Eksperimentalno-numerička analiza toplinske ugodnosti kod korištenja podnih konvektora

Tomorad, Jura

Master's thesis / Diplomski 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:235:923438

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-18**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jura Tomorad

Zagreb, 2017

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing. Jura Tomorad

Zagreb,2017.

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

Zahvaljujem prof.dr.sc. Damiru Doviću na slobodi odabira teme ovog rada te prihvaćanja mentorstva, potpori i savjetima. Zahvaljujem Ivanu Horvatu, mag.ing.mech. na pomoći u izradi ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem i svojoj obitelji koja mi je bila velika podrška tijekom studiranja.

Jura Tomorad

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Jura Tomorad** Mat. br.: 0035190501

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno-numerička analiza toplinske ugodnosti kod korištenja podnih konvektora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and numerical analysis of the thermal comfort using the floor standing convector**

Opis zadatka:

U sklopu ovog diplomskog rada potrebno je provesti analizu raspodijele temperature zraka i zidova kod korištenja niskotemperaturnih i standardnih ogrjevnih tijela. Analiza se provodi s ciljem određivanja utjecaja spomenutih parametara na toplinsku ugodnost te potencijalnih ušteda toplinske energije za grijanje prostora kod korištenja niskotemperaturnih ogrjevnih tijela.
U tu je svrhu potrebno provesti mjerenja toplinskih karakteristika podnog konvektora te standardnog radijatora prema normi HRN EN 442-2, pri istim toplinskim učinima i odgovarajućim temperaturama radnog medija.
Također, tom je prilikom potrebno provesti mjerenja temperature zraka i površinske temperature zidova ispitne sobe te ih usporediti s onima dobivenim prilikom ispitivanja radijatora. Temperature zidova je potrebno, osim termoparovima u kontrolnim točkama, mjeriti i pomoću termografske kamere.
Sva navedena ispitivanja će se provesti u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje.

Temeljem dobivenih rezultata mjerenja potrebno je numerički odrediti temperaturu zračenja i operativnu temperaturu kao mjeru toplinske ugodnosti u odabranim točkama unutar zone boravka ispitne prostorije.
U konačnici, temeljem provedene eksperimentalno-numeričke analize dati procjenu potencijalnih ušteda toplinske energije za grijanje kod korištenja podnih konvektora u odnosu na radijatore.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
11. svibnja 2017.	13. srpnja 2017.	19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Damir Dović

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK IX
SUMMARY X
1. UVOD 1
2. TOPLINSKA UGODNOST 5
2.1 Definicija toplinske ugodnosti 5
2.2 Izmjena topline u ljudskom tijelu 5
2.3 Osnovni faktori za ocjenu toplinske ugodnosti 7
2.3.1 Temperatura zraka 9
2.3.2 Temperatura ploha prostorije 10
2.3.3 Brzina strujanja zraka 10
2.3.4 Relativna vlažnost zraka 12
2.3.5 Razina odijevenosti 13
2.3.6 Razina fizičke aktivnosti 14
3. PARAMETRI ZA OPIS TOPLINSKOG OKOLIŠA 16
3.1 Temperatura zraka 18
3.2 Srednja temperatura zračenja 19
3.2.1 Mjerenje srednje temperature zračenja 20
3.2.2 Proračun srednje temperature zračenja 22
3.2.2.1 Površinska temperatura okolnih ploha 23
3.2.2.2 Vidni faktori 24
3.3 Brzina strujanja zraka 27
3.4 Vlažnost zraka 29
3.5 Integrirani parametri za ocjenu toplinskog okoliša 32
3.5.1 Operativna temperatura 32
3.5.2 Ekvivalentna temperatura 34
3.5.3 Efektivna temperatura 34
4. OGRJEVNA TIJELA 35
4.1 Osnovne vrste radijatora 40
4.2 Osnovne vrste konvektora 45
5. OPIS MJERENJA I MJERNE LINIJE 48
5.1 Mjerna linija 48
5.2 Komponente mjerne linije 50
5.2.1 Konvektor 50
5.2.2 Radijator 52
5.2.3 Cirkulacijska pumpa 53
5.2.4 Električni grijač s regulatorom 54

5.2.5 Preljevna posuda ... 55
5.3 Mjerna oprema ... 56
5.3.1 Termoparovi ... 56
5.3.2 Akvizicijski sustav ... 56
5.3.3 Termografska kamera ... 57
5.3.4 Anemometar sa žarnom niti ... 58
5.3.5 Ultrazvučni protokomjer ... 59
5.3.6 Vaga ... 59
5.4 Opis mjerenja ... 60
5.4.1 Mjerenje temperature zraka ... 62
5.4.2 Mjerenje temperature ogrjevnog medija ... 62
5.4.3 Mjerenje protoka vode ... 63
5.4.4 Mjerenje površinskih temperatura zidova ... 64
5.4.5 Mjerenje brzine strujanja zraka ... 65
5.4.6 Mjerenje toplinskog učina ... 65
5.5 Inicijalno mjerenje ... 65
6. NUMERIČKA METODA ODREĐIVANJA SREDNJE TEMPERATURE ZRAČENJA 70
6.1 Princip podjele površina ... 71
6.2 Opis principa izračuna srednje temperature zračenja ... 76
7. PRIKAZ REZULTATA I ANALIZA ... 78
7.1 Rezultati mjerenja ... 78
7.2 Proračun toplinskog učina ogrjevnih tijela ... 79
7.2.1 Toplinski učin konvektora ... 80
7.2.2 Toplinski učin radijatora ... 80
7.3 Rezultati dobiveni primjenom numeričke metode ... 81
7.4 Analiza dobivenih rezultata ... 83
8. PROCJENA POTENCIJALNIH UŠTEDA TOPLINSKE ENERGIJE ... 87
8.1 Opis stanja objekta ... 87
8.2 Usporedba rezultata ... 88
9. ZAKLJUČAK ... 91
LITERATURA ... 93
PRILOZI ... 98
Infrared Report ... 99

POPIS SLIKA

Slika 1 – Veza između PMV i PPD indeksa [28] ... 8
Slika 2 – Ovisnost PPD indeksa o vertikalnoj promjeni temperature [28] ... 9
Slika 3 – Vertikalna stratifikacija temperature zraka kod različitih ogrjevnih tijela [28] ... 10
Slika 4 – Ovisnost PPD indeksa o srednjoj brzini strujanja zraka na različitim temperaturama [28] ... 11
Slika 5 – Ovisnost relativne vlažnosti zraka o temperaturi zraka [28] ... 13
Slika 6 – Clo vrijednosti nekih odjevnih predmeta [28] ... 14
Slika 7 – Srednja temperatura zračenja ploha [28] ... 20
Slika 8 – Termometar s crnom sferom ... 21
Slika 9 – Radiometar s dvije sfere ... 22
Slika 10 – Definiranje vidnog faktora [29] ... 25
Slika 11 – Grafički prikaz određivanja vidnog faktora ... 27
Slika 12 – Princip rada psihrometra [11] ... 31
Slika 13 – Psihrometrijski grafikon [11] ... 32
Slika 14 – Utjecaj smještaja ogrjevnog tijela na strujanje zraka u prostoriji [30] ... 39
Slika 15 – Elementi potrebni za montažu radijatora ... 42
Slika 16 – Smanjenje učinka radijatora u ovisnosti o načinu ugradnje ... 42
Slika 17 – Izvedba pločastog radijatora ... 43
Slika 18 – Prikaz različitih izvedba priključaka radijatora ... 44
Slika 19 – Princip rada konvektora ... 45
Slika 20 – Načini postavljanja konvektora ... 47
Slika 21 – Shema mjerne linije ... 49
Slika 22 – Mjerna linija ... 50
Slika 23 – Smještaj konvektora u ispitnoj prostoriji ... 51
Slika 24 – Ispitivani konvektor ... 51
Slika 25 – Prikaz spajanja termoparova na polazni i povratni vod konvektora ... 52
Slika 26 – Ispitivani radijator ... 53
Slika 27 – Cirkulacijska pumpa kruga grijanja ... 54
Slika 28 Električni grijač s regulatorom ... 55
Slika 29 – Preljevna posuda ... 55
Slika 30 – Termopar tipa T ... 56
Slika 31 – Analogno-digitalni pretvarač signala ... 57
Slika 32 – Termografska kamera ... 58
Slika 33 – Anemometar sa žarnom niti ... 58
Slika 34 – Ultrazvučni protokomjer ... 59
Slika 35 – Vaga za kontrolu točnosti izmjerenog protoka ... 60
Slika 36 – Ispitna prostorija ... 61
Slika 37 – Spajanje termoparova na polazni i povratni vod radijatora ... 63
Slika 38 - Spajanje termoparova na polazni i povratni vod konvektora ... 63
Slika 39 – Snimanje temperaturnih profila zidova termokamerom ... 65
Slika 40 – Operativne krivulje ogrjevnih tijela ... 68
Slika 41 – Model ispitne prostorije ... 70
Slika 42 – Primjer podjele termograma na dijelove (konvektor, nasuprotni zid) ... 71
Slika 43 - Primjer podjele termograma na dijelove (radijator, nasuprotni zid) ... 72
Slika 44 - Primjer podjele termograma na dijelove (konvektor, desni zid) ... 73

Slika 45 - Primjer podjele termograma na dijelove (radijator, desni zid) 73
Slika 46 – Primjer izračuna prosječne temperature dijela zida 74
Slika 47 – Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije konvektorom (pogled 1) 75
Slika 48 - Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije konvektorom (pogled 2) 75
Slika 49 - Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije radijatorom (pogled 1) 76
Slika 50 - Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije radijatorom (pogled 2) 76
Slika 51 – Grafički prikaz rezultata mjerenja temperature zraka 79
Slika 52 – Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije konvektorom (dio zida smještenog nasuprotno ulaznim vratima) 81
Slika 53 – Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije konvektorom (dio zida smještenog lijevo od ulaznih vrata) 81
Slika 54 - Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije radijatorom (dio zida smještenog desno od ulaznih vrata) 82
Slika 55 - Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije radijatorom (dio zida smještenog lijevo od ulaznih vrata) 82
Slika 56 - Grafički prikaz rasporeda operativne temperature 85
Slika 57 - Potrebna toplinska energija za grijanje po mjesecima [34] 88

POPIS TABLICA

Tablica 1 – Karakteristike mjernih uređaja [11] 17
Tablica 2 – Preporučene visine za mjerenje fizikalnih parametara [11] 18
Tablica 3 – Koeficijenti za proračun operativne temperature [28] 33
Tablica 4 – Eksponenti ogrjevnih tijela [31] 38
Tablica 5 – Udjeli konvekcije i zračenja najčešćih izvedbi ogrjevnih tijela [31] 40
Tablica 6 – Usporeba izmjerenih protoka 64
Tablica 7 – Inicijalno ispitivanje radijatora prema HRN EN 442-2-2014 66
Tablica 8 - Inicijalno ispitivanje konvektora prema HRN EN 442-2-2014 67
Tablica 9 – Prikaz mjerenih parametara 78
Tablica 10 - Prikaz rezultata dobivenih numeričkom analizom 82
Tablica 11 – Prikaz rezultata dobivenih termografijom 83
Tablica 12 – Prikaz proračunatih operativnih temperatura 84
Tablica 13 – Prikaz konačnih rezultata 86
Tablica 14 – Prikaz parametara koji opisuju uštedu energije [34] 89

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	1/°C	Psihrometrijski koeficijent
A_1	m^2	Površina plohe 1
A_2	m^2	Površina plohe 2
A_{OT}	m^2	Izmjenjivačka površina ogrjevnog tijela
A_k	m^2	Ukupna korisna površina zgrade
a	-	Koeficijent za proračun operativne temperature
B	$W/°C^n$	Normom propisani omjer toplinskog učina i nadtemperature na n-tu potenciju
C_p	W/m^2	Specifični izmijenjeni toplinski tok
C_{res}	W/m^2	Konvektivno izmijenjena toplina disanjem
$c_{w,pol}$	J/kg K	Specifični toplinski kapacitet vode na temperaturi polaza
$c_{w,pov}$	J/kg K	Specifični toplinski kapacitet vode na temperaturi povrata
D	m	Promjer sfere
DR	%	Ocjena propuha (draught rating)
E_{del}	kWh	Isporučena energija
E_{del}'	kWh	Specifična godišnja isporučena energija
E_{prim}	kWh	Primarna energija
E_{prim}'	kWh	Specifična godišnja primarna energija
E_{res}	W/m^2	Izmijenjena toplina ishlapljivanjem pri disanju
E_{sk}	W/m^2	Izmijenjena toplina ishlapljivanjem s površine kože
E_{sk}	W/m^2	Izmijenjena toplina ishlapljivanjem s površine kože
e_{12}	-	Vidni faktor plohe 1 prema plohi 2
e_{12}	-	Vidni faktor plohe 2 prema plohi 1
F_{p-n}	-	Vidni faktor između promatranog objekta i n-te

		plohe
H	W/m^2	Izmijenjena osjetna toplina
k	W/m^{2}K	Koeficijent prolaza topline
M	W/m^2	Metabolički učinak
mCO_2	kg	Godišnja emisija CO_2
m_a	kg	Masa vodene pare u uzorku
m_w	kg	Masa vodene pare u uzorku
N	-	Broj mjernih točaka
n	-	Eksponent ogrjevnog tijela
P_b	W/m^2	Toplina dovedena crnoj sferi
P_p	W/m^2	Toplina dovedena sjajnoj sferi
PMV	-	PMV (Predicted mean vote) indeks
PPD	%	PPD (Predicted percentage of dissatisfied) indeks
p_d	Pa	Parcijalni tlak vodene pare
p_s	Pa	Tlak zasićenja
p	Pa	Tlak vlažnog zraka u prostoriji
$Q'_{H,nd}$	kWh/m^2	Specifična potrebna toplinska energija za grijanje
$Q_{H,gen,in}$	kWh	Toplinska energija na ulazu u podsustav proizvodnje
$Q_{H,nd}$	kWh	Potrebna toplinska energija za grijanje
$q_{V,N}$	m^3	Nazivni volumni protok ogrjevnog medija
q_V	m^3	Volumni protok ogrjevnog medija
q_m	kg/s	Maseni protok ogrjevnog medija
r	m	Spojnica dviju ploha
SD	m/s	Standardna devijacija brzine strujanja zraka
T_{mrt}	K	Termodinamička srednja temperatura zračenja
T_n	K	Termodinamička temperatura n-te plohe
T_s	K	Termodinamička temperatura osjetnika
T_{s1}	K	Termodinamička površinska temperatura tijela 1
T_{s2}	K	Termodinamička površinska temperatura tijela 2
v_a	m/s	Brzina strujanja zraka
W	W/m^2	Efektivna mehanička snaga

x	kg/kg	Sadržaj vlage
α_c	W/m^2 K	Koeficijent prijelaza topline
$\Delta\vartheta_m$	°C	Srednja logaritamska razlika temperatura
ε_1	-	Emisijski faktor plohe 1
ε	-	Emisijski faktor zida u ispitnoj prostoriji
ε_2	-	Emisijski faktor plohe 2
ε_b	-	Emisijski faktor crne sfere
ε_g	-	Emisijski faktor sfere
ε_p	-	Emisijski faktor sjajne sfere
ϑ_a	°C	Temperatura zraka
ϑ_c	°C	Temperatura elementa
ϑ_{ef}	°C	Efektivna temperatura
ϑ_{eq}	°C	Ekvivalentnta temperatura
ϑ_g	°C	Temperatura sfere
$\vartheta_{int,H}$	°C	Unutarnja projektna temperatura
ϑ_{mrt}	°C	Srednja temperatura zračenja
ϑ_o	°C	Operativna temperatura
ϑ_{pol}	°C	Temperatura polaznog voda
ϑ_{pov}	°C	Temperatura povratnog voda
ϑ_w	°C	Temperatura vlažnog termometra
$\rho_{w,pov}$	kg/m^3	Gustoća ogrjevnog medija na temperaturi povrata
σ	W/m^{2}K^4	Stefan-Boltzmannova konstanta
φ_1	-	Polarni kut između normale n_1 na plohu 1
φ_2	-	Polarni kut između normale n_2 na plohu 2
φ_a	%	Relativna vlažnost zraka
ϕ	W	Toplinski učin ogrjevnog tijela
ϕ_{12}	W	Ukupno preneseni toplinski tok zračenjem
ϕ_N	W	Normni toplinski učin
χ	-	Faktor za izračun dopuštenih odstupanja kod mjerenja

SAŽETAK

Novi standardi za računanje energetskih performansi zgrada temeljeni su na sobnoj operativnoj temperaturi umjesto temperaturi zraka u računanju energetskih potreba. Operativna temperatura kao reprezent toplinske ugodnosti funkcija je temperature zraka, srednje temperature zračenja i brzine strujanja zraka u prostoriji. Postupak proračuna operativne temperature opisan je u normi EN ISO 7726:1998. U ovom radu, temperatura zraka i zidova u prostoriji određena je eksperimentalno za konvektor i radijator u kontroliranim uvjetima. Temperatura zraka mjerena je u nekoliko točaka u prostoru na visinama 0,75 m te 1,5 m od poda koristeći termoparove tipa T. Temperature zidova određene su iz termograma snimljenih infracrvenom termokamerom. Svaki od zidova podijeljen je u manje sekcije s približno istim temperaturama. Za te sekcije, vidni faktori korišteni za proračun srednje temperature zračenja određivani su numerički. Toplinski učin testiranih ogrjevnih tijela određen je prema HRN EN 442-2:2014. Dobiveni rezultati su uspoređivani te su doneseni zaključci o toplinskoj ugodnosti.

Ključne riječi:

Srednja temperatura zračenja, operativna temperatura, toplinska ugodnost, termografija, ogrjevna tijela

SUMMARY

The new standards, for calculation of energy performance of buildings, which are under public enquiry, deal with the room operative temperature instead of the indoor air temperature in calculations of building energy needs. The operative temperature, as a representative of thermal comfort, is a function of the air temperature, the mean radiant temperature and the relative air velocity. Calculation of operative temperature is described in EN ISO 7726:1998. In this paper, the room air and wall temperature distribution was determined experimentally for floor-standing convector and conventional radiator at controlled room conditions. The room air was continuously measured at several positions and heights (0,75 m and 1,5 m) using calibrated T-type thermocouples. The wall temperatures were obtained from thermograms captured by the IR thermal camera. Each wall was divided into several sections with approximately similar temperatures. For these sections, the view factors used in determination of the mean radiant temperature were obtained numerically. The thermal capacity of the tested heat emitters is determined according to HRN EN 442-2:2014. Obtained results were analysed and conclusions about the achieved thermal comfort were made accordingly.

Key words:

Mean radiant temperature, operative temperature, thermal comfort, thermography, heat emitters

1. UVOD

Sustavi za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju (HVAC) troše preko 60% ukupne energije u zgradarstvu [1]. Visoka potrošnja energije tradicionalnih HVAC sustava polazi od težnje za postizanjem i održavanjem jednolike temperature zraka u prostorima u intervalu od 2°C [2]. Međutim, nedavna istraživanja pokazala su da je sveukupno zadovoljstvo toplinskom ugodnošću postignuto u samo 11% zgrada. [2]

Europske i nacionalne odredbe kao što su EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) i određeni dijelovi nacionalnih građevinskih propisa nastoje smanjiti potrošnju energije u zgradama kako bi se postigli ciljevi koji uključuju smanjenje emisija i potrošnje energenata do 2020. godine [3]. Predviđanje i procjena potrošnje energije u kućanstvu bitne su stavke u postizanju spomenutih ciljeva. Zgrade su složeni sustavi same po sebi. Nove, a i obnovljene zgrade, opremljene su sa suvremenim sustavima grijanja, ventilacije i klimatizacije i imaju visoke izvedbene zahtjeve koji su u uskoj vezi s ciljevima održivosti Europske Unije do 2020. godine. Povećanjem pouzdanosti instaliranih sustava te mjerenjem relevantnih veličina može se napraviti važan doprinos smanjenju potrošnje energije u zgradarstvu. Ušteda energije jedan je od glavnih smjerova istraživanja u sektoru zgradarstva. Ušteda energije znači smanjenje ovisnosti o uvozu [4] i istovremenu zaštitu okoliša [5]. Međutim, ostvarena toplinska ugodnost mora biti na prvom mjestu neovisno o namjeni zgrade [6].

Čovjek oduvijek teži stvoriti toplinski ugodan okoliš, što se odražava u povijesti gradnje diljem svijeta. Toplinska ugodnost definirana je kao stanje uma u kojem se izražava zadovoljstvo s toplinskim uvjetima okoliša. Definiciju je lako razumijeti ali istovremeno teško izraziti matematičkim jednadžbama zato što treba uzeti u obzir veliku količinu okolišnjih i ljudskih parametara. Neki od parametara koji utječu na ugodnost boravka su kvaliteta zraka, razina osvijetljenosti, razina buke, vlažnost zraka, temperatura zraka, temperatura zidova, brzina strujanja zraka, itd. Stvoriti okoliš koji je čovjeku toplinski ugodan danas je jedan od najvažnijih faktora koji se uzima u obzir kod projektiranja zgrada. Ljudski osjećaj toplinske ugodnosti strogo je vezan za metaboličku proizvodnju topline, za energetske izmjene između ljudskog tijela i okoliša te varijacije fizioloških parametara. [7.]. Kod mjerenja okolišnjih uvjeta u prostoru, važno je uzeti u obzir da čovjek ne osjeća temperaturu zraka u prostoriji nego gubitak topline iz tijela. Pretopli ili prehladni osjećaj može se odnositi na ljudsko tijelo u

cjelovitosti, tako da osoba osjeća generalnu neugodnost. Taj slučaj naziva se „global thermal discomfort“ i opisuje se Fangerovim PMV i PPD indeksima opisanim u ISO 7730 [8] baziranim na ASHRAE skali od 7 stupnjeva zadovoljstva toplinskim uvjetima okoliša [9]. Dokazano je da niskotemperaturni sustavi grijanja rezultiraju boljom toplinskom ugodnošću [10]. Tople površine mogu uzrokovati da osoba osjeća kao da je temperatura zraka u prostoriji viša. U suprotnom slučaju, hladni zidovi i prozori stvaraju osjećaj hladnoće iako je temperatura zraka u prostoriji na zadovoljavajućoj razini.

Prema racionalnom pristupu [7], procjena toplinskih svojstava okoliša zahtijeva određivanje sljedećih 6 veličina: dvije subjektivne (toplinska izolacija odjeće koju nose korisnici zgrade i metabolički učinak) i četiri fizikalne (unutarnja temperatura zraka, srednja temperatura zračenja, brzina strujanja zraka i vlažnost zraka). Ovi parametri moraju se mjeriti da bi se računski prikazala toplinska ugodnost što potom vodi do toplinske procjene okoliša. Kao reprezentativna veličina toplinske ugodnosti u ovom radu promatrat će se operativna temperatura. Operativna temperatura je temperatura crnog zatvorenog prostora kod koje bi osoba izmijenila jednak iznos energije zračenjem i konvekcijom s okolišem kao i u stvarnom nejednolikom okruženju, ali uz jednaku relativnu vlažnost i brzinu strujanja zraka. Računanje toplinske ugodnosti i standardi za mjerenje ISO 7726 [11] i ISO 7730 [8.] bazirani su na upotrebi operativne temperature kao kriterija za toplinsku ugodnost. Operativna temperatura još nije implementirana u EN 15316-2:2014 metodologiju za računanje gubitaka u sustavu grijanja i pripreme PTV-a. Korištenje operativne temperature umjesto temperature zraka stvorit će razliku u gubicima u podsustavu predaje [12]. Toplinski gubici zgrade računaju se na temelju unutarnje temperature zraka. Ista operativna temperatura može biti izračunata pomoću različitih kombinacija srednje temperature zračenja i unutarnje temperatura zraka. Ako uzimamo u obzir samo toplinske gubitke, povoljniji je slučaj kada je unutarnja temperatura zraka niža. Vrijednost srednje temperature zračenja ovisi o položaju osobe u grijanom prostoru. Položaj ljudskog tijela uzima u obzir vidne faktore koji se računaju složenim matematičkim izrazima [7, 13]. Tehničko izvješće CR 1752 sadrži vrijednosti operativnih temperatura potrebnih za zgrade različitih namjena [14]. Prilagodba korisnika zgrada uzeta je u obzir u ISO 7730–2005 standardu [8] i u ASHRAE 55–2004 [9].

Za proračun operativne temperature potrebna su 3 podatka [15]:

ϑ_a - temperatura zraka [°C]

ϑ_{mrt} – srednja temperatura zračenja [°C]

v_a - brzina strujanja zraka [°C]

Temperatura zraka mjeri se prema EN ISO 7726-1998. Srednja temperatura zračenja definirana je kao jednolika temperatura zamišljene crne prostorije u kojoj bi osoba izmijenila jednaku količinu topline s okolišem kao i u stvarnom promatranom prostoru. Srednja temperatura zračenja ovisi o geometriji sobe i vrsti instaliranog sustava grijanja. Povećanjem grijane površine i smanjenjem površine grijača srednja temperatura zračenja se smanjuje [16]. Zračenje je najvažniji mehanizam prijenosa topline u ljudskom tijelu [17]. Zračenje (kratkovalno i dugovalno) između osobe i okoline može biti promatrano i modelirano. Najtočniji način promatranja srednje temperature zračenja je mjerenjem gustoće toplinskog toka kratkovalnog i dugovalnog zračenja objekata iz ljudske okoline te računanjem vidnih faktora (dijela zračenja primljenog od ljudskog tijela u pojedinom smjeru) [18]. Ako je poznata gustoća toplinskog toka te vidni faktori, srednja temperatura zračenja može se izračunati korištenjem Stefan – Boltzmannovog zakona. Srednju temperaturu zračenja moguće je mjeriti korištenjem termometra s crnom sferom zajedno s mjerenjem temperature i brzine strujanja zraka. [19]. Srednja temperatura zračenja može se odrediti korištenjem modela kao što su ENVI-met [20], RayMan [21] ili SOLWEIG [22]. Ovi modeli korišteni su za izračunavanje srednje temperature zračenja na otvorenom. U tom slučaju, vremenski podaci mjereni na meteorološkim stanicama koriste se kao ulazni. Za razliku od vanjskih uvjeta gdje srednja temepratura zračenja može biti više od temperature zraka za više od 30 K [23] te pokazuje jasni prostorni uzorak [24], razlike u zatvorenom prostoru mogu biti jako male (pod pretpostavkom da okolne plohe imaju jednake temperature i izmjenjuju sa zrakom u prostoriji jednake toplinske tokove). Posljedično, klimatske studije u zatvorenom prostoru često su ograničene na pretpostavku da je srednja temperatura zračenja jednaka temperaturi zraka [25]. Na taj način uzima se u obzir manji iznos temperature zračenja od stvarnog što utječe na procjenu toplinskog opterećenja.

Na tržištu je dostupno nekoliko uređaja za mjerenje srednje temperature zračenja [26] Najčešće korišteni instrument je svakako termometar s crnom sferom, zbog niske cijene i dobre sljedivosti. S druge strane, karakteriziraju ga visoka vremena odaziva (što ima za posljedicu nemogućnost obavljanja uzastopnih mjerenja) te zbog svog sferičnog oblika precjenjuje doprinos zračenja horizontalnih ploha (strop i pod). Povrh toga, termometar s crnom sferom ne daje mogućnost procjene varijabilnosti temperature zračenja u prostoru što je jedan od glavnih uzroka toplinske neugodnosti u zatvorenim prostorima [27].

Za razliku od prethodno spomenutih metoda, u ovom radu srednja temepratura zračenja određivana je na način da su se prvo termografijom odredile prosječne temperature

svih ploha. Potom je u programskom paketu SOLIDWORKS Simulation napravljen prikladan model iz kojeg se mogla jednostavno očitati temperatura zračenja na 10 mjesta u prostoriji čijim osrednjavanjem je dobivena tražena ϑ_{mrt} [°C]. Mjerenje je provedeno za oba ogrjevna tijela u dva navrata s težnjom da i radijator i konvektor postignu približno isti toplinski učin. Cilj ovog rada bio je usporediti operativne temperature postignute u ispitnoj prostoriji kod korištenja dva različita ogrjevna tijela (konvektor i konvencionalni radijator) na istim toplinskim učinima. Uspoređivana je i postignuta nadtemperatura, temperature zidova te dobivena temperaturna stratifikacija za svako ogrjevno tijelo. Na temelju mjerenja i usporedbi doneseni su zaključci o toplinskoj ugodnosti i potencijalnoj uštedi toplinske energije za grijanje.

