sklopu navedenog proračuna potrebno je provesti parametarsku analizu i dati preporuke za poboljšanje konstrukcije s ciljem daljnjeg povećanja toplinskog učina.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK	X
SUMMARY	XI
1. UVOD	1
1.1. Radijatori.....	1
1.2. Konvektori	3
2. MJERNA LINIJA	5
3. MJERNA OPREMA	7
3.1. Termoparovi tip T i tip K.....	7
3.2. Termografska kamera.....	8
3.3. Anemometar sa žarnom niti	12
3.4. Pretvarač brzine strujanja- ultrazvučni protokomjer.....	12
3.5. Analogno-digitalni pretvarač	12
4. TESTIRANJE ISPRAVNOSTI ULTRAZVUČNOG PROTOKOMJERA.....	13
5. PROCEDURA MJERENJA PREMA HRN EN 442-2 [2] :.....	14
6. ANALIZA REZULTATA RADIJATORA	16
6.1. Nadtemperatura 30°C – radijator.....	16
6.2. Nadtemperatura 50°C – radijator.....	18
6.3. Nadtemperatura 60°C – radijator.....	20
6.4. Karakteristična jednačba radijatora.....	22
6.5. Usporedba realnih sa očekivanim rezultatima	26
7. ANALIZA REZULTATA KONVEKTORA.....	27
7.1. Nadtemperatura 30°C konvektor	27
7.2. Proračun brzine strujanja zraka za nadtemperaturu 30 °C.....	28

7.3. Nadtemperatura 50°C - konvektor	29
7.3.1. Proračun brzine strujanja zraka za nadtemperaturu 50 °C:	30
7.4. Nadtemperatura 60°C konvektor	31
7.4.1. Proračun brzine strujanja zraka za nadtemperaturu 60 °C	32
7.5. Karakteristična jednadžba konvektora	33
8. PRORAČUN TOPLINSKOG UČINA OREBRENE POVRŠINE.....	36
8.1. Koeficijent prijelaza topline na strani vode prema Mac Adamsu [5] :	37
8.2. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka prema VDI Heat Atlas-u:	38
8.3. Proračun za druga dva režima proveden je analogno prethodno prikazanom proračunu.....	43
9. PARAMETARSKA ANALIZA	45
9.1. Debljina lamela s promjenom koraka	46
9.2. Razmak lamela	47
9.3. Širina lamela.....	48
9.4. Visina lamela.....	49
9.5. Materijal lamele	50
9.6. Promjena toplinskog toka ovisno o protoku vode.....	51
10. MJERENJE POVRŠINSKE TEMPERATURE ZIDOVA.....	52
11. ZAKLJUČAK	59
LITERATURA	60

POPIS SLIKA

slika 1. dimenzije ugradnje radijatora	2
slika 2. princip rada konvektora	3
slika 3. mogućnosti ugradnje konvektora.....	4
slika 4. skica sobe sa termoparovima	5
slika 5. skica mjerne linije.....	6
slika 6. termografska kamera fluke ti-25.....	9
slika 7. infracrvena fotografija radijatora	10
slika 8. infracrvena fotografija konvektora	11
slika 9. karakteristična jednadžba radijatora	25
slika 10. nestacionarnih uvjeta za nadtemp. 30 °C.....	26
slika 11. karakteristična jednadžba konvektora.....	35
slika 12. pomoćni dijagram	39
slika 13. utjecaj debljine lamele na toplinski učin	46
slika 14. utjecaj razmaka lamele na toplinski učin.....	47
slika 15. utjecaj širine lamele na toplinski učin	48
slika 16. utjecaj visine lamele na toplinski učin.....	49
slika 17. utjecaj toplinske vodljivosti na toplinski učin	50
slika 18. utjecaj protoka na toplinski učin.....	51
slika 19. shema rasporeda zidova.....	53
slika 20. temperatura zida iznad konvektora (lijevo) i zida pored njega (slika desno).....	54
slika 21. temperatura radijatora(lijevo) i zida nasuprot radijatoru (desno) za $\Delta 60$ °C.....	55
slika 22. raspodjela temperatura konvektora (plavo) i radijatora(narančasto) za zidove iznad ogrjevnog tijela za nadtemperaturu 60 °c.....	56
slika 23. usporedba temperatura negrijanog zida konvektora i radijatora.....	57
slika 24. raspodjela temperatura zida iznad konvektora za nadtemperaturu 50 °C	58

POPIS TABLICA

tablica 1. svojstva modela "solar"	2
tablica 2. svojstva i vrste termoparova	7
tablica 3. karakteristike termografske kamere fluke ti-25	8
tablica 4. rezultati mjerenja ispravnosti ultrazvučnog protokomjera	13
tablica 5. temperature prostora za 30 °C, radijator	16
tablica 6. temperature polaza i povrata za 30 °C, radijator	16
tablica 7. temperature vanjskog prostora za 30 °C, radijator	16
tablica 8. temperature prostora za 50 °C, radijator	18
tablica 9. temperature polaza i povrata za 50 °C, radijator	18
tablica 10. temperature vanjskog prostora za 50 °C, radijator	18
tablica 11. temperature prostora za 60 °C, radijator	20
tablica 12. temperature polaza i povrata za 60 °C, radijator	20
tablica 13. temperature vanjskog prostora za 60 °C, radijator	20
tablica 14. rezultati mjerenja za radijator	22
tablica 15. pomoćna tablica za izračun ekponenta n i km	24
tablica 16. temperature prostora za 30 °C, konvektor	27
tablica 17. temperature polaza i povrata za 30 °C, konvektor	27
tablica 18. temperature vanjskog prostora za 30 °C, konvektor	27
tablica 19. temperature unutarnjeg prostora za 50, °C konvektor	29
tablica 20. temperature polaza i povrata vode za 50 °C, konvektor	29
tablica 21. temperature vanjskog prostora za 50 °C, konvektor	29
tablica 22. temperature unutarnjeg prostora za 60 °C, konvektor	31
tablica 23. temperature polaza i povrata vode za 60 °C, konvektor	31
tablica 24. temperature vanjskog prostora za 60 °C, konvektor	31
tablica 25. prikaz toplinski učin - eksperimentalno	33
tablica 26. pomoćna tablica za izračun karakteristične jedadžbe konvektora	33
tablica 27. konstrukcijske veličine konvektora	36
tablica 28. prikaz svih mjerenja konvektora za tri režima strujanja	43
tablica 29. prikaz toplinskih učina za eksperimentalnu i vdi heat atlas metodu	44
tablica 30. konstrukcijske veličine konvektora	45
tablica 31. utjecaj debljine lamela na toplinski učin	46

tablica 32. utjecaj razmaka lamela na toplinski učin.....	47
tablica 33. utjecaj širine lamele na toplinski učin	48
tablica 34. utjecaj visine lamele na toplinski učin.....	49
tablica 35. utjecaj izbora materijala na toplinski učin	50
tablica 36. utjecaj masenog protoka na toplinski učin	51
tablica 37. tablica srednjih temperatura zidova za konvektor	52
tablica 38. tablica srednjih temperatura zidova za radiator	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Φ	W	toplinski učin
$q_{m,w}$	kg/s	maseni protok vode
$h_{w,1}$	J/kg	ulazna specifična entalpija vode
$h_{w,2}$	J/kg	izlazna specifična entalpija vode
K_m	-	konstanta modela
$\Delta T, \Delta \vartheta$	K, °C	nadtemperatura
n	-	eksponent karakteristične jednadžbe
ϑ_m	°C	srednja temperatura vode
ϑ_r	°C	referentna temperatura
$\vartheta_{w,1}$	°C	temperatura polaza vode
$\vartheta_{w,2}$	°C	temperatura povrata vode
N	-	broj mjernih točaka
c_w	J/kgK	specifični toplinski kapacitet vode
A_p	m ²	nastrujna površina
L_k	m	duljina konvektora
b_k	m	širina konvektora
ρ_z	kg/m ³	gustoća zraka
$q_{m,z}$	kg/s	maseni protok zraka
w_z	m/s	brzina strujanja zraka
$c_{p,z}$	J/kgK	specifični toplinski kapacitet zraka
$h_{z,1}$	J/kg	ulazna specifična entalpija zraka
$h_{z,2}$	J/kg	izlazna specifična entalpija zraka
$\vartheta_{z,1}$	°C	ulazna temperatura zraka
$\vartheta_{z,2}$	°C	izlazna temperatura zraka
d_o	m	vanjski promjer cijevi
δ_t	m	debljina stijenke cijevi

d_i	m	unutarnji promjer cijevi
λ_t	W/mK	toplinska vodljivost materijala cijevi
δ	m	debljina lamele
a	m	razmak između lamela
s	m	korak lamele
l_f	m	širina lamele
b_f	m	visina lamele
c_f	m	treća dimenzija lamele
λ_f	W/mK	toplinska vodljivost materijala lamele
w_w	m/s	brzina strujanja vode
ρ_w	kg/m ³	gustoća vode
μ_w	Pas	dinamička viskoznost vode
λ_w	W/mK	toplinska vodljivost vode
Re	-	Reynoldsov broj
Pr	-	Prandtlov broj
Nu	-	Nusseltov broj
μ_z	Pas	dinamička viskoznost zraka
λ_z	W/mK	toplinska vodljivost zraka
α_i	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline na strani vode
A_i	m ²	unutarnja površina cijevi
A_f	m ²	površina lamela
A_t	m ²	vanjska površina cijevi između rebara
$A_{t,0}$	m ²	vanjska površina neorebrene cijevi
A	m ²	ukupna površina izmjene topline
C	-	konstanta za raspored cijevi
α_m	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline na strani zraka
α_v	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline na orebrenoj cijevi
η_f	-	iskoristivost lamele
φ'	-	pomoćni faktor za izračun η_f
φ	-	pomoćni faktor za izračun η_f

X	-	pomoćni faktor za izračun η_f
k	W/m ² K	koeficijent prolaza topline
$\Delta\vartheta_m$	°C	srednja logaritamska razlika temperatura

SAŽETAK

U sklopu rada sam proveo analizu toplinskih karakteristika podnog konvektora i radijatora u režimu grijanja. Analizu sam proveo u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje prema normi HRN EN 442-2 za tri različite temperature radnog medija. Također bilo je potrebno provesti mjerenja površinskih temperatura zidova ispitne sobe i usporediti ih s onima dobivenim prilikom ispitivanja radijatora.

Rad je razrađen uvodom gdje sam opisao elemente ispitne sobe i normu HRN EN 442-2. Rezultate mjerenja analizirao prema normi te dao dodatnu usporedbu prema metodi iz VDI Heat Atlasa. U konačnici sam proveo parametarsku analizu i dao preporuke za poboljšanje konstrukcije s ciljem povećanja toplinskog učina. Na samom kraju nalazi se usporedba površinskih temperatura zidova za konvektor i radijator.

Ključne riječi: radijator, konvektor, norma HRN EN 442-2, parametarska analiza, temperatura zidova

SUMMARY

In this work I conducted an analysis of the thermal characteristics of the floor convector and radiator in the heating mode. Analysis were conducted in the Laboratory for heat and thermal devices according to norm HRN EN 442-2 for three different temperature of working fluid. Also this work contains measurements of the surface temperatures of the walls of the test room. This temperatures were compared with temperatures obtained during radiator testing.

The project work was developed with an introduction where I described the elements of the test room and standard of HRN EN 442-2. The results of the measurements were analyzed according to the norm and later gave additional comparison with method from the VDI Heat Atlas. In the end I did parametric analysis and made recommendations to improve the structure in order to increase heating output. At very last there is a comparison of surface temperature of the walls in convector and radiator mode.

Key words: radiator, convector, standard HRN EN 442-2, parametric analysis, temperature of the walls

1. UVOD

1.1. Radijatori

Radijator je element sustava grijanja koji služi za zagrijavanje prostora. To ogrjevno tijelo spada u izmjenjivače topline koji prenose toplinu s ogrjevnog medija (vode, pare...) na sam zrak u prostoru. Osnovni mehanizam izmjene topline je konvekcija (70-85%), dok u manjoj mjeri zračenje.

Podijela ogrjevnih tijela:

1. Člankasta ogrjevna tijela
2. Pločasta ogrjevna tijela
3. Konvektori
4. Cijevni grijači
5. Panelni grijači

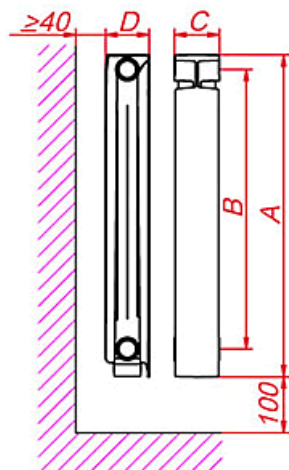
Zahtjevi koji se stavljaju na sva ogrjevna tijela su ravnomjerna razdioba temperature po prostoru, visoka učinkovitost, mala masa i jednostavna ugradnja. Konvektivna ogrjevna tijela se obično smještaju uz vanjski zid, ispod prozora, kako bi kompenzirali gubitke propuha, zračenja i konvekcije od hladno prozora. (slika 2.) Sam utjecaj na toplinsku ugodnost ima i razdioba temperature po visini prostorije. U radu smo testirali radijator, koji u odnosu na konvektor ima puno lošiju temperaturnu razdiobu.

U ovom radu smo testirali člankasti radijator proizvođača „Lipovica“ model SOLAR. Taj aluminijski lijevani radijator testiran je po normi HRN EN 442-2.

Bitne karakteristike	Svojstva				Usklađena tehnička specifikacija
Oslobađanje opasnih supstanci	Nema				EEC 76/769
Otporno na vatru	A1				EN 442-1-2-3
Udaljenost između priključaka	350	500	600	700	
Maksimalan radni tlak	16 bara				
Tlak ispitivanja	27,04 bara				
Km (koeficijent radijatora)	0,5631	0,7199	0,7921	0,8504	
n (eksponent radijatora)	1,2903	1,2994	1,3085	1,3213	
$Q_{\Delta t 50}$ (toplinski učinak) W	87,6	116	132	149 W	
Toplinske karakteristike kod različitih Δt	$Q = Km * \Delta t^n$				

Tablica 1. Svojstva modela "SOLAR"

Izvor: <http://www.lipovica.hr/radijator-solar.html>, preuzeto 20.02.2017.



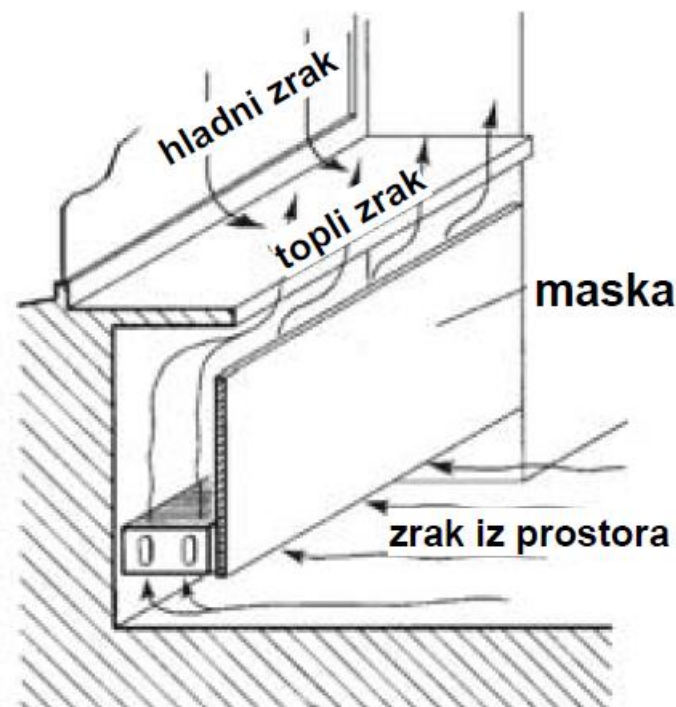
Ugradnja na otvoreni ravni zid

Slika 1. Dimenzije ugradnje radijatora

Izvor: http://www.lipovica.hr/images/stories/content_img/solar_dop_hr.pdf, preuzeto „19.02.2017.“

1.2. Konvektori

Konvektori su ogrjevna tijela sastavljena iz cijevi s nanizanim lamelama. Poprečni presjek cijevi je kružni ili ovalni. Također spadaju u izmjenjivače topline koji prenose toplinu s ogrjevnog medija (vode), na zrak u prostoriji. Osnovni mehanizam izmjene topline je konvekcija. Prednosti konvektora su male dimenzije, male masa i mali sadržaj vode u odnosu na radiator, dok su nedostaci izgled i otežano čišćenje.



Slika 2. Princip rada konvektora

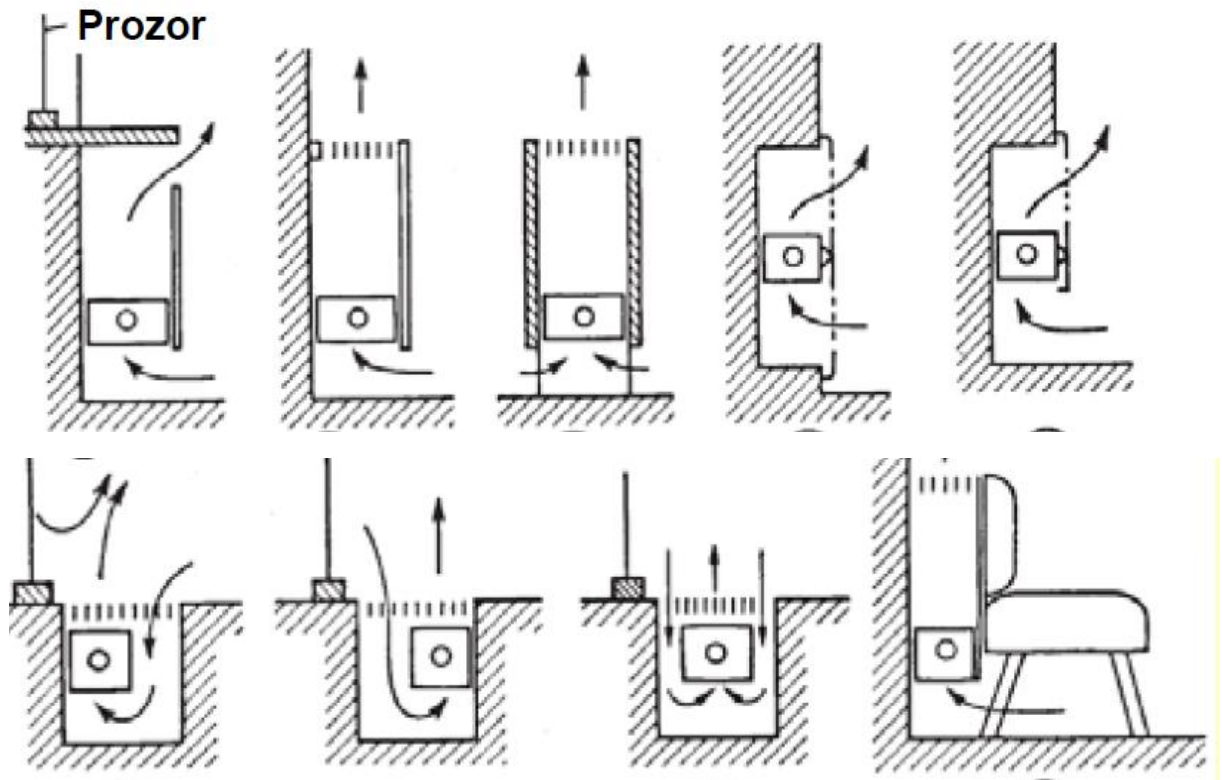
Izvor: Balen, skripta iz kolegija: Grijanje [1]

Konvektori imaju dvije osnovne izvedbe [1] :

- Konvektori s prirodnom cirkulacijom – postojanje strujanja uzgonom zbog razlika temperatura zraka ispod i iznad konvektora
- Konvektori s prisilnom cirkulacijom – imaju ugrađeni ventilator što za posljedicu ima bolji koeficijent prolaza topline i veći toplinski učin

Prema slici 5. postoji nekoliko mogućnosti ugradnje konvektora:

- zidni konvektori
- stropni konvektori
- podni konvektori



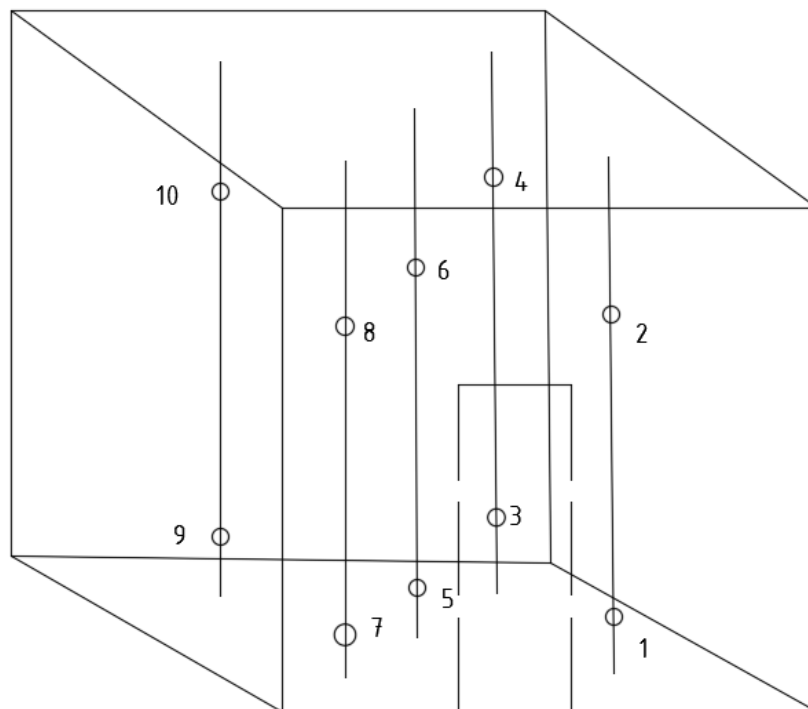
Slika 3. Mogućnosti ugradnje konvektora

Izvor: Balen, skripta iz kolegija: Grijanje [1]

2. MJERNA LINIJA

Mjerenje je provedeno u laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje 2017. godine. Mjerenja su provedena u skladu s normom HRN EN 442-2.

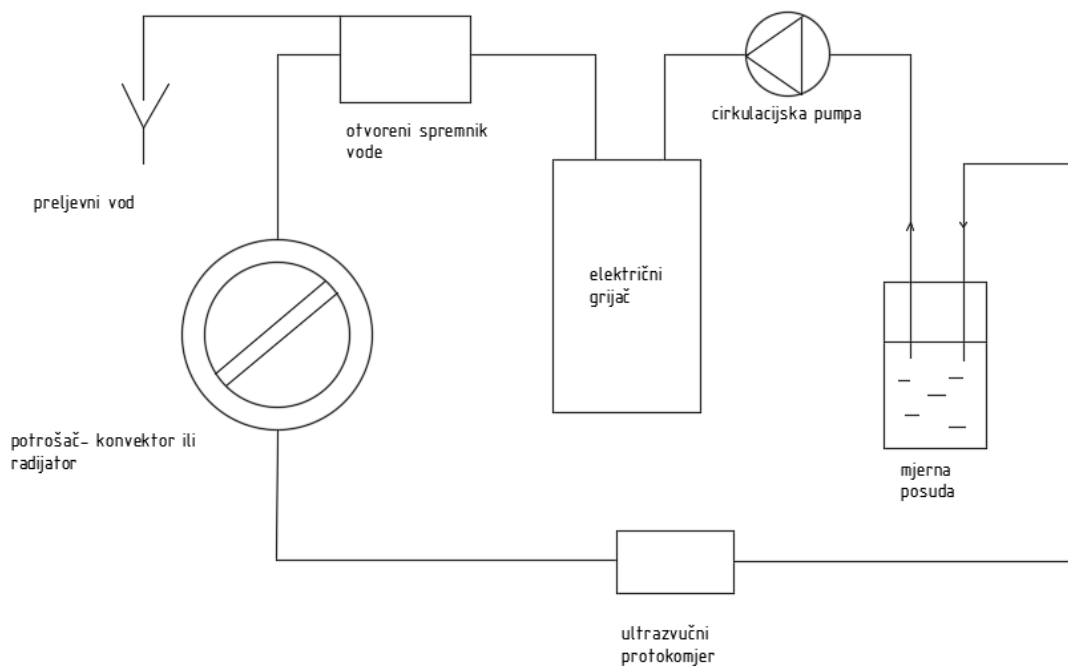
Radijator i konvektor su instalirani u ispitnoj sobi koja je dimenzionirana u skladu s normom HRN EN 442-2. Deset termoparova je raspoređeno unutar sobe, dok se hlađenje sobe vrši ventilacijom kroz otvor i transmisijom kroz zidove. Vanjski prostor se hladi pomoću zasebnog sustava kako bi se toplinski tok konstantno odvodio da bi postigli stacionarne uvjete.



Slika 4. Skica sobe sa termoparovima

Izvor: Izrada autora

Voda se zagrijava pomoću električnog grijača gdje prolaskom kroz otvoreni spremnik odlazi prema potrošaču. Vodu prema grijaču opskrbljava cirkulacijska pumpa, a nakon potrošača vršimo mjerenje protoka pomoću ultrazvučnog protokomjera. Ovaj sustav je otvoren sustav, jer prije cirkulacijske pumpe imamo mjernu posudu koja se nalazi pri atmosferskom tlaku.



Slika 5. Skica mjerne linije

Izvor: Izrada autora

3. MJERNA OPREMA

3.1. Termoparovi tip T i tip K

Termopar je temperaturni senzor koji se sastoji od dvije žice različitih metala koji su spojeni na jednom kraju. Princip rada se zasniva na termoelektričnom efektu „Thomasa Johanna Seebecka“. Napon se javlja na samom spoju metala zbog izlaganja temperaturnom gradijentu pri čemu dolazi do razlike potencijala između pozitivnog i negativnog metala.

Termoparove tipa T smo koristili za očitavanje temperature unutar same prostorije. Sastoje se od pozitivnog metala bakra i negativnog metala nikla. Tip T se odlikuje visokom točnošću od $\pm 1^\circ\text{C}$ do temperature od 100°C , ali se mogu naći i s boljim specifikacijama od $\pm 0.25^\circ\text{C}$ u cijelom radnom opsegu. Termoparovi su postavljeni u skladu s normom 442-2.

Termoparove tipa K smo koristili za očitavanje temperature zraka ispod i iznad konvektora. Sastoje se od pozitivnog metala kroma i negativnog metala nikla. Njihova točnost je u opsegu od $\pm 3^\circ\text{C}$ između 0°C i $+400^\circ\text{C}$, i $\pm 0.75\%$ između $+400^\circ\text{C}$ i 1100°C .

Tablica 2. Svojstva i vrste termoparova

Tip	Legura	Opseg u $^\circ\text{C}$
J	Fe, Cu-NI	-210 do 760
K	Ni-Cr, Ni-Al	-270 do 1372
T	Cu, Cu-Ni	-27 do 400
E	Ni-Cr, Cu-Ni	-270 do 1000
R	Pt-13% Rh, Pt	0 do 1768
S	Pt-10% Rh, Pt	0 do 1768
N	Ni-14,2% Cr-1.4% Si, Ni-4.4% Si-0.1%Mg	-270 do 1300

3.2. Termografska kamera

Infracrvenom termografijom snimamo infracrveno zračenje koje emitira objekt i obradom zračenja dobivamo vidljivu sliku, termogram. Cjelokupno zračenje se sastoji od reflektiranog, propuštenog i vlastitog emitiranog zračenja. Ono što pokušavamo utvrditi termografskom kamerom je vlastito emitirano zračenje. Da bismo eliminirali ostala zračenja smanjujemo ukupno zračenje pomoću koeficijenta emisijskog faktora ε .