2. TOPLINSKA UGODNOST

2.1 Definicija toplinske ugodnosti

„Toplinska ugodnost definirana je kao stanje uma u kojem osoba izražava zadovoljstvo s toplinskim uvjetima okoliša“ [8]. Osjećaj toplinske ugodnosti nužno je individualan što znači da ne postoji točno određeno stanje okoliša u kojem bi sve prisutne osobe iskazale zadovoljstvo. U skupu osoba koje borave ili obavljaju iste aktivnosti u određenom prostoru uvijek se javlja izvjestan broj nezadovoljnih. Stoga, toplinsku ugodnost može se definirati kao skup stanja okoliša u kojem udio osoba nezadovoljnih toplinskim uvjetima okoliša ne prelazi određenu vrijednost. Toplinska ugodnost rezultat je međudjelovanja velikog broja faktora:

-fizikalni faktori (zvuk, svijetlost, oplošje i volumen prostorije, zračenje, sastav zraka, atmosferski tlak, polje sila, strujanje zraka, temperatura)

-faktori organizma (fizička sprema, tjelesna građa, psiha, pokretljivost, genetika, dob, spol)

-faktori prilagodbe (aktivnost, odijevanje, izloženost, motivacija, društevni faktori, prehrana)

2.2 Izmjena topline u ljudskom tijelu

Čovjek ima vrlo učinkovit sustav za regulaciju temperature dubokih tkiva (tjelesne jezgre) koji osigurava njeno održavanje na pribižno 37°C. Kada tijelo postane pretoplo, započinju dva procesa. Prvo krvne žile vazodilatiraju povećavajući na taj način protok krvi kroz kožu te posljedično počinje znojenje. Znojenje je učinkovit mehanizam hlađenja zato jer se energija potrebna za isparavanje znoja uzima iz kože. Povećanje temperature jezgre tijela od tek nekoliko desetinki °C može potaknuti proizvodnju znoja što učetverostručuje gubitak topline iz tijela. Ako se tijelo počne prebrzo hladiti, počinje vazokonstrikcija krvnih žila čime se postiže smanjenje protoka krvi kroz kožu. Sljedeća reakcija je povećanje unutarnje proizvodnje topline stimuliranjem mišića, što uzrokuje drhtavicu. Ovaj sustav je također vrlo učinkovit i može znatno povećati proizvodnju topline u tijelu. Upravljački sustav koji regulira temperaturu tijela je iznimno kompleksan i nije u potpunosti istražen. Međutim, dva najvažnija skupa osjetnika za upravljački sustav su poznata i nalaze se u koži i hipotalamusu. Osjetnik u hipotalamusu je osjetnik topline koji započinje funkciju hlađenja tijela kada

temperatura tijela prijeđe 37°C. Osjetnici smješteni u koži su osjetnici „hladnoće“ koji štite tijelo od pothlađenja kada temperatura kože padne ispod 34°C. Ako oba osjetnika šalju signale u isto vrijeme, mozak inhibira jednu ili obje obrambene reakcije. [28]

Čovjek okoliš smatra ugodnim ako ne postoji nikakvi uzrok toplinske neugodnosti. Prvi uvjet toplinske ugodnosti je toplinska neutralnost što znači da osobi nije ni pretoplo ni prehladno. Kada temperatura kože padne ispod 34°C, osjetnici „hladnoće“ šalju impulse prema mozgu. Kako temperatura nastavlja padati, broj impulsa se povećava. Broj impulsa također je i funkcija brzine smanjivanja temperature kože. Slično tome, toplinski osjetnik smješten u hipotalamusu također šalje impulse mozgu kada temperatura kože prijeđe 37°C. Kako se temperatura kože sve više povećava, šalje se sve više impulsa. Smatra se da upravo signali iz ova dva sustava osjetnika formiraju ljudsku osnovu za procjenu toplinskog okoliša. Ako su signali na obje strane jednakog iznosa, osoba se osjeća toplinski neutralno. U protivnom, osobi je ili prehladno ili pretoplo. Osoba u toplinski neutralnom i opuštenom stanju (npr. spavanje) je poseban slučaj budući da se tada ne aktiviraju nikakvi osjetnici. Potrebno je određeno vrijeme da se promijeni temperatura tijela. Signal od „toplog“ osjetnika mijenja temperaturu znatno sporije u usporedbi s „hladnim“ osjetnikom. [28]

Dva uvjeta moraju biti ispunjena za održavanje toplinske ugodnosti:

-Osiguravanje toplinske neutralnosti kombinacijom temperature kože i temperature tjelesne jezgre

-Ispunjenje energetske bilance tijela (toplina proizvedena od strane metabolizma mora biti jednaka količini topline predane okolišu)

Veza između spomenutih parametara (temperatura kože, temperatura tjelesne jezgre, tjelesna aktivnost) koja rezultira toplinskom neutralnošću zasnovana je na velikom broju eksperimenata. U tim eksperimentima mjerena je temperatura kože, temperatura tjelesne jezgre i količina proizvedenog znoja na različitim razinama tjelesne aktivnosti dok su osobe koje su sudjelovale u eksperimentima izrazile zadovoljstvo toplinskom ugodnošću. Razlike u spolu, dobi, rasi i geografskom podrijetlu nisu promatrane u spomenutom eksperimentu kod određivanja definicije toplinski ugodnog okoliša. Međutim, promatrane su razlike između pojedinaca. [28]

Kombinacija jednadžbe za temperaturu kože i proizvodnju znoja kombinirana s energetskom bilancom tijela daje jednadžbu toplinske ugodnosti. Jednadžba toplinske ugodnosti opisuje vezu između mjerljivih fizikalnih parametara i osjeta toplinske neutralnosti prosječne osobe te služi kao pokazatelj mogućnosti postizanja toplinske ugodnosti u

prostorijama u različitim uvjetima. Jednadžba toplinske ugodnosti prekompleksna je za ručno računanje stoga se uobičajeno rješava uz pomoć računala. [28]

$$M - W = H + E_{sk} + C_{res} + E_{res} \tag{1}$$

M – metabolički učinak, $\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$

W – efektivna mehanička snaga, $\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$

H – izmijenjena osjetna toplina, $\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$

E_{sk} – izmijenjena toplina ishlapljivanjem s površine kože, $\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$

C_{res} – konvektivno izmijenjena toplina disanjem, $\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$

E_{res} – izmijenjena toplina ishlapljivanjem pri disanju, $\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$

2.3 Osnovni faktori za ocjenu toplinske ugodnosti

Toplinska ugodnost je rezultat zajedničkog djelovanja navedenih faktora što znači da je pri promjeni jedne veličine, moguće održati jednaku ili barem sličnu razinu ugodnosti uz promjenu neke druge veličine. Promjene pojedinih veličina moguće je ostvariti u određenim međuzavisnim rasponima koji tvore područje toplinske ugodnosti. Osnovni faktori na temelju kojih se ocjenjuje toplinska ugodnost osoba u prostoru su:

1. Temperatura zraka u prostoriji
2. Temperatura ploha prostorije (zidovi, pod, strop)
3. Brzina strujanja zraka
4. Vlažnost zraka
5. Razina odijevenosti
6. Razina fizičke aktivnosti
7. Ostali fizički faktori

Toplinska ugodnost ocjenjuje se na temelju PMV i PPD indeksa. PMV (predicted mean vote) indeks vrednuje razinu ugode (ili neugode). Predviđa subjektivno ocjenjivanje ugodnosti boravka u okolišu od strane grupe ljudi. Određuje se na temelju složenih matematičkih izraza prema HRN EN ISO 7730.

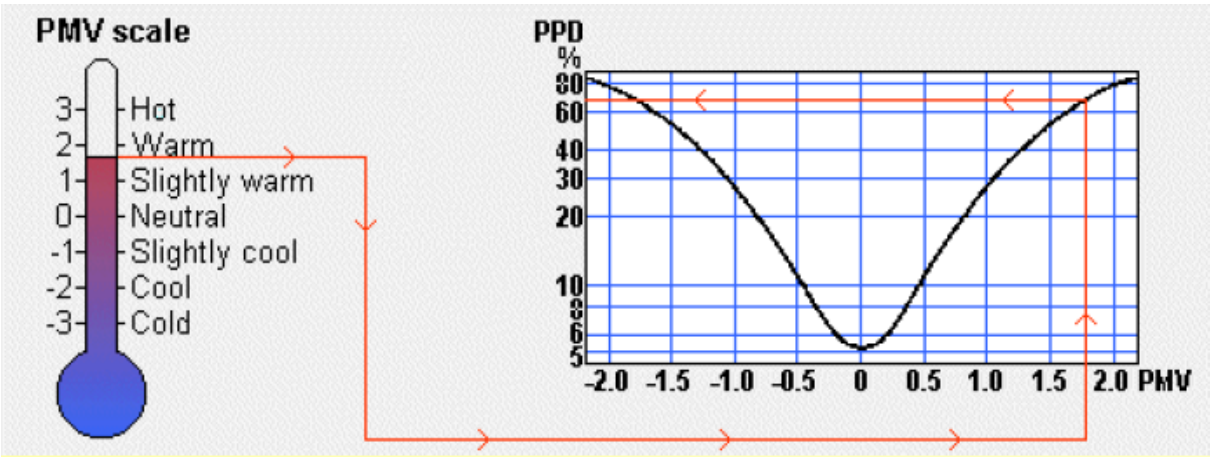
$$PMV = \left(0{,}303e^{(-0{,}036*M)} + 0{,}028\right) * [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \qquad (2)$$

PMV skala sastoji se od 7 stupnjeva ocjene toplinskog osjeta koji varira od -3 (hladno) do +3 (vruće) gdje 0 predstavlja stanje toplinske neutralnosti. Čak i kad je PMV indeks jednak nuli i dalje će postojati osobe koje su nezadovoljne s temperaturom u prostoriji neovisno o činjenici da su isto odjevene i imaju istu razinu fizičke aktivnosti kao osobe koje su izrazile zadovoljstvo s toplinskim okolišem. Ocjena toplinske ugodnosti varira od osobe do osobe.

Kako bi bilo moguće predvidjeti koliko ljudi je nezadovoljno u nekom toplinskom okruženju, uveden je PPD (predicted percentage of dissatisfied) indeks. PPD indeks određuje se iz jednostavnog matematičkog izraza kao funkcija od PMV:

$$PPD = 100 - 95 * e^{[-(0{,}03353PMV^4 + 0{,}2179PMV^2)]} \qquad (3)$$

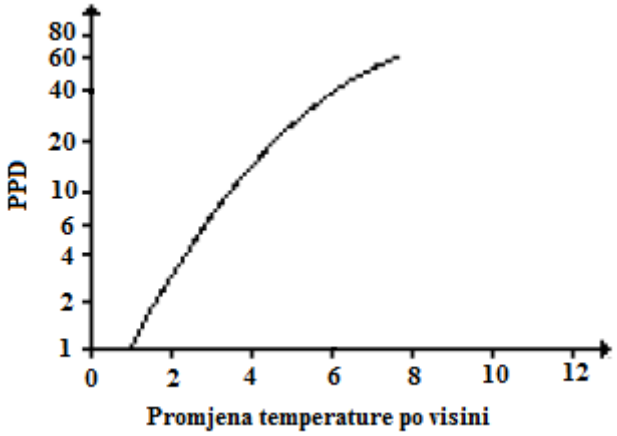
U PPD indeksu osobe koje zadovoljstvo toplinskim okruženjem izraze sa -3, -2, +2 i +3 na PMV skali smatraju se nezadovoljnima. Veza između PMV I PPD indeksa prikazana je na Slici 1. Može se primjetiti kako se krivulja koja predstavlja funkcijsku vezu između PMV i PPD indeksa nikad ne spušta ispod 5% nezadovoljnih.



Slika 1 – Veza između PMV i PPD indeksa [28]

2.3.1 Temperatura zraka

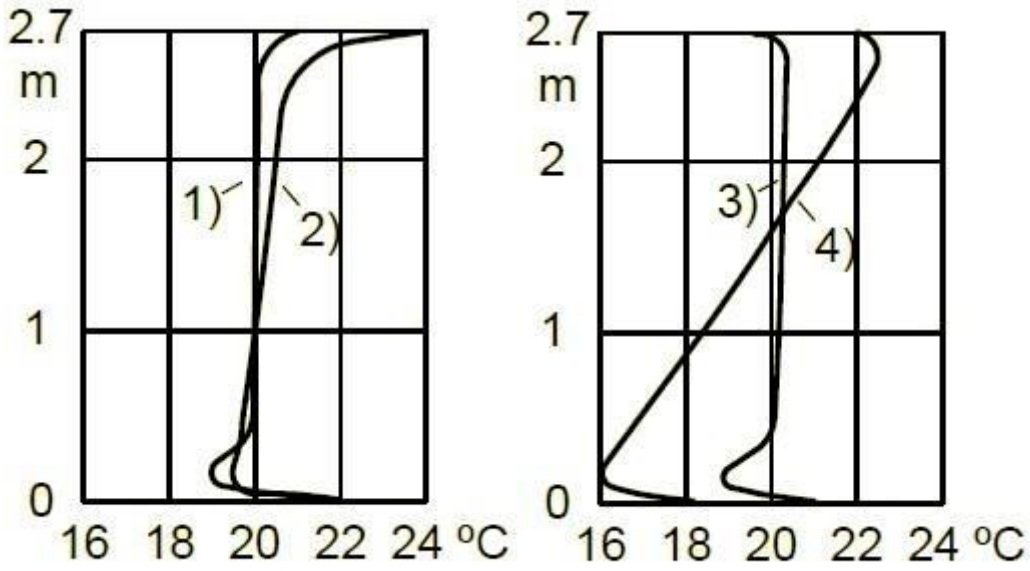
Za toplinsku ugodnost važna je razlika temperature po visini prostorije. Navedena temperaturna razlika odnosi se na visinu između stopala i vrata osobe. Maksimalna dopuštena razlika iznosi 3°C prema HRN EN ISO 7730. Na Slici 2 prikazana je ovisnost PPD indeksa o promjeni temperature zraka po visini.



Slika 2 – Ovisnost PPD indeksa o vertikalnoj promjeni temperature [28]

Općenito je neugodan osjećaj visoke temperature zraka u razini glave i u isto vrijeme niske temperature poda, neovisno o tome događa li se prijenos topline zračenjem ili konvekcijom. Kod mjerenja razlika u temperaturi zraka važno je koristiti neku vrstu temperaturnog osjetnika koji je zaštićen od toplinskog zračenja. To osigurava mjerenje temperature zraka a ne kombinacije temperature zraka i temperature zračenja.

Što se tiče utjecaja temperature ogrjevnog medija, povoljnije su niže temperature. Utjecaj izbora vrste sustava grijanja prikazan je na Slici 3.



Slika 3 – Vertikalna stratifikacija temperature zraka kod različitih ogrjevnih tijela [28]

1) podno grijanje

2) stropno grijanje

3) radijator na vanjskom zidu

4) radijator na unutarnjem zidu

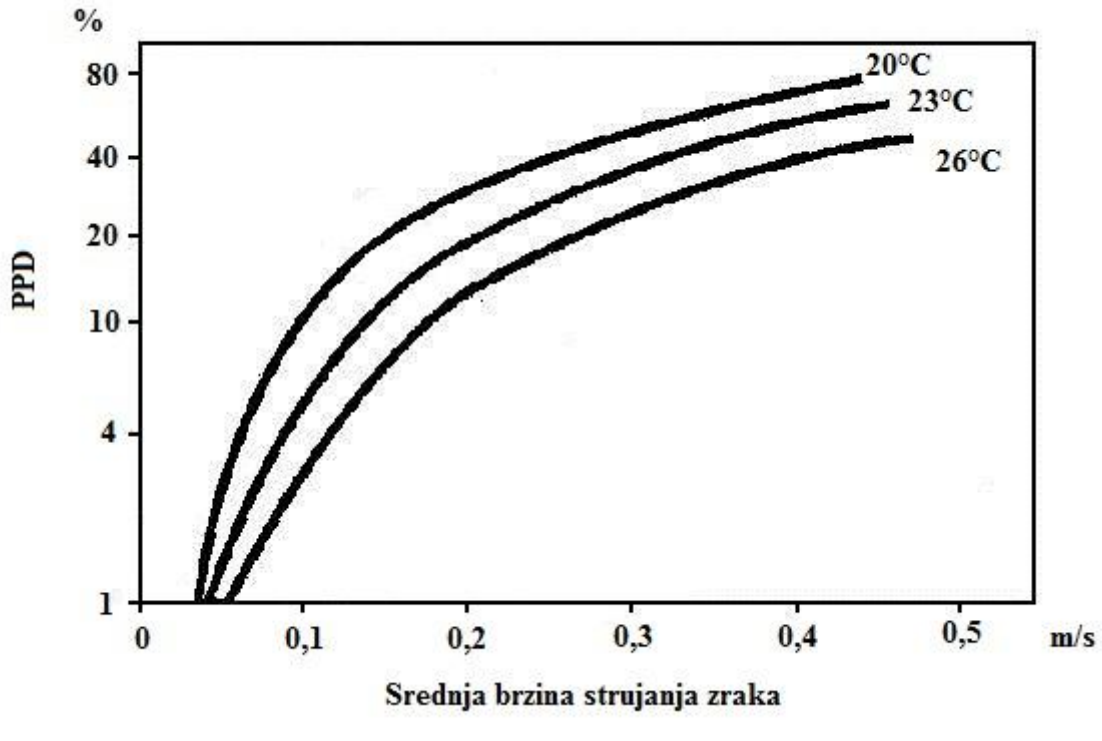
2.3.2 Temperatura ploha prostorije

Ako osoba stoji ispred otvorenog ložišta na hladan dan, nakon nekog vremena osjećat će neugodnu hladnoću u području leđa. Ta neugodnost neće nestati približavanjem vatri, nego će se na taj način samo povisiti temperatura tijela. Ovaj primjer pokazuje kako nejednoliko toplinsko zračenje uzrokuje toplinsku neugodnost. Eksperimenti koji su uključivali izlaganje ljudi promjenama toplinskog zračenja u okolišu pokazali su da kombinacija toplog stropa i hladnih prozora uzrokuje najveću neugodnost dok kombinacija hladnog stropa i toplih zidova uzrokuje najmanju. Tijekom ovih eksperimenata temperature zraka i svih ostalih ploha u prostoriji držane su konstantnima. [28]

2.3.3 Brzina strujanja zraka

Brzina strujanja zraka ima iznimno velik utjecaj na toplinsku ugodnost. Neželjeno lokalno hlađenje tijela prouzročeno pojačanim strujanjem zraka naziva se propuh. Ljudi su

najosjetljiviji na propuh na nepokrivenim dijelovima tijela (npr. lice, ruke i donji dio nogu). Propuh predstavlja najčešći prigovor u klimatiziranim prostorijama te ovisi o brzini strujanja, temperaturi zraka i turbulenciji. Za standardne temperaturne uvjete, brzine strujanja zraka u zoni boravka do 0,25 m/s ne utječu značajno na toplinsku ugodnost. Zbog načina na koji funkcioniraju osjetnici topline smješteni u koži (osjetnici „hladnoće“), osjećaj toplinske neugodnosti ne ovisi samo o lokalnom gubitku topline već i o fluktuaciji temperature kože. Jako turbulentno strujanje zraka stvara veći osjećaj neugode od slabo turbulentnog strujanja iako rezultiraju jednakim gubitkom topline. Smatra se da su mnogi nagli padovi temperature kože uzrokovani fluktuacijom što započinje slanje impulsa sa „hladnih“ osjetnika. Poznato je kakve vrste fluktuacija uzrokuju najveću neugodnost. To je dokazano izlaganjem odraslih pojedinaca različitim frekvencijama brzine strujanja zraka. Fluktuacija s frekvencijom od 0,5 Hz stvara najveću neugodnost dok se frekvencije iznad 2 Hz ne osjete. Na Slici 4 prikazana je ovisnost PPD indeksa o srednjoj brzini strujanja zraka na više različitih temepratura zraka. [28]



Slika 4 – Ovisnost PPD indeksa o srednjoj brzini strujanja zraka na različitim temperaturama [28]

Veći postotak nezadovoljnih pojavljuje se na nižim temperaturama zraka. Brzina zraka do 0,15 m/s prihvatljiva je za niže temperature zraka i laganiju odjeću. Brzina zraka do 0,5

m/s prihvatljiva je pri većoj razini fizičke aktivnosti. Postotak ljudi nezadovoljnih zbog postojanja propuha može se izračunati iz sljedeće jednadžbe [28]:

$$DR = (34 - \vartheta_a) * (v_a - 0{,}05)^{0{,}62} * (37 * SD + 3{,}14) \quad (4)$$

DR – ocjena propuha (draught rating), [%]

ϑ_a – temperatura zraka, [°C]

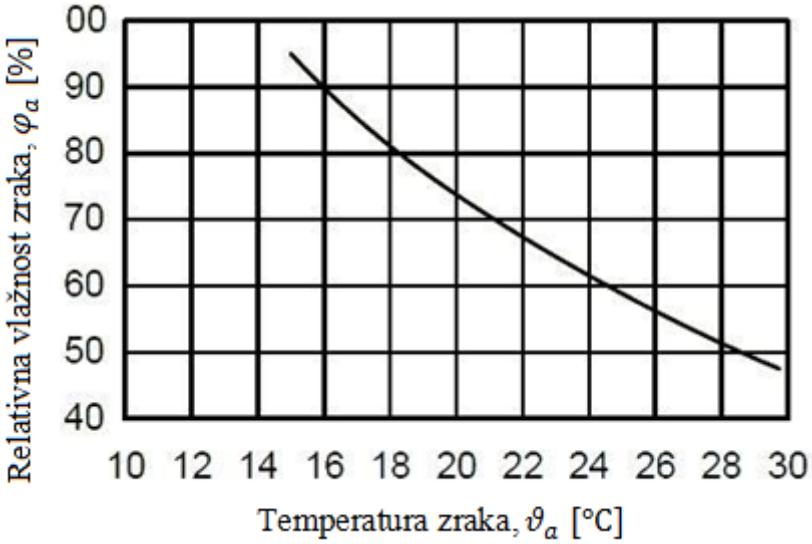
v_a – brzina strujanja zraka, [$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$]

SD – standardna devijacija brzine strujanja zraka, [$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$]

Jednadžba ocjene propuha preuzeta je iz HRN EN ISO 7730 standarda i temelji se na studijama koje su uključivale sudjelovanje 150 osoba. Jednadžba vrijedi za osobe s uglavnom sjedilačkom aktivnošću te osjećajem toplinske neutralnosti. Za proračun v_a i SD korišten je period od 3 minute. Postoji nekoliko zahtjeva za osjetnik koji se koristi za mjerenje brzine strujanja zraka. Mora omogućavati mjerenje brzine strujanja zraka do 0,05 m/s, fluktuacije do 2 Hz i na njega ne smije utjecati smjer strujanja zraka. Na manjim brzinama, smjer strujanja zraka u okupiranoj zoni mijenja se naglo. Pozicionirati uređaj za mjerenje brzine strujanja u unaprijed određenom smjeru nije moguće, stoga je potreban osjetnik koji mjeri brzinu neovisno o smjeru. [28]

2.3.4 Relativna vlažnost zraka

Vlažnost zraka nema značajan utjecaj na toplinsku ugodnost. Zdrav čovjek uglavnom ne osjeća promjenu relativne vlažnosti u smislu promjene razine toplinske ugodnosti u rasponu od 30% do 70% pri temperaturama od 20-25°C. Preporučuje se održavanje relativne vlažnosti u prostoru između 40% i 60% za temperature zraka do 25°C, razinu odjevenosti ≈1 Clo i nisku razinu fizičke aktivnosti. Kod povećane razine fizičke aktivnosti, veći je i udio latentne topline što daje mogućnost smanjenja relativne vlažnosti zraka za održavanje iste razine toplinske ugodnosti. Funkcijska ovisnost spomenutih veličina prikazana je na Slici 5 [28].



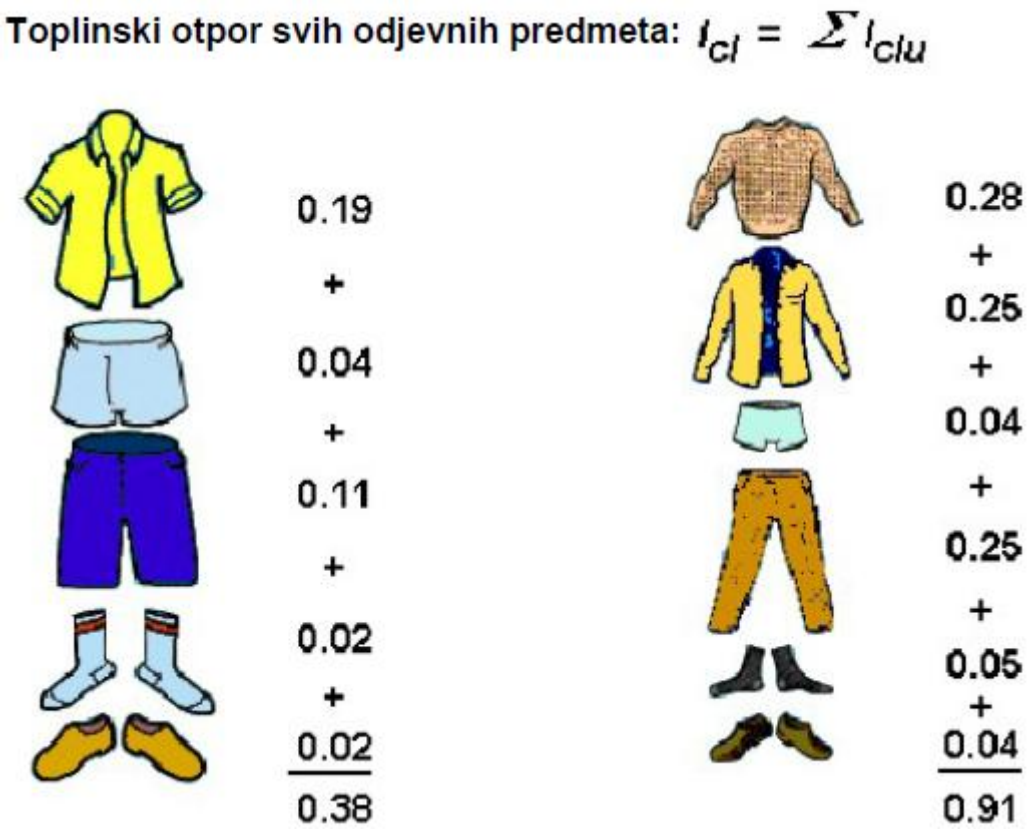
Slika 5 – Ovisnost relativne vlažnosti zraka o temperaturi zraka [28]

2.3.5 Razina odijevenosti

Odjeća smanjuje toplinske gubitke iz tijela stoga je podijeljena prema vrijednosti toplinskog otpora. Mjerna jedinica koja se uobičajeno koristi za izražavanje toplinskog otpora odjeće naziva se Clo jedinica. [28]

$$1\ \mathrm{Clo} = 0{,}155\ \frac{\mathrm{m^2{°C}}}{\mathrm{W}} \tag{5}$$

Clo skala napravljena je na način da neodjevena osoba ima Clo vrijednost jednaku nuli, a osoba koja nosi npr. poslovno odijelo ima Clo vrijednost jednaku jedinici. Neke od Clo vrijednosti odjeće prikazane su na Slici 6Slika 6. Ukupna Clo vrijednost odjeće koju osoba nosi može se izračunati sumiranjem Clo vrijednosti svakog od odjevnih predmeta zasebno. Računanjem Clo vrijednosti na taj način uglavnom se postiže dovoljna točnost. Ako su potrebne egzaktne vrijednosti, toplinski otpor odjeće mjeri se na grijanoj lutki. [28]



Slika 6 – Clo vrijednosti nekih odjevnih predmeta [28]

2.3.6 Razina fizičke aktivnosti

Metabolizam se smatra motorom ljudskog tijela. Količina energija koju otpušta metabolizam ovisi o razini fizičke aktivnosti. Uglavnom, cjelokupna aktivnost mišića pretvara se u toplinu u tijelu ali tijekom teškog fizičkog rada taj omjer može pasti i do 75%. Primjerice, kod penjanja na planinu, dio korištene energije pohranjen je u tijelu u obliku potencijalne energije. Metabolička aktivnost mjeri se u Met jedinicama i predstavlja toplinski tok koji se odvodi iz ljudskog tijela sveden na površinu kože. [28]

$$1\ \mathrm{Met} = 58{,}15\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} \tag{6}$$

Zdrava odrasla osoba ima površinu kože od oko 1,7 m^2. To znači da će osoba koja izražava zadovoljstvo toplinskim stanjem okoliša s razinom fizičke aktivnosti od 1 Met iskusiti toplinske gubitke iz tijela od otprilike 100W. Ljudi imaju najnižu razinu fizičke

aktivnosti kod spavanja (0,8 Met), a najvišu kod obavljanja sportskih aktivnosti gdje je moguće postići i do 10 Met. Uobičajena vrijednost razine fizičke aktivnosti iznosi 1,2 Met i opisuje uobičajen rad koji uključuje sjedenje za radnim stolom u uredu. Primjerice, obavljanje kućnih poslova odgovara vrijednostima od 2,5 i 2,9 Met. Kod ocjenjivanja razine fizičke aktivnosti pojedinca, važno je koristiti prosječnu vrijednost za aktivnosti kojima se osoba bavila unutar zadnjih sat vremena. Razlog za to je da toplinski kapacitet tijela „pamti“ u prosjeku jedan sat fizičke aktivnosti. [28]

3. PARAMETRI ZA OPIS TOPLINSKOG OKOLIŠA

Parametri koji se trebaju mjeriti kako bi se adekvatno opisao toplinski okoliš moraju biti izravno povezani s gubitkom topline iz tijela prema okolišu budući da ljudi ne osjećaju temperaturu prostorije direktno nego izmjenu topline s okolišem. U pitanju su sljedeći parametri:

ϑ_a - temperatura zraka, [°C]
ϑ_{mrt}- srednja temperatura zračenja, [°C]
v_a – brzina strujanja zraka, [°C]
φ_a – relativna vlažnost zraka, [%]

Utjecaj ovih parametara na gubitke topline nije jednak stoga nije dovoljno mjeriti samo jednog od njih. Primjerice, srednja temperatura zračenja često ima jednako velik utjecaj na gubitke topline kao temperatura zraka. Za opis toplinskog okoliša korištenjem čim je manje moguće parametara predloženi su sljedeći integrirani parametri:

ϑ_o - operativna temperatura, [°C]; integrirani utjecaj $\vartheta_a + \vartheta_{mrt}$
ϑ_{eq} - ekvivalentna temperatura, [°C]; integrirani utjecaj $\vartheta_a + \vartheta_{mrt} + v_a$
ϑ_{ef} - efektivna temperatura, [°C]; integrirani utjecaj $\vartheta_a + \vartheta_{mrt} + \varphi_a$

Integrirani parametri kombiniraju utjecaj ranije spomenutih parametara na toplinske gubitke prema okolišu te je na taj način moguće kraće i jednostavnije opisati toplinski okoliš. Metode mjerenja fizikalnih karakteristika okoliša moraju uzeti u obzir činjenicu da te karakteristike variraju u ovisnosti o lokaciji i vremenu. Svojstva toplinskog okoliša mogu se mijenjati u horizontalnom i vertikalnom smjeru ovisno o lokaciji osobe u prostoriji. Također treba uzeti u obzir i vrijeme boravka osobe na određenom mjestu. Okoliš se može smatrati homogenim s bioklimatske točke gledišta ako se temperatura zraka, srednja temperatura zračenja, brzina strujanja zraka i vlažnost zraka u određenom trenutku mogu smatrati praktički uniformnima u promatranoj točki tj. ako odstupanja između tih veličina i njihovih prostorno osrednjenih vrijednosti ne prelaze iznose dobivene množenjem zahtijevane točnosti iz Tablica 1. odgovarajućim faktorom χ. Spomenuti uvjet se puno lakše postiže u slučaju

temperature zraka, brzine strujanja zraka i relativne vlažnosti zraka, a rjeđe kod srednje temperature zračenja. Kad se okoliš odlikuje izrazito heterogenim svojstvima, fizikalne veličine mjere se na nekoliko lokacija u promatranoj točki i oko nje te se na temelju toga donose zaključci o svojstvima toplinskog okoliša. Često se u slučaju loše definiranih prostorija ili radnih mjesta promatra samo ograničena zona boravka u kojoj se potom moraju poštivati kriteriji toplinske ugodnosti. Tablica 2 prikazuje preporučene visine za mjerenje osnovnih veličina. Srednja temperatura zračenja i vlažnost zraka uobičajeno se mjere samo na srednjoj visini. [11]

Međutim, u ovom radu srednja temperatura zračenja određivana je na 10 mjesta u ispitnoj prostoriji na dvije visine. Vlažnost zraka nije mjerena.

Tablica 1 – Karakteristike mjernih uređaja [11]

Mjerena veličina	Klasa C, toplinska ugodnost			
	Mjerno područje	Točnost	Odzivno vrijeme	Faktor χ
Temperatura zraka, ϑ_a [°C]	10 – 40 °C	Zahtijevana: ±0,5°C Poželjna: ±0,2°C	Najkraće moguće. Vrijednost mora biti određena kao karakteristika mjernog instrumenta	3
Srednja temperatura zračenja, ϑ_{mrt} [°C]	10 – 40 °C	Zahtijevana: ±2°C Poželjna: ±0,2°C	Najkraće moguće. Vrijednost mora biti određena kao karakteristika mjernog instrumenta	2
Brzina strujanja zraka, v_a [m/s]	0,05 – 1 m/s	Zahtijevana: ±(0,05 + 0,05v_a) m/s Poželjna: ±(0,02 + 0,07v_a) m/s Ove vrijednosti moraju biti ostvarene neovisno o kutu i smjeru strujanja	Zahtijevano: 0,5s Poželjno: 0,2 s	2

Tablica 2 – Preporučene visine za mjerenje fizikalnih parametara [11]

Pozicija osjetnika	Preporučene visine	
	Sjedenje	Stajanje
Razina glave	1,1 m	1,7 m
Razina abdomena	0,6 m	1,1 m
Razina gležnja	0,1 m	0,1 m

3.1 Temperatura zraka

Temperatura zraka uzima se u obzir kod određivanja prijenosa topline od osobe prema okolišu konvekcijom. Mjerenje ove veličine, na prvi pogled jednostavno, može dovesti to znatnih pogrešaka ne poštuju li se dane preporuke. Iznos temperature određuje se mjerenjem fizikalnih veličina koje se očitavaju na jedan od sljedećih načina: kroz duljinu krutih tijela, volumen kapljevina, električni otpor, elektromotornu silu. Koja god da je fizikalna veličina u pitanju, osjetnik može mjeriti samo onu temperaturu na kojoj se nalazi i ta temperatura se razlikuje od temperature fluida (u ovom slučaju zraka) koju mjeri.

Potrebno je poduzeti sve moguće mjere kako bi se spriječilo izlaganje osjetnika toplinskom zračenju susjednih tijela budući da temperatura izmjerena na taj način ne bi točno predstavljala stvarno stanje temperature zraka nego kombinaciju temperature zraka i srednje temperature zračenja. Postoje različite metode za smanjenje utjecaja zračenja na osjetnik, kao što su:

a) Smanjenje emisijskog faktora zračenja osjetnika korištenjem sjajnih osjetnika ako je npr. izrađen od metalnog materijala ili prekrivanje osjetnika reflektirajućom bojom [11]

b) Smanjenje razlike između temperature osjetnika i susjednih zidova. Budući da nije moguće mijenjati temperaturu zidova prostorije, mogu se koristiti reflektirajući zasloni postavljeni između osjetnika i zidova. Na taj način osjetnik „vidi“ zid čija temperatura postepeno poprima iznos temperature osjetnika kako se povećava broj zaslona. Ova metoda zaštite osjetnika je učinkovita i jednostavna za izvesti. Zasloni mogu biti načinjeni od tankih (0,1 mm ili 0,2 mm) limova reflektirajućeg metala (npr. aluminija). Kada se zasloni koriste bez mehaničke ventilacije, unutarnji zaslon mora biti odvojen od osjetnika dovoljno velikim zračnim prostorom za strujanje zraka prirodnom konvekcijom. [11]

c) Povećanje koeficijenta prijelaza topline konvekcijom povećanjem brzine strujanja zraka oko osjetnika mehaničkom ventilacijom i smanjenjem veličine osjetnika (termistor ili termopar) [11]

Termometar postavljen u danoj okolini ne prikazuje trenutnu temperaturu zraka. Potrebno mu je određeno vrijeme dok ne postigne ravnotežu. Mjerenje se ne bilježi prije

isteka perioda 1,5 puta dužeg od odzivnog vremena (Tablica 1). Termometar će reagirati brže ako:

-ako se koristi manji i lakši temperaturni osjetnik s manjim specifičnim toplinskim kapacitetom

-ako je bolja izmjena topline s okolišem (veći koeficijent prijelaza topline)

Mogu se koristiti sljedeći temperaturni osjetnici:

a) Ekspanzijski termometri

- kapljevinski ekspanzijski termometri (alkohol, živa)

-ekspanzijski termometri s krutim medijem

b) Električni termometri

- termometri s promjenjivim otporom (platinasti rezistor, termistor)

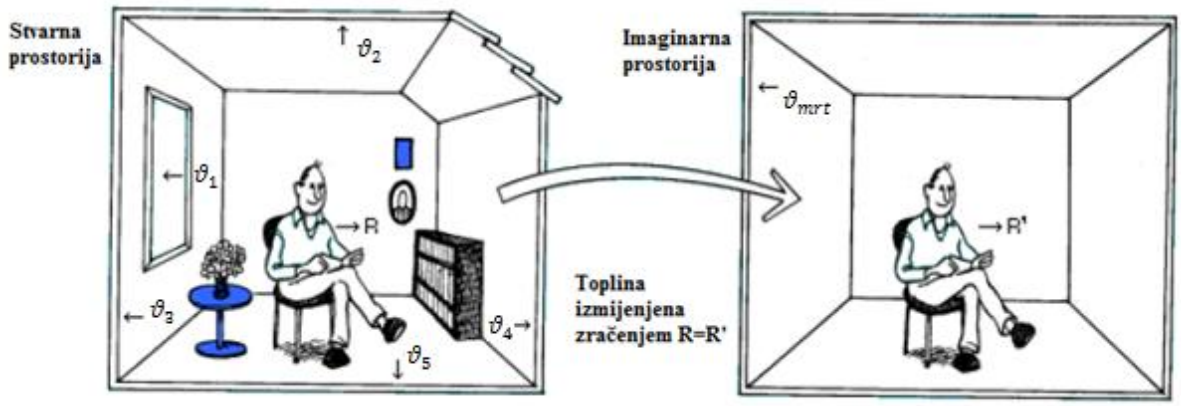
- termometar temeljen na generiranju elektromotorne sile (termopar)

c) Termomanometri (varijacija u tlaku fluida kao funkcija promjene temperature)

3.2 Srednja temperatura zračenja

Neto iznos gubitaka i dobitaka topline ljudskog tijela zračenjem je algebarska suma svih toplinskih tokova zračenja izmijenjivanih između izloženih dijelova tijela s raznim okolnim izvorima topline. Svaki od tih toplinskih tokova može se izračunati ako su poznate dimenzije, lokacije i toplinska svojstva (temperature površina i emisijski faktori) izvora topline i izloženog dijela tijela ili dijela odjeće. Ova metoda brzo postaje izuzetno kompleksna i dugotrajna kada se uzme u obzir stvarna geometrija prostora.

Srednja temperatura zračenja definirana je kao jednolika temperatura ploha zamišljenog crnog zatvorenog prostora kod koje se događa jednak gubitak topline zračenjem kao i za stvarni zatvoreni prostor s nejednolikim temperaturama ploha. Srednju temperaturu zračenja moguće je odrediti mjerenjem i proračunom.[28]



Slika 7 – Srednja temperatura zračenja ploha [28]

3.2.1 Mjerenje srednje temperature zračenja

Srednju temperaturu zračenja moguće je prema [11] mjeriti termometrom s crnom sferom ili radiometrom s dvije sfere. Termometar s crnom sferom sastoji se od crne sfere u čijem centru je postavljen živin termometar, termopar ili otpornički termometar. U teoriji, sfera može imati po volji izabran promjer ali budući da srednja temperature zračenja ovisi o promjeru sfere, preporučen i generalno usvojen promjer je 150 mm. Čim je manji promjer sfere, veći je utjecaj temperature zraka i brzine strujanja zraka što smanjuje točnost u mjerenju. Kako bi sfera apsorbirala toplinsko zračenje od okolnih ploha, mora biti zatamnjena ili elektrokemijskim premazima ili slojem mat crne boje. Termometar s crnom sferom potrebno je postaviti na poziciju u kojoj se želi izmjeriti srednja temperatura zračenja. Sfera teži toplinskoj ravnoteži pod utjecajem izmjene topline zračenjem s različitih okolnih ploha zatvorenog prostora i pod utjecajem konvekcije. Temperatura sfere u toplinskoj ravnoteži omogućuje određivanje srednje temperature zračenja. To omogućuje osjetnik temperature smješten u sredini sfere. Zapravo, temperature unutarnje stijenke sfere i temperatura zraka izvan sfere su praktički jednake srednjoj vanjskoj temperaturi sfere. Srednja temperatura zračenja određuje se prema jednadžbi (7). [11]

$$\vartheta_{mrt} = \sqrt[4]{(\vartheta_g + 273)^4 + \frac{1{,}1 * 10^8 * {v_a}^{0{,}6}}{\varepsilon_g * D^{0{,}4}} * (\vartheta_g - \vartheta_a)} - 273 \qquad (7)$$

ϑ_g - temperatura sfere, [°C]

ϑ_a - temperatura zraka, [°C]

v_a – brzina strujanja zraka, $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$

D – promjer sfere, [m]

ε_g – emisijski faktor sfere, [−]

Slika 8 – Termometar s crnom sferom

Termometri s crnom sferom odlikuju se niskom cijenom i dobrom sljedivošću. S druge strane, uređaj ima visoka vremena odaziva (što onemogućuje provođenje uzastopnih mjerenja) te precjenjuje doprinos zračenja horizontalnih ploha (stropova i podova) zbog svojeg sferičnog oblika. Povrh svega, termometar s crnom sferom ne omogućuje procjenu varijabilnosti srednje temperature zračenja u prostoriji što je jedan od glavnih uzroka toplinske neugodnosti u zatvorenim prostorima. [27]

Kod mjerenja srednje temprature zračenja radiometrom s dvije sfere koriste se dvije sfere različitih emisijskih faktora (jedna je crna a druga sjajna). Kako se obje sfere griju na istu temperaturu, izložene su jednakom konvektivnom gubitku topline. Budući da je emisijski faktor crne sfere veći od emisijskog faktora sjajne sfere, postoji razlika u ukupnoj izmjeni topline obiju sfera i na taj način se uzima u obzir utjecaj zračenja. Za procjenu srednje temperature zračenja, potrebno je znati emisijske faktore i temperature osjetnika. Srednja temperatura zračenja računa se pomoću jednadžbe (8). [11]

$$T_{mrt}{}^4 = T_s{}^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma(\varepsilon_b - \varepsilon_p)} \tag{8}$$

T_s – termodinamička temperatura osjetnika, [K]

P_p – toplina dovedena sjajnoj sferi, $[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}]$

P_b – toplina dovedena crnoj sferi, $[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}]$

ε_p – emisijski faktor sjajne sfere, $[-]$

ε_b – emisijski faktor crne sfere, $[-]$

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta, $[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}^4}]$

Slika 9 – Radiometar s dvije sfere

U ovom radu srednja temperatura zračenja nije direktno mjerena zbog neposjedovanja spomenutih uređaja već je proračunata izrazima predstavljenim u poglavlju 3.2.2

3.2.2 Proračun srednje temperature zračenja

Srednja temperatura zračenja može se izračunati ako su poznati sljedeći podaci:

- površinska temperatura okolnih ploha

- vidni faktor između osobe i okolnih ploha kao funkcija oblika, dimenzija i položaja okolnih ploha u odnosu na osobu.

Kako većina građevinskih materijala ima visoki emisijski faktor ε, moguće je zanemariti reflektirani dio zračenja što znači da se sve plohe u prostoriji smatraju crnima. Za proračun srednje temperature zračenja koristi se jednadžba (9). [11]

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{{T_1}^4 * F_{p-1} + {T_2}^4 * F_{p-2} + \cdots + {T_n}^4 * F_{p-n}} \tag{9}$$

$T_1, \ldots, T_n$ – termodinamičke temperature ploha, [K]

$F_{p-1}, \ldots, F_{p-n}$ – vidni faktori, $[-]$

Budući da je zbroj vidnih faktora jedinstven, četvrta potencija srednje temperature zračenja jednaka je srednjoj vrijednosti temperatura okolnih ploha na četvrtu potenciju ponderiranih prema iznosu odgovarajućih vidnih faktora. Za uobičajene zatvorene okoliše utjecaj srednje temperatura zračenja manji je od 1 K. Ako su u prostoriji relativno male razlike u temperaturama okolnih ploha, jednadžba (9) može se pojednostaviti na linearni oblik. [11]

$$T_{mrt} = T_1 * F_{p-1} + T_2 * F_{p-2} + \cdots + T_n * F_{p-n} \tag{10}$$

Jednadžba (10) uvijek će dati nižu vrijednost srednje temperature zračenja nego jednadžba (9) ali u mnogim slučajevima razlika je mala ili zanemariva. Ako primjerice pola okolnih ploha ima temperaturu koja je za 10 K viša od temperature druge polovice ploha, razlika između srednje temperature zračenja prema jednadžbi (9) i prema jednadžbi (10) bit će samo 0,2 K. Ako su ipak razlike u temperaturama ploha veće, greška u korištenju jednadžbe (10) može biti značajna.

3.2.2.1 Površinska temperatura okolnih ploha

Površinska temperatura okolnih ploha koristi se za ocjenu izmjene topline između ljudskog tijela i zidova, stropova i podova putem srednje temperature zračenja. Također se koristi za ocjenu efekta direktnog kontakta između tijela i promatrane plohe. Površinska temperatura okolnih ploha može se mjeriti osjetnikom koji je u kontaktu s plohom (kontaktni termometar) ili pomoću infracrvenog senzora. Korištenjem kontaktnog termometra mijenja se izmjena topline između plohe i okoliša. To je pogotovo problem na plohama s niskom

toplinskom vodljivosti. Kontaktni termometar sastoji se od temperaturnog osjetnika koji treba dovesti u direktni kontakt s površinom plohe (zida, stropa, poda). Važno je znati da je izmjena topline između osjetnika i površine znatno veća nego izmjena topline između osjetnika i okoliša. To se ostvaruje osiguravanjem stalnog kontakta pomoću pritiska na kontaktnu površinu. Dobro izveden kontakt podrazumijeva korištenje ljepila i izolaciju osjetnika prema okolišu. Kontakt između osjetnika i površine plohe utjecat će na izmjenu topline između plohe i okoliša i na posljetku na izmjerenu temperaturu. Na plohama s niskom toplinskom vodljivosti mogu se korištenjem kontaktnog termometra pojaviti pogrešni rezultati. [11]

Na mjerenja pomoću infracrvenih radiometara utječu emisijski faktori površine plohe. Infracrveni radiometri omogućuju mjerenje površinske temperature okolnih ploha bez direktnih kontakta u širokom rasponu. Većinom su to pasivni sustavi koji zahtijevaju da promatrani objekt bude obasjan infracrvenim zračenjem. Dostupni su senzori koji mjere temperaturu u jednoj točki ili na čitavoj površini. U svakom slučaju, toplinska energija prenesena zračenjem s promatranog objekta fokusirana je pomoću optičkog sustava na infracrveni detektor koji potom šalje signal proporcionalan očitanom zračenju računalnoj jedinici. Ovakvi senzori mjere samo energetsku razinu zračenja na detektoru a to zračenje uključuje zračenje emitirano od strane površine plohe te zračenje reflektirano sa same plohe. Točno mjerenje površinske temperature okolnih ploha stoga zahtijeva znanje dugovalne emisivnosti svih ploha i polja toplinskih tokova zračenja oko objekta. Potrebna je unutarnja ili vanjska temperaturna referenca za mjerenje apsolutnog iznosa površinske temperature ploha. Razlučivost temperatura infracrvenih radiometara smanjuje se proporcionalno smanjenju temperature objekta. Primjerice, infracrveni radiometri koji detektiraju temperaturne razlike ispod 0,3 °C na objektu koji se nalazi na 20 °C mogu detektirati razliku od oko 1°C na objektu koji se nalazi na -20°C. U ovom radu, površinske temperature okolnih ploha mjerene su infracrvenom termokamerom. [11]

3.2.2.2 Vidni faktori

Međusobna orijentacija dviju površina direktno utječe na izmjenu toplinskih tokova. Kako bi bilo moguće opisati takve pojave i provoditi termodinamičke proračune za različite geometrije, uveden je koncept vidnog faktora, koji se u literaturi može naći i pod nazivom faktor oblika, kutni faktor ili faktor konfiguracije. Pod pojmom vidni faktor u ovom radu podrazumijevat će se da se površine ponašaju i kao difuzni emiteri i difuzni reflektori. Vidni faktor predstavlja udio energije zračenja (udio svjetloće površine) koja napušta jednu površinu i izravno pogađa drugu površinu. [29]

Za primjer konačnih elementarnih površina A_1 i A_2 prikazanih na Slici 10 te konstantnih njihovih temperatura i emisijskih faktora ukupno preneseni toplinski tok zračenjem računa se prema jednadžbi (11). [29]

$$\phi_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\pi} \sigma ({T_{s1}}^4 - {T_{s2}}^4) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{r^2} dA_1 dA_2 \tag{11}$$

ε_1 – emisijski faktor plohe 1, [−]

ε_2 – emisijski faktor plohe 2, [−]

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta, $[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}}]$

T_{s1} – termodinamička površinska temperatura tijela 1, [K]

T_{s2} – termodinamička površinska temperatura tijela 2, [K]

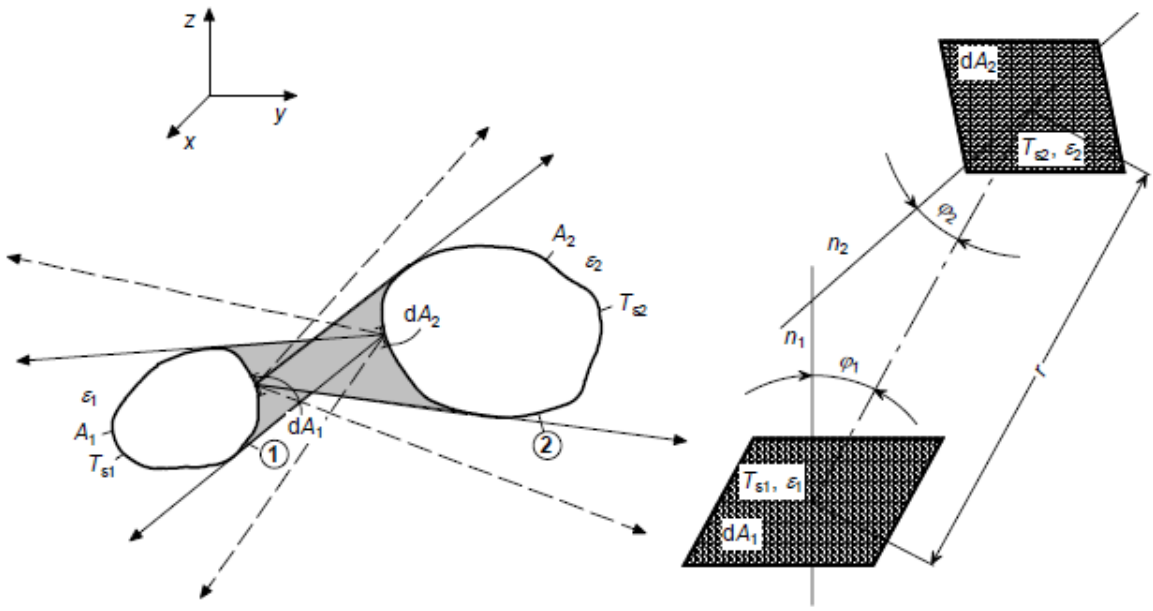
A_1 – površina plohe 1 $[\mathrm{m^2}]$

A_2 – površina plohe 2 $[\mathrm{m^2}]$

φ_1 – polarni kut između normale n_1 na plohu 1 [−]

φ_2 – polarni kut između normale n_2 na plohu 2 [−]

r – spojnica dviju ploha [m]



Slika 10 – Definiranje vidnog faktora [29]

Rješenje jednadžbe (11) direktno je povezano s oblicima površina tijela 1 i tijela 2 kao i njihovim smještajem u prostoru. Bitno je znati da jednadžba (11) vrijedi samo ako su reflektirane vrijednosti zanemarive u usporedbi s vlastitim emitiranim zračenjima obiju tijela. To posebno vrijedi kada površine A_1 i A_2 reflektiraju premalo zračenja tj. kada se svojstvima svojih površina približavaju svojstvima crnog tijela što i jest slučaj kod zidova, stropova i podova te ako su maleni prostorni kutovi pod kojim se površine međusobno vide (to je također ispunjeno budući da su sve plohe prostorije najčešće postavljene pod pravim kutem). Jednadžbu (11) moguće je zapisati u sljedećem obliku:

$$\phi_{12} = e_{12} A_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma ({T_{s1}}^4 - {T_{s2}}^4) \tag{12}$$

Veličina e_{12} u jednadžbi (12) predstavlja vidni faktor koji ovisi samo o geometriji ploha i njihovom međusobnom smještaju u prostoru. Veza između vidnih faktora vidi se iz jednadžbe (13).

$$e_{12} A_1 = e_{21} A_2 \tag{13}$$

Jednadžba (14) predstavlja konkretni matematički izraz za izračun vidnog faktora.

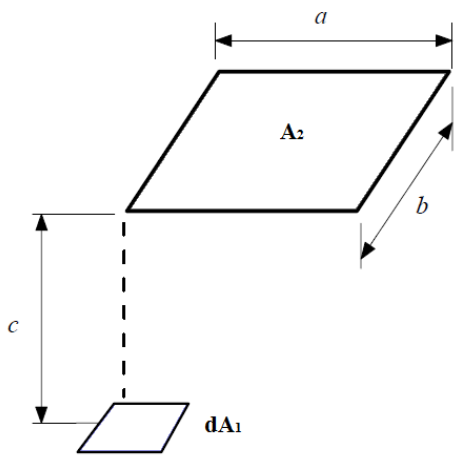
$$e_{12} = \frac{1}{A_1 \pi} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{cos\varphi_1 cos\varphi_2}{r^2} dA_1 dA_2 \tag{14}$$

Izraz za proračun vidnih faktora prilično je kompleksan stoga se pribjegava korištenju pojednostavljenja. Ne postoji veliki broj analitičkih izraza ili dijagramskih prikaza vidnih faktora, čak niti za relativno jednostavne konfiguracije. Međutim, moguće je konfiguracije složenijih geometrija podijeliti na određeni broj jednostavnijih konfiguracija na način da se tada njihovi vidni faktori mogu odrediti iz dostupnih izraza ili dijagrama. Na taj način moguće je odrediti vidni faktor za originalnu složenu geometrijsku konfiguraciju jednostavnim zbrajanjem vidnih faktora odvojenih jednostavnijih konfiguracija. Ovaj postupak naziva se algebra vidnog kuta. [29]

Primjenom postupka algebre vidnog kuta na uobičajenu geometriju prostorije prikazanu na Slici 11. izraz za vidni faktor znatno se pojednostavljuje. [29]

$$e_{dA_1-2} = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{a}{c\sqrt{1+\left(\frac{a}{c}\right)^2}} * tan^{-1}\left(\frac{b}{c\sqrt{1+\left(\frac{a}{c}\right)^2}}\right) + \frac{b}{c\sqrt{1+\left(\frac{b}{c}\right)^2}} * tan^{-1}\left(\frac{a}{c\sqrt{1+\left(\frac{b}{c}\right)^2}}\right)\right] \tag{15}$$

U ovom radu srednja temperatura zračenja određivana je na 10 mjesta u ispitnoj prostoriji čiji zidovi su podjeljeni na više manjih dijelova s približno istom temperaturom stoga bi određivanje vidnih faktora ovom metodom bilo dugo i zamorno. Srednja temperatura zračenja izračunata je numerički u programskom paketu SOLIDWORKS Simulation 2016 budući da program sam računa vidne faktore neovisno o zadanoj geometriji.



Slika 11 – Grafički prikaz određivanja vidnog faktora

3.3 Brzina strujanja zraka

Brzinu strujanja zraka treba uzeti u obzir kod određivanja prijenosa topline konvekcijom i isparavanjem na poziciji osobe. Uglavnom nije jednostavno vršiti mjerenja brzine strujanja zraka u prostorima zbog turbulentne prirode strujanja što znači da brzina varira nasumično te često mijenja smjer. U slučaju toplinskih okoliša, promatra se brzina strujanja zraka kao iznos vektora brzine strujanja na mjernom mjestu. Iako su istraživanja pokazala da je osoba različito osjetljiva na protok zraka sa različitih strana (ispred, iza, ispod i

iznad) korištenje brzine strujanja zraka za ocjenu toplinske ugodnosti opravdano je jer se vektor brzine mijenja u relativno malom prostornom kutu. Potrebno je uzeti u obzir sljedeće karakteristike mjernih uređaja:

-osjetljivost na smjer strujanja zraka

-osjetljivost na fluktuacije brzine

-mogućnost određivanja srednje brzine i standardne devijacije brzine u nekom periodu

Za osiguravanje točnosti mjerenja, treba obratiti pažnju na sljedeće faktore:

-kalibracija mjernog uređaja

-vrijeme odaziva osjetnika i mjernog uređaja

-period mjerenja

Točno mjerenje srednje brzine ovisi o kalibraciji instrumenta. Točnost mjerenja standardnih devijacija tj. intenziteta turbulencije ovisi o vremenu odaziva. Mjerni uređaj s dugim vremenom odaziva neće biti u stanju izmjeriti učestale fluktuacije brzine. Mjerenja u struji zraka visokog intenziteta turbulencije i niske frekvencije fluktuacija brzine zahtijevat će duži vremenski period mjerenja od mjerenja u struji zraka s niskim intenzitetom turbuencije i visokim frekvencijama fluktuacija brzine.

Brzina strujanja zraka može se odrediti korištenjem sonde koja mjeri brzinu u svim smjerovima (eng. „omnidirectional probe“) ili upotrebom triju osjetnika koji mjere brzinu u smjeru triju okomitih osi. Rezultantna brzina dobiva se vektorskim zbrajanjem izmjerenih komponenti. U praksi je veoma teško mjeriti točno u samo jednom smjeru te se ta metoda rijetko primjenjuje.

U slučajevima u kojima je strujanje zraka jednosmjerno, moguće je koristiti sondu koja je osjetljiva samo na jedan smjer strujanja (anemometar s lopaticama ili sa žarnom niti). Anemometar sa žarnom niti je najčešće upotrebljavan mjerni uređaj za mjerenje brzine strujanja zraka u prostorijama. Princip rada temelji se na izmjeni topline između užarenog osjetnika i okolnog zraka što ovisi o aerodinamičkim karakteristikama zraka. Prethodna kalibracija mjernog uređaja omogućuje da se prijenos topline pretvori u brzinu strujanja zraka. Anemometar se sastoji od sfere grijane električnim grijačem do temperature više od temperature zraka. Žarni element gubi toplinu (većinom konvektivno) prema okolišu. Toplinska bilanca prikazana je jednadžom (16). [11]

$$C_p = \alpha_c(\vartheta_c - \vartheta_a) \tag{16}$$

C_p – specifični izmijenjeni toplinski tok, $[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}]$

α_c – koeficijent prijelaza topline, $[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}]$

ϑ_c – temperatura elementa, [°C]

ϑ_a – temperatura zraka, [°C]

Toplinske karakteristike elementa, temperatura elementa i zraka omogućavaju određivanje brzine strujanja zraka korištenjem koeficijenta prijelaza topline konvekcijom. Anemometar stoga mora imati imati dva temperaturna osjetnika, jedan koji će mjeriti temperaturu žarnog elementa i jedan koji će mjeriti temperaturu zraka. Jednostavni instrumenti bez osjetnika temperature zraka mogu raditi sami na onim temperaturama zraka za koje su kalibrirani. Glavna karakteristika anemometra sa žarnom niti je smanjena osjetljivost na smjer strujanja osim u malom prostornom kutu oko osjetnika. Međutim, anemometar ima izrazito visoku osjetljivost u smjeru strujanja zraka.

3.4 Vlažnost zraka

Vlažnost zraka uzima se u obzir kod određivanja prijenosa topline isparavanjem od strane ispitivane osobe. Visoka vlažnost zraka smanjuje isparavanje znoja i stoga stvara toplinsko opterećenje osobi. Vlažni zrak je smjesa više plinova koji se mogu podijeliti u dvije skupine:

-plinovi koji su sastavni dijelovi suhog zraka (kisik, dušik, itd.)

-vodena para

Postoji granična količina pregrijane vodene pare koja se može nalaziti u zraku na određenoj temperaturi. Iza tog iznosa, vodena para kondenzira. Kako temperatura zraka raste, raste i maksimalna količina vodene pare koju zrak može primiti. Vrijednosti koje su povezane sa stvarnom količinom vodene pare u zraku opisuju apsolutnu vlažnost zraka u nekom okolišu. Dvije vrijednosti se uglavnom koriste za opisivanje apsolutne vlažnosti zraka: sadržaj vlage i parcijalni tlak vodene pare.