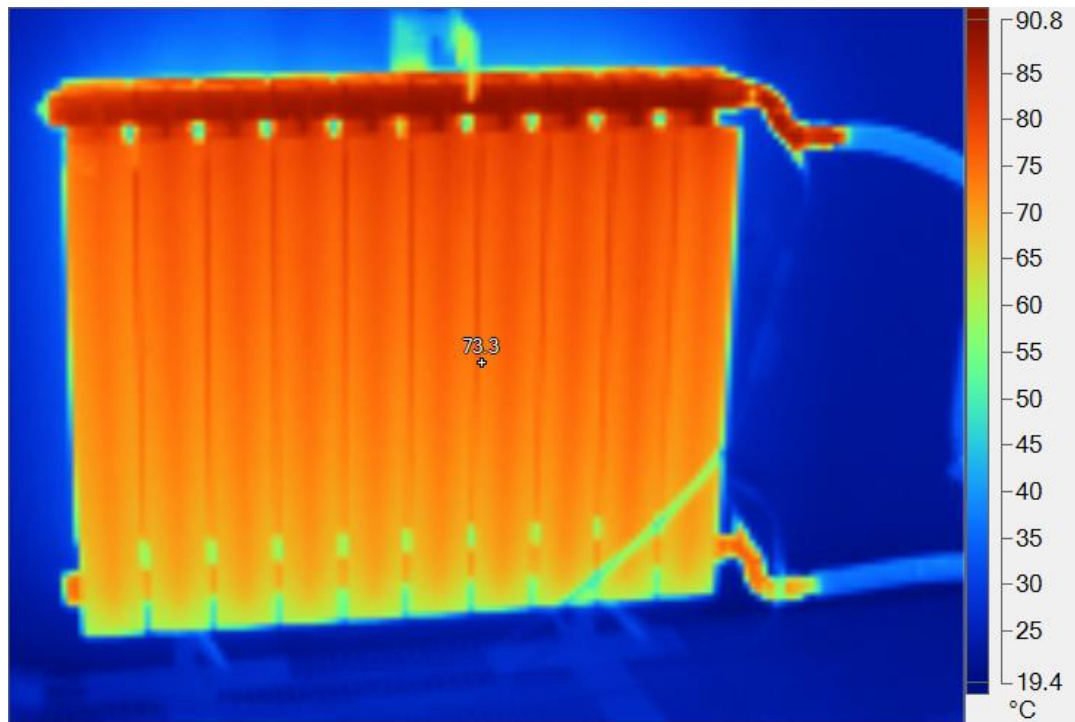
Tablica 3. Karakteristike termografske kamere Fluke Ti-25

Temperaturni raspon	-20 °C do 350 °C
Točnost	± 2 °C or 2 %
Vidno polje	23° x 17°
Prostorna razlučivost	2.5 mRad
Toplinska osjetljivost	≤ 0.1 °C pri 30 °C (100 mK)



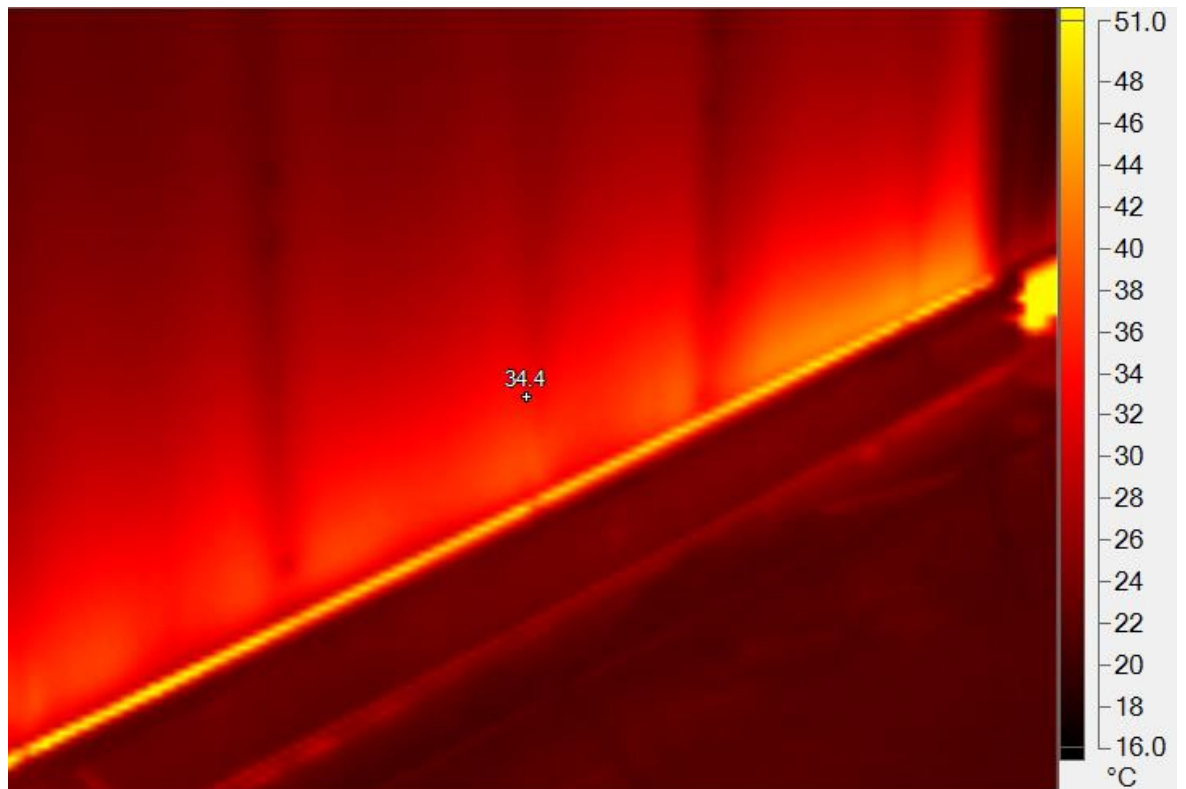
Slika 6. Termografska kamera FLUKE Ti-25

Izvor: <http://en-us.fluke.com/products/all-products/fluke-infrared-camera.html>, preuzeto „20.02.2017.“



Slika 7. Infracrvena fotografija radijatora

Izvor: slika autora



Slika 8. Infracrvena fotografija konvektora

Izvor: slika autora

3.3. Anemometar sa žarnom niti

Anemometar sa žarnom niti mjeri brzinu vjetra opažanjem odvođenja topline zbog gibanja zraka. Glavni element je senzor ugrijane žice kojoj se mijenja otpor odvođenja u ovisnosti od brzine vjetra. Žica je izrađena od platine jer je otporna na oksidaciju i ima dobar temperaturni koeficijent ($0,003/^\circ\text{C}$). Dimenzije žice su od 4 do 10 μm u promjeru i 1 mm u duljinu.

3.4. Pretvarač brzine strujanja- ultrazvučni protokomjer

Ultrazvučni protokomjer služi za mjerenje volumnog protoka čistih kapljevina. Princip rada je da zbog strujanja fluida postoji razlika između vremena uzvodnog i nizvodnog prolaza. Pri raspršivanju zvuka dolazi do frekvencijskog pomaka na osnovi kojeg se zaključuje o smjeru strujanja i brzini.

3.5. Analogno-digitalni pretvarač

Termoparovi, kao i ultrazvučni protokomjer su preko A/D pretvarača spojeni na računalo pomoću softwarea. Software nam omogućava praćenje promjena temperatura i protoka u vremenskim periodima od 30 sekundi.

4. TESTIRANJE ISPRAVNOSTI ULTRAZVUČNOG PROTOKOMJERA

Testiranje smo vršili pri temperaturi 60 °C :

- protok 0,145 m³/h

- $\rho = 983,2 \text{ kg/m}^3$

Testiranje smo vršili pomoću vage, cijevi i štoperice.

Postupak: Prvo smo resetirali vagu da pokazuje 0 kg. Nakon toga smo istovremeno stavili crijevo iz protokomjera u bačvu i pokrenuli štopericu. Mjerenje smo bilježili u četiri etape:

Tablica 4. Rezultati mjerenja ispravnosti ultrazvučnog protokomjera

Masa	Vrijeme	Rezultat:	St. devijacija
2,5 kg	1 min	0,15 m ³ /h	3,45%
7,026 kg	3 min	0,1429 m ³ /h	1,4%
11,71 kg	5 min	0,143 m ³ /h	1,44%
18,77 kg	8 min	0,143 m ³ /h	1,25%

Analizom smo utvrdili da imamo odstupanje od protoka 1,25% što bi daljnjim mjerenjem bilo i manje. Prema normi HRN EN 442-2, odstupanje protoka vode ne smije biti veće od 1%.

5. PROCEDURA MJERENJA PREMA HRN EN 442-2 [2] :

Kako bi se utvrdila karakteristična jednadžba potrebno je odrediti toplinski učin samog ogrjevnog tijela. Kako toplinski učinak ne možemo mjeriti direktno, moramo ga mjeriti posredno preko drugih fizikalnih informacija i matematičkih relacija.

Postoje dvije metode mjerenja toplinskog učinka:

- Električna metoda
- Metoda vaganja

Električna metoda mjeri razliku između snage P_{el} grijača i oduzima ga od topline izgubljene u potrošaču i cijevima. Također u proračun ulazi i snaga pumpe.

Metoda vaganja izračunava toplinski učin preko masenog protoka vode i temperatura polaza i povrata. Te temperature koristimo u izračunavanju spec. entalpija definiranih preko internacionalnih toplinskih tablica pri referentnom tlaku vode od 120 kPa.

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) \quad (1)$$

Da bi se odredila karakteristična jednadžba moramo mjeriti najmanje tri točke pri konstantnom protoku i nadtemperaturama od :

$$\Delta T = (30 \pm 2,5) \text{ K} \quad (2)$$

$$\Delta T = (50 \pm 2,5) \text{ K} \quad (3)$$

$$\Delta T = (60 \pm 2,5) \text{ K} \quad (4)$$

Prilikom određivanja, referentna temperatura zraka se ne smije mijenjati više od $\pm 1K$ od jednog mjerenja do drugog, protok vode ne smije varirati više od 1%, a između mjerenja ne smijemo imati veću promjenu protoka od $\pm 5\%$. Također temperatura zraka ne smije varirati više od $\pm 0,1 K$.

Za ogrjevna tijela radijatore, standardna karakteristična jednadžba je:

$$\Phi = K_m \cdot \Delta T^n \quad (5)$$

Φ - toplinski učin

K_m - konstanta modela

ΔT – nadtemperatura

n – eksponent karakteristične jednadžbe

Primjenom metode najmanjih kvadrata na karakterističnu jednadžbu dobivamo konstantu modela i eksponent karakteristične jednadžbe [2] :

$$\log K_m = \frac{\sum(\log \Phi) \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) \cdot \sum(\log \Delta T)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2} \quad (6)$$

$$n = \frac{N \cdot \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) - \sum(\log \Delta T) \cdot \sum(\log \Phi)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2} \quad (7)$$

N - broj mjernih točaka

6. ANALIZA REZULTATA RADIJATORA

6.1. Nadtemperatura 30°C – radijator

Tablica 5. Temperature prostora za 30 °C, radijator

Temperatura termopara: Prostor 1	20,888
Temperatura termopara: Prostor 2	22,8135
Temperatura termopara: Prostor 3	20,882
Temperatura termopara: Prostor 4	22,9245
Temperatura termopara: Prostor 5	20,783
Temperatura termopara: Prostor 6	22,94
Temperatura termopara: Prostor 7	20,27
Temperatura termopara: Prostor 8	22,68
Temperatura termopara: Prostor 9	20,547
Temperatura termopara: Prostor 10	22,9
Srednja temperatura prostora	21,76329

Tablica 6. Temperature polaza i povrata za 30 °C, radijator

Temperatura polaza vode	54,728
Temperatura povrata vode	50,365
Protok	2,473316694 = 0,148

Tablica 7. Temperature vanjskog prostora za 30 °C, radijator

Termopar 108	15
Termopar 109	16,78
Termopar 110	17,85
Termopar 112	21,11

Svojstva vode za srednju temperaturu 52,643 °C prema [4] iznosi:

$$\rho_w = 986,5 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4180,5 \text{ J/kgK}$$

$$q_{m,w} = q_{v,w} \cdot \rho_w = 4,111 \cdot 10^{-5} \cdot 986,5 = 0,0406 \text{ kg/s}$$

Toplinski učin na strani vode dakle iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 0,0406 \cdot 4,1805 \cdot (54,81 - 50,48) = 740,5 \text{ W}$$

6.2. Nadtemperatura 50°C – radiator

Tablica 8. Temperature prostora za 50 °C, radiator

Temperatura termopara: Prostor 1	22,54
Temperatura termopara: Prostor 2	24,9
Temperatura termopara: Prostor 3	22,55
Temperatura termopara: Prostor 4	25,2
Temperatura termopara: Prostor 5	22,35
Temperatura termopara: Prostor 6	24,45
Temperatura termopara: Prostor 7	21,7
Temperatura termopara: Prostor 8	24,85
Temperatura termopara: Prostor 9	22,01
Temperatura termopara: Prostor 10	24,7
Srednja temperatura prostora	23,5

Tablica 9. Temperature polaza i povrata za 50 °C, radiator

Temperatura polaza vode	67,88
Temperatura povrata vode	76,33
Protok	2,442 = 0,1452

Tablica 10. Temperature vanjskog prostora za 50 °C, radiator

Termopar 108	13,4
Termopar 109	15,5
Termopar 110	16,4
Termopar 112	21,4

Svojstva vode za srednju temperaturu 72,1 °C prema [4] iznosi:

$$\rho_w = 976,51 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4189,7 \text{ J/kgK}$$

$$q_{m,w} = q_{v,w} \cdot \rho_w = 4,111 \cdot 10^{-5} \cdot 976,51 = 0,0394 \text{ kg/s}$$

Toplinski učin na strani vode dakle iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 0,0394 \cdot 4189,7 \cdot (76,33 - 67,88) = 1394,378 \text{ W}$$

6.3. Nadtemperatura 60°C – radiator

Tablica 11. Temperature prostora za 60 °C, radiator

Temperatura termopara: Prostor 1	22,96
Temperatura termopara: Prostor 2	25,94
Temperatura termopara: Prostor 3	22
Temperatura termopara: Prostor 4	26,1
Temperatura termopara: Prostor 5	22,76
Temperatura termopara: Prostor 6	26,64
Temperatura termopara: Prostor 7	22,04
Temperatura termopara: Prostor 8	25,86
Temperatura termopara: Prostor 9	22,36
Temperatura termopara: Prostor 10	25,95
Srednja temperatura prostora	24,36

Tablica 12. Temperature polaza i povrata za 60 °C, radiator

Temperatura polaza vode	87,45
Temperatura povrata vode	76,75
Protok	2,47139591 = 0,145

Tablica 13. Temperature vanjskog prostora za 60 °C, radiator

Termopar 108	15,37
Termopar 109	17,16
Termopar 110	18,18
Termopar 112	21,34

Svojstva vode za srednju temperaturu 82,1 °C prema [4] iznosi:

$$\rho_w = 970,476 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4197,5 \text{ J/kgK}$$

$$q_{m,w} = q_{v,w} \cdot \rho_w = 4,111 \cdot 10^{-5} \cdot 970,476 = 0,03909 \text{ kg/s}$$

Toplinski učin na strani vode iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 0,03901 \cdot 4197,5 \cdot (87,45 - 76,75) = 1755,6 \text{ W}$$

6.4. Karakteristična jednadžba radijatora

Nadtemperatura 30 °C

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2} - \vartheta_r = \frac{54,81 + 50,48}{2} - 21,8 = 30,78$$

Nadtemperatura 50 °C

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2} - \vartheta_r = \frac{76,33 + 67,88}{2} - 23,5 = 48,39$$

Nadtemperatura 60 °C

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2} - \vartheta_r = \frac{87,45 + 76,75}{2} - 24,4 = 57,7$$

Tablica 14. Rezultati mjerenja za radijator

Temperaturni režim °C	54,81-50,48	76,33-67,88	87,45-76,75
Temperatura prostorije °C	21,8	23,5	24,4
Nadtemperatura $\Delta\vartheta$ °C	30,78	48,39	57,7
Toplinski učin Φ	734,9	1394,378	1755,6

Karakteristična jednadžba glasi:

$$\Phi = K_m \cdot \Delta T^n$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_m - \vartheta_r$$

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_{w,1} + \vartheta_{w,2}}{2}$$

Referentna temperatura se dobiva osrednjavanjem temperature izmjerenih u prethodnih 10 točaka prostorije.

Konstanta modela te eksponent karakteristične jednadžbe dobivaju se primjenom metode najmanjih kvadrata prema izrazima iz [4]:

$$\log K_m = \frac{\sum(\log \Phi) \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) \cdot \sum(\log \Delta T)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

$$n = \frac{N \cdot \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) - \sum(\log \Delta T) \cdot \sum(\log \Phi)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

gdje je

N - broj mjernih točaka

Tablica 15. Pomoćna tablica za izračun ekponenta n i Km

Nadtemperatura	30,378	48,393	57,37
log ΔT	1,49	1,687	1,76
φ	740,5	1394,378	1755,6
log φ	2,866	3,144	3,244
$\sum \log \Delta T$	4,937		
$\sum \log \phi$	9,254		
log ΔT * log φ	4,27	5,304	5,71
$\sum \log \Delta T * \log \phi$	15,284		
(log ΔT)²	2,22	2,846	3,1
$\sum ((\log \Delta T)^2)$	8,166		
$(\sum (\log \Delta T))^2$	24,374		

Uvrštavanjem u prethodno postavljene jednadžbe dobivamo:

$$\log K_m = \frac{\sum(\log \phi) \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - \sum(\log \Delta T \cdot \log \phi) \cdot \sum(\log \Delta T)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

$$\log K_m = \frac{9,254 \cdot 8,166 - 15,284 \cdot 4,937}{3 \cdot 8,166 - 24,374}$$

$$\log K_m = 0,82$$

$$K_m = 6,6116$$

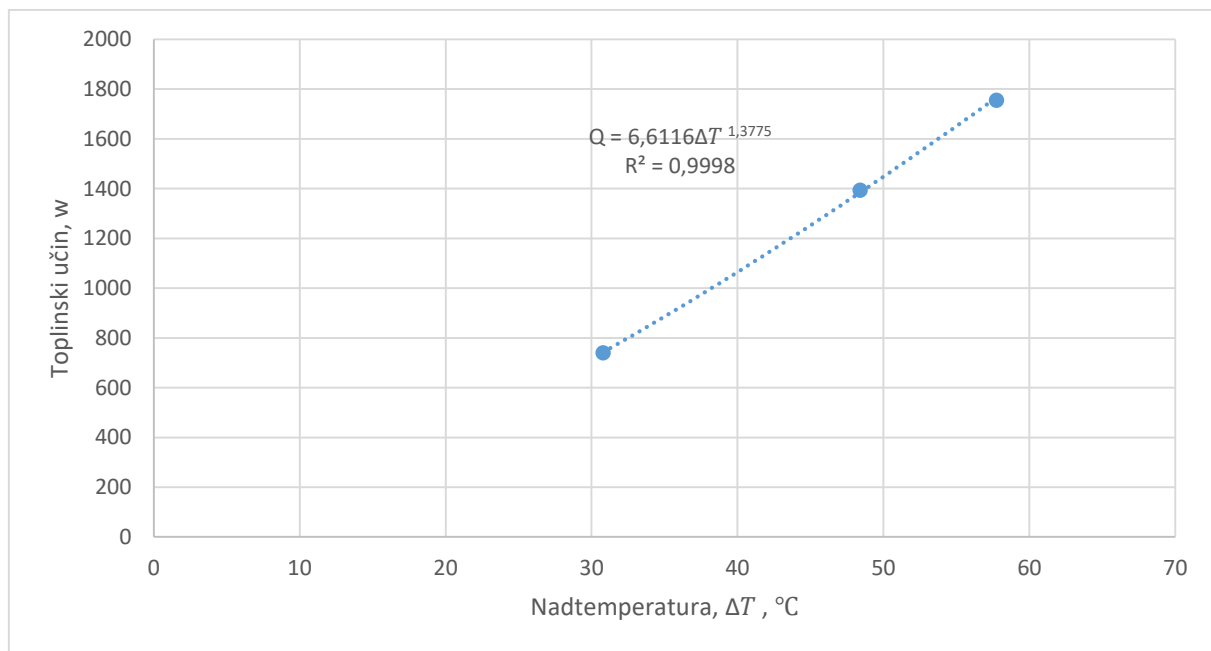
$$n = \frac{N \cdot \sum(\log \Delta T \cdot \log \phi) - \sum(\log \Delta T) \cdot \sum(\log \phi)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

$$n = \frac{3 \cdot 15,284 - 4,937 \cdot 9,254}{3 \cdot 8,166 - 24,374}$$

$$n = 1,3775$$

Iz toga slijedi karakteristična jednadžba toplinskog učina radijatora:

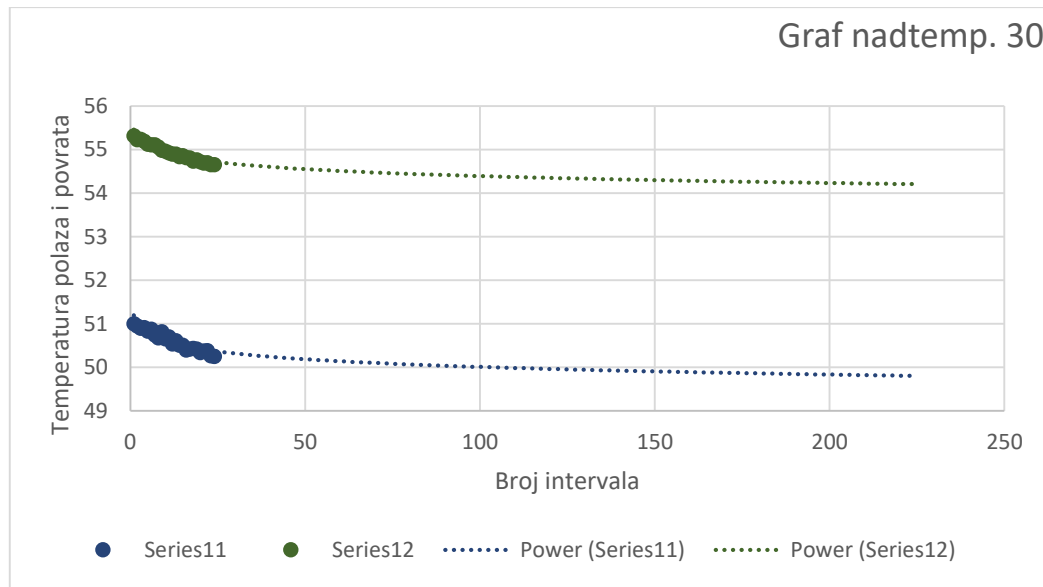
$$\Phi = 6,1746 \cdot \Delta T^{1,3775}$$



Slika 9. Karakteristična jednadžba radijatora

Izvor: Izrada autora

6.5. Usporedba realnih sa očekivanim rezultatima



Slika 10. Nestacionarnih uvjeta za nadtemp. 30 °C

Izvor: Izrada autora

Osrednjavanjem vrijednosti za zadnjih 30 točaka mjerenja, rezultati za nadtemperature od 50 i 60 °C pokazuju standardnu devijaciju manju od 0,3 °C, dok pri nadtemperaturi od 30 °C, odstupanje doseže i 0,8 °C. Samim time nismo postigli stacionarne uvjete. Ovaj graf prikazuje nakon koliko intervala od po 30 sekundi bi se postigli ti stacionarni uvjeti. Očekivani eksponent karakteristične jednadžbe se kreće u intervalu od 1,25-1,35, dok dobiveni eksponent iznosi 1,37. Osjetljivost rezultata je velika te zaključujemo da je sustavu potrebno više vremena za postizanje stacionarnih uvjeta nego što smo mu dali pri testiranju.

7. ANALIZA REZULTATA KONVEKTORA

7.1. Nadtemperatura 30°C konvektor

Tablica 16. Temperature prostora za 30 °C, konvektor

Temperatura termopara: Prostor 1	18,79
Temperatura termopara: Prostor 2	19,52
Temperatura termopara: Prostor 3	18,96
Temperatura termopara: Prostor 4	19,6
Temperatura termopara: Prostor 5	18,92
Temperatura termopara: Prostor 6	19,56
Temperatura termopara: Prostor 7	18,51
Temperatura termopara: Prostor 8	19,35
Temperatura termopara: Prostor 9	19,03
Temperatura termopara: Prostor 10	19,55
Srednja temperatura prostora	19,18

Tablica 17. Temperature polaza i povrata za 30 °C, konvektor

Temperatura polaza vode	52,09
Temperatura povrata vode	49,5
Protok	2,122 = 0,126 m ³ /s

Tablica 18. Temperature vanjskog prostora za 30 °C, konvektor

Termopar 108	14,733
Termopar 109	15,363
Termopar 110	16,971
Termopar 112	16,135

Svojstva vode za srednju temperaturu 50,8 °C prema [4] iznosi:

$$\rho_w = 987,576 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4180 \text{ J/kgK}$$

$$q_{m,w} = q_{v,w} \cdot \rho_w = 3,47222 \cdot 10^{-5} \cdot 987,576 = 0,03456 \text{ kg/s}$$

Toplinski učin na strani vode iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 0,03456 \cdot 4180 \cdot (52,09 - 49,5) = 374,21 \text{ W}$$

7.2. Proračun brzine strujanja zraka za nadtemperaturu 30 °C

$$Q = A_p \cdot \rho_z \cdot w_z \cdot c_{p,z} \cdot \Delta\vartheta$$

Površina istrujavanja:

$$A_p = L_k \cdot b_k = 0,1565 \text{ m}^2$$

Gustoća zraka:

$$\rho_z = 1,166 \text{ kg/m}^3$$

Razlika temperatura zraka:

$$\Delta\vartheta = 14,47 \text{ °C}$$

Maseni protok:

$$q_{m,z} = A_p \cdot w_z \cdot \rho_z = 0,182479 w_z$$

$$w_z = \frac{q_{m,z}}{A_p \cdot \rho_z}$$

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/kgK}$$

$$\rightarrow w_z = 0,141 \text{ m/s (izmjereno 0,11 m/s)}$$

7.3. Nadtemperatura 50°C - konvektor

Tablica 19. Temperature unutarnjeg prostora za 50, °C konvektor

Temperatura termopara: Prostor 1	21,3
Temperatura termopara: Prostor 2	22,21
Temperatura termopara: Prostor 3	21,56
Temperatura termopara: Prostor 4	22,36
Temperatura termopara: Prostor 5	21,5
Temperatura termopara: Prostor 6	22,45
Temperatura termopara: Prostor 7	21,03
Temperatura termopara: Prostor 8	22,04
Temperatura termopara: Prostor 9	21,76
Temperatura termopara: Prostor 10	22,41
Srednja temperatura prostora	21,86071842

Tablica 20. Temperature polaza i povrata vode za 50 °C, konvektor

Temperatura polaza vode	76,76
Temperatura povrata vode	71,62
Protok	2,1136 = 0,126 m ³ /h

Tablica 21. Temperature vanjskog prostora za 50 °C, konvektor

Termopar 108	16,27
Termopar 109	17,19
Termopar 110	18,6
Termopar 112	17,6

Svojstva vode za srednju temperaturu 74,19 °C prema [4] iznosi:

$$\rho_w = 975,313 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4191 \text{ J/kgK}$$

$$q_{m,w} = q_{v,w} \cdot \rho_w = 3,47222 \cdot 10^{-5} \cdot 975,313 = 0,0341 \text{ kg/s}$$

Toplinski učin na strani vode iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 0,0341 \cdot 4191 \cdot (76,76 - 71,62) = 735,35 \text{ W}$$

7.3.1. Proračun brzine strujanja zraka za nadtemperaturu 50 °C:

$$Q = A_p \cdot \rho_z \cdot w_z \cdot c_{p,z} \cdot \Delta\vartheta$$

Površina istrujavanja:

$$A_p = L_k \cdot b_k = 0,1565 \text{ m}^2$$

Gustoća zraka:

$$\rho_z = 1,166 \text{ kg/m}^3$$

Razlika temperatura zraka:

$$\Delta\vartheta = 24,5 \text{ °C}$$

Maseni protok:

$$q_{m,z} = A_p \cdot w_z \cdot \rho_z = 0,182479 w_z$$

$$w_z = \frac{q_{m,z}}{A_p \cdot \rho_z}$$

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/kgK}$$

$$\rightarrow w_z = 0,163 \text{ m/s (izmjereno } 0,15 \text{ m/s)}$$

7.4. Nadtemperatura 60°C konvektor

Tablica 22. Temperature unutarnjeg prostora za 60 °C, konvektor

Temperatura termopara: Prostor 1	20,97
Temperatura termopara: Prostor 2	21,95
Temperatura termopara: Prostor 3	21,26
Temperatura termopara: Prostor 4	22,16
Temperatura termopara: Prostor 5	21,18
Temperatura termopara: Prostor 6	22,22
Temperatura termopara: Prostor 7	20,65
Temperatura termopara: Prostor 8	21,75
Temperatura termopara: Prostor 9	21,51
Temperatura termopara: Prostor 10	22,2
Srednja temperatura prostora	21,5857963