Sadržaj vlage x za određeni uzorak vlažnog zraka predstavlja omjer mase vodene pare i suhog zraka u uzorku.

$$x = \frac{m_w}{m_a} \tag{17}$$

m_w – masa vodene pare u uzorku, [kg]

m_a – masa suhog zraka u uzorku, [kg]

Parcijalni tlak vodene pare p_d u vlažnom zraku je tlak kojim bi djelovala vodena para u slučaju da se nalazi sama u volumenu koji trenutno okupira vlažni zrak te na istoj temperaturi. Pod pretpostavkom da su plinovi idealni, sadržaj vlage i parcijalni tlak povezani su sljedećim izrazom:

$$x = 0{,}622 \frac{p_d}{p - p_d} \tag{18}$$

p – tlak vlažnog zraka u prostoriji (vlaga + suhi zrak), [Pa]

Ako je $x = 0$, u pitanju je samo suhi zrak, a ako je pak $x = +\infty$ tada se govori o samoj vodi. Stanje vlažnog zraka određeno je s temperaturom, tlakom i sadržajem vlage. Sve dok je parcijalni tlak vodene pare p_d manji od tlaka zasićenja p_s (uz nepromijenjenu temperaturu vlažnog zraka) vlaga u zraku nalazi se u stanju pregrijane pare.

Relativna vlažnost zraka predstavlja omjer sadržaja vlage u zraku i maksimalni sadržaj vlage koji zrak može primiti na zadanoj temperaturi. Relativna vlažnost zraka je također omjer parcijalnog tlaka vodene pare u vlažnom zraku i tlaka zasićenja na istoj temperaturi i ukupnom tlaku.

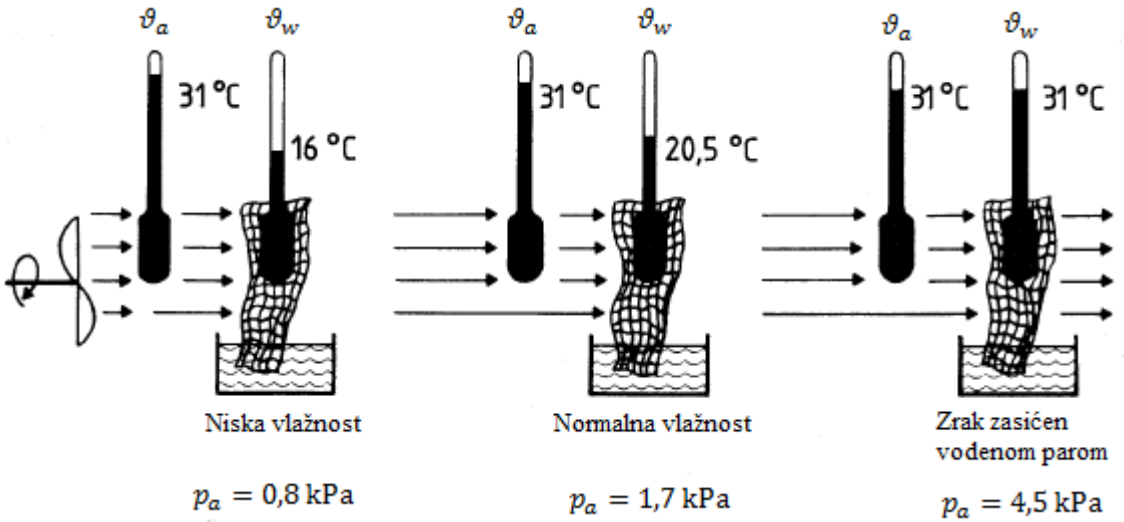
$$e = \frac{p_d}{p_s} \tag{19}$$

Relativna vlažnost često se izražava kao postotak u skladu sa sljedećim izrazom

$$\varphi_a = e * 100\% \tag{20}$$

Što se tiče prijenosa topline između čovjeka i njegove okoline isparavanjem, apsolutna vlažnost zraka je ona koja se uzima u obzir kao relevantna. Vlažnost zraka mjeri se psihrometrom. Psihrometar je mjerni uređaj koji se sastoji od dva termometra i konstruiran je na način da osigura minimalno strujanje zraka preko termometara. Mjerenje temperature može se provoditi živinim termometrima, termoparovima, otporničkim termometrima, itd. Prvi termometar mjeri temperaturu zraka ϑ_a. Ta temperatura u ovom smislu naziva se temperaturom suhog termometra za razliku od temperature vlažnog koju mjeri drugi termometar. Drugi termometar obložen je vlažnom pamučnom krpicom. Kraj krpice uronjen je u spremnik s vodom. Voda se diže zbog efekta kapilarnosti iz spremnika do termometra i

potom isparava brzinom koja ovisi o vlažnosti zraka. Što je suši zrak, to je intenzitet hlađenja termometra veći (hlađenje je ograničeno konvektivnim prijenosom topline). Izmjerene temperature suhog (ϑ_a) i vlažnog (ϑ_w) termometra koriste se za određivanje apsolutne vlažnosti zraka.



Slika 12 – Princip rada psihrometra [11]

Apsolutna vlažnost zraka, izražena pomoću parcijalnog tlaka vodene pare, povezana je s temperaturom vlažnog termometra sljedećim izrazom:

$$p_d = p_s - A * p * (\vartheta_a - \vartheta_w) \tag{21}$$

p_d – parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku, [Pa]

p_s – tlak zasićenja, [Pa]

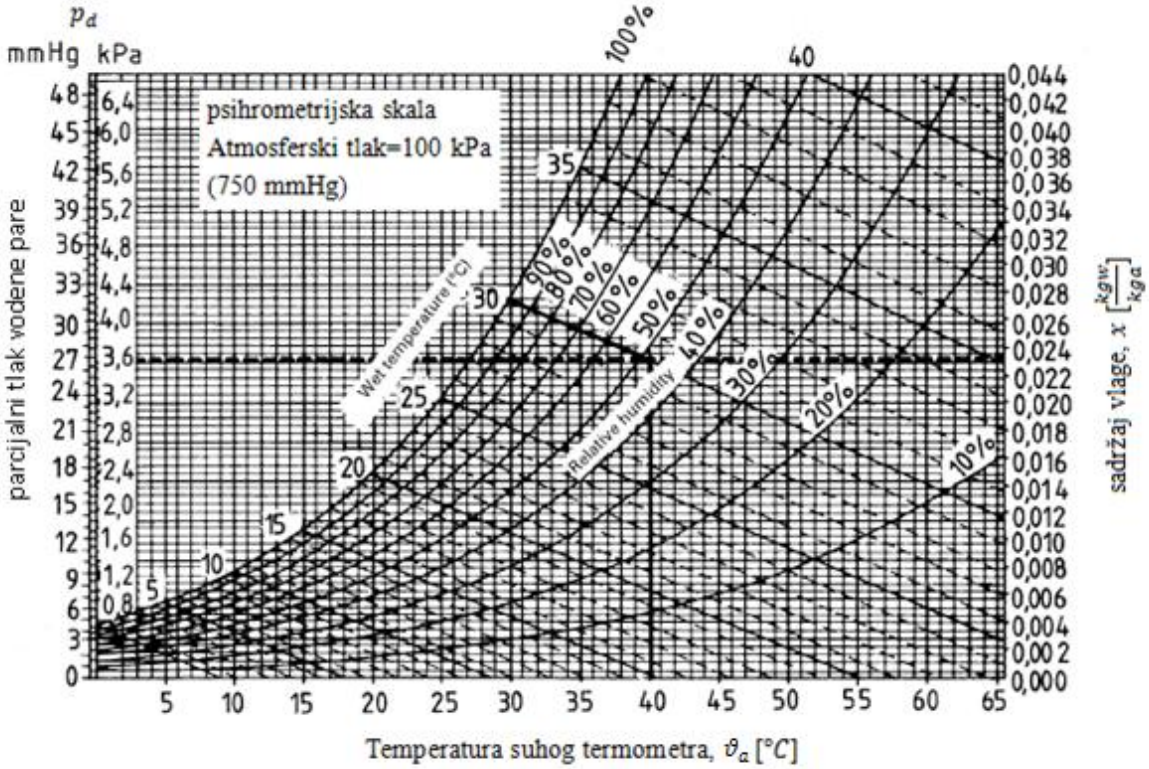
A – psihrometrijski koeficijent, [$\frac{1}{°C}$] (preporučljivo je koristiti $A = 6{,}67 * 10^{-4}\ \frac{1}{°C}$)

ϑ_a – temperatura suhog termometra (temperatura zraka), [°C]

ϑ_w – temperatura vlažnog termometra, [°C]

Stoga, u psihrometrijskom grafikonu (Slika 13), uz pretpostavku da je psihrometrijski koeficijent A približno konstantan, izoterme temperatura vlažnog termometra odgovaraju paralelnim pravcima nagiba ($-Ap$). Sjecište izoterme temperature vlažnog termometra s vertikalnim pravcima koji predstavljaju izoterme temperature suhog termometra (temperature

zraka) predstavljaju stanje vlažnog zraka. Parcijalni tlak i sadržaj vlage se potom očitavaju s osi ordinata. [11]



Slika 13 – Psihrometrijski grafikon [11]

3.5 Integrirani parametri za ocjenu toplinskog okoliša

3.5.1 Operativna temperatura

„Operativna temperatura je temperatura crnog zatvorenog prostora kod koje bi osoba izmijenila jednaku količinu topline zračenjem i konvekcijom s okolišem uz jednaku relativnu vlažnost i brzinu strujanja zraka kao i u stvarnom nejednolikom okruženju“ .[28]

Operativna temperatura ovisi o temperaturi zraka, srednjoj temperaturi zračenja i brzini strujanja zraka te se računa prema jednadžbi (22). [28]

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_{mrt} + \vartheta_a}{2} \tag{22}$$

Jednadžba (22) vrijedi za $|\vartheta_a - \vartheta_{mrt}| \leq 4$ i $v_a < 0{,}2\ \frac{m}{s}$. Za veću preciznost i različite okoliše, vrijedi jednadžba (23). [28]

$$\vartheta = (1 - a)\vartheta_{mrt} + a\vartheta_a \tag{23}$$

Vrijednosti koeficijenta a prikazani su u Tablici 3 u ovisnosti o brzini strujanja zraka.

Tablica 3 – Koeficijenti za proračun operativne temperature [28]

a, [-]	v_a, [m/s]
0,5	$v_a<0,2$
0,6	$0,2<v_a<0,6$
0,7	$0,6<v_a<1$

U slučaju direktnog mjerenja operativne temperature, veza između koeficijenta prijenosa topline zračenjem i konvekcijom kod osjetnika mora biti jednaka kao i kod stvarne osobe. Korištenjem jednadžbe (16) moguće je procijeniti promjer osjetnika koji će imati jednaki iznos omjera h_c/h_r kao i osoba. Optimalni promjer osjetnika ovisi o brzini strujanja zraka i upada u interval između 40 mm i 100 mm. Standardni osjetnik promjera 160 mm precijenit će utjecaj srednje temperature zračenja. Potrebno je poduzeti jednake mjere opreza kao i kod mjerenja srednje temperature zračenja termometrom s crnom sferom. Važni su oblik osjetnika u nejednolikom okruženju i boja osjetnika zbog izloženosti kratkovalnom zračenju.
Može se pokazati da će operativna temperatura u određenoj točki biti jednaka temperaturi kojoj se prilagođava negrijana testna lutka. Temperaturni osjetnik i lutka prema [28] moraju imati:

-jednaki omjer gubitka topline konvekcijom i zračenjem

-jednaki vidni faktor prema okolnim plohama

-jednaki emisijski faktor za dugovalno i kratkovalno zračenje

Svijetlosivi elipsoidni oblik dug 160 mm s promjerom od 54 mm opremljen mjernim uređajem za mjerenje prosječne površinske temperature zadovoljava zahtjeve za osjetnikom operativne temperature. Kako se vidni faktor osobe prema okolnim plohama mijenja kako oni mijenjaju svoj položaj u prostoriji, osjetnik također mora imati mogućnost zauzimati različite položaje kako bi ga se moglo koristiti u više prostorija. Grijanjem osjetnika operativne temperature na temperaturu jednaku površinskoj temperaturi odjeće koju nosi osoba, količina izmijenjene osjetne topline (H) može se direktno odrediti. H se jednostavno određuje kao količina energije potrebna za održavanje površinske temperature osjetnika operativne temperature. [28]

U ovom radu, operativna temperatura nije mjerena već je proračunavana prema jednadžbi (22) budući da prethodno izračunate srednja temperatura zračenja, izmjerena temperatura zraka i brzina strujanja zraka zadovoljavaju spomenute kriterije.

3.5.2 Ekvivalentna temperatura

„Ekvivalentna temperatura je temperatura prostora kod koje bi osoba izmijenila jednaku količinu topline zračenjem i konvekcijom s okolišem uz uključeni utjecaj brzine strujanja zraka i s jednakom relativnom vlažnošću kao i u stvarnom nejednolikom okruženju“ Predstavlja integrirani utjecaj temperature zraka i srednje temperature zračenja. [28]

3.5.3 Efektivna temperatura

Efektivna temperatura je temperatura prostora kod koje bi osoba izmijenila jednak iznos energije s okolišem uz relativnu vlažnost od 50% kao i u stvarnom nejednolikom okruženju uz pretpostavku sljedećih standardnih uvjeta [30]:

-razina odjevenosti: 0,6 clo

-razina fizičke aktivnosti: 1,1 met

-brzina strujanja zraka $v_a < 0{,}2\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Za proračun efektivne temperature približno vrijedi sljedeći izraz [30]:

$$ET = 0{,}4\vartheta_a + 0{,}5\vartheta_{mrt} + 0{,}1\vartheta_w - 3{,}2v_a \tag{24}$$

ϑ_a – temperatura suhog termometra (temperatura zraka), [°C]

ϑ_{mrt} – srednja temperatura zračenja, [°C]

ϑ_w – temperatura vlažnog termometra, [°C]

v_a – brzina strujanja zraka, $[\frac{m}{s}]$

Ekvivalentna i efektivna temperatura nisu mjerene u ovom radu. Zaključci o toplinskoj ugodnosti doneseni su na temelju operativne temperature.

4. OGRJEVNA TIJELA

Sustavi grijanja mogu se podijeliti prema izvedbi na pojedinačne grijače (izvor topline postavljen u pojedinoj prostoriji kao primjerice peći, grijalice i kamini), centralno grijanje (jedan izvor topline za više prostora unutar zgrade), daljinsko grijanje (jedan izvor topline za više zgrada, stambeni kompleks ili dio grada) te sustave posebne izvedbe (obnovljivi izvori energije). Današnji moderni sustavi koriste mnoge napredne i energetski učinkovite tehnologije te na njihov izbor utječu brojni faktori:

-vremenski uvjeti ovisni o geografskoj lokaciji

-položaj i vrsta zgrade (poslovna, stambena…)

-vrijeme korištenja zgrade

-dostupnost izvora energije (električna energija, fosilna goriva, biomasa, Sunčeva energija…)

-troškovi investicije i pogona

-zakoni i norme

-utjecaj na okoliš

Ogrjevna tijela su dijelovi sustava grijanja čija je namjena ostvariti izmjenu topline sa zrakom, osobama i objektima u prostoriji u smislu postizanja toplinske ugodnosti i zadovoljavanja potreba radnog procesa. U slučaju centralnih sustava grijanja, ogrjevna tijela izvedena su kao zasebni elementi do kojih se pomoću sustava cijevnog razvoda dovodi prikladan ogrjevni medij (uglavnom voda) zagrijan pomoću izvora zajedničkog za cijelu zgradu (za više prostorija). Za razliku od toga, kod lokalnih sustava grijanja izmjena topline s okolišem odvija se direktno na izvoru topline, bez posrednih elemenata. Uzevši u obzir izvedbu, način izmjene topline i upotrebljavani ogrjevni medij, postoji nekoliko osnovnih vrsta ogrjevnih tijela:

-radijatori

-konvektori

-zračeći paneli i kaloriferi

-površinski sustav grijanja (ugradnja u pod, zid ili strop)

-toplozračna

-s izravnom izmjenom topline (peći, grijalice, kamini…)

-s posebnim izvedbama

Kod odabira odgovarajućih ogrjevnih tijela potrebno je obratiti pozornost na nekoliko osnovnih zahtjeva koji se u tom slučaju postavljaju:

-potreban toplinski učin za pokrivanje projektnih toplinskih gubitaka prostorije

-način izmjene topline (konvekcija, zračenje)

-ugradbene dimenzije

-masa ogrjevnog tijela

-mjesto ugradnje u prostoriji

-vanjski izgled s obzirom na uklapanje u interijer

-radni parametri (tlak i temperatura ogrjevnog medija)

-mogućnost ugradnje regulacijskih elemenata

-jednostavnost ugradnje i povezivanja s ostalim dijelovima sustava

-jednostavnost popravaka, održavanja i čišćenja

-sigurnost u pogonu i postojanost na vanjske utjecaje

-cijena

Potreban toplinski učin osnovni je kriterij na temelju kojeg se odabire ogrjevno tijelo. Određuje se na temelju proračuna projektnih toplinskih gubitaka prema EN 12831. Temperaturni režim ogrjevnog medija značajka je o kojoj ovisi izvedba sustava. Glavni kriterij za odabir temperaturnog režima trebaju biti toplinske potrebe prostorije i zahtjevi za toplinskom ugodnošću, a ne izvedba izvora topline. Sustav grijanja može funkcionirati na visokotemperaturnim (90/70 °C) ili niskotemperaturnim (75/65, 70/55, 55/45 °C) režimima što omogućuje sve veća primjena modernijih izvora topline kao što su niskotemperaturni i kondenzacijski kotlovi, dizalice topline, itd. Na taj način ostvaruje se i povoljniji vertikalni temperaturni profil u prostoriji (Slika 3). Toplinski učin koji je po iznosu jednak toplinskim potrebama prostorije određen je sljedećim izrazom:

$$\phi = q_m\left(c_{w,pol} * \vartheta_{pol} - c_{w,pov} * \vartheta_{pov}\right) = kA_{OT}\Delta\vartheta_{\mathrm{m}} \tag{25}$$

ϕ – toplinski učin radijatora, [W]

q_m – maseni protok ogrjevnog medija, $[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}]$

$c_{w,pol}$ - specifični toplinski kapacitet vode na temperaturi ϑ_{pol}, odnosno temperaturi polaza $[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}]$

$c_{w,pov}$ - specifični toplinski kapacitet vode na temperaturi ϑ_{pov}, odnosno temperaturi povrata [$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}}$]

ϑ_{pol} – temperatura polaznog voda, [°C]

ϑ_{pov} – temperatura povratnog voda, [°C]

k – koeficijent prolaza topline, [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}$]

A_{OT} – izmjenjivačka površina ogrjevnog tijela, [m^2]

$\Delta\vartheta_m$ – srednja logaritamska razlika temperatura, [°C]

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov}}{ln\frac{\vartheta_{pol} - \vartheta_a}{\vartheta_{pov} - \vartheta_a}} \tag{26}$$

ϑ_a – temperatura zraka u prostoriji, [°C]

Toplinskim učinom radijatora smatra se toplinski tok koji predaje ogrjevna voda preko ogrjevne plohe zraku, osobama i objektima u prostoriji prolazeći kroz ogrjevno tijelo u stacionarnom stanju. Toplinski učin ovisi o nadtemperaturi ogrjevnog medija ($\Delta\vartheta$) i stvarnoj razlici temperatura polaznog i povratnog voda ($\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov}$). Nadtemperatura ogrjevnog medija računa se prema sljedećem izrazu:

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2} - \vartheta_a \tag{27}$$

Normni učin ogrjevnog tijela računa se prema jednadžbi (28).

$$\phi_N = \phi\left(\frac{\Delta\vartheta_N}{\Delta\vartheta}\right)^n \tag{28}$$

$\Delta\vartheta_N$ – nadtemperatura ogrjevnog medija koja odgovara vrijednostima temperatura polaznog i povratnog voda određenih normom HRN EN 442-2:2014 (npr. 90/70/20 ili 75/65/20 °C), [°C]

$\Delta\vartheta$ – nadtemperatura ogrjevnog medija uz stvarne vrijednosti temperatura polaznog i povratnog voda te zraka u prostoriji, [°C]

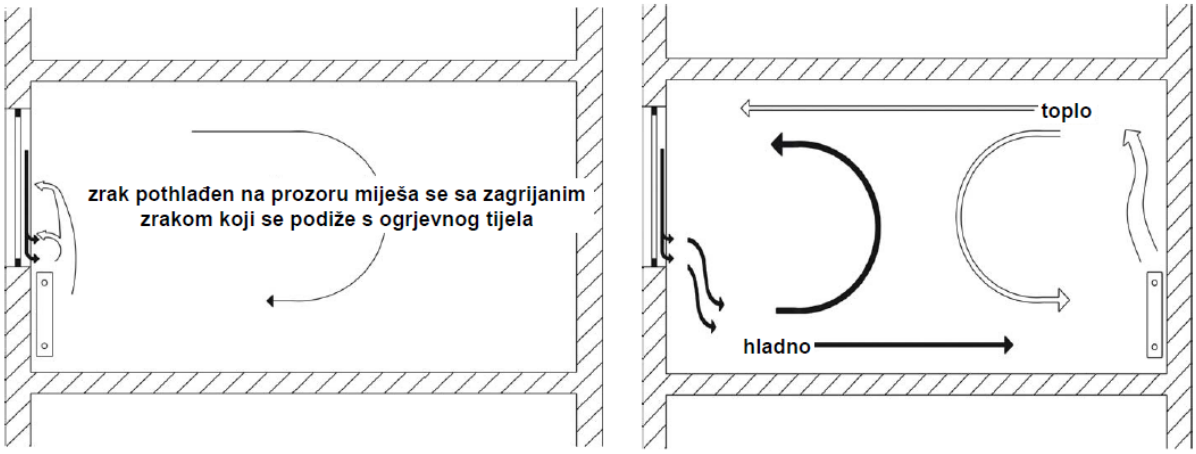
n – eksponent ogrjevnog tijela (Tablica 4)

Tablica 4 – Eksponenti ogrjevnih tijela [31]

Izvedba ogrjevnog tijela	Eksponent ogrjevnog tijela, n $[-]$
Radijator	1,3
Konvektor	1,3-1,5
Podno grijanje	1,1

U stvarnim uvjetima pogona dolazi do odstupanja toplinskog učina radijatora od proračunate vrijednosti zbog promjene uvjeta, odnosno radnih parametara ($\vartheta_{pol}, \vartheta_{pov}, \vartheta_a$). Na promjenu toplinskog učina također utječu izvedba priključka na sustav cijevnog razvoda i smještaj ogrjevnog tijela u prostoriji. Do smanjenja toplinskog učina kao posljedice načina priključivanja dolazi zbog toga što se u realnim pogonskim uvjetima ne može osigurati ujednačena prostrujanost ogrjevnog medija kroz ogrjevno tijelo što uzrokuje nastanak različito zagrijanih područja. Uzrok tome može biti i nakupljanje kamenca i nečistoća.

Pravilan odabir mjesta ugradnje ogrjevnog tijela u prostoriji jedan je od osnovnih preduvjeta njegovog ispravnog rada odnosno ostvarivanja toplinske ugodnosti. Taj se utjecaj najviše primjećuje kroz ostvarivanje izmjene topline, strujanje toplog zraka po prostoriji i temperaturnu stratifikaciju po visini prostorije. U većini slučajeva se najprikladnijim mjestom za smještaj ogrjevnog tijela smatra dio prostorije u kojem su najveći toplinski gubici prema okolišu a to je prostor ispod ostakljenih ploha ili u njihovoj blizini. Primjerice, uobičajeno je postavljati radijatore ispod prozora (Slika 14), a konvektori se najčešće ugrađuju u pod ispod velikih ostakljenih ploha (primjerice izloga u trgovinama). Cijevni i električni grijači podnog grijanja uobičajeno se gušće raspoređuju u blizini ostakljenih ploha. Uz spomenute zahtjeve za pozicioniranje ogrjevnog tijela, potrebno je omogućiti njihov ispravan rad, rukovanje, održavanje i čišćenje stoga ogrjevne plohe, priključci i regulacijski elementi ne smiju biti zaklonjeni građevinskim dijelovima i pokućstvom.



Slika 14 – Utjecaj smještaja ogrjevnog tijela na strujanje zraka u prostoriji [30]

Mogućnost regulacije je značajka koja sve više dolazi do izražaja u posljednje vrijeme kad se stavlja sve veći naglasak na energetsku učinkovitost i uštedu energije. Ogrjevna tijela moraju se moći opremiti suvremenim regulacijskim elementima kao što su primjerice termostatski ventili koji omogućavaju promjenu odavanja topline ovisno o promjeni temperature zraka u prostoriji ili s obzirom na namještenu vrijednost smanjenjem protoka ogrjevnog medija kroz ogrjevno tijelo. Isto tako, moraju imati mogućnost brzog zagrijavanja a i ohlađivanja prostorije kada grijanje više nije potrebno. Mehanizam izmjene topline proizlazi iz konstrukcije ogrjevnog tijela. Kod većine suvremenih ogrjevnih tijela izmjena topline odvija se zračenjem i konvekcijom pri čemu je jedan od ta dva načina dominantan pri njihovom dimenzioniranju i odabiru. Udjeli konvekcije i zračenja najčešćih izvedbi ogrjevnih tijela prikazani su u Tablica 5.

Tablica 5 – Udjeli konvekcije i zračenja najčešćih izvedbi ogrjevnih tijela [31]

Izvedba ogrjevnog tijela				Konvekcijski udio, [%]	Udio zračenja, [%]
članksti radijatori	izduženi po visini	dubina, [mm]	110	70	30
			>110	75	25
	izduženi po duljini		110	73	27
			>110	75	25
pločasti radijatori	s 1 redom ploča	bez konvekcijskih lamela		50	50
		s 2 konvekcijske lamele		75	25
	s 2 reda ploča	bez konvekcijskih lamela		65	35
		s 2 konvekcijske lamele		85	15
	s 3 reda ploča	bez konvekcijskih lamela		80	20
		s 2 konvekcijske lamele		90	10
konvektori	bez pokrova			95	5
	s pokrovom			100	0
cijevni registri				80	20

4.1 Osnovne vrste radijatora

Radijatori su ogrjevna tijela korištena u sustavu grijanja kod kojih se izmjena topline odvija konvekcijom i zračenjem a građeni su od jedne ili više ogrjevnih ploha različite izvedbe i veličine. Tijela radijatora koji se koriste u centralnim sustavima grijanja su šuplja te kroz njih struji odgovarajući ogrjevni medij (topla ili vrela voda, niskotlačna para). Radijatori za lokalne sustave grijanja mogu imati tijelo punog poprečnog presjeka s ugrađenim električnim grijačima (mramorni radijatori) ili je šuplje i ispunjeno medijem koji se zagrijava pomoću električnih grijača (uljni radijatori). U većini slučajeva, pod pojmom radijatori podrazumijevaju se oni koji se koriste u centralnim sustavima grijanja.

Podjela radijatora može se izvršiti prema:

a) materijalu izrade:

-čelični

-aluminijski

-lijevanoželjezni

b) izvedbi ogrjevne plohe

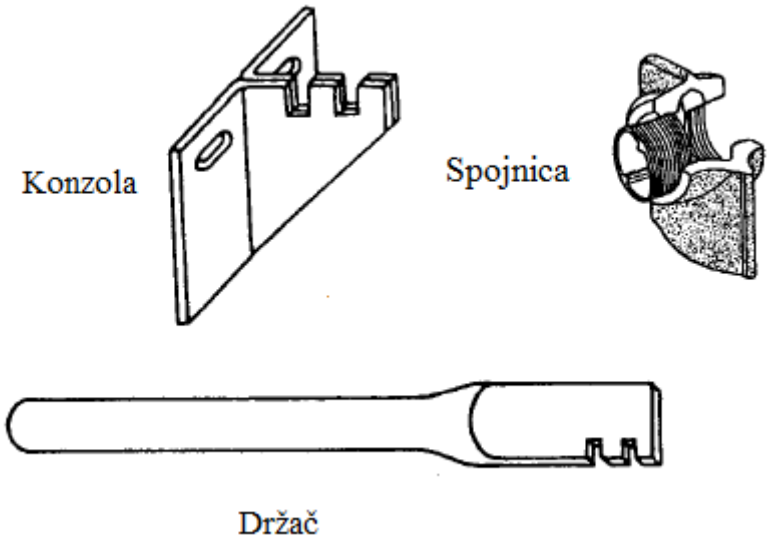
-člankasti

-pločasti

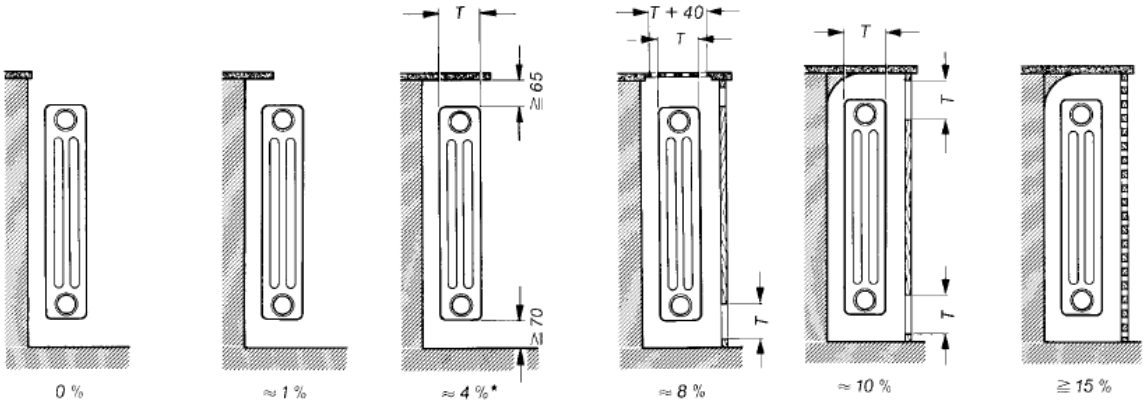
-cijevni

-u raznim posebnim izvedbama

Člankasti (rebrasti) radijatori sastoje se od više članaka napravljenih od tlačno lijevanog aluminija, željeznog lijeva ili mogu biti zavareni od čelika. Međusobno su povezani spojnicama s desnim i lijevim cijevnim (Whithworthovim) navojem dimenzija R 32. Broj spojnica mijenja se ovisno o potrebnom toplinskom učinu radijatora. Ukupne dimenzije i toplinski učin radijatora jednaki su zbroju dimenzija i učina svakog članka. Izbor toplinskog učina ostvaruje se spajanjem članaka u „bateriju“. Osnovni mehanizam izmjene topline je konvekcija (70-75%) a konvektivna ogrjevna tijela najbolje je smjestiti uz vanjski zid ispod vanjskog prozora. Na taj način se kompenzira propuh i toplinski gubici zračenjem i konvekcijom prema hladnom prozoru. Prilikom ugradnje iza maske toplinski učin se smanjuje od 8% do oko 20%. Smanjenje učinka u ovisnosti o načinu ugradnje prikazano je na Slici 16. Nedostatak ovakvih radijatora je pojava izgaranja prašine na njihovoj površini što ostavlja crni trag na zidu iza radijatora pri visokim temperaturama ogrjevnog medija (kada površinska temperatura radijatora iznosi $\geq 60°C$). Montiraju se pomoću držača i konzola (Slika 15). Na 12 članaka potrebne su 2 konzole i dva držača, a nakon toga po 1 konzola i 1 držač na svakih sljedećih 6 članaka). Što se tiče spajanja na cijevni razvod, za radijatore duljine veće od 2 m preporučuje se dijagonalno spajanje.



Slika 15 – Elementi potrebni za montažu radijatora



Slika 16 – Smanjenje učinka radijatora u ovisnosti o načinu ugradnje

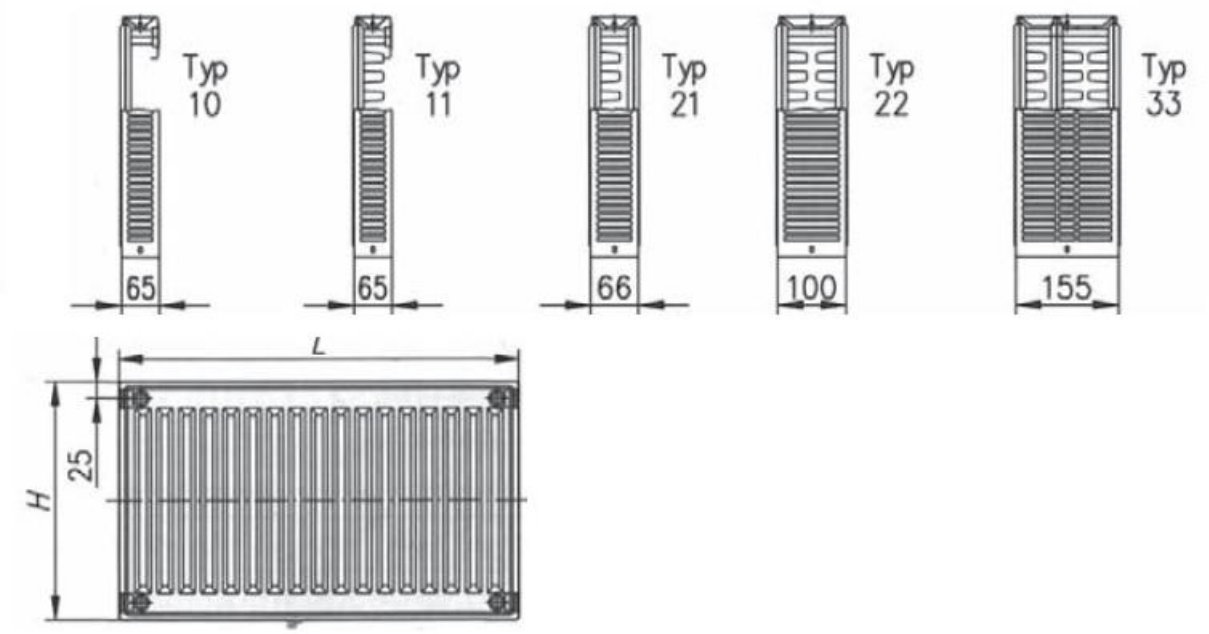
Tijelo pločastog radijatora sastoji se od zavarenih čeličnih ploča (ogrjevnih ploha) s ravnom i glatkom vanjskom površinom. Ploča je najvećim dijelom svoje unutarnje površine u kontaktu s ogrjevnim medijem. Moguće su izvedbe s više ploča u dubinu (najviše 3, debljina pojedine ploče oko 25 mm). Odlikuje ih povećanje udjela zračenja s prednje površine. Za povećanje izmjene topline konvekcijom ugrađuju se konvektorski limovi koji oblikuju okomite kanale za strujanje zraka na stražnjoj strani ploče. Visine pločastih radijatora su većinom do 90 cm a duljine do 3 m. Ploče se uobičajeno postavljaju u više redova a poboljšanje izmjene topline postiže se postavljanjem konvekcijskih lamela. Lamele se odabiru

s obzirom na toplinski učin izražen po duljini. U odnosu na člankaste radijatore imaju sljedeće prednosti:

-relativno male ugradbene dimenzije (posebno dubina)

-glatka površina za izmjenu topline omogućava lakše održavanje i čišćenje čime se postiže veća higijenska razina upotrebe

-lakši odabir, isporuka i ugradnja zbog kompaktne izvedbe



Slika 17 – Izvedba pločastog radijatora

Što se tiče izvedbe priključaka na radijatore, postoji nekoliko osnovnih načina (Slika 18):

a) priključci s jedne strane, pri čemu se priključak polaznog voda nalazi na gornjem, a povratnog na donjem dijelu

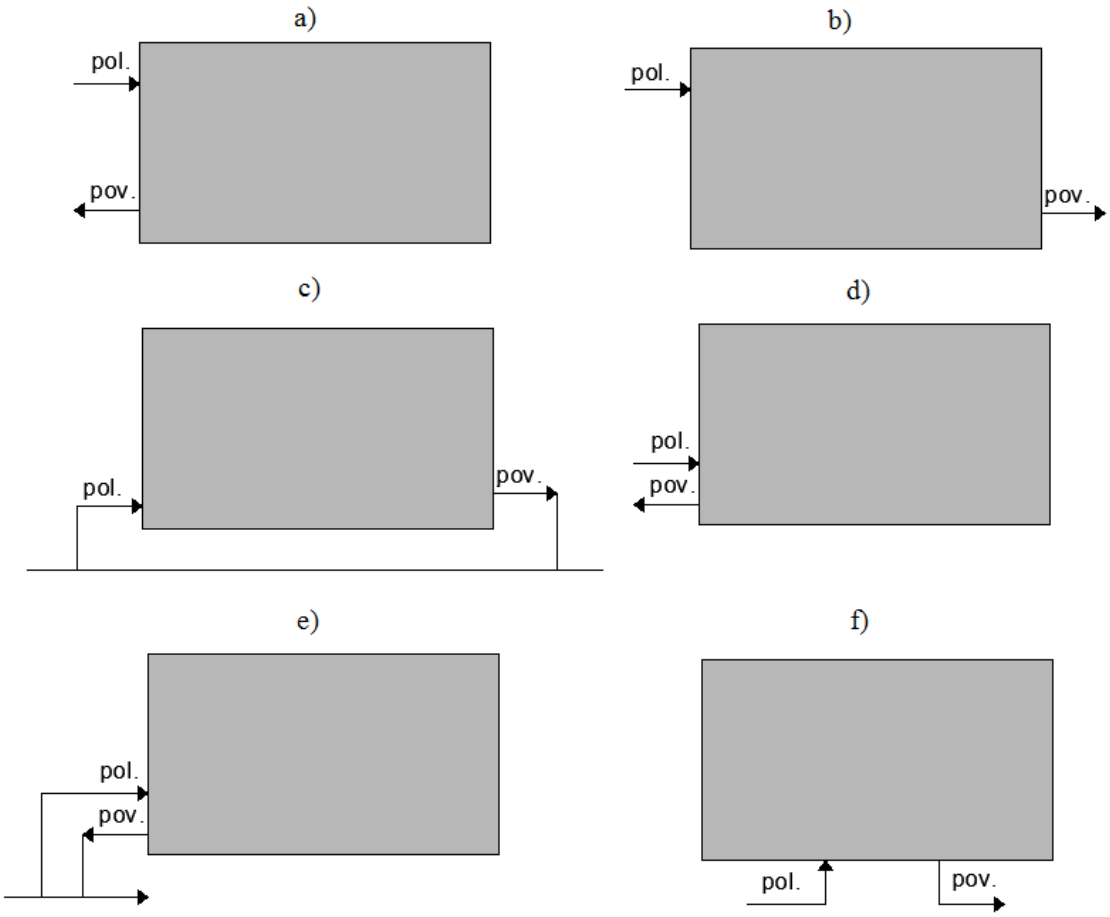
b) priključci s različitih strana, pri čemu se priključak polaznog voda nalazi na gornjem, a povratnog na donjem dijelu

c) priključci s različitih strana, pri čemu se oba nalaze na donjem dijelu s kratkospojenim vodom

d) priključci s jedne strane, pri čemu se oba nalaze na donjem dijelu izvedena kao jednostavan cijevni ventil

e) priključci s jedne strane, pri čemu se oba priključka nalaze na donjem dijelu izvedena kao jednostavan jednocijevni ventil s kratkospojenim vodom

f) priključci s jedne strane, pri čemu se oba priključka nalaze s donje strane izvedena kao jednostavan jednocijevni ventil

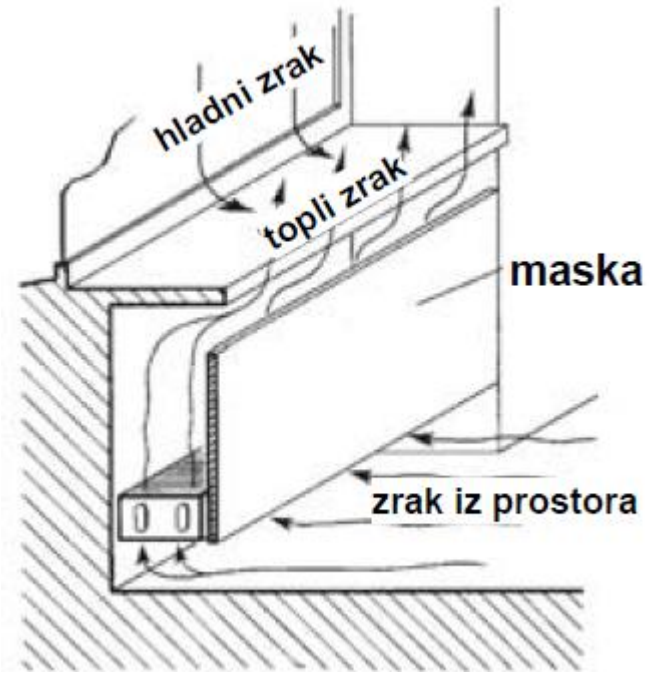


Slika 18 – Prikaz različitih izvedba priključaka radijatora

Način priključivanja najmanje utječe na smanjenje toplinskog učina radijatora u slučaju izvedbe priključka samo s jedne strane ili s različitih strana, ali s priključkom polaznog voda u gornjem dijelu radijatora (izvedbe pod a) i b)). Do smanjenja toplinskog učina također dolazi zbog ometanja izmjene topline (zračenjem i konvekcijom) građevinskim elementima i pokućstvom. Zbog toga su propisani najmanji potrebni razmaci između radijatora i okolnih građevinskih elemenata kod kojih je smanjenje toplinskog učina svedeno na minimum. Prema DIN 4701 udaljenost radijatora od zida mora biti najmanje 50 mm, a od poda 100 mm.

4.2 Osnovne vrste konvektora

Konvektori su ogrjevna tijela koja se koriste u centralnim sustavima grijanja (toplovodnim, vrelovodnim ili parnim) kod kojih se izmjena topline gotovo isključivo odvija konvekcijom (90-100%). Princip rada konvektora prikazan je na Slici 19.



Slika 19 – Princip rada konvektora

Sastoje se od jednog ili više izmjenjivača topline u obliku cijevi kružnog ili ovalnog poprečnog presjeka s nanizanim lamelama (rebrima). Lamele nasjedaju na cijevi u punom obodu i služe za proširenje površine za izmjenu topline na strani zraka. Materijal cijevi i lamela je uobičajeno čelik, bakar ili aluminij. Lamele se prešaju (aluminijske lamele na bakrene cijevi) ili zavaruju na cijevi (čelični lim na čeličnu cijev). Konvektori se mogu podijeliti na dva osnovna načina:

a) prema načinu ugradnje

-stropni konvektori (zračne zavjese) - ugrađuju se u strop te prisilnom konvekcijom ostvaruju strujanje toplog ili hladnog zraka

-zidni konvektori - ugrađuju se u zid ili uz njega

-podni konvektori - ugrađuju se ispod ostakljenih ploha

b) prema načinu ostvarenja strujanja zraka

-s prirodnom konvekcijom - strujanje zraka je posljedica uzgona koji nastaje zbog razlike u gustoćama hladnog i toplog zraka

-s prisilnom konvekcijom - strujanje zraka je osigurano ugradnjom ventilatora što ima za posljedicu bolji koeficijent prolaza topline a time i veći toplinski učin.

Većinom se koriste za grijanje prostora s velikim ostakljenim plohama (npr. zimski vrtovi, terase, trgovine s izlozima) a mogu se izvesti i na način da se do njih dovodi svježi zrak izvana, odnosno mogu se povezati s ventilacijskim sustavom. Prednosti konvektora u odnosu na radijatore su manje dimenzije i masa te manji sadržaj vode što znači i kraće vrijeme zagrijavanja te „bržu“ regulaciju. Ipak, u odnosu na radijatore imaju nekoliko nedostataka među kojima su najveći složena izvedba i ugradnja (iza maske ili rešetke) te otežano čišćenje i održavanje što uzrokuje razmjerno nižu higijensku razinu uporabe stoga treba izbjegavati ugradnju konvektora u prostorima gdje je moguće pojačano onečišćenje.

Konvektori se postavljaju na unutarnje ili na vanjske zidove ispod prozora. U slučaju postavljanja na unutarnje zidove mogu se ugraditi u pregradni zid te na taj način grijati više prostorija. Zbog malih dimenzija, moguće ih je ugrađivati i ispod klupa, stolova, itd. Na Slici 20. prikazani su primjeri ugradnje konvektora.

a) konvektor ispod prozora

b) konvektor pokraj zida

c) slobodnostojeći konvektor

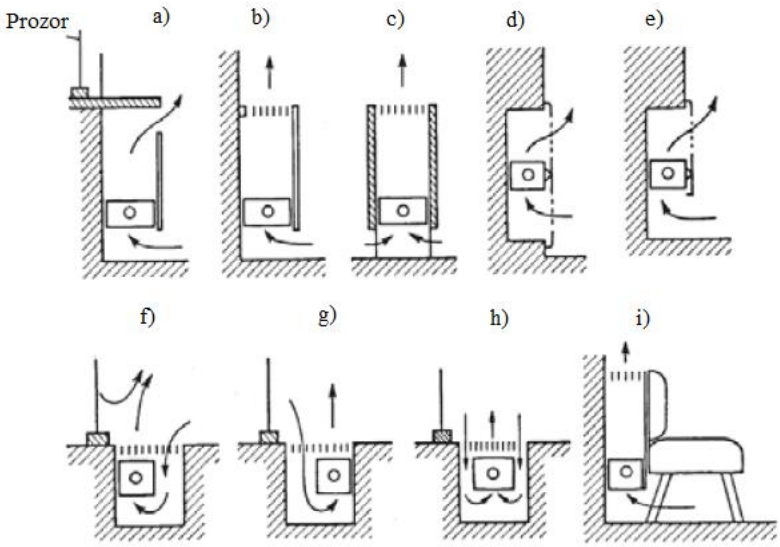
d) i e) konvektor ugrađen u zid

f) podni konvektor s usisavanjem toplijeg zraka

g) podni konvektor s usisavanjem hladnijeg zraka (zrak u kontaktu s hladnim vanjskim zidom)

h) podni konvektor s usisavanjem s obje strane

i) konvektor smješten iza klupe



Slika 20 – Načini postavljanja konvektora

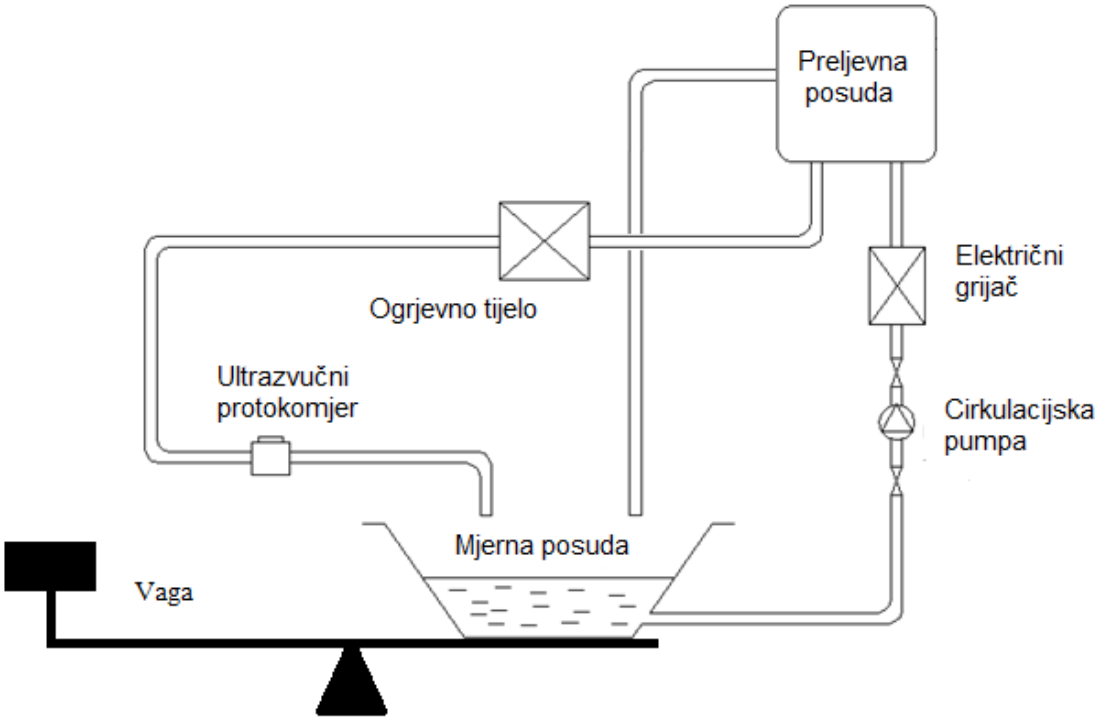
U ovom radu ispitani su i uspoređeni konvencionalni člankasti radijator i novokonstruirani konvektor postavljen uz zid. Konvektor se sastoji od dvije bakrene cijevi vanjskog promjera $\phi 12$ spojene mjedenim lamelama s razmakom od 8 mm. Testirani radijator je konvecionalni člankasti radijator od aluminija koji se sastoji od 10 članaka dimenzija 600/80. Radijator ima nominalni toplinski učin od 1450 W na temperaturnom režimu 75/65/20 °C.

5. OPIS MJERENJA I MJERNE LINIJE

Mjerenje je provedeno u u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u studenom i prosincu 2016. te siječnju 2017. godine. Svrha mjerenja bila je provesti analizu raspodjele temperature zraka i zidova kod zagrijavanja prostorije radijatorom i konvektorom. Analiza se provodi s ciljem određivanja utjecaja spomenutih parametara na toplinsku ugodnost te potencijalnih ušteda toplinske energije za grijanje prostora kod korištenja konvektora. Kao kriterij toplinske ugodnosti u ovom radu promatra se operativna temperatura (ϑ_o). Operativna temperatura proračunavana je prema jednadžbi (22). Kako bi mjerenja bila valjana i usporedba opravdana, parametri potrebni za izračun operativne temperature (temperatura zraka, srednja temperatura zračenja i brzina strujanja zraka) određivani su kod jednakih toplinskih učina i odgovarajućih temperatura ogrjevnog medija obaju ogrjevnih tijela u stacionarnom stanju.

5.1 Mjerna linija

Cirkulacijskom pumpom osigurava se strujanje ogrjevnog medija od spremnika otvorenog sustava (mjerne posude) do preljevne posude. Strujanje vode u ostatku kruga grijanja ostvareno je gravitacijom. Toplinska energija dovodi se ogrjevnom mediju pomoću električnog grijača te se na taj način postiže postavljena temperatura polaznog voda. Izlaskom iz električnog grijača, voda ulazi u spremnik koji sprječava oscilacije protoka. Konstantna visina i jednakost protoka kroz ogrjevno tijelo ostvaruju se spajanjem preljevnog voda spremnika u mjernu posudu. Prolaskom kroz ispitivano ogrjevno tijelo temperatura vode pada zbog predavanja topline zraku i objektima u prostoriji preko izmjenjivačke površine. Protok ogrjevnog medija mjeri se ultrazvučnim protokomjerom. Budući da je sustav otvoren, omogućena je kontrola točnosti mjerenja protoka pomoću vage i štoperice. Ultrazvučni protokomjer mjeri volumni protok vode i spojen je na računalo. Kod određivanja masenog protoka vode izmjereni volumni protok množi se s gustoćom vode na temperaturi povrata. Na taj način bilježe se i prate numerički iznosi protoka vode kroz ogrjevna tijela. Temperature polaznog i povratnog medija mjerene su termoparovima tipa T (bakar-konstantan) i bilježene na računalu. Shema mjerne linije prikazana je na Slici 21.



Slika 21 – Shema mjerne linije

Slika 22 – Mjerna linija

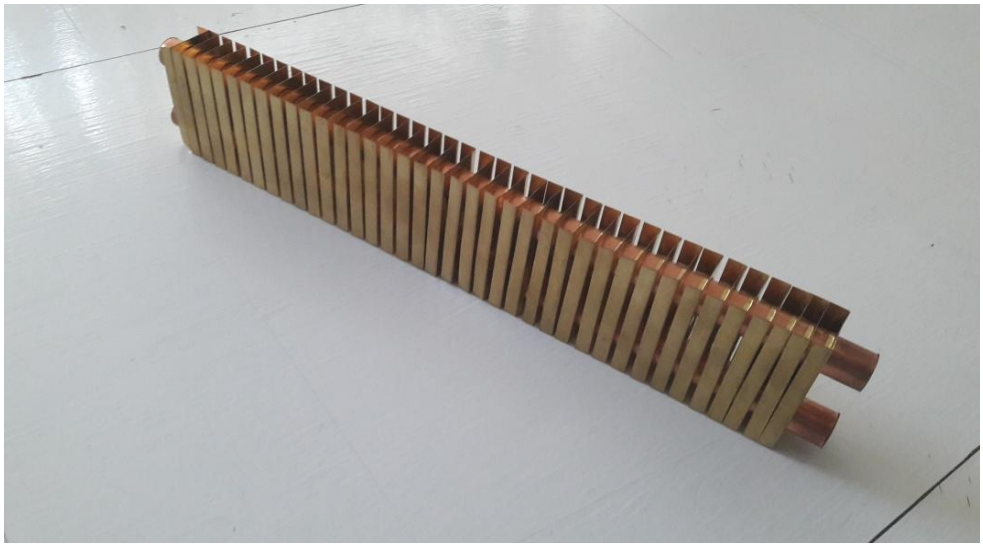
5.2 Komponente mjerne linije

5.2.1 Konvektor

Ispitivani konvektor sastoji se od dvije bakrene cijevi vanjskog promjera $\phi 12$ spojene mjedenim lamelama s razmakom od 8 mm. Konvektor je u ispitnoj prostoriji postavljen sa zaštitnom maskom uz cijeli zid smješten nasuprotno vratima i uz dio zida lijevo od vrata (Slika 23).

Slika 23 – Smještaj konvektora u ispitnoj prostoriji

Sam konvektor prikazan je na Slici 24, dok se na Slici 25 vidi izvedba spajanja termoparskih žica na polazni i povratni vod.



Slika 24 – Ispitivani konvektor

Slika 25 – Prikaz spajanja termoparova na polazni i povratni vod konvektora

Karakteristike uređaja:

-proizvođač: Horvatić d.o.o.

-tip: prototip

-duljina: 5,5 m

5.2.2 Radijator

Ispitivani radijator konvencionalni je člankasti radijator od aluminija koji se sastoji od 10 članaka dimenzija 600/80 (Slika 26).

Karakteristike uređaja:

-proizvođač: Lipovica d.o.o.

-tip: SOLAR 600/80

-nominalni toplinski učin: 1,45 kW na temperaturnom režimu (75/65/20 °C)

Slika 26 – Ispitivani radijator

5.2.3 Cirkulacijska pumpa

Cirkulacijska pumpa u krugu grijanja osigurava cirkulaciju vode i savladava padove tlaka kroz ogrjevna tijela, električni grijač i cjevovod. Protok se regulira zapornim ventilima (nema frekventnog upravljanja). Pumpa korištena u mjerenju prikazana je na Slici 27.

Karakteristike uređaja:
-proizvođač: Grundfoss
-tip: UPS 25-60 180

Slika 27 – Cirkulacijska pumpa kruga grijanja

5.2.4 Električni grijač s regulatorom

Električni grijač koristi se za grijanje vode na temperaturu postavljenu na regulatoru. Na taj način osiguravaju se potrebni uvjeti kod ispitivanja ogrjevnih tijela u ispitnoj prostoriji. Moguće je regulirati temperaturu polaznog voda u intervalu točnosti od ∓ 0,5 °C. Na Slici 28 prikazan je električni grijač s regulacijom.

Karakteristike uređaja:

-proizvođač: Centrometal

-tip: 5E 143

-snaga: 6 kW

Slika 28 Električni grijač s regulatorom

5.2.5 Preljevna posuda

Preljevna posuda (Slika 29) nalazi se iznad električnog grijača u krugu grijanja i služi za anuliranje oscilacija protoka kroz ispitivano ogrjevno tijelo čime se omogućava postizanje stacionarnog stanja u ispitnoj prostoriji. Preljevni vod spojen je s mjernom posudom.

Slika 29 – Preljevna posuda

5.3 Mjerna oprema

5.3.1 Termoparovi

Temperatura ogrjevne vode i zraka u prostoriji mjerena je termoparovima tipa T (Slika 30).

Slika 30 – Termopar tipa T

Temperatura ogrjevne vode mjerena je na dva mjesta (polaz i povrat) na ulazu i izlazu iz ogrjevnih tijela. Temperatura zraka mjerena je na 10 mjesta u ispitnoj prostoriji na dvije razine. Termoparovi su zajedno s ultrazvučnim protokomjerom preko A/D pretvarača (Slika 31) spojeni na računalo gdje se pomoću programa pod nazivom „Benchlink data logger“ prate i bilježe temperature tijekom vremena.

5.3.2 Akvizicijski sustav

Akvizicijski sustav u mjernoj liniji služi za prikupljanje podataka o temperaturama u mjerenom sustavu u određenim vremenskim intervalima (u ovom radu mjerenje je provedeno s vremenskim intervalom od 60 s). Svih 12 termoparova (10 za mjerenje temperature zraka i 2 za mjerenje temperature ogrjevne vode u polaznom i povratnom vodu) spojeno je na akvizicijski sustav. Akvizicijski sustav funkcionira na principu pretvaranja analognog signala u digitalni što omogućuje praćenje izmjerenih podataka na računalu u obliku tabličnih vrijednosti. Uređaj je prikazan na Slici 31.

Karakteristike uređaja:

-proizvođač: Agilent Technologies

-broj kanala: 20

Slika 31 – Analogno-digitalni pretvarač signala

5.3.3 Termografska kamera

Temperaturni profil zidova u slučaju grijanja ispitne prostorje s oba ogrjevna tijela snimljen je infracrvenom termografskom kamerom (Slika 32) u stacionarnom stanju. Analiza snimljenih termograma provedena je u programu Fluke SmartView.

Karakteristike uređaja:

-proizvođač: Fluke

-tip: Ti25

Slika 32 – Termografska kamera

5.3.4 Anemometar sa žarnom niti

Brzina strujanja zraka mjerena je anemometrima sa žarnom niti (Slika 33) na svih 10 pozicija u ispitnoj prostoriji.

Karakteristike uređaja:

-prozivođač: TSI inc.

-tip: 8455-150

-mjerno područje: 0-50 m/s

-izlazni signal: 0-10 V

Slika 33 – Anemometar sa žarnom niti

5.3.5 Ultrazvučni protokomjer

Volumni protok ogrjevnog medija mjeren je ultrazvučnim protokomjerom koji je preko akvizicijskog sustava spojen na računalo. Na računalu su praćene i bilježene izmjerene vrijednosti protoka. Korišteno mjerilo toplinske energije (koje uključuje i ultrazvučno mjerilo protoka) prikazano je na Slici 34.

Karakteristike uređaja:

-proizvođač: Siemens

-tip: 2WR5 (2WR5051-5CC10-6KB9)

-mjerno područje: 0,012 – 1,2 $\frac{m^3}{h}$ (nazivni protok $q_{V,N} = 0{,}6\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$)

-granice pogreške: $\left(2 + 0{,}02 * \frac{q_{V,N}}{q_V}\right)$, [%] (maksimalno 5% pri 0,012 $\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$)

Slika 34 – Ultrazvučni protokomjer

5.3.6 Vaga

Kontrola masenog protoka izmjerenog pomoću ultrazvučnog protokomjera izvršena je pomoću vage i štoperice. Ogrjevna voda slijeva se u mjernu posudu smještenu na vagi nakon izlaza iz ogrjevnog tijela. Masa ogrjevne vode na povratu iz ogrjevnih tijela mjerena je u intervalima od 30 s i 60 s. Uređaj je prikazan na Slici 35.