Tablica 23. Temperature polaza i povrata vode za 60 °C, konvektor

Temperatura polaza vode	84,825
Temperatura povrata vode	78,43
Protok	2,1175 = 0,126 m ³ /s

Tablica 24. Temperature vanjskog prostora za 60 °C, konvektor

Termopar 108	15,616
Termopar 109	16,701
Termopar 110	18,207
Termopar 112	17,138

Svojstva vode za srednju temperaturu 81,63 °C prema [4] iznosi:

$$\rho_w = 970,777 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4197,1 \text{ J/kgK}$$

$$q_{m,w} = q_{v,w} \cdot \rho_w = 3,47222 \cdot 10^{-5} \cdot 970,777 = 0,034 \text{ kg/s}$$

Toplinski učin na strani vode iznosi:

$$\Phi = q_{m,w}(h_{w,1} - h_{w,2}) = q_{m,w} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{w,1} - \vartheta_{w,2})$$

$$\Phi = 0,0343 \cdot 4197,1 \cdot (84,825 - 78,43) = 911,96 \text{ W}$$

7.4.1. Proračun brzine strujanja zraka za nadtemperaturu 60 °C

$$Q = A_p \cdot \rho_z \cdot w_z \cdot c_{p,z} \cdot \Delta\vartheta$$

Površina istrujavanja:

$$L_k = 4,86 \text{ m}; \quad b_k = 0,032 \text{ m}$$

$$A_p = L_k \cdot b_k = 0,1565 \text{ m}^2$$

Gustoća zraka:

$$\rho_z = 1,166 \text{ kg/m}^3$$

Razlika temperatura zraka:

$$\Delta\vartheta = 25 \text{ °C}$$

Maseni protok:

$$q_{m,z} = A_p \cdot w_z \cdot \rho_z = 0,182479 w_z$$

$$w_z = \frac{q_{m,z}}{A_p \cdot \rho_z}$$

$$c_{p,z} = 1005 \text{ J/kgK}$$

$$\rightarrow w_z = 0,1989 \text{ m/s (izmjereno 0,17 m/s)}$$

7.5. Karakteristična jednadžba konvektora

Tablica 25. Prikaz toplinski učin - eksperimentalno

Temperaturni režim °C	52,09-49,5	76,76-71,62	84,825-78,43
Temperatura prostorije °C	19,18	21,86	21,585
Nadtemperatura $\Delta\vartheta$ °C	31,615	52,33	60,04
Toplinski učin Φ	374,21	735,35	911,96

Tablica 26. Pomoćna tablica za izračun karakteristične jednadžbe konvektora

nadtemperatura	31,615	52,33	60,04
log ΔT	1,499893186	1,7187507	1,778440681
Φ	374,21	735,35	911,96
log Φ	2,573115	2,866494097	2,95997579
$\sum \log \Delta T$	4,99708		
$\sum \log \Phi$	8,3995848		
log $\Delta T \cdot \log \Phi$	3,8593976	4,9267887	5,26414136
$\sum \log \Delta \cdot \log \Phi$	14,05032766		
$(\log \Delta T)^2$	2,24967	2,95410397	3,162851256
$\sum ((\log \Delta T)^2)$	8,36662523		
$(\sum \log \Delta T)^2$	24,97080853		

Uvrštavanjem u prethodno postavljene jednadžbe dobivamo:

$$\log K_m = \frac{\sum(\log \Phi) \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) \cdot \sum(\log \Delta T)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

$$\log K_m = \frac{8,3995 \cdot 8,335 - 14,027 \cdot 4,987}{3 \cdot 8,335 - 24,87}$$

$$\log K_m = 0,508005026$$

$$K_m = 3,2226$$

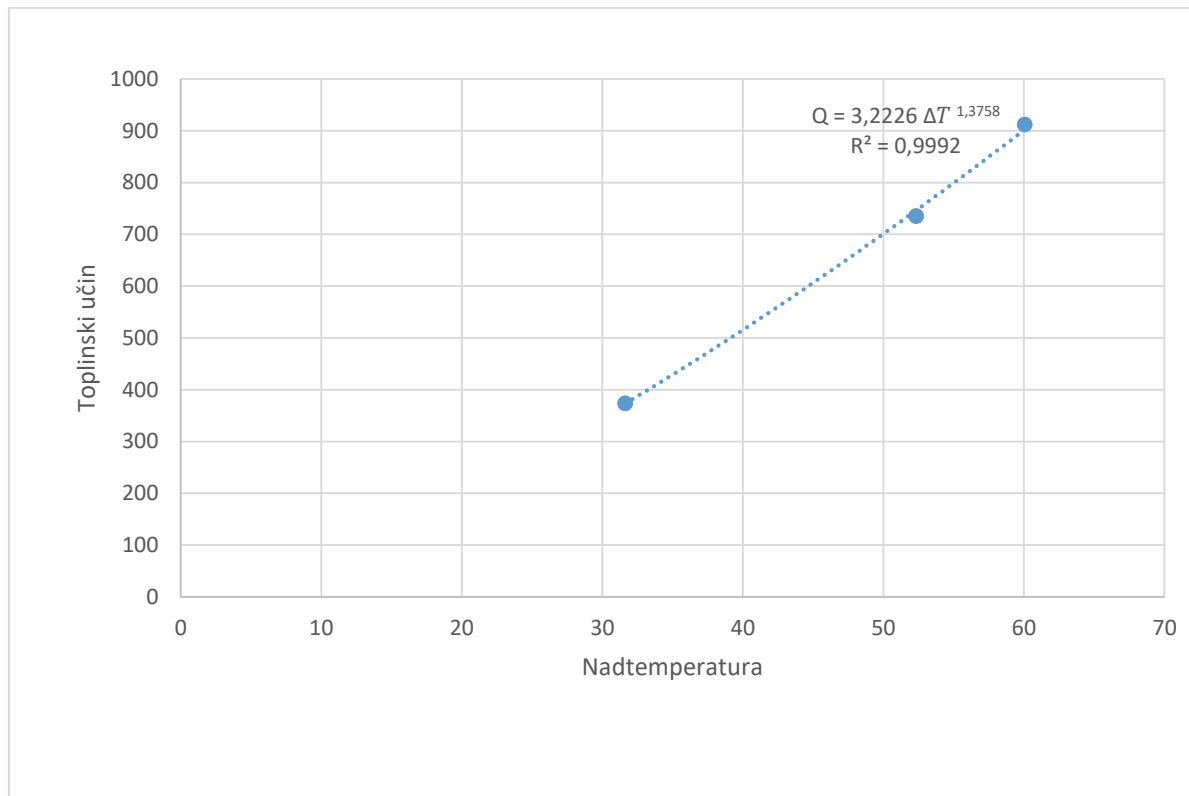
$$n = \frac{N \cdot \sum(\log \Delta T \cdot \log \Phi) - \sum(\log \Delta T) \cdot \sum(\log \Phi)}{N \cdot \sum[(\log \Delta T)^2] - (\sum(\log \Delta T))^2}$$

$$n = \frac{3 \cdot 14,027 - 4,987 \cdot 8,3995}{3 \cdot 8,335 - 24,87}$$

$$n = 1,3758$$

Iz toga slijedi karakteristična jednadžba toplinskog učina:

$$\Phi = 3,2226 \cdot \Delta T^{1,3758}$$



Slika 11. Karakteristična jednađžba konvektora

Izvor: Izrada autora

8. PRORAČUN TOPLINSKOG UČINA OREBRENE POVRŠINE

Odabrana metoda proračuna orebrene površine je iz VDI Heat Atlasa [2]. Proračun je proveden za režim iz točke za $\Delta\vartheta = 52,33^{\circ}\text{C}$

Ulazni podaci za proračun:

- maksimalna brzina strujanja zraka $w_z = 0,194 \text{ m/s}$
- maseni protok vode $q_{m,w} = 0,0341 \text{ kg/s}$

Konstrukcija konvektora: bakrene cijevi $\Phi 15 \times 0,7$

Tablica 27. Konstruktivske veličine konvektora

<i>Vanjski promjer cijevi d_o</i>	15 mm
<i>debljina stijenke cijevi δ_i</i>	0,7 mm
<i>unutarnji promjer cijevi d_i</i>	13,6 mm
<i>toplinska vodljivost λ_t</i>	400 W/mK
<i>debljina δ_l (lamelle)</i>	0,2 mm
<i>razmak između dvije lamelle a</i>	10 mm
<i>korak s</i>	10,2 mm
<i>širina l_f</i>	23 mm
<i>visina b_f</i>	60 mm
<i>treća dimenzija c_f</i>	9 mm
<i>toplinska vodljivost λ_l lamelle</i>	209 W/mK
<i>Ukupna duljina cijevi l</i>	9,7191 m
<i>Udaljenost cijevi s_l</i>	0,0275 m

8.1. Koeficijent prijelaza topline na strani vode prema Mac Adamsu [5] :

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_w = B_w \cdot f_w \cdot \frac{w^{0,8}}{d_i^{0,2}}$$

Toplinske karakteristike za srednju temperaturu vode 74,19 °C prema [4] :

$$\rho_w = 975,31 \text{ kg/m}^3$$

$$c_w = 4191,13 \text{ J/kgK}$$

$$\mu_w = 0,00038197 \text{ Pas}$$

$$\lambda_w = 0,66618 \text{ kg/m}^3$$

Brzinu strujanja vode iz jednadžbe kontinuiteta glasi:

$$w_w = \frac{4 \cdot q_{m,w}}{\rho_w \cdot d_i^2 \cdot \pi} = 0,2407 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{\rho_w \cdot w_w \cdot d_i}{\mu_w} = 8358,5$$

$2300 \leq Re \leq 10^4 \rightarrow$ prijelazno područje između laminarnog strujanja i turbulencije.

Korekcijski faktor $f_w < 1$ i glasi:

$$f_w = -0,0101183 \cdot (Re/1000)^2 + 0,18978 \cdot (Re/1000) + 0,106247$$

$$f_w = 0,985613$$

Koeficijent termofizičkih svojstva vode prema korekciji Mac Adams glasi:

$$B_w = 0,023 \cdot \rho^{0,8} \cdot c^{0,4} \cdot \lambda^{0,6} \cdot \mu^{-0,4} = 2906,1477$$

Koeficijent prijelaza na unutarnjoj strani iznosi:

$$\alpha_w = 2165,196 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

8.2. Koeficijent prijelaza topline na strani zraka prema VDI Heat Atlas-u:

Proračun predlaže definiranje prividnog koeficijenta prijelaza topline prema izrazu iz [3] :

$$\alpha_s = \alpha_R \left[1 - (1 - \eta_R) \cdot \frac{A_R}{A} \right]$$

Toplinske karakteristike za srednju temperaturu zraka 21,86°C prema [4]:

$$\rho_z = 1,181 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c_{p,z} = 1006 \text{ J}/\text{kgK}$$

$$\mu_z = 0,0000182 \text{ Pas}$$

$$\lambda_z = 0,0257 \text{ W}/\text{mK}$$

Površina neorebrene cijevi - vanjska:

$$A_o = d_o \cdot \pi \cdot l = 0,4580 \text{ m}^2$$

Površina cijevi – unutarnja:

$$A_i = d_i \cdot \pi \cdot l = 0,41525 \text{ m}^2$$

Površina rebra na ukupnoj duljini:

$$A_R = \frac{l}{s} \cdot 2 \cdot \left(l_f \cdot b_f + 2 \cdot b_f \cdot c_f - \frac{d_o^2 \cdot \pi}{4} \right) = 2,0672 \text{ m}^2$$

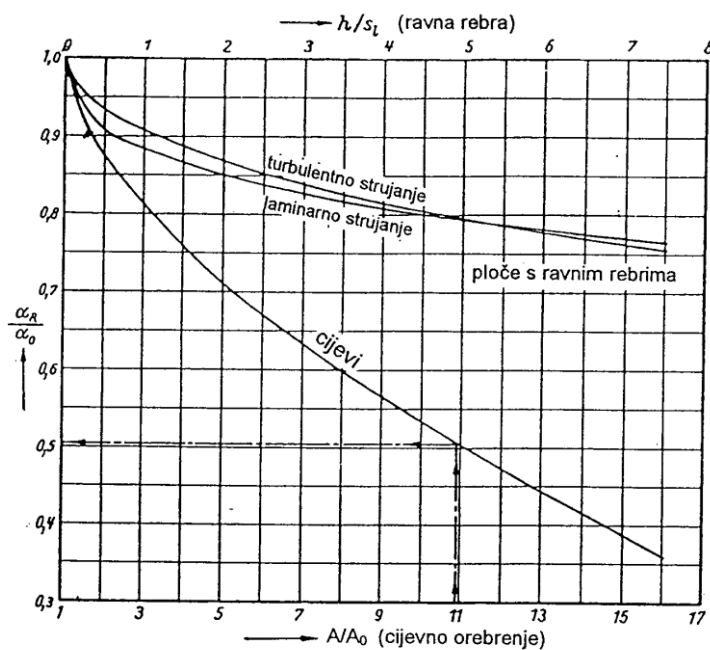
Površina cijevi između rebara na ukupnoj duljini:

$$A_t = \frac{s - \delta_r}{s} \cdot d_o \cdot \pi \cdot l = 0,407113 \text{ m}^2$$

Ukupna površina izmjene topline:

$$A = A_R + A_t = 2,474294 \text{ m}^2$$

Iz odnosa $\frac{A}{A_0}$ dobiva se prema dijagramu 1. $\frac{\alpha_R}{\alpha_0}$



Slika 12. Pomoćni dijagram

$$\frac{A}{A_o} = 5,4$$

$$\frac{\alpha_R}{\alpha_o} = 0,675$$

α_o se računa prema:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_o}{\lambda} = C \cdot Re^{0.61} \cdot Pr^{0.31}$$

gdje je konstanta C: C=0.21 - za redni raspored (odabrano)

C=0.45 - za šahovski raspored

Brzina u najužem presjeku izmjenjivača koja se koristi u Re broju:

$$w_m = w_o \cdot \frac{s_l}{s_l - d_o} \cdot \frac{s}{s - \delta_r} = 0,33 \text{ m/s}$$

gdje su:

w_m – brzina u najužem presjeku izmjenjivača

w_o – brzina ispred izmjenjivača

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re = \frac{\rho_z \cdot w_m \cdot d_o}{\mu_z} = 322,62$$