Karakteristike uređaja:

-proizvođač: OHAUS

-tip: C-11

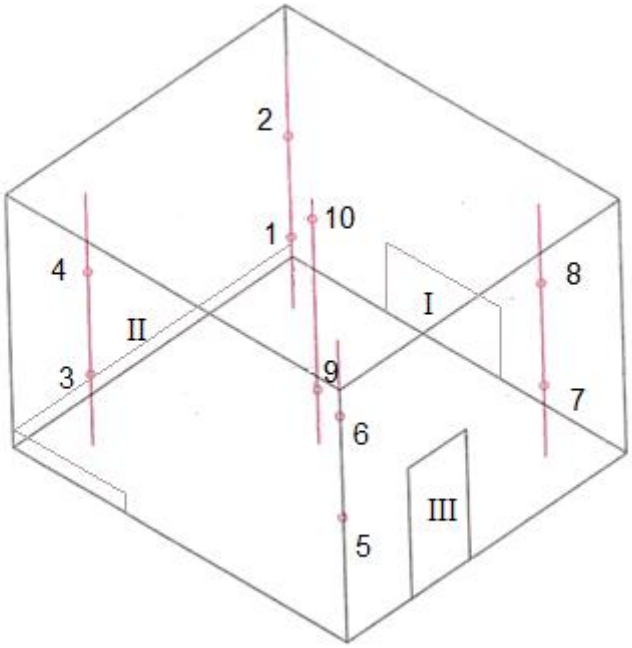
-mjerno područje: 0,2 – 30 kg

-osjetljivost: 10 g

Slika 35 – Vaga za kontrolu točnosti izmjerenog protoka

5.4 Opis mjerenja

Operativna temperatura u ispitnoj prostoriji određivana je u 10 točaka. Kako bi bilo moguće odrediti operativnu temperaturu, mjerene su temperatura zraka i brzina strujanja zraka na tim istim pozicijama. Termoparovi su postavljeni na dvije visine na 5 mjesta u prostoriji. Donji termoparovi postavljeni su 0,75 m od poda, a gornji na 1,5 m. Položaj postavljanja termoparova označen je rednim brojevima od 1 do 10. Položaj radijatora, konvektora te ulaznih vrata označen je redom s I, II i III. Ispitna prostorija prikazana je na Slici 36. Ispitna prostorija (4x4x2,6 m) je prostorija u prostoriji čije su sve plohe hlađene zrakom. Zrak dobavlja klima jedinica kroz istrujne otvore na vanjske površine zidova unutarnje prostorije. Kako je normom HRN EN 442-1:2014 [32] određeno ispitivanje karakteristika radijatora i konvektora pri stalnoj temperaturi zraka prostorije u kojoj se ogrjevno tijelo nalazi (unutarnja prostorija), rashladni učinak dobavljenog zraka trebao bi odgovarati toplinskom učinu ogrjevnih tijela. Budući da rashladni učinak klima jedinice ovisi o vanjskoj temperaturi, radijator i konvektor morali su biti ispitivani na približno jednakim uvjetima vanjskog zraka.



Slika 36 – Ispitna prostorija

Nakon montaže ogrjevnih tijela u ispitnu prostoriju postavljeni su svi mjerni uređaji i potrebna oprema. Prvi korak bio je uključiti električni grijač i postaviti temperaturu polaznog voda. Radijator i konvektor razlikuju se po konstrukciji i veličini izmjenjivačke površine (ogrjevne plohe) stoga nisu u stanju postići jednaki toplinski učin na jednakim nadtemperaturama. Budući da je uz jednaki toplinski učin bio cilj postići i jednaku temperaturu zraka u prostoriji, ogrjevna tijela ispitivana su na različitim temperaturnim režimima. Nakon nekoliko provedenih inicijalnih mjerenja (poglavlje 5.5.) donesen je zaključak da je najbolje mjeriti potrebne parametre kod postizanja jednakog toplinskog učina od oko 630 W. To znači da je kod mjerenja parametara potrebnih za izračun operativne temperature u slučaju grijanja prostorije radijatorom postavna temperatura polaznog voda iznosila 50°C a kod konvektora 75°C. Stvarno izmjerena temperatura polaznog voda pomoću termopara neće biti jednaka postavljenoj temperaturi zbog mjerne nesigurnosti i nepreciznosti regulacije. Nakon postavljanja temperature polaznog voda potrebno je regulirati protok ogrjevnog medija pomoću zapornih ventila. Potreban protok određen je inicijanim mjerenjima i proračunom pomoću jednadžbe (25). Cirkulacijska pumpa u krugu grijanja osigurava cirkulaciju vode i savladavanje padova tlaka kroz električni grijač i spremnik vode. Pumpa nije frekventno regulirana te je regulaciju protoka moguće vršiti jedino zapornim ventilima. Nakon postavljanja protoka i temperature polaznog voda, potrebno je čekati da se u ispitnoj

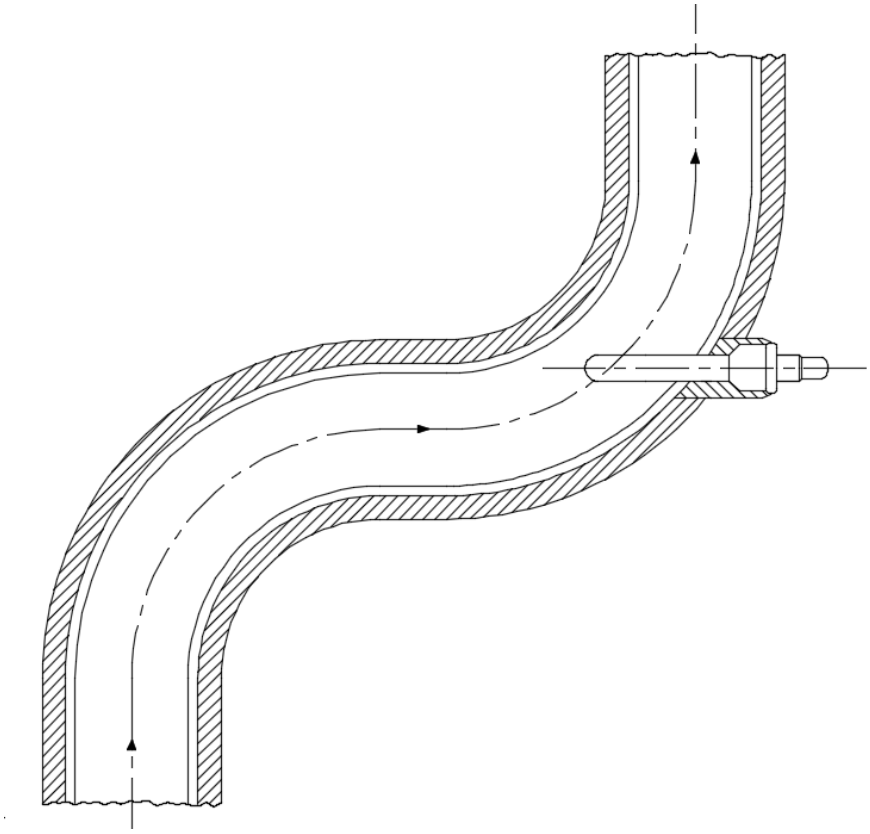
prostoriji uspostavi stacionarno stanje i da mjerene vrijednosti postanu približno konstantne. Promjena mjerenih parametara praćena je na računalu.

5.4.1 Mjerenje temperature zraka

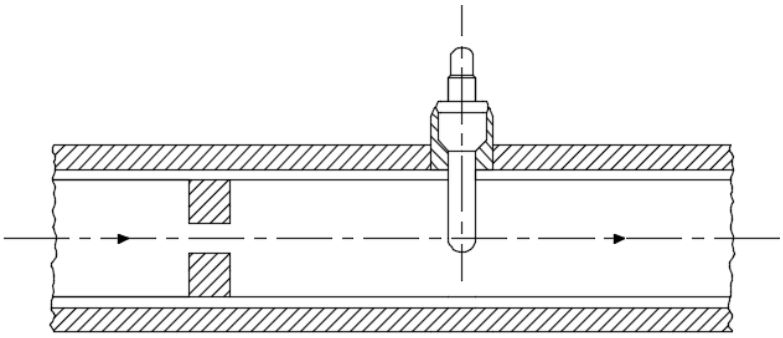
Temperatura zraka mjerena je na pozicijama označenim rednim brojevima na Slici 36. za oba ogrjevna tijela. Tijek promjene temperature zraka od puštanja mjerne linije u pogon praćen je na računalu. Kada se stanje u ispitnoj prostoriji stacioniralo, mjerenje je prekinuto i zabilježeni podaci su analizirani. Temperatura zraka u prostoriji određena je kao aritmetička sredina svih 10 izmjerenih temperatura pomoću termoparova.

5.4.2 Mjerenje temperature ogrjevnog medija

Temperatura vode za grijanje mjerena je termoparovima smještenim u polaznom i povratnom vodu. Termoparske žice bilo je potrebno prespajati s radijatora na konvektor i obratno te spojeve dobro zabrtviti kako bi mjerenje bilo čim točnije. Na mjestima na kojima su postavljeni termoparovi potrebno je osigurati čim bolji prijenos topline. To se u slučaju spajanja termoparova na radijator postiže izvedbom spoja prema Slici 37. Budući da je kod konvektora cijev ravna, na unutrašnoj stijenci cijevi zavareni su elementi koji pospješuju vrtloženje ogrjevnog medija što omogućuje bolji prijenos topline s ogrjevnog medija na temperaturni osjetnik a time i točnije mjerenje temperature. Izvedba spajanja termoparova u slučaju konvektora prikazana je na Slici 38Slika 38. Mjereni podaci praćeni su na računalu.



Slika 37 – Spajanje termoparova na polazni i povratni vod radijatora



Slika 38 - Spajanje termoparova na polazni i povratni vod konvektora

5.4.3 Mjerenje protoka vode

Volumni protok vode mjeren je ultrazvučnim protokomjerom i izmjerene vrijednosti bilježene su na računalu. Maseni protok računat je množenjem volumnog protoka s gustoćom vode na temperaturi povratnog voda. Na posljetku je izračunata osrednjena vrijednost protoka u stacionarnom stanju kontrolirana pomoću vage i štoperice. Kontrola je izvršena vaganjem vode koja se slijeva u mjernu posudu kroz 2 min i 5 min. Usporedba rezultata dana je u

Tablica 6. Kontrola pokazuje da je odstupanje manje od 2% što znači da su rezultati dobiveni pomoću ultrazvučnog protokomjera dovoljno točni za ovu primjenu.

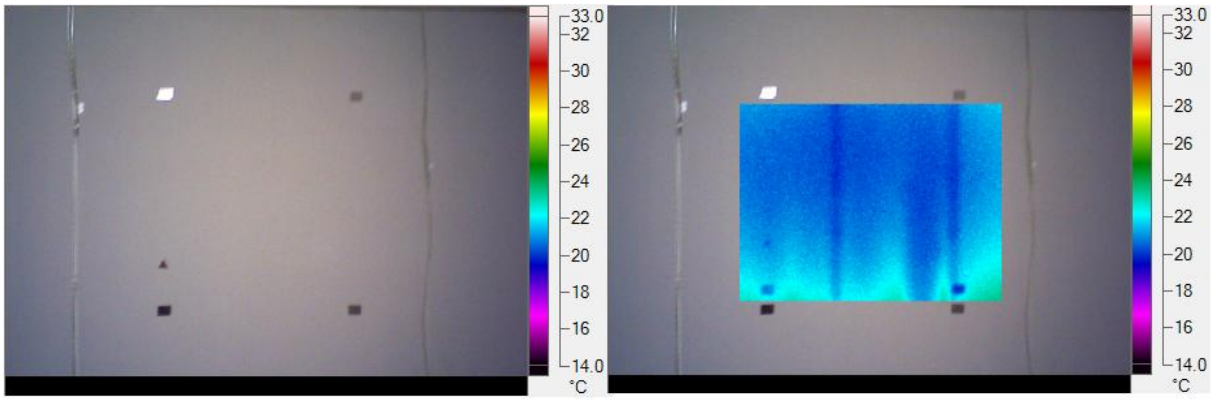
Tablica 6 – Usporeba izmjerenih protoka

Ogrjevno tijelo	Osrednjena vrijednost volumnog protoka izmjerena ultrazvučnim protokomjerom, $[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}]$	Protok izmjeren pomoću štoperice i vage ($\Delta t =$ 2 min), $[\frac{m^3}{h}]$	Protok izmjeren pomoću štoperice i vage ($\Delta t =$ 5 min), $[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}]$
Konvektor	0,0443	0,0446	0,044
Radijator	0,1258	0,1252	0,1261

5.4.4 Mjerenje površinskih temperatura zidova

Temperaturni profil okolnih zidova mjeren je termokamerom. Mjerenju temperaturnih profila zidova pristupilo se u trenutku kada su vrijednosti temperature zraka, temperatura polaza i povrata te masenog protoka postale približno konstantne (stacionarno stanje). Prije snimanja termograma bilo je potrebno odrediti emisijski faktor zidova. Prvo je bilo potrebno odrediti prividnu temperaturu okoliša na način da se termokamera izbacila van fokusa i na taj način je snimljen temperaturni profil zida (u postavkama termokamere emisijski faktor namješten je na vrijednost $\varepsilon = 1$). Budući da je mala razlika između snimljene prosječne temperature zida i temperature zraka, stvarni emisijski faktor zida određivan je na mjestu s izraženijom razlikom temperatura (tik iznad konvektora u slučaju grijanja prostorije konvektorom). Potom je bilo potrebno kontaktnim termometrom izmjeriti temperaturu zraka na odabranoj točki. Zbog uzgonskog efekta, javlja se strujanje zagrijanog zraka koje dodatno otežava točnost mjerenja kontaktnim termometrom. Zbog toga je u trenutku mjerenja fizički spriječeno strujanje zraka kako bi izmjerena temperatura što bolje opisala stvarno stanje. Postupak se ponovio više puta i emisijski faktor u postavkama termokamere je postupno smanjivan dok se ponovno snimljena temperatura zida u odabranoj točki nije u potpunosti poklopila s temperaturom izmjerenom kontaktnim termometrom. Ovim postupkom određen je emisijski faktor zida u iznosu od $\varepsilon = 0{,}93$. Slikano je 12 termograma po zidu (ukupno 48 za svako ogrjevno tijelo) kako bi se kasnije kod izračuna srednje temperature zračenja u SOLIDWORKS-u mogao napraviti model koji čim bolje opisuje realnu sliku ispitne

prostorije. Zbog lakše orijentacije kod snimanja temperaturnih profila, po zidovima su na jednake razmake polijepljene trake od reflektirajućeg materijala (Slika 39).



Slika 39 – Snimanje temperaturnih profila zidova termokamerom

5.4.5 Mjerenje brzine strujanja zraka

Brzina strujanja zraka mjerena je anemometrima sa žarnom niti u svim ranije spomenutima pozicijama označenim na Slici 36. Budući da je brzina strujanja zraka bila znatno niža od 0,2 m/s, za proračun operativne temperature opravdano je korištena jednadžba (22).

5.4.6 Mjerenje toplinskog učina

Mjerenje toplinskog učina provedeno je zbog kontrole ispravnosti uvjeta u prostoriji. Budući da je cilj uspoređivati toplinsku ugodnost u ispitnoj prostoriji, potrebno je osigurati jednake uvjete (jednaki toplinski učin i temperatura zraka). Toplinski učin ogrjevnih tijela računat je prema jednadžbi (25) s prethodno izmjerenim parametrima. Parametri koji se uvrštavaju u navedenu jednadžbu odgovaraju osrednjenim vrijednostima u stacionarnom stanju.

5.5 Inicijalno mjerenje

Budući da je cilj eksperimentalno analizirati toplinsku ugodnost koja se postiže u ispitnoj prostoriji u slučaju grijanja radijatorom i konvektorom, provedeno je inicijalno mjerenje toplinskog učina obaju ogrjevnih tijela u svrhu određivanja optimalnog toplinskog učina kod kojeg se može najlakše izvršiti usporedba. Oba ogrjevna tijela mjerena su na 3 temperaturna režima te su na temelju izmjerenih točaka konstruirane operativne krivulje i

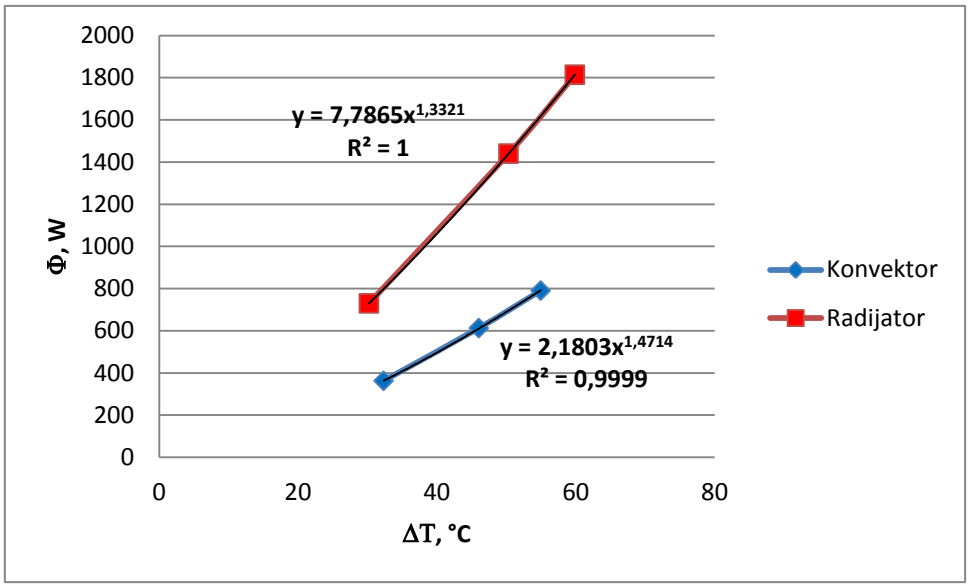
izračunati eksponenti ogrjevnih tijela n (Slika 40). U Tablica 7 i Tablica 8 prikazani su rezultati inicijalnih mjerenja.

Tablica 7 – Inicijalno ispitivanje radijatora prema HRN EN 442-2-2014

	Oznaka	Mjerna jedinica	Točka mjerenja		
			1	2	3
Srednja temperatura zraka	ϑ_a	[°C]	20,03	20,08	19,92
Temperatura polaznog voda	ϑ_{pol}	[°C]	75,32	86,22	52,68
Temperatura povratnog voda	ϑ_{pov}	[°C]	65,38	73,71	47,62
Razlika temperatura	$\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov}$	[°C]	9,94	12,51	5,06
Srednja temperatura vode	$\frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2}$	[°C]	70,35	79,96	50,15
Nadtemperatura	$\Delta\vartheta$	[°C]	50,32	59,88	30,23
Maseni protok vode	q_m	[kg/h]	124,45	124,42	124,34
Toplinski učin	ϕ	[W]	1440	1814	730

Tablica 8 - Inicijalno ispitivanje konvektora prema HRN EN 442-2-2014

	Oznaka	Mjerna jedinica	Točka mjerenja		
			1	2	3
Srednja temperatura zraka	ϑ_a	[°C]	22,09	21,82	20,94
Temperatura polaznog voda	ϑ_{pol}	[°C]	73,91	84,00	56,63
Temperatura povratnog voda	ϑ_{pov}	[°C]	62,37	69,56	49,93
Razlika temperatura	$\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov}$	[°C]	11,54	14,44	6,7
Srednja temperatura vode	$\frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2}$	[°C]	68,14	76,78	53,28
Nadtemperatura	$\Delta\vartheta$	[°C]	46,05	54,96	32,34
Maseni protok vode	q_m	[kg/h]	45,22	46,36	46,4
Toplinski učin	ϕ	[W]	613	791	363



Slika 40 – Operativne krivulje ogrjevnih tijela

Operativne krivulje opisuje karakteristična jednadžba (29).

$$\phi = B * \Delta\vartheta^{n} \tag{29}$$

ϕ – toplinski učin ogrjevnog tijela, [W]

B – normom propisani omjer toplinskog učina i nadtemperature na n-tu potenciju, $\left[\frac{\mathrm{W}}{°\mathrm{C}^{\mathrm{n}}}\right]$

$$B = \frac{\phi_N}{\Delta\vartheta_N{}^{n}} \tag{30}$$

$\Delta\vartheta$ – nadtemperatura ogrjevnog medija, [°C]

n – eksponent ogrjevnog tijela

$\Delta\vartheta_N$ – nadtemperatura ogrjevnog medija koja odgovara vrijednostima temperatura polaznog i povratnog voda određenih normom HRN EN 442-2:2014 (npr. 90/70/20 ili 75/65/20 °C), [°C]

ϕ_N – normni toplinski učin ogrjevnog tijela, [W]

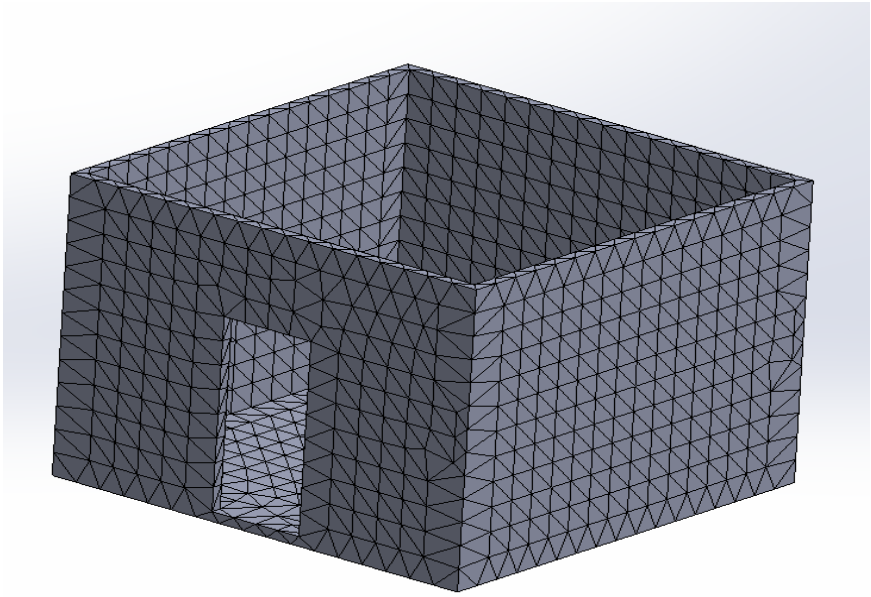
Eksponent ogrjevnog tijela određuje se metodom najmanjih kvadrata prema jednadžbi (31).

$$n = \frac{N * \sum(log\Delta\vartheta * \log\ \phi) - \sum(log\Delta\vartheta) * \sum(log\phi)}{N * \sum(log\Delta\vartheta)^{2} - (\sum log\Delta\vartheta)^{2}} \tag{31}$$

N – broj mjernih točaka, [−]

6. NUMERIČKA METODA ODREĐIVANJA SREDNJE TEMPERATURE ZRAČENJA

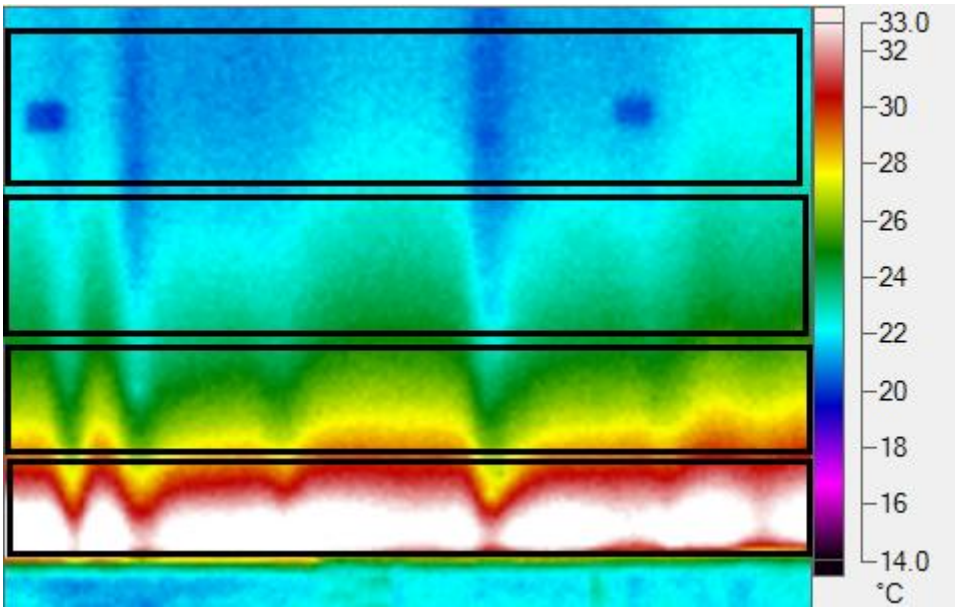
Zbog kompleksnosti određivanja vidnih faktora potrebnih za izračun srednje temperature zračenja, u ovom radu, korištena je numerička metoda određivanja srednje temperature zračenja. Potrebni proračuni provedeni su u programskom paketu SOLIDWORKS 2016 koristeći „Simulation“ dodatak. SOLIDWORKS nudi različite mogućnosti simulacije uključujući simulaciju statičkog opterećenja, toplinskog opterećenja, opterećenja izvijanjem, simulacije opterećenja posuda pod tlakom te simulacije vezane za linearnu i nelinearnu dinamiku. U ovom radu korišten je tzv. „Thermal study“ koji nudi mogućnost analize jednostavnijih slučajeva prijenosa topline. Budući da se promatra srednja temperatura zračenja, efekti konvekcije i provođenja nisu definirani kako bi se eliminirali svi oblici prijenosa topline osim čistog zračenja. Napravljen je model ispitne prostorije u originalnim dimenzijama (Slika 41).



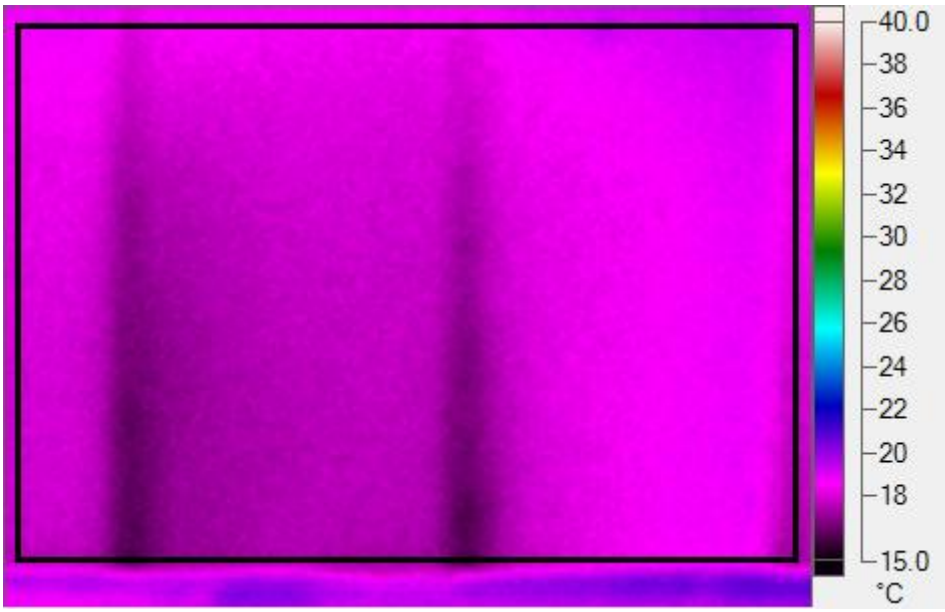
Slika 41 – Model ispitne prostorije

6.1 Princip podjele površina

Model prostorije predstavlja sklop velikog broja pojedinačnih dijelova. Tako se svaki zid također sastoji od minimalno 12 dijelova (snimljeno je 12 termograma po zidu u slučaju grijanja prostorije i radijatorom i konvektorom). Program nudi mogućnost definiranja površinske temperature pojedinih dijelova. Ulazni podaci koji se unose u model (površinske temperature zidova) dobiveni su snimanjem zidova stvarne ispitne prostorije pomoću termografske kamere u stacionarnom stanju kada su konvektor i radijator postigli približno jednake toplinske učine i približno jednake temperature zraka u prostoriji. Analizom dobivenih termograma u programu Fluke SmartView 3.15, napravljena je podjela zidova na odgovarajući broj dijelova. Podjela je vršena na način prikazan na Slici 42Slika 42 i Slici 43. Slika 42. prikazuje jedan od snimljenih termograma koji se odnosi na dio zida nasuprot ulaznim vratima u slučaju kada je prostorija grijana konvektorom. Slika 43 prikazuje isti taj dio zida u slučaju grijanja prostorije radijatorom. Nastojalo se svaki termogram podijeliti na dijelove u obliku pravokutnika koji imaju približno jednoliku temperaturu (oblik pravokutnika izabran je zbog jednostavnosti modeliranja u SOLIDWORKS-u). Razlog takvog pristupa je nastojanje da se situacija u stvarnoj ispitnoj prostoriji (temperaturni profili zidova) čim bolje preslika u model napravljen u SOLIDWORKS-u.

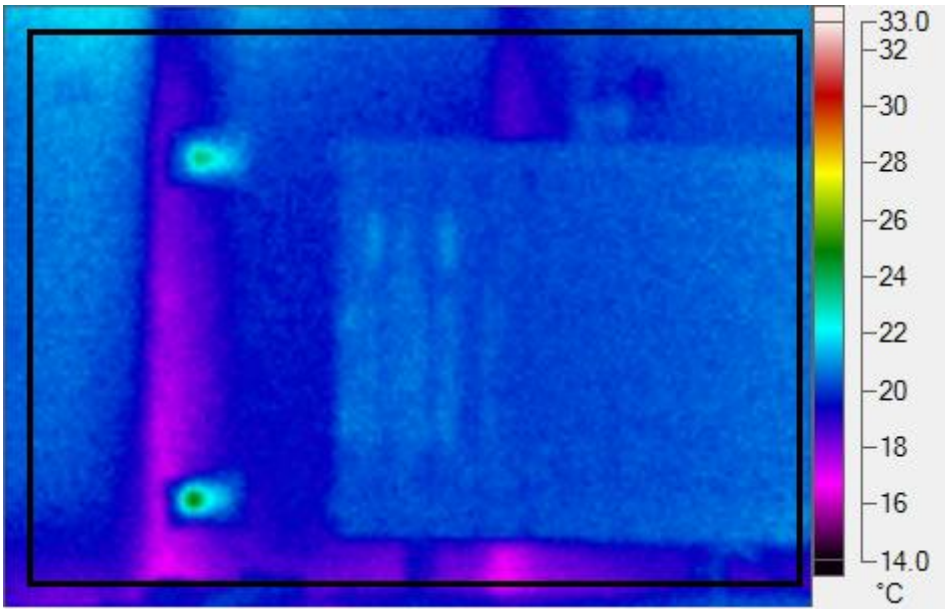


Slika 42 – Primjer podjele termograma na dijelove (konvektor, nasuprotni zid)

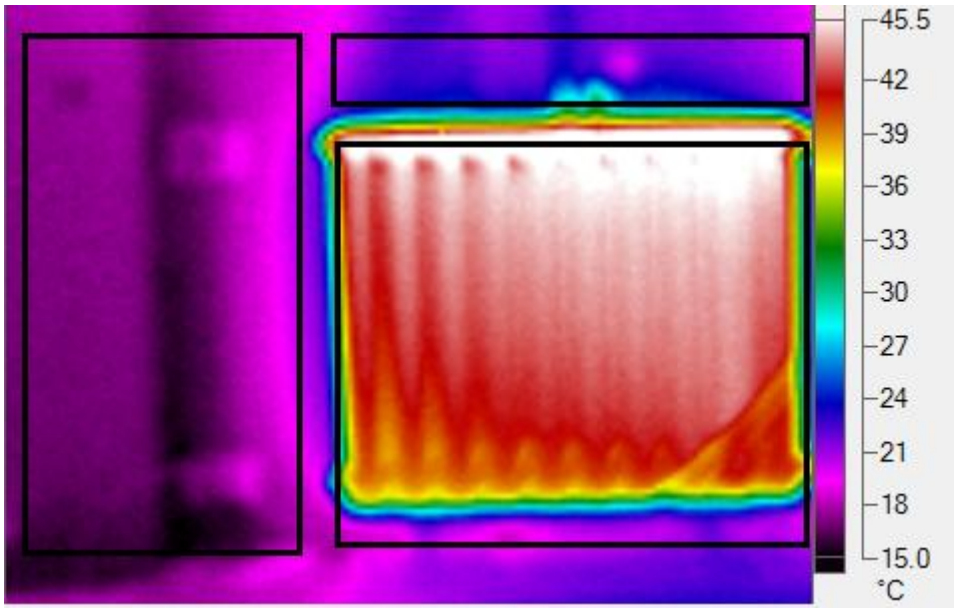


Slika 43 - Primjer podjele termograma na dijelove (radijator, nasuprotni zid)

Budući da se navedeni primjeri odnose na dio zida (zid nasuprot vratima) uzduž kojeg je instaliran konvektor, temperaturni profil zida uniformniji je u slučaju grijanja prostorije radijatorom (oko samog ogrjevnog tijela javlja se izrazita temperaturna stratifikacija zbog intenzivnije izmjene topline i pojačanog strujanja zraka). Termogrami na Slici 44. i Slici 45. prikazuju drugačiju situaciju. Navedene snimke odnose se na dio zida smještenog desno od ulaznih vrata (zida na čiju sredinu je smješten radijator).



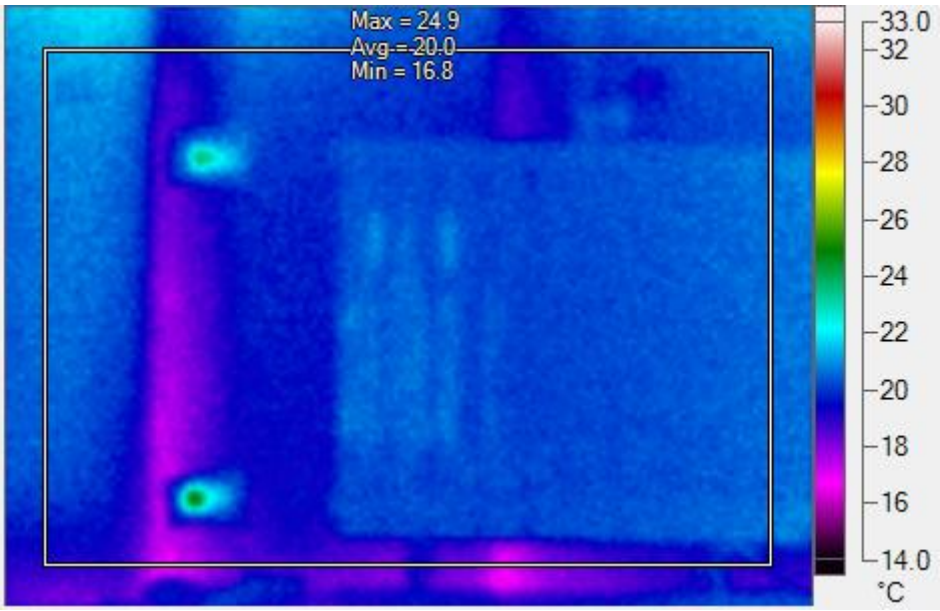
Slika 44 - Primjer podjele termograma na dijelove (konvektor, desni zid)



Slika 45 - Primjer podjele termograma na dijelove (radijator, desni zid)

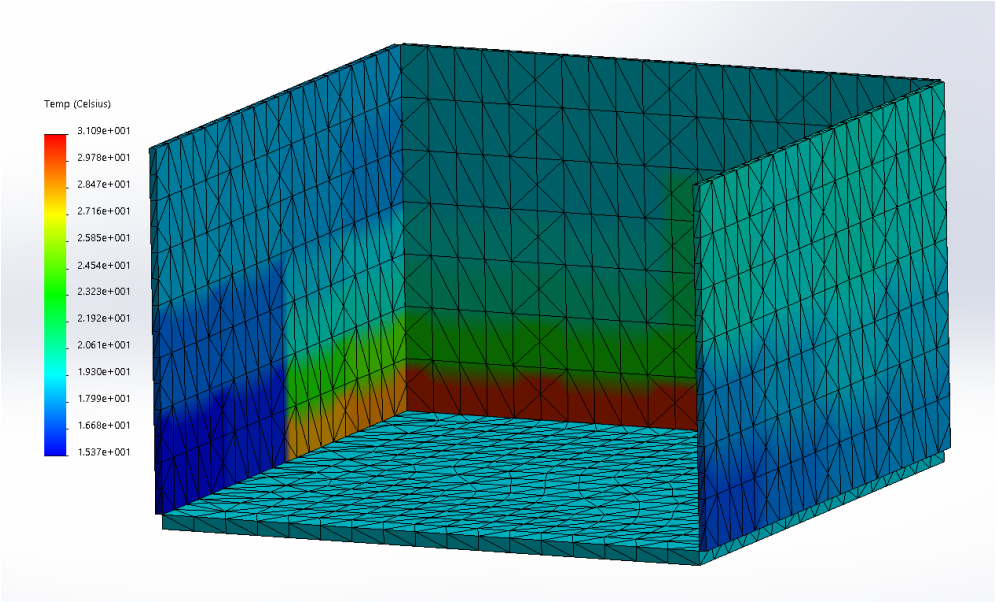
Temperaturna skala prikazana na termogramima služi samo za orijentaciju po plohama te je izuzeta iz određivanja prosječne temperature tog dijela zida. Posljedica isprekidanog strujanja koje se može primjetiti na Slici 42 su nosači konvektora te metalni nosači zidova ispitne prostorije koji se ponašaju kao rebra i povećavaju intenzitet prijenosa topline na spojevima. Program Fluke SmartView 3.15 nudi opciju računanja minimalne, maksimalne i

prosječne temperature na označenoj površini. Korištenjem te opcije određene su prosječne temperature izabranih pravokutnika na svakom termogramu (Slika 46).

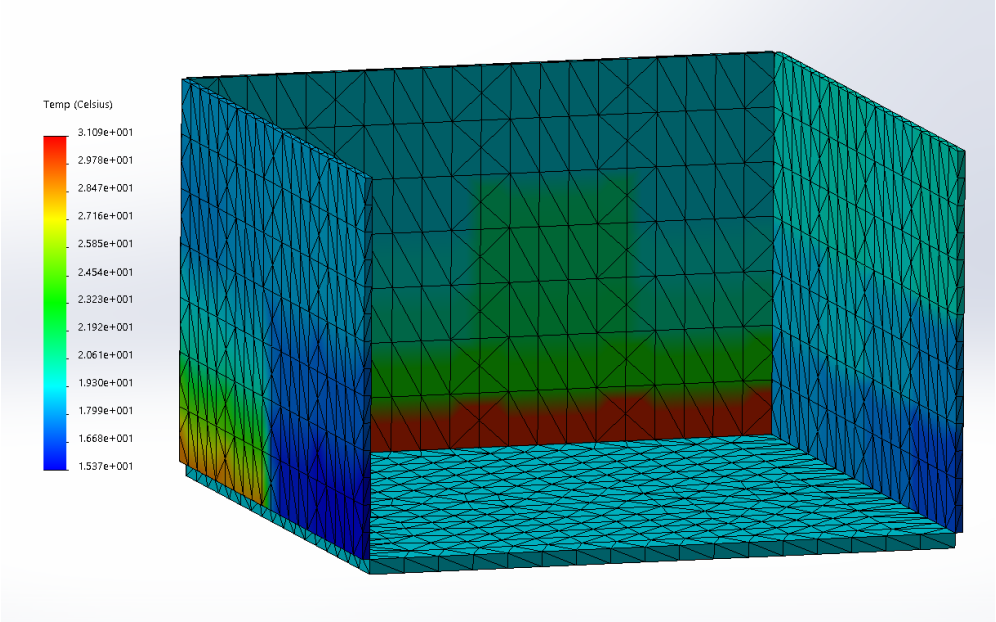


Slika 46 – Primjer izračuna prosječne temperature dijela zida

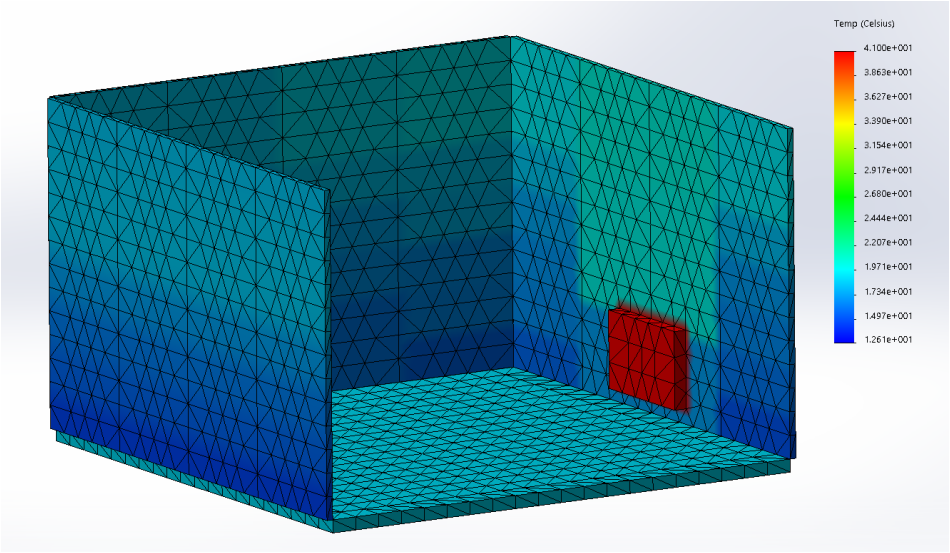
Izvršivši tako podjelu svih 96 snimljenih termograma (12 po svakom zidu za slučaj grijanja prostorije svakim ogrjevnim tijelom), dobiven je potreban broj dijelova za približno točan opis temperaturnog profila svih zidova u ispitnoj prostoriji potreban za pravilno definiranje modela. Tako je za svaki dio („Part“ u SOLIDWORKS-u) definirana temperatura i emisijski faktor (određen metodom spomenutom u poglavlju 5.4.4.). Definirani dijelovi složeni su u konačni sklop („Assembly“) te je na taj način dobiven model i generirana mreža prikazana na Slici 41. Napravljena su 2 jednaka modela s različito definiranim temperaturama i različitom podjelom na dijelove za svako ogrjevno tijelo (grijanje radijatorom i konvektorom uzrokuje velike razlike u temperaturnim profilima zidova). Budući da je snimljeno 12 termograma po svakom zidu na jednakim udaljenostima (orijentacija prema prethodno zalijepljenim trakama od reflektirajućeg materijala) bilo je jednostavno procijeniti dimenzije svakog dijela („Part“) koji se definirao u SOLIDWORKS-u s jednakom temperaturom. Na Slikama 47-51 prikazana je preslika temperaturnog profila ispitne prostorije snimljenog termokamerom u model.



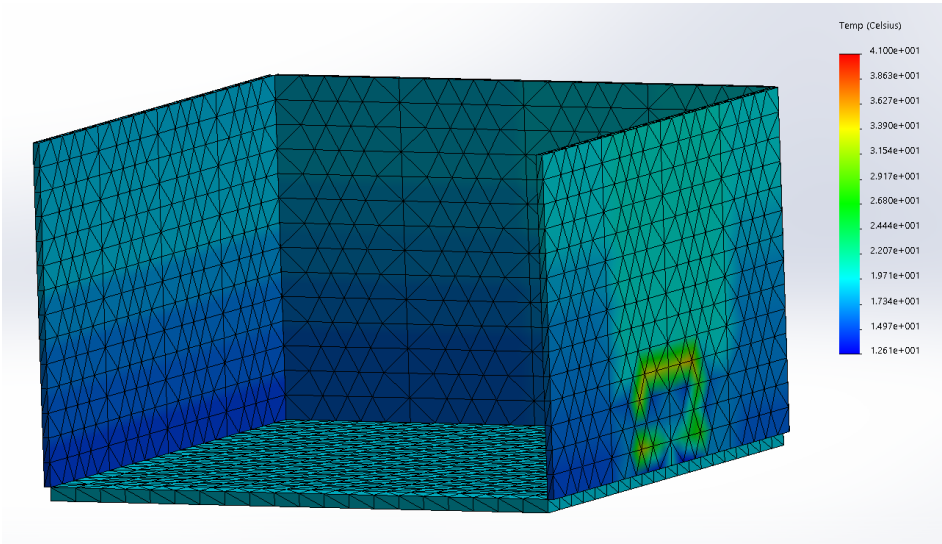
Slika 47 – Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije konvektorom (pogled 1)



Slika 48 - Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije konvektorom (pogled 2)



Slika 49 - Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije radijatorom (pogled 1)



Slika 50 - Preslika temperaturnog profila zidova u model u slučaju grijanja prostorije radijatorom (pogled 2)

6.2 Opis principa izračuna srednje temperature zračenja

Kao zasebni dijelovi („Parts“) modelirani su i osjetnici temperature koji dimenzijama i oblikom odgovaraju termometru s crnom sferom (poglavlje 3.2.1). Kao što je ranije

spomenuto, radi se o šupljoj kugli promjera $\phi 150$ crne boje ($\varepsilon = 1$). Kugle su razmiještene na 10 pozicija u modelu koje odgovaraju pozicijama na kojima su smješteni termoparovi u stvarnoj ispitnoj prostoriji (pozicijama u kojima je mjerena temperatura zraka i brzina strujanja zraka). Temperatura osjetnika (kugli) u modelu nije definirana stoga je program promatra kao nepoznanicu. Temperatura osjetnika određuje se numerički na način da se dovodi u toplinsku ravnotežu s okolnim plohama. Nakon provođenja simulacije, program izračunava površinske temperature svih 10 kugli koje posljedično predstavljaju srednje temperature zračenja u tih 10 točki budući da je simuliran jedino prijenos topline zračenjem. Glavna prednost ovakvog postupka vidi se kod izračuna vidnih faktora. Program automatski računa vidne faktore između svih 10 kugli i okolnih površina zidova, stropa i poda. Budući da je ranije pokazano da je brzina strujanja zraka u svim točkama u prostoriji znatno manja od propisane granice, operativna temperatura posljedično je računata kao aritmetička sredina izmjerene temperature zraka pomoću termoparova u ispitnoj prostoriji i srednje temperature zračenja određene numerički u modelu. Jedini ulazni podaci koje je bilo potrebno unijeti u model su dimenzije i temperaturni profili zidova, stropa i poda.

7. PRIKAZ REZULTATA I ANALIZA

Provedeno je mjerenje temperature zraka i brzine strujanja zraka na 10 pozicija u ispitnoj prostoriji, mjerenje volumnog protoka ogrjevnog medija i temperatura u polaznom i povratnom vodu za oba ogrjevna tijela (radijator i konvektor). Na temelju izmjerenih podataka izračunati su toplinski učini koji su morali biti približno jednaki za oba ogrjevna tijela. Na posljetku su snimljeni temperaturni profili zidova pomoću termografske kamere kako bi bilo moguće korištenjem modela u SOLIDWORKS-u izračunati srednju temperaturu zračenja. Uzevši u obzir sve navedene podatke, izračunata je i operativna temperatura u svih 10 pozicija u ispitnoj prostoriji te na kraju i njena osrednjena vrijednost.

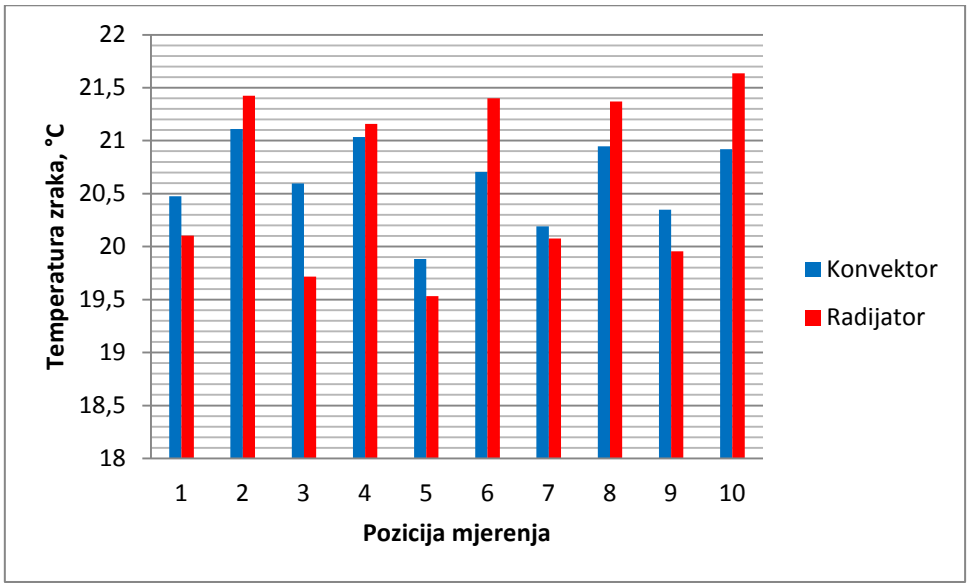
7.1 Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenih parametara prikazani su u Tablica 9.

Tablica 9 – Prikaz mjerenih parametara

	mjerenje 14.12.2016.	mjerenje 15.12.2016.
	konvektor	radijator
Volumni protok ogrjevne vode, q_V [m^3/h]	0,044	0,126
Temperatura polaznog voda, ϑ_{pol} [°C]	73,45	49,28
Temperatura povratnog voda, ϑ_{pov} [°C]	61,19	44,92
Temperatura zraka u točki 1, ϑ_{a1} [°C]	20,47	20,10
Temperatura zraka u točki 2, ϑ_{a2} [°C]	21,11	21,43
Temperatura zraka u točki 3, ϑ_{a3} [°C]	20,60	19,72
Temperatura zraka u točki 4, ϑ_{a4} [°C]	21,03	21,16
Temperatura zraka u točki 5, ϑ_{a5} [°C]	19,88	19,53
Temperatura zraka u točki 6, ϑ_{a6} [°C]	20,71	21,40
Temperatura zraka u točki 7, ϑ_{a7} [°C]	20,19	20,08
Temperatura zraka u točki 8, ϑ_{a8} [°C]	20,95	21,37
Temperatura zraka u točki 9, ϑ_{a9} [°C]	20,35	19,96
Temperatura zraka u točki 10, ϑ_{a10} [°C]	20,92	21,63

Mjerene temperature zraka grafički su prikazane na Slici 51.



Slika 51 – Grafički prikaz rezultata mjerenja temperature zraka

Termoparovi označeni parnim brojevima nalaze se na 1,5 m od poda, a termoparovi označeni neparnim brojevima 0,75 m. Može se primjetiti da je na termoparovima postavljenim više izmjerena viša temperatura u slučaju grijanja prostorije radijatorom u odnosu na konvektor. To je posljedica izraženijeg dizanja toplog zraka kod grijanja prostorije radijatorom. Temperatura izmjerena na termoparovima postavljenim niže (na Slici 36Slika 36 i Slici 51 označeni neparnim brojevima) viša je u slučaju grijanja prostorije konvektorom. Maksimalna temperatura u prostoru izmjerena je u točki 10 za radijator a u točki 2 za konvektor. Minimalna temperatura u prostoru izmjerena je u točki 5 za oba ogrjevna tijela. Iz ovih podataka može se zaključiti da je kod radijatora jače izraženo dizanje toplijeg zraka prema gore budući da se točka 10 nalazi u sredini prostorije na 1,5 m od poda. Općenito, kod radijatora su temperature mjerene na termoparovima na 1,5 m od poda više nego kod temperatura mjerenih kod konvektora za 0,5 °C.

7.2 Proračun toplinskog učina ogrjevnih tijela

Na temelju izmjerenih podataka proveden je proračun toplinskog učina prema jednadžbi (25). Svrha računanja toplinskog učina je dokazivanje opravdanosti usporedbe ogrjevnih tijela te donošenja zaključaka o toplinskoj ugodnosti.

7.2.1 Toplinski učin konvektora

Uvrštavanjem izmjerenih vrijednosti za konvektor u jednadžbu (25) dobiva se:

$$\phi = q_V \rho_{w,pov}\left(c_{w,pol} * \vartheta_{pol} - c_{w,pov} * \vartheta_{pov}\right) =$$

$$= 0{,}044 * (4{,}191 * 73{,}45 - 4{,}183 * 61{,}19) = 626{,}98 \text{ W}$$

Specifični toplinski kapaciteti i gustoća ogrjevnog medija očitani su iz Toplinskih tablica [33]. Temperatura zraka u prostoriji određena je kao aritmetička sredina temperatura zraka izmjerenih na svih 10 pozicija u ispitnoj prostoriji prema jednadžbi (32).

$$\vartheta_a = \frac{\sum_{i=1}^{j=10} \vartheta_{ai}}{10} \tag{32}$$

$$\vartheta_a = 20{,}62 \text{ °C}$$

Uzevši u obzir srednju vrijednost temperature zraka u prostoriji izračunata je nadtemperatura ogrjevnog medija u slučaju grijanja prostorije konvektorom:

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2} - \vartheta_a =$$

$$= \frac{73{,}45 + 61{,}19}{2} - 20{,}62 = 46{,}7 \text{ °C}$$

7.2.2 Toplinski učin radijatora

Toplinski učin radijatora i ostali potrebni parametri proračunati su na isti način kao i kod konvektora.

$$\phi = q_V \rho_{w,pov}\left(c_{w,pol} * \vartheta_{pol} - c_{w,pov} * \vartheta_{pov}\right) =$$

$$= 0{,}126 * (4{,}180 * 49{,}28 - 4{,}179 * 44{,}92) = 631{,}59 \text{ W}$$

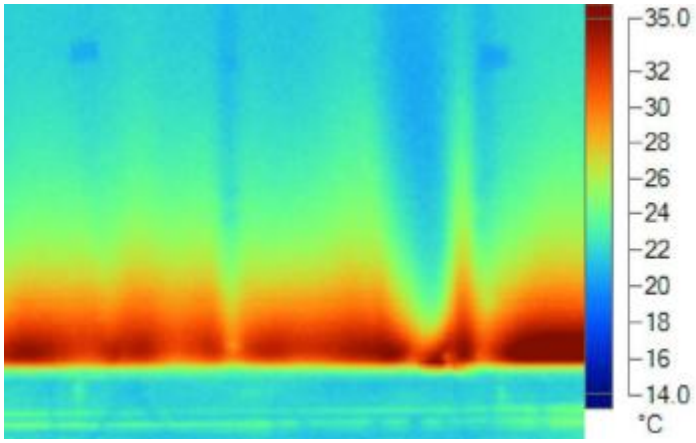
$$\vartheta_a = 20{,}64 \text{ °C}$$

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2} - \vartheta_a =$$

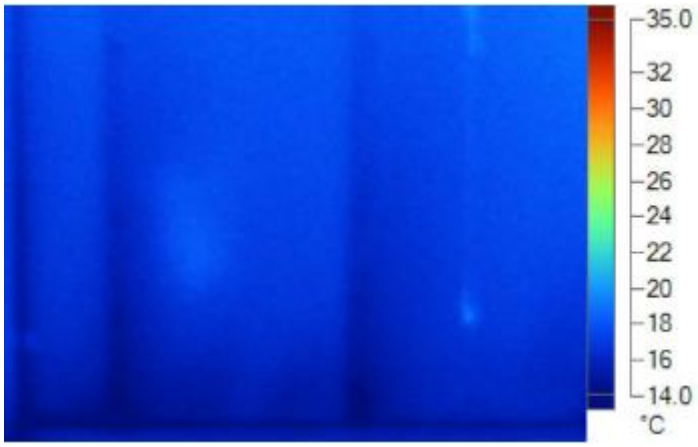
$$= \frac{49{,}28 + 44{,}92}{2} - 20{,}64 = 26{,}46\ °\mathrm{C}$$

7.3 Rezultati dobiveni primjenom numeričke metode

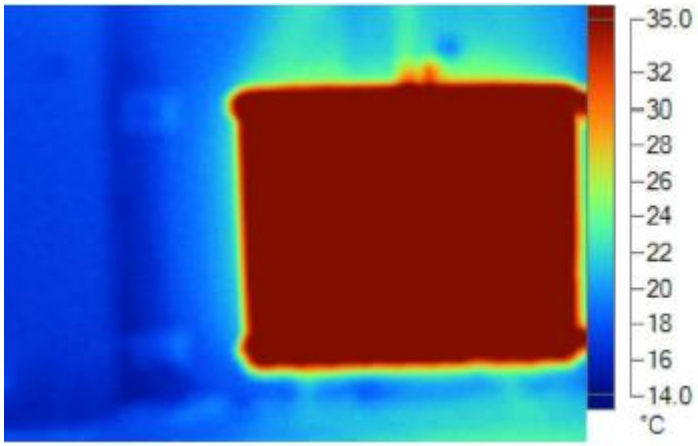
U ovom radu, srednja temperatura zračenja određena je u svih 10 pozicija simulacijom stvarne situacije u ispitnoj prostoriji u modelu napravljenom u SOLIDWORKS-u. Potrebni ulazni podaci bili su dimenzije prostorije te temperaturni profili okolnih ploha. Temperaturni profili određeni su pomoću termografske kamere. Neki od reprezentativnih termograma prikazani su na Slikama Slika 5252-55. Termogrami su detaljnije opisanu u Prilogu.



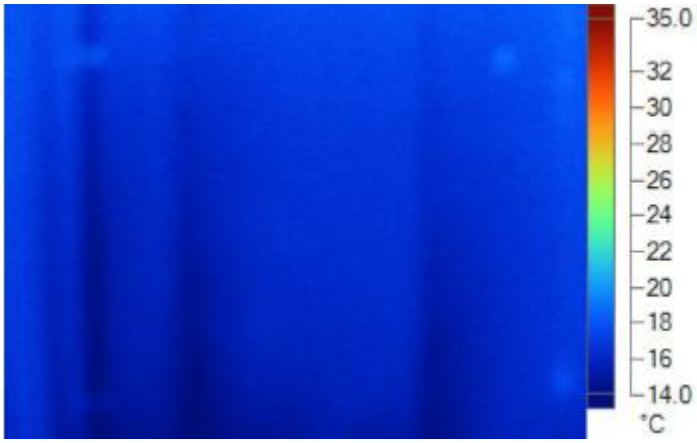
Slika 52 – Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije konvektorom (dio zida smještenog nasuprotno ulaznim vratima)



Slika 53 – Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije konvektorom (dio zida smještenog lijevo od ulaznih vrata)



Slika 54 - Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije radijatorom (dio zida smještenog desno od ulaznih vrata)



Slika 55 - Temperaturni profil zida u slučaju grijanja prostorije radijatorom (dio zida smještenog lijevo od ulaznih vrata)

Srednja temperatura zračenja u ispitnoj prostoriji izračunata je kao aritmetička sredina svih 10 srednjih temperatura izračunatih simulacijom u SOLIDWORKS-u. Rezultati za oba ogrjevna tijela prikazani su u Tablica 10

Tablica 10 - Prikaz rezultata dobivenih numeričkom analizom

	mjerenje 14.12.2016.	mjerenje 15.12.2016.
	konvektor	radijator
Srednja temperatura zračenja, ϑ_{mrt} [°C]	19,48	18,78
Aritmetička sredina srednjih temperatura zračenja na gornjim pozicijama, [°C]	19,29	18,53
Aritmetička sredina srednjih temperatura zračenja na donjim pozicijama, [°C]	19,67	19,02
Razlika između aritmetičkih sredina srednjih temperatura zračenja na gornjim i donjim pozicijama, [°C]	0,38	0,49

Srednja temperatura zračenja veća je kod konvektora za 0,7 °C što znači da konvektor osigurava bolju progrijanost zidova, što znači i njihovu višu temperaturu. Taj zaključak proizlazi iz definicije srednje temperature zračenja te se ona zbog toga promatra kao reprezent prosječne temperature zidova. Na temelju snimljenih termograma izračunate su i srednje površinske temperature pojedinih zidova. Snimljeno je 12 termograma po zidu stoga je pomoću programa Fluke SmartView izračunata srednja temperatura svakog termograma. Srednja površinska temperatura zida potom je računata kao aritmetička sredina 12 dobivenih temperatura. Rezultati su prikazani u Tablica 11.