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\mu_z \cdot c_{p,z}}{\lambda_z} = 0,7148$$

Nusseltov broj iznosi:

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_o}{\lambda} = C \cdot Re^{0,61} \cdot Pr^{0,31} = 6,417$$

$$\alpha_o = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_o} = 10,91$$

Iz toga slijedi:

$$\frac{\alpha_R}{\alpha_o} = 0,675 \rightarrow \alpha_R = 7,3637$$

Koeficijent iskoristivosti rebra računa se preko značajki koje u sebi sadrže geometrijske veličine i α_R :

$$Y = \sqrt{\frac{2\alpha_R}{\delta_l \cdot \lambda_l}} = 18,77$$

Za izračun korisnosti lamele potrebno je izračunati pomoćne faktore φ' , φ i X prema izrazima:

$$\varphi' = 1,28 \cdot \frac{b_f}{d_o} \sqrt{\left(\frac{l_f}{b_f} - 0,2\right)} = 2,192253$$

$$\varphi = (\varphi' - 1) \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln \varphi') = 1,52$$

$$X = Y \cdot \left(\frac{d_o}{2}\right) \cdot \varphi = 0,213983$$

$$\eta_f = \frac{\tanh X}{X} = 0,989$$

Prividni koeficijent prijelaza topline iznosi:

$$\alpha = \alpha_R \left[1 - (1 - \eta_f) \cdot \frac{A_R}{A}\right] = 7,298 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline k:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \frac{A}{A_i} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_{cijevi}}{\lambda_{cijevi}}\right) \rightarrow k = 7,154 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{uz } \Delta\vartheta_m = 37,82 \text{ }^\circ\text{C}$$

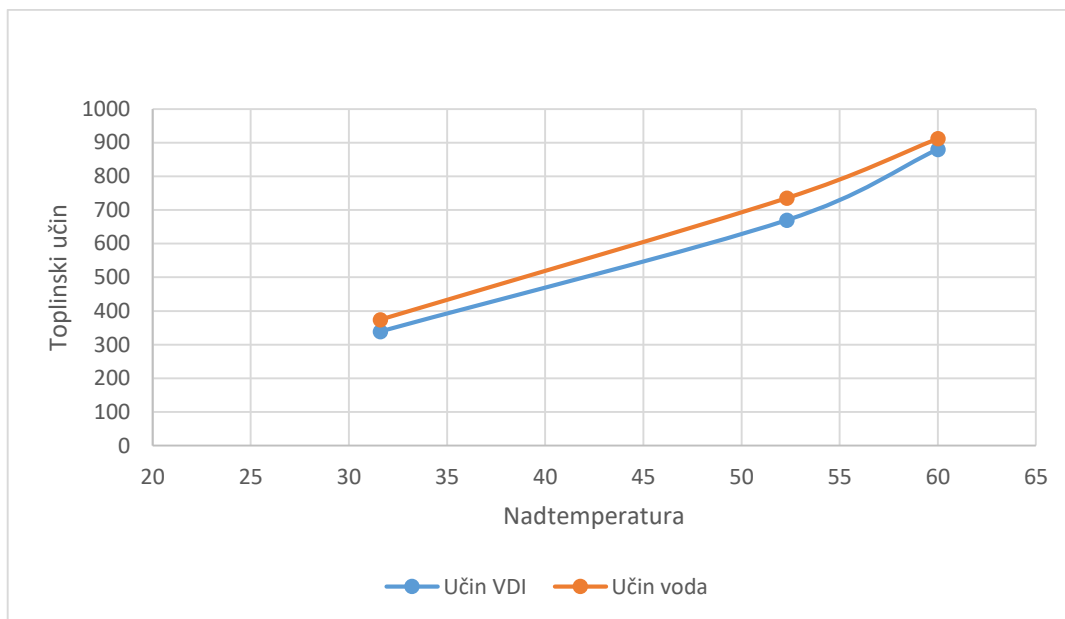
Orebrena površina prenosi količinu topline od:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m = 669,46 \text{ W}$$

8.3. Proračun za druga dva režima proveden je analogno prethodno prikazanom proračunu

Tablica 28. Prikaz svih mjerenja konvektora za tri režima strujanja

Temperaturni režim °C	52,09 - 49,5	76,76 - 71,62	84,825 - 78,43
Temperatura prostorije °C	19,18	21,86	21,585
Nadtemperatura $\Delta\vartheta$ °C	31,615	52,33	60,04
Log. Temperatura	22,335	37,82	43,465
Brzina strujanja zraka nakon konvektora m/s	0,11	0,15	0,176
α_i [W/m ² K]	1646,588	2165,196	2277,37
α_v [W/m ² K]	6,277	7,41	8,36
k [W/m ² K]	6,137	7,98	8,18
Toplinski učin preko VDI	339,16	669,46	879,868
Toplinski učin Φ	374,21	735,35	911,96
Srednja temp. zraka iznad konvektora	35,17	48	50
Srednja temp. zraka ispod konvektora	20,7	23	25



Tablica 29. Prikaz toplinskih učina za eksperimentalnu i VDI Heat Atlas metodu

Izvor: Izrada autora

Uočavamo da pri eksperimentalnoj metodi dobivamo nešto veće učine nego preko proračuna iz VDI Heat Atlasa. Odstupanja su manja od 10% tako da možemo reći da su dobiveni rezultati realni.

9. PARAMETARSKA ANALIZA

Parametarsku analizu provodimo s ciljem povećavanja toplinskog toka konvektora. U analizi smo proveli nekoliko parametara koje možemo promijeniti.

Parametri koje smo mijenjali:

- Debljina lamele
- Razmak lamela
- Širina lamele
- Visina lamele
- Materijal lamele

Tablica 30. Konstruktivske veličine konvektora

<i>Vanjski promjer cijevi d_o</i>	15 mm
<i>debljina stijenke cijevi δ_t</i>	0,7 mm
<i>unutarnji promjer cijevi d_i</i>	13,6 mm
<i>toplinska vodljivost λ_t</i>	400 W/mK
<i>debljina δ_l (lamele)</i>	0,2 mm
<i>razmak između dvije lamele a</i>	10 mm
<i>korak s</i>	10,2 mm
<i>širina l_f</i>	23 mm
<i>visina b_f</i>	60 mm
<i>treća dimenzija c_f</i>	9 mm
<i>toplinska vodljivost λ_l lamele</i>	209 W/mK
<i>Ukupna duljina cijevi l</i>	9,7191 m
<i>Udaljenost cijevi s_l</i>	0,0275 m

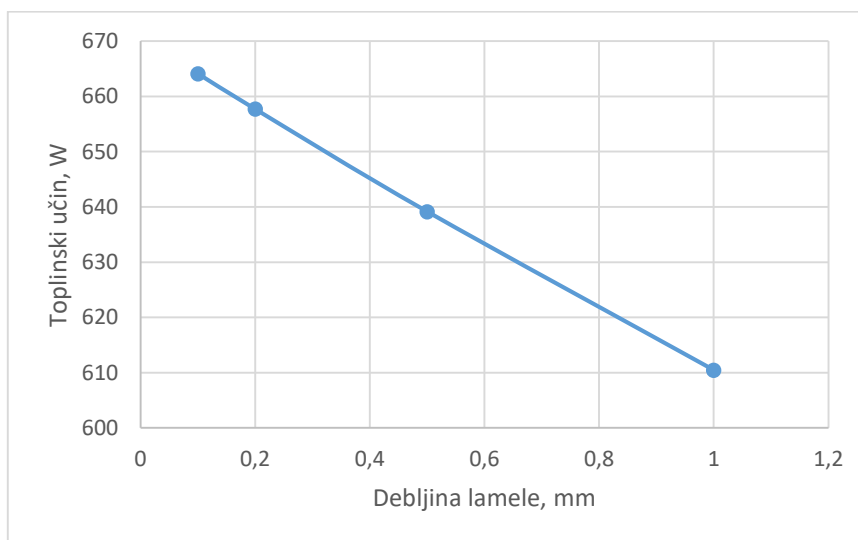
9.1. Debljina lamela s promjenom koraka

Tablica 31. Utjecaj debljine lamela na toplinski učin

Debljina lamele δ_l , mm	Toplinski učin Φ , W
0,1 mm	675,954 W
0,2 mm	669,46 W
0,5 mm	650,69 W
0,7 mm	635,64 W

Pošto vrijedi jednadžba: $Q = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_{log} = q_m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$

Uz pretpostavku da nam k ostaje približno konstantan, vršimo iteraciju gdje mijenjamo izlaznu temperaturu vode i izlaznu temperaturu zraka.



Slika 13. Utjecaj debljine lamele na toplinski učin

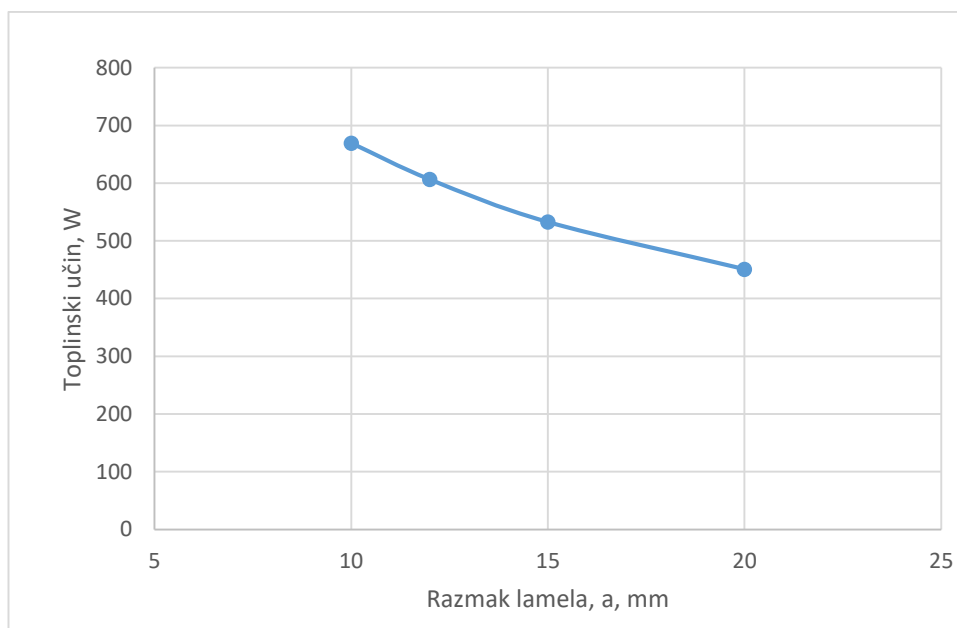
Izvor: Izrada autora

Zaključujemo da toplinski učin pada s povećanjem debljine lamela. Sam odnos pada je linearan. Pošto nam je cilj imati čim veći učin, debljinu lamele od 0,1 mm je teško ispuniti, stoga možemo reći da debljina lamele od 0,2 mm je optimalna. Samom parametarskom analizom sve druge karakteristike ostaju iste osim što se smanjuje duljina neorebrene cijevi pa time i pada učin samog konvektora.

9.2. Razmak lamela

Tablica 32. Utjecaj razmaka lamela na toplinski učin

Ramak lamela, a, mm	Toplinski učin, Φ , W
10 mm	669,46 W
12 mm	606,324 W
15 mm	532,582 W
20 mm	450,8 W



Slika 14. Utjecaj razmaka lamele na toplinski učin

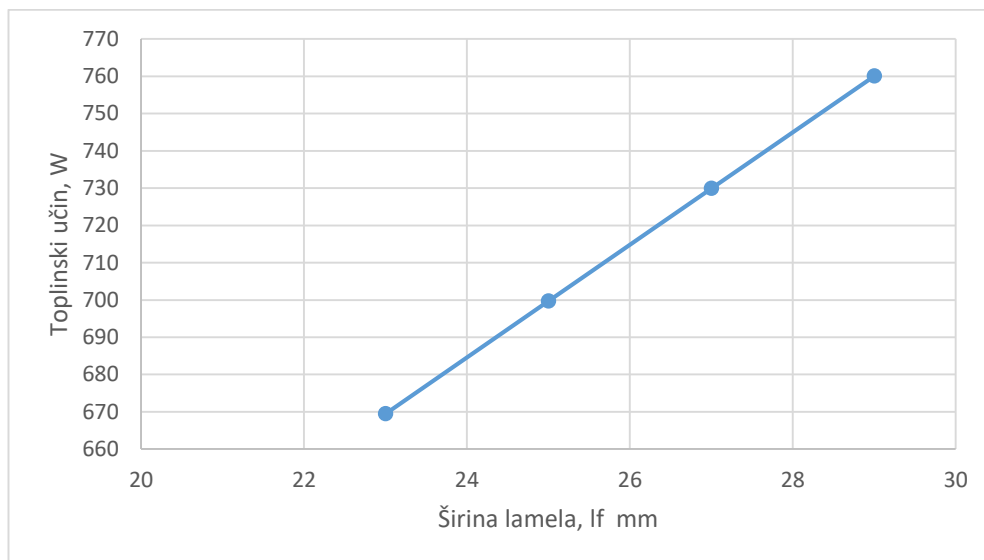
Izvor: Izrada autora

Porastom razmaka između lamela toplinski učin pada te uočavamo da pad nije linearan. Samim povećanjem razmaka između lamela smo smanjili površinu izmjene topline a pri tom ukupna duljina cijevi je ostala ista.

9.3. Širina lamela

Tablica 33. Utjecaj širine lamele na toplinski učin

Širina lamela, l_f mm	Toplinski učin, Φ , W
23 mm	669,46 W
25 mm	699,7 W
27 mm	729,89 W
29 mm	760,03 W



Slika 15. Utjecaj širine lamele na toplinski učin

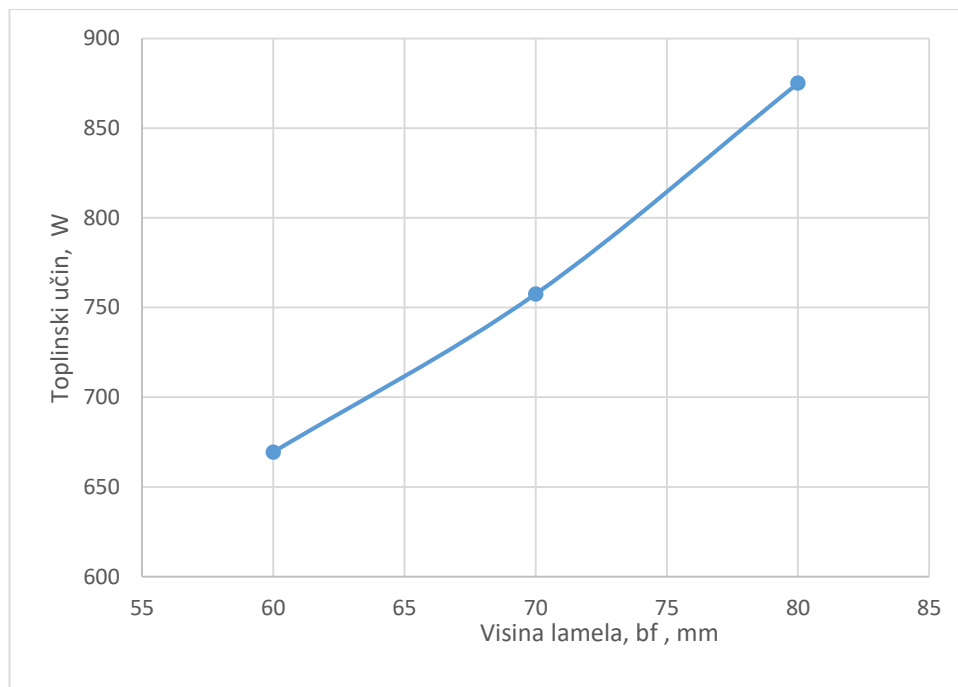
Izvor: Izrada autora

Povećanjem širine lamele raste nam i toplinski učin. Samim povećanjem od samo 6 mm dobili smo 100 W toplinskog toka. Povećanjem smo povećali i površinu izmjene topline a pri tom nismo dirali parametar duljine cijevi, odnosno konvektora. Sam zahtjev koji se stavlja na konstruktora je koliko mjesta ima za ugradnju konvektora pa je obično širina lamele predodređena s prostorom ugradnje konvektora.

9.4. Visina lamela

Tablica 34. Utjecaj visine lamele na toplinski učin

Visina lamela, b_f , mm	Toplinski učin, Φ , W
60 mm	669,46 W
70 mm	757,567 W
80 mm	875,038 W



Slika 16. Utjecaj visine lamele na toplinski učin

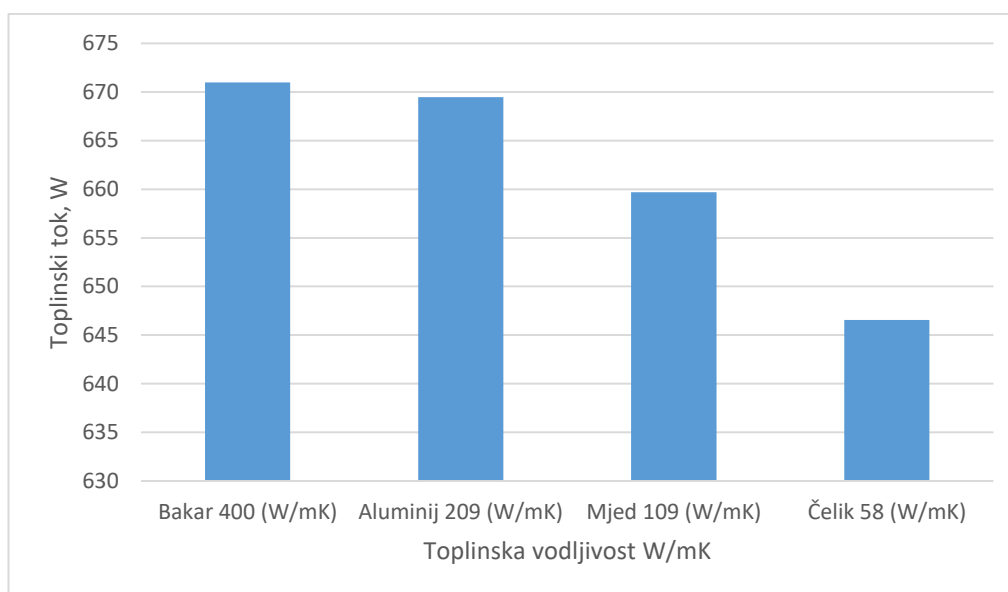
Izvor: Izrada autora

Povećanjem visine lamele nam se povećao i toplinski učin. Vidimo da je odnos linearan te uz samo 2 cm više možemo povećati učin i do 30%. Također, kao i kod povećanja širine, problem nam je prostor smještaja i dimenzije konvektora koji nam predodređuju samu visinu lamela.

9.5. Materijal lamele

Tablica 35. Utjecaj izbora materijala na toplinski učin

Materijal	Toplinska vodljivost λ [W/mK]	Toplinski učin, Φ , W
Bakar	400	670,97 W
Aluminij	209	669,46 W
Mjed	109	659,69 W
Čelik	58	646,56 W



Slika 17. Utjecaj toplinske vodljivosti na toplinski učin

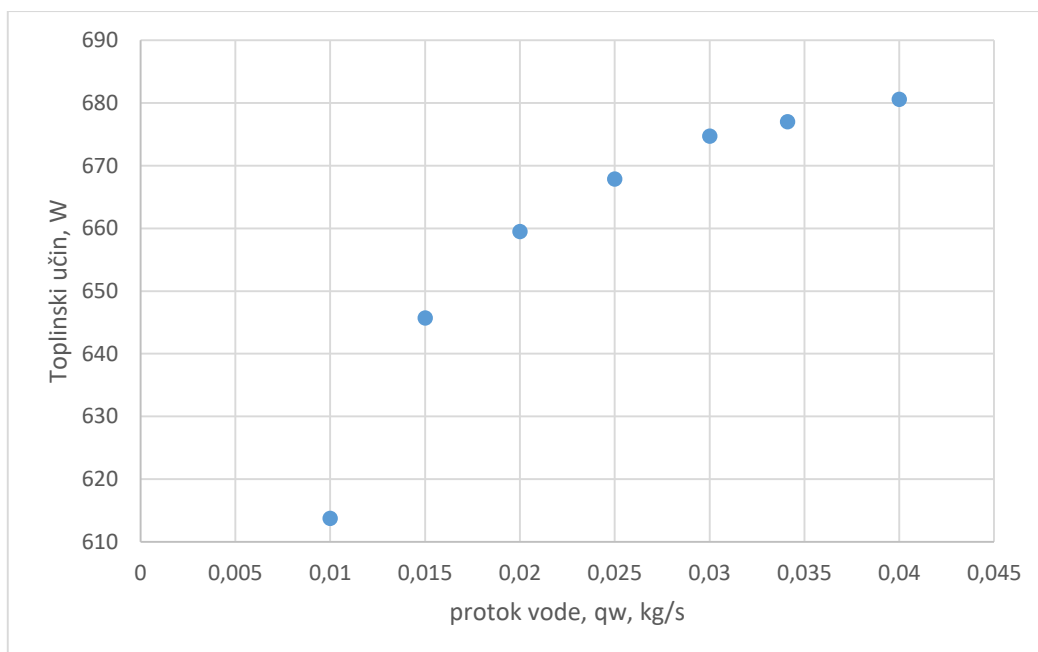
Izvor: Izrada autora

U ovom dijelu proračuna držao sam površinu izmjenjivača konstantnom dok imamo promjenu koeficijent toplinske vodljivosti u odnosu na materijal. Promjenom materijala lamela vidimo da nam se toplinski učin kreće u razlici od 30 W. S tim stajalištem bi trebali birati materijal koji je jeftiniji, otporniji na udarce, lakši za čišćenje kako nam korisnost lamela ne bi opadala s vremenom.

9.6. Promjena toplinskog toka ovisno o protoku vode

Tablica 36. Utjecaj masenog protoka na toplinski učin

Maseni protok kg/s	Toplinski učin, W
0,04	680,566
0,0341	677
0,03	674,68
0,025	667,859
0,02	659,48
0,015	645,7
0,01	613,76



Slika 18. Utjecaj protoka na toplinski učin

Izvor: Izrada autora

Iz dijagrama uočavamo da toplinski tok ne raste puno pri povećanju, tj. da smo sam početni protok doveli blizu maksimalne veličine od 0,04 kg/s te da iznad te vrijednosti toplinski tok slabo raste.

10. MJERENJE POVRŠINSKE TEMPERATURE ZIDOVA

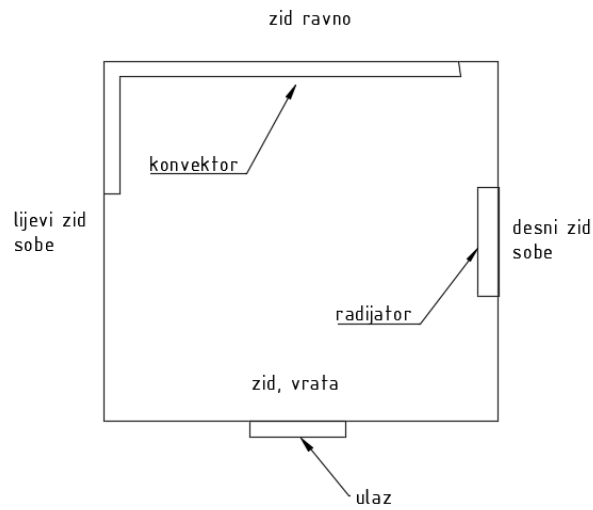
Tablica 37. Tablica srednjih temperatura zidova za konvektor

	Nadtemeperatura 30 °C	Nadtemeperatura 50°C	Nadtemeperatura 60 °C
Zid lijevo	17,86	20,33	20
Zid ravno	18,71	21,41	21,17
Zid desno	19	21,16	21,4
Zid, vrata	17,6	19	18,4
Osrednjeno	18,29	20,475	20,3

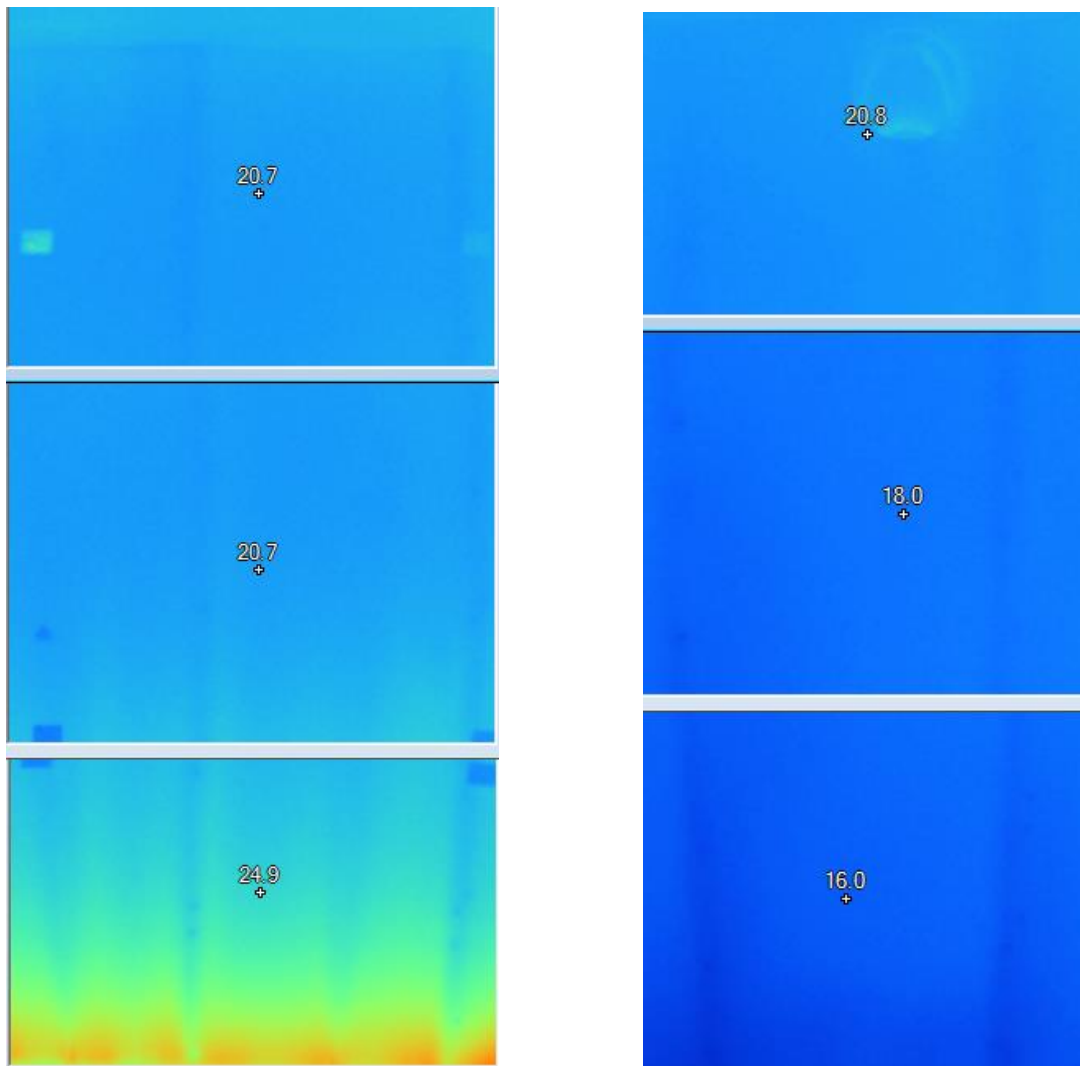
Tablica 38. Tablica srednjih temperatura zidova za radijator

	Nadtemeperatura 30 °C	Nadtemeperatura 50 °C	Nadtemeperatura 60 °C
Zid lijevo	18,7	20,15	19,95
Zid ravno	20,2	20,75	21,05
Zid desno	22,45	22,98	25,6
Zid, vrata	19	19,98	19,7
Osrednjeno	20,1	20,965	21,575

Samom analizom utvrđujemo da su temperature zidova u režimu grijanja radijatora veće nego temperature u režimu grijanja konvektora. Kao razlog tim eksperimentalnim rezultatima, pripisujemo sam učin koji kod radijatora za nadtemperature 30/50/60 °C iznose 734,9/1394,378/1755,6 W. Učin pri nadtemperaturama 30/50/60 °C konvektora iznose 362,7/657,7/849,01 W. Progrijanost zidova je ipak nešto bolja kod radijatora, međutim točniji rezultati bi se dobili duljim mjerenjima kad bi postigli stacionarnije uvjete.

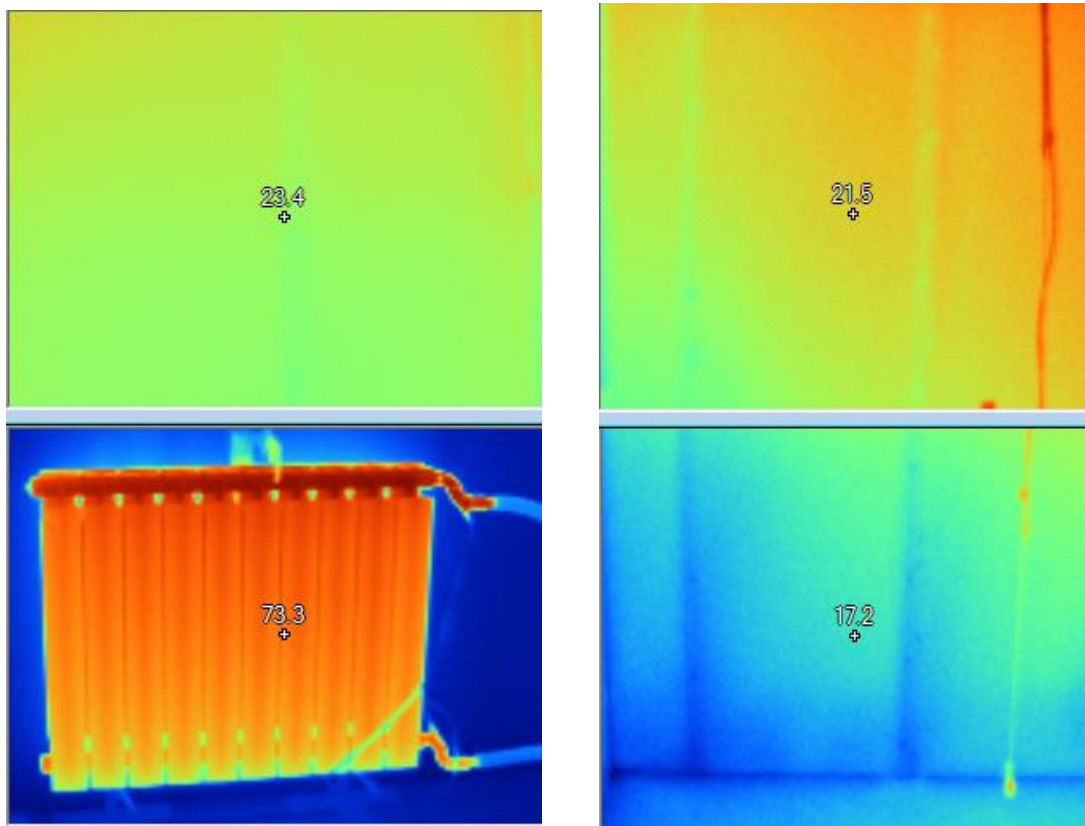


Slika 19. Shema rasporeda zidova



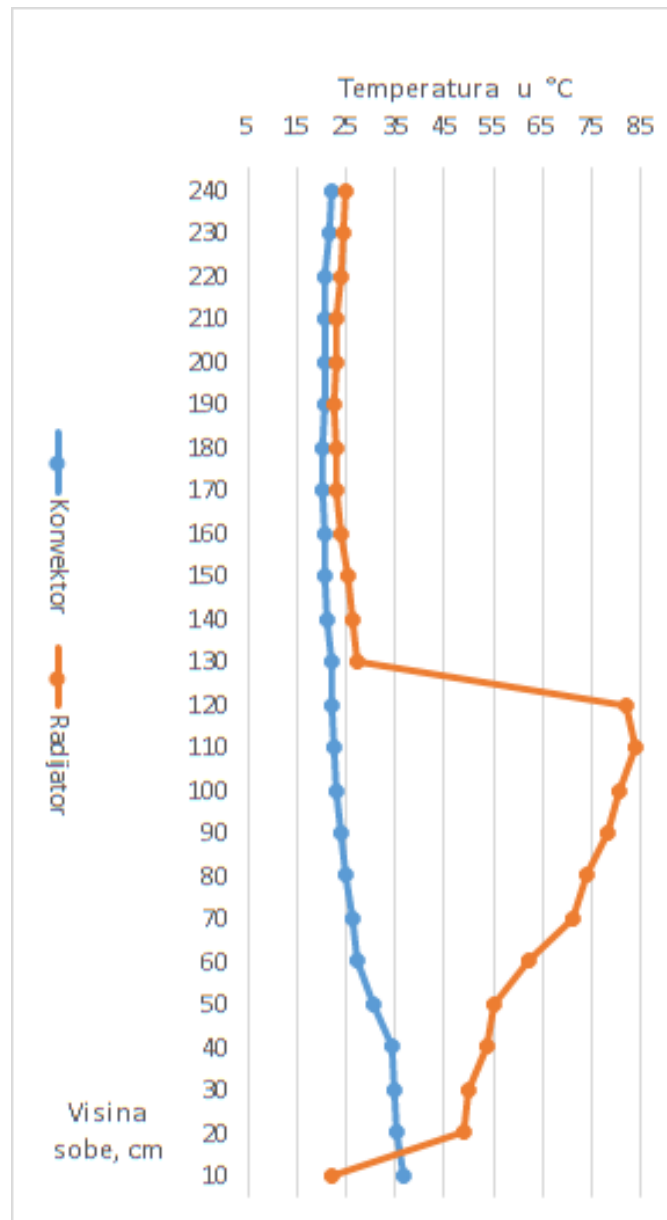
Slika 20. Temperatura zida iznad kovenktora (lijevo) i zida pored njega (slika desno)

Izvor: Izrada autora



Slika 21. Temperatura radijatora(lijevo) i zida nasuprot radijatoru (desno) za $\Delta 60$ °C

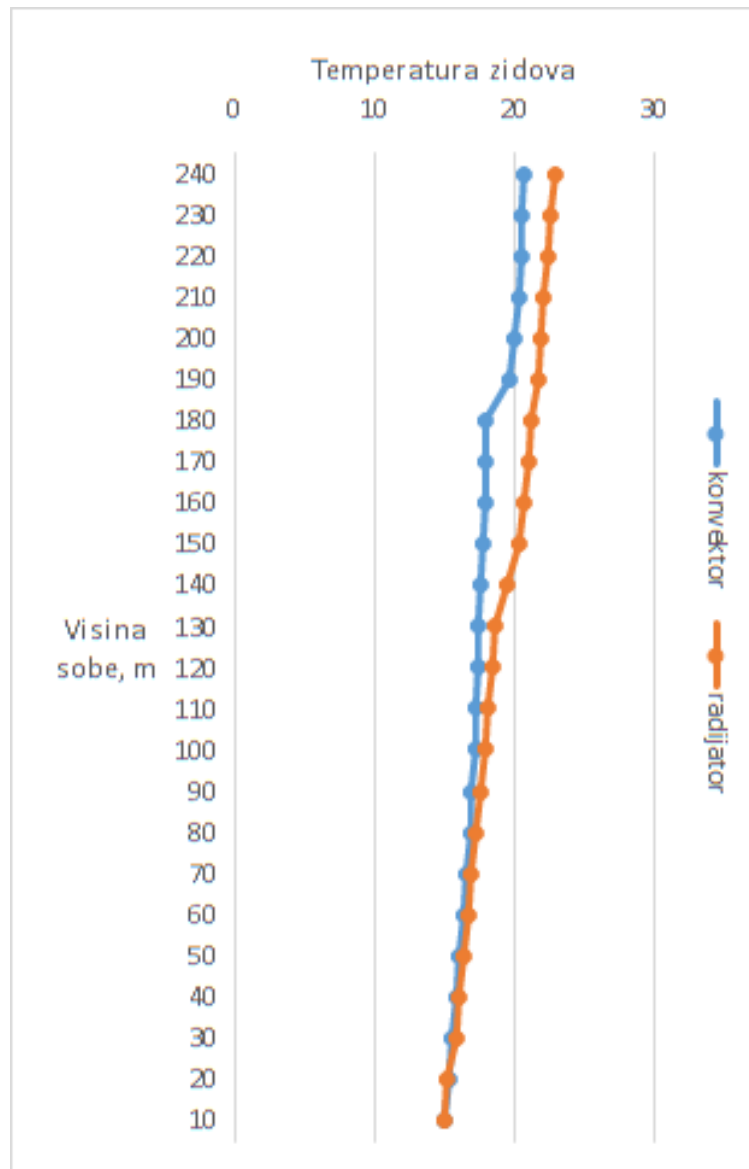
Izvor: Izrada autora



Slika 22. Raspodjela temperatura konvektora (plavo) i radijatora(narančasto) za zidove iznad ogrjevnog tijela za nadtemperaturu 60 °C

Izvor: Izrada autora

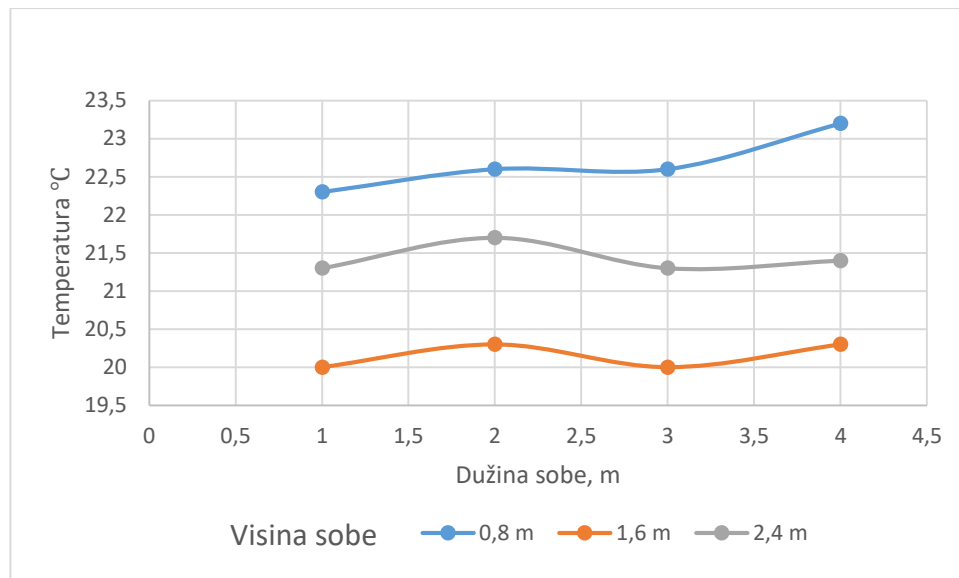
Radijator do svoje visine od 120 cm postiže temperaturu i do 85 °C, a zrak zagrijava do 40 °C. Uočavamo da se temperatura zida iznad ogrjevnih tijela jednoliko ponaša, dok imamo blagi porast prema vrhu gdje se vrši akumulacija toplog zraka zbog uzgona.



Slika 23. Usporedba temperatura negrijanog zida konvektora i radijatora

Izvor: Izrada autora

Uočavamo da su temperature progrijanosti zida radijatora jednoličnije nego kod konvektora gdje imamo skokovite rastove.



Slika 24. Raspodjela temperatura zida iznad konvektora za nadtemperaturu 50 °C

Izvor: Izrada autora

Na zidovima koji se ne nalaze iznad grijanog tijela, imamo jednoličniju progrijanost zidova. Kod zida koji se nalazi iznad samog konvektora imamo višu temperaturu do 80 cm te više temperature pri stropu. Progrijanost zida nije jednolika kao što i prikazuje slika 12.

11. ZAKLJUČAK

U radu sam prikazao rezultate mjerenja radijatora i konvektora prema normi HRN EN 442-2. Iz dobivenih podataka sam napravio parametarsku analizu konvektora te usporedbu temperatura zidova ispitne sobe.

Dobiveni rezultati toplinskog učina na strani vode u tri točke nadtemperatura su mi bili ulazni podaci za dobivanje karakterističnih jednadžbi radijatora i konvektora. Rezultati kod konvektora su realni, pošto je dobiveni eksponent jednadžbe $n=1,37$ koji se inače kreće u rasponu od 1,35 do 1,45. Rezultati radijatora su nam dali eksponent također od 1,37, dok nam se realni eksponent kreće u rasponu od 1,25 do 1,35. Kao razlog tome naveo sam u odlomku da odstupanje pri nadtemperaturi od 30 °C doseže i 1 °C. Time nismo postigli stacionarne uvjete te bi trebalo ponoviti mjerenje za tu određenu točku.

Provjeru eksperimentalnih vrijednosti konvektora sam pak proveo pomoću metode iz VDI Heat Atlasa za orebrene površine. Odstupanja su bila manja od 10% te možemo zaključiti da su rezultati konvektora realni. Parametarskom analizom sam mijenjao samu geometriju lamela dok su ostale vrijednosti ostale iste. Mijenjao sam debljinu, širinu, visinu i razmak lamela. Dobivenom analizom je utvrđeno da povećanje toplinskog toka postizemo smanjenjem debljina lamela, povećanjem širine i visine te čim manjim razmakom lamela čime smo povećali površinu izmjene topline. Također toplinski učin raste ako u konstrukciji primijenimo materijale koji imaju bolju toplinsku vodljivost. Najoptimalnije rješenje su dakle čim tanje lamele, veća širina i visina te bolja toplinska vodljivost materijala. Protok nije poželjno povećati te možemo zaključiti da smo dosegli maksimalni protok iznad kojeg više nema smisla povećati jer ne dobivamo znatno povećanje toplinskog učina.

Usporedbom temperatura zidova zaključili smo da je progrijanost bolja u slučaju radijatora što je i bilo očekivano pošto imamo bolju cirkulaciju zraka unutar sobe.

LITERATURA

- [1] - Balen I. – podloge za predavanja iz kolegija „Grijanje“
- [2] - EN 442-2: *Radiators and convectors – Part 2: Test methods and rating*, 2014
- [3] - Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010: *VDI Heat Atlas*
- [4] – Halasz B, Antun G., Boras I : *Toplinske tablice*, Zagreb, 2013.
- [5] –Ciconkov R. - *Refrigeration solved examples*, 2001.
- [6] -<http://en-us.fluke.com/products/all-products/fluke-infrared-camera.html>
- [7] -<http://www.lipovica.hr/radijator-solar.html>