Tablica 11 – Prikaz rezultata dobivenih termografijom

	mjerenje 14.12.2016.	mjerenje 15.12.2016.
	konvektor	radijator
Prosječna temperatura zidova, [°C]	20,39	19,34
Prosječna temperatura desnog zida, [°C]	20,30	21,04
Prosječna temperatura nasuprotnog zida, [°C]	21,91	18,92
Prosječna temperatura lijevog zida, [°C]	19,94	18,30
Prosječna temperatura zida s vratima, [°C]	19,42	19,1

U slučaju grijanja prostorije konvektorom postiže se uniformniji profil temperatura zidova u usporedbi s radijatorom što pozitivno utječe na toplinsku ugodnost. S druge strane, zbog postizanja viših temperatura zidova povećani su toplinski gubici transmisijom. Prosječna temperatura svih zidova osim desnog viša je u slučaju grijanja prostorije konvektorom (situacija je takva zbog smještaja radijatora na sredinu desnog zida). U oba slučaja najlošije progrijani dio prostorije je u kutu lijevo od ulaznih vrata budući da je to zid suprotan zidu na kojem je postavljen radijator i istovremeno je daleko od konvektora.

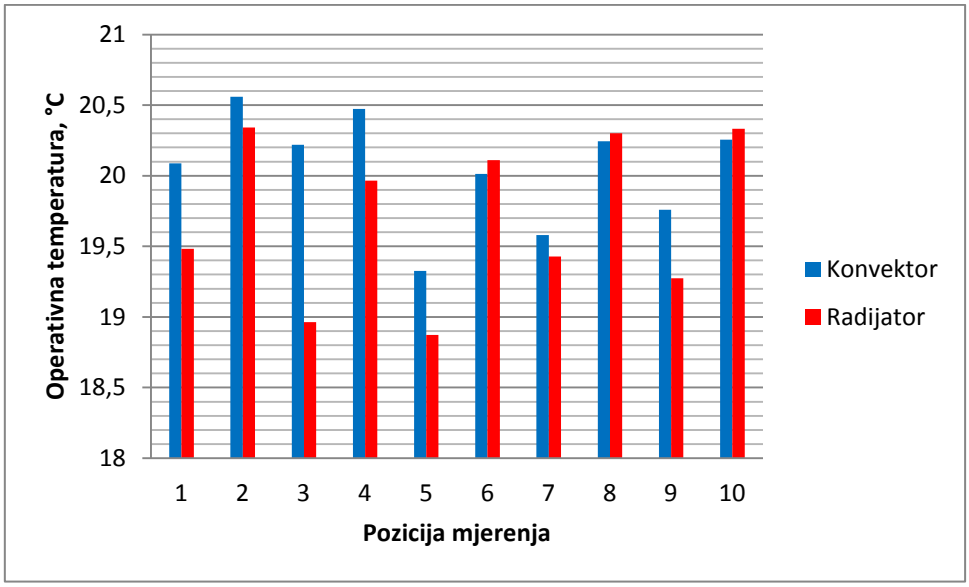
7.4 Analiza dobivenih rezultata

Koristeći izmjerenu temperaturu zraka i numerički određenu srednju temperaturu zračenja moguće je izračunati operativnu temperaturu u svih 10 točaka u ispitnoj prostoriji. Operativna temperatura računata je kao aritmetička sredina temperature zraka i srednje temperature zračenja budući da je mjerenjem pokazano da je brzina strujanja zraka u svim točkama u prostoriji znatno manja od 0,2 m/s. Operativna temperatura proračunata je u svih 10 točaka prema jednadžbi (22). Dobivene vrijednosti prikazane su u Tablica 12.

Tablica 12 – Prikaz proračunatih operativnih temperatura

	mjerenje 14.12.2016.	mjerenje 15.12.2016.
	konvektor	radijator
Operativna temperatura u točki 1, ϑ_{o1}[°C]	20,09	19,48
Operativna temperatura u točki 2, ϑ_{o2}[°C]	20,56	20,34
Operativna temperatura u točki 3, ϑ_{o3}[°C]	20,22	18,96
Operativna temperatura u točki 4, ϑ_{o4}[°C]	20,47	19,96
Operativna temperatura u točki 5, ϑ_{o5}[°C]	19,33	18,87
Operativna temperatura u točki 6, ϑ_{o6}[°C]	20,01	20,11
Operativna temperatura u točki 7, ϑ_{o7}[°C]	19,58	19,43
Operativna temperatura u točki 8, ϑ_{o8}[°C]	20,24	20,30
Operativna temperatura u točki 9, ϑ_{o9}[°C]	19,76	19,27
Operativna temperatura u točki 10, ϑ_{o10}[°C]	20,26	20,33

Za razliku od trenda koji prati temperatura zraka na termoparovima gore i dolje, u slučaju operativne temperature konvektor pokazuje bolje rezultate i na osrednjenim vrijednostima na obje razine. Na Slici 56Slika 56 prikazana je usporedba operativnih temperatura po točkama u prostoriji za radijator i konvektor te se na njoj jasno vidi promjena trenda u korist konvektora u odnosu na temperaturu zraka. Primjerice, u točki 4 (kut između zida smještenog nasuprot vratima i lijevog zida) je operativna temperatura u slučaju grijanja prostorije konvektorom značajno viša u usporedbi s radijatorom. S druge strane, temperatura zraka u točki 4 manja je u slučaju konvektora. Ta razlika nadoknađuje se uzimanjem u obzir zračenja okolnih ploha što se očituje kroz srednju temperaturu zračenja.



Slika 56 - Grafički prikaz rasporeda operativne temperature

Osrednjena vrijednost operativne temperature za čitavu prostoriju zajedno s ostalim bitnim parametrima prikazana je u Tablica 13. Budući da su izračunati toplinski učini ogrjevnih tijela približno jednaki (odstupanje manje od 1%), opravdano je napraviti usporedbu na temelju podataka prikazanih u Tablica 13.

Tablica 13 – Prikaz konačnih rezultata

	mjerenje 14.12.2016.	mjerenje 15.12.2016.
	konvektor	radijator
Toplinski učin, ϕ [W]	626,98	631,59
Nadtemperatura, $\Delta\vartheta$ [°C]	46,7	26,46
Protok ogrjevne vode, q_m [m^3/h]	0,04	0,13
Temperatura polaznog voda, ϑ_{pol} [°C]	73,45	49,28
Temperatura povratnog voda, ϑ_{pov} [°C]	61,19	44,92
Osrednjena temperatura zraka u prostoru, ϑ_a [°C]	20,62	20,64
Srednja temperatura zračenja, ϑ_{mrt} [°C]	19,48	18,78
Operativna temperatura, ϑ_a [°C]	20,05	19,71
Aritmetička sredina operativnih temperatura na gornjim pozicijama, [°C]	20,31	20,21
Aritmetička sredina operativnih temperatura na donjim pozicijama, [°C]	19,79	19,2
Razlika između aritmetičkih sredina operativnih temperatura na gornjim i donjim pozicijama, [°C]	0,51	1,01
Maksimalna operativna temepratura, [°C]	20,56	20,34
Minimalna operativna temepratura, [°C]	19,33	18,87
Razlika između maksimalne i minimalne operativne temperature, [°C]	1,23	1,47

Srednja operativna temperatura viša je kod konvektora na temelju čega se donosi konačni zaključak da konvektor postiže bolju toplinsku ugodnost u prostoru za jednaku ili čak neznatno manju snagu. Rezultati također pokazuju da razlika između aritmetičkih sredina operativnih temperatura na gornjim i donjim pozicijama u slučaju grijanja prostorije radijatorom iznosi 1,01 °C dok u slučaju konvektora iznosi 0,51 °C što potvrđuje prethodnu tvrdnju da grijanje prostorije konvektorom uzrokuje manju temperaturnu stratifikaciju po visini. Maksimalna operativna temperatura izračunata je u poziciji 2 za oba ogrjevna tijela (20,56 °C u slučaju konvektora i 20,34 u slučaju radijatora). Minimalna operativna temperatura izračunata je u poziciji 5 (lijevo od ulaznih vrata u donjem kutu) u slučaju oba ogrjevna tijela. Kao što je ranije spomenuto, grijanje prostorije konvektorom uzrokuje bolju toplinsku ugodnost zbog uniformnije raspodijele operativne temperature i više prosječne operativne temperature za 0,34 °C

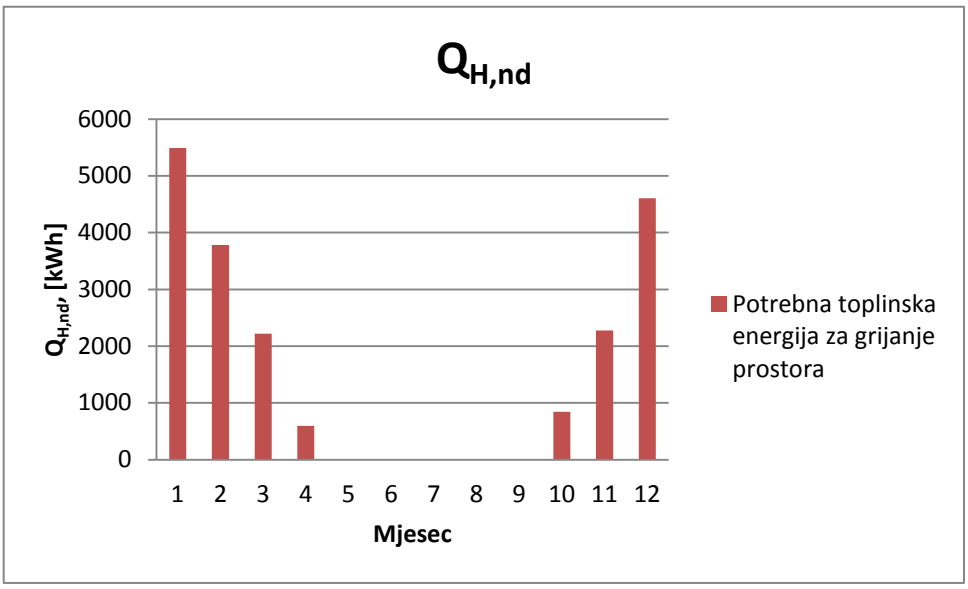
8. PROCJENA POTENCIJALNIH UŠTEDA TOPLINSKE ENERGIJE

Temeljem provedene eksperimentalno-numeričke analize napravljena je procjena potencijalnih ušteda toplinske energije kod korištenja konvektora u odnosu na radijatore. Rezultatima u Tablica 13 prikazano je da se uz jednaku temperaturu zraka u prostoriji postiže različita prosječna operativna temperatura u slučaju grijanja radijatorom i konvektorom (operativna temperatura viša je za 0,34 °C u slučaju grijanja prostorije konvektorom). Potencijalna ušteda toplinske energije procijenjena je na konkretnom primjeru obiteljske kuće za koju je prethodno napravljeno izvješće o energetskom pregledu i energetski certifikat [34]. Proveden je proračun potrebne toplinske energije za grijanje prema normi HRN EN 13790, a potom i proračun primarne energije prema seriji normi HRN EN 15316. Za proračun korišten je program MGIPU Energetski Certifikator v1.7.0.0. temeljen na Algoritmima [35, 36] pisanima u skladu sa spomenutim normama. Procjena uštede izvršena je na način da su se u programu promijenile postavke unutarnje projektne temperature s trenutnih 20 °C na 19,66 °C što odgovara razlici između postignutih operativnih temperatura kod ispitivanja obaju ogrjevnih tijela.

8.1 Opis stanja objekta

Napravljen je energetski pregled obiteljske kuće na adresi Gajeva 1, Marija Bistrica, 49246. Snimljeno je stanje objekta, popisani su potrošači energije a na osnovu energetskog stanja objekta definirana su potencijalna mjesta uštede. Ukupna korisna površina zgrade iznosi $A_k = 144{,}63\ \mathrm{m}^2$. Kuća ima 3 etaže (negrijani podrum, grijano prizemlje i potkrovlje). Krov je izoliran sa 10 cm staklene vune, prozori i vrata su izvedeni s drvenim okvirom i dvostrukim ostakljenjem te bez zaštite od Sunčeva zračenja dok vanjski zidovi nemaju nikakvu izolaciju što znači da niti jedan građevni dio ne zadovoljava norme toplinske zaštite koje propisuje Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN110/08). Zbog malog toplinskog otpora preko otvora i neizolirane fasade nastaju veliki transmisijski gubici. Sustav grijanja izveden je centralno s standardnim protočnim bojlerom na plin od 24 kW koji se koristi za grijanje te pripremu PTV. Korištena ogrjevna tijela su člankasti radijatori zavareni od aluminija ukupne snage od 26 kW pri temperaturnom režimu 80/60/20 °C. Temperatura prostora regulira se sobnim termostatom te termostatskim ventilima na radijatorima. Prema iskazanim vrijednostima koeficijenata prolaza topline,

mjesečnom metodom proračuna izračunata je godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za stvarne klimatske podatke (meteorološka postaja Zagreb, Maksimir) u iznosu od $Q_{H,nd} = 19812{,}15\ \frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{a}}$ odnosno $Q'_{H,nd} = 136{,}99\ \frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2a}}$ što zgradu svrstava u razred D. Na Slici 57Slika 57 prikazana je mjesečna potreba za toplinskom energijom. [34]



Slika 57 - Potrebna toplinska energija za grijanje po mjesecima [34]

8.2 Usporedba rezultata

Zamjena radijatora konvektorima, za ovu potrebu procjene uštede toplinske energije, provedena je na način da su se u programu MGIPU Energetski Certifikator promijenile postavke unutarnje projektne temperature ($\vartheta_{int,H}$). Pretpostavka je da postizanjem različitih temperatura zraka u prostorijama (potrošnjom različitih količina toplinske energije) ogrjevna tijela i dalje postižu jednaku toplinsku ugodnost (jednaku operativnu temperaturu). Postavke ogrjevnih tijela u podsustavu predaje nisu mijenjane budući da bi se na taj način u postojeći sustav uvelo previše promjena koje ne bi bilo moguće na pravilan način protumačiti. Usporedba dobivenih rezultata prikazana je u Tablica 14.

Tablica 14 – Prikaz parametara koji opisuju uštedu energije [34]

Parametar	Grijanje radijatorima (postojeće stanje), $\vartheta_{int,H} = 20$ °C	Grijanje konvektorima, $\vartheta_{int,H} = 19{,}66$ °C	Smanjenje u odnosu na postojeće stanje, [%]
Specifična godišnja toplina za grijanje $Q'_{H,nd}$ [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$]	136,99	132,13	3,55
Godišnja potrebna toplina za grijanje, $Q_{H,nd}$ [kWh]	19812,15	19109,56	3,55
Toplinska energija na ulazu u podsustav proizvodnje, $Q_{H,gen,in}$ [kWh]	35885,61	34969,92	2,55
Isporučena energija, E_{del}[kWh]	36537,43	35614,55	2,53
Specifična godišnja isporučena energija, E_{del}'[kWh]	252,63	246,25	2,53
Primarna energija, E_{prim} [kWh]	40346,78	39332,50	2,51
Specifična godišnja primarna energija, E_{prim}' [kWh]	278,97	271,95	2,51
Energetski razred	D	D	
Emisija CO_2, [kg]	8055,06	7851,74	2,52

Korištenjem konvektora umjesto radijatora godišnja potreba za toplinskom energijom može se smanjiti za 3,55% (uzevši u obzir pretpostavku da konvektori postižu jednaku toplinsku ugodnost kao radijatori na 0,34 °C nižoj unutarnjoj temperaturi zraka). Također, moguće je ostvariti uštedu godišnje primarne energije do 2,51%. Ove rezultate treba promatrati kao preliminarne budući da nisu svi potrebni faktori uzeti u obzir ovim proračunom.Iskazane uštede treba promatrati kao maksimalno moguće jer postoji toplinska interakcija između zraka u prostoru i zida što znači da se promjena temperature zida uvijek posljedično odnosi i na promjenu temperature zraka a time i operativne temperature. Drugim riječima, temperatura zraka smanjena je za 0,34 °C što je prouzročilo i smanjenje temperatura

stijenki. Iz toga slijedi da se operativna temperatura smanjila za neki drugi iznos. Zbog toga, iskazanu uštedu treba shvatiti kao maksimalnu moguću, a ne očekivanu.

9. ZAKLJUČAK

Kao predstavnik toplinske ugodnosti, u ovom radu promatrana je operativna temperatura. Operativna temperatura predstavlja temperaturu crnog zatvorenog prostora kod koje bi osoba izmijenila jednak iznos energije zračenjem i konvekcijom s okolišem kao i u stvarnom nejednolikom okruženju, ali uz jednaku relativnu vlažnost i brzinu strujanja zraka. Drugim riječima, operativna temperatura predstavlja onu temperaturu koju osoba osjeća u nekom toplinskom okolišu. U okviru ovog rada provedena je usporedba dvaju ogrjevna tijela (radijator i konvektor) u ispitnoj prostoriji u kontroliranim uvjetima. Kod jednakog toplinskog učina od približno 630 W mjeren je protok vode, temperatura polaza i povrata te temperatura zraka u prostoriji na 10 mjesta termoparovima tipa T.

Cilj je bio izračunati operativnu temperaturu u svih 10 točaka i na temelju toga donijeti zaključke o tome koje ogrjevno tijelo osigurava bolju toplinsku ugodnost u prostoru. Za računanje operativne temperature je uz mjerenu temperaturu zraka bilo potrebno odrediti srednju temperaturu zračenja. Srednja temperatura zračenja određena je mjerenjem temperatura zidova termokamerom i pomoću programskog paketa SOLIDWORKS čime je bitno olakšan izračun potrebnih vidnih faktora. Spomenuta metoda predstavlja novi pristup u određivanju srednje temperature zračenja (za razliku od mjerenja pomoću termometara s crnom sferom) i posljedično operativne temperature što omogućuje veću fleksibilnost u kasnijoj analizi podataka. [37]

Srednja temperatura zračenja viša je kod konvektora za 0,7 °C što se vidi i kroz bolju progrijanost zidova. To također znači i veće gubitke transmisijom prema okolišu. Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da konvektor postiže manju vertikalnu temperaturnu stratifikaciju u prostoru (razlika između temperatura zraka mjerenih na gornjim i donjim termoparovima je tek 0,64 °C dok je kod radijatora 1,52 °C) što rezultira jednolikijom progrijanošću prostora. Srednja operativna temperatura također je viša kod konvektora za 0,34 °C što čini konvektor boljim ogrjevnim tijelom što se tiče postizanja bolje toplinske ugodnosti kod istih toplinskih učina. Jedina mjesta na kojima radijator daje višu operativnu temperaturu su na samom vrhu zone boravka i to u samo 3 točke.

Na temelju dobivenih rezultata izvršena je procjena potencijalne uštede toplinske enegije za grijanje kod korištenja konvektora u odnosu na radijatore. Uzevši u obzir dobivene rezultate, donešena je pretpostavka da je grijanjem zraka u prostoriji na nižu temperaturu

konvektorom moguće postići jednaku toplinsku ugodnost (jednaku operativnu temperaturu) kao i kod korištenja radijatora. Na konkretnom primjeru obiteljske kuće za koju je prethodno napravljeno izvješće o energetskom pregledu i energetski certifikat, proveden je proračun potrebne toplinske energije za grijanje i primarne energije u programu MGIPU Energetski Certifikator za smanjenu unutarnju projektnu temperaturu $\vartheta_{int,H}$ (unutarnja projektna temepratura smanjena je za 0,34 °C što odgovara razlici u postignutim operativnim temperaturama u ispitnoj prostoriji). Rezultati pokazuju da je na taj način u analiziranom slučaju moguće postići uštedu godišnje potrebne toplinske energije za grijanje od 3,55% te uštedu primarne energije od 2,51%. Navedenu energetsku uštedu treba shvatiti kao maksimalno postizivu uštedu budući da ovim proračunom nije uzeta u obzir toplinska interakcija zraka u prostoriji s okolnim zidovima.

LITERATURA

[1] Pérez-Lombard L, Ortiz, J, Pout, C, A review on buildings energy consumption information, Energy Buildings 2008; 40: 394–398

[2] Hoyt T, Arens E, Zhang H, Extending air temperature setpoints: simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings, Building and Environment 2015; 88: 89–96.

[3] Ioannou A, Itard L, In-situ and real time measurements of thermal comfort and itsdeterminants in thirty residential dwellings in the Netherlands, Energy and Buildings 2017; 487 – 506.

[4] Correlje A, van der Linde C, Energy supply security and geopolitics: a European perspective, Energy Policy 2006; 34:532–543.

[5] Hammond G.P, Energy, environment and sustainable development: a UK perspective, Process Safety and Environmental Protection 2000; 78: 304-323.

[6] Kalmár T, Kalmár F, Comfort and energy analysis of heating up, International Review of Applied Sciences and Engineering 2010; 1: 35–43.

[7] Fanger P.O, Thermal Comfort, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970

[8] EN ISO 7730:2005 - Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. International Standard Organization, Geneva.

[9] ASHRAE, 2010. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

[10] Hesaraki A, Holmberg S, Energy performance of low temperature heating systems in five new built Swedish dwellings: A case study using simulations and on-site measurements, Building and Environment 2013; 64: 85–93.

[11] EN ISO 7726:2001 Ergonomics of the thermal environment, Instruments for measuring physical quantities

[12] Maivel M, Kurnitski J, Radiator and floor heating operative temperature and temperature variation corrections for EN 15316-2 heat emission standard, Energy and Buildings 2015; 204-214.

[13] J.E. Burt, W.H. Terjung, P.A. O'Rourke, View-factors leading to the simulation of human heat stress and radiant exchange: an algorithm, Theoretical and Applied Climatology 1982; 30: 321–331

[14] CR 1752: Ventilation for buildings—design criteria for the indoor environment, 1998.

[15] Miriel J, Serres L, Trombe A, Radiant ceiling panel heating–cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions, Applied Thermal Engineering 2002; 22: 1861–1873.

[16] F. Kalmar, T. Kalmar, Interrelation between mean radiant temperature and room geometry, Energy and Buildings 2012; 1-8.

[17] Huizenga C, Hui Z, Arens E, A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments, Building and Environment 2001; 36: 691–699.

[18] Thorsson S, Lindberg F, Eliasson I, Holmer B, 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. International Journal of Climatology 2007; 27: 1983–1993.

[19] Thorsson S , Lindberg F, Björklund J, Holmer B , Rayner D.P. Potential changes in outdoor thermal comfort conditions in Gothenburg, Sweden due to climate change: the influence of urban geometry, International Journal of Climatology 2011; 31: 324–335.

[20] Bruse M, Fleer H, Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, Environmental Modelling & Software 1998; 13: 373–384

[21] Matzarakis A, Rutz F, Mayer H, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model, International Journal of Biometeorology 2009; 54: 131–139

[22] Lindberg F, Grimmond, C.S.B, Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London, Urban Ecosystem 2011; 14: 617–634

[23] Mayer H, Holst J, Dostal P, Imbery F, Schindler D. Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe, Meteorologische Zeitschrift 2008; 17: 241-253

[24] Lindberg F, Holmer B, Thorsson S, Rayner D. Characteristics of the mean radiant temperature in high latitude cities: implications for sensitive climate planning applications, International Journal of Biometeorology 2014; 58: 613-627

[25] Kantor N, Unger J. The most problematic variable in the course of human biometeorological comfort assessment - the mean radiant temperature, Central European Journal of Geosciences 2011; 3: 90-100

[26] Chen X. Using radiant temperature sensor to measure room thermal environment, Technical Papers of 1999 Annual Meeting of SHASE; 1999

[27] Olesen BW, Fanger PO, Jemsen PB, Nielsen OJ. Comfort limits for man exposed to asymmetric thermal radiation, In: Proceedings of CIB Commission W45 (human

requirements) symposium: thermal comfort and moderate heat stress, Building Research Station, London: HMSO; 1973; 133-148

[28] Brüel & Kjær, Thermal Comfort, 2002

[29] Galović A, predavanja iz kolegija „*Prijenos topline i mase*“, ak.god. 2015./16

[30] Balen I, predavanja iz kolegija „Grijanje“, ak. god. 2014./15

[31] Labudović B, Priručnik za grijanje, Kratis d.o.o., Sveta Nedjelja, 2005
.

[32] HRN EN 442-2:2014, Radiators and convectors, Test methods and rating

[33]Halasz B, Galović A, Boras I, Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[34] Tomorad J, Izvješće o energetskom pregledu obiteljske kuće, kolegij „Energetsko certificiranje zgrada“, 2017.

[35] Soldo V, Novak S, Horvat I, Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[36] Dović D, Horvat I, Rodić A, Soldo V, Švaić S, Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama: Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015

[37] Tomorad J, Horvat I, Dović D, Study of operative temperature using the novel detail approach in determining mean radiant temperature – comparison between wall-mounted convector and conventional radiator, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017

[38] Galović A, Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[39] Galović A, Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

[40] Kraut B, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1954

PRILOZI

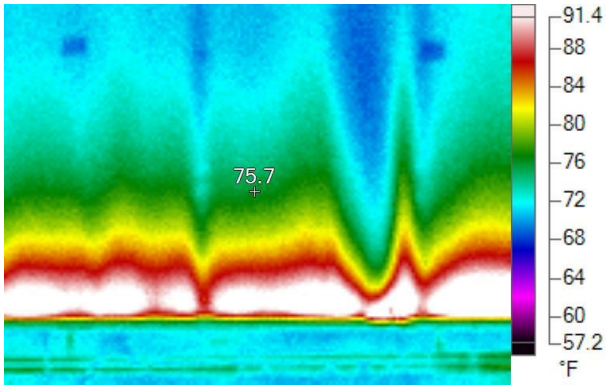
I. CD-R disc

II. Infrared Report

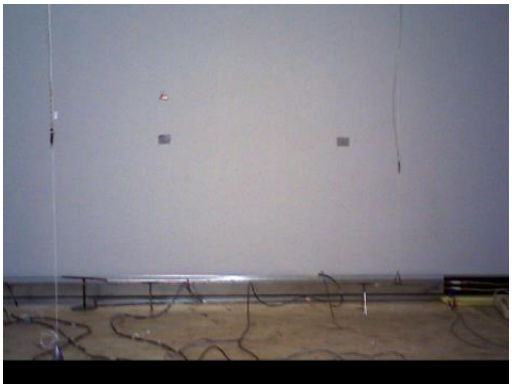
Infrared Report

Inspected By:

Inspection Date:	12/14/2016 12:09:39 PM	Area	
Location		Compass	
Description		Weather Conditions:	
Indoor Air Temperature		Outdoor Air Temperature	
Indoor Relative Humidity:		Outdoor Relative Humidity:	
Dew Point (inside):		Wind Speed	
Problem		Repair Priority:	
Emissivity:	0.93	Reflected Temperature:	22°C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	09010758



IR004804.IS2



Visible Light Image

Image Info

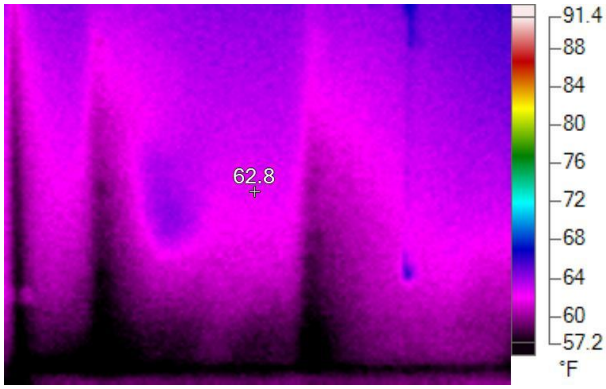
Average Temperature	24,72°C
Image Range	20.22°C to 39,28°C
Camera Model	Ti25
IR Sensor Size	160 x 120
DSP Version	1.2.7
OCA Version	1.2.7
Lens description	20mm
Lens serial number	-
Image Time	12/14/2016 12:09:39 PM
File Location	D:\ diplomski tomorad\ IR004804.IS2
Calibration Range	-22°C to 125°C

Main Image Markers

Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	24.28°C	0.93	22°C

Inspected By:

Inspection Date:	12/14/2016 12:11:46 PM	Area	
Location		Compass	
Description		Weather Conditions:	
Indoor Air Temperature		Outdoor Air Temperature	
Indoor Relative Humidity:		Outdoor Relative Humidity:	
Dew Point (inside):		Wind Speed	
Problem		Repair Priority:	
Emissivity:	0.93	Reflected Temperature:	22
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	09010758



IR004822.IS2

Visible Light Image

Image Info

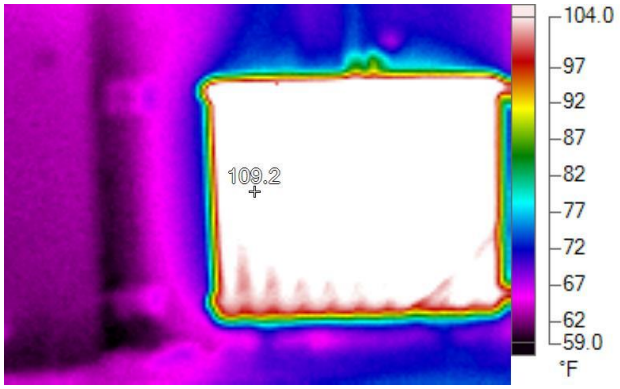
Average Temperature	16.39°C
Image Range	11.61°C to 19.44°C
Camera Model	Ti25
IR Sensor Size	160 x 120
DSP Version	1.2.7
OCA Version	1.2.7
Lens description	20mm
Lens serial number	-
Image Time	12/14/2016 12:11:46 PM
File Location	D:\ diplomski tomorad\ IR004822.IS2
Calibration Range	-22°C to 125°C

Main Image Markers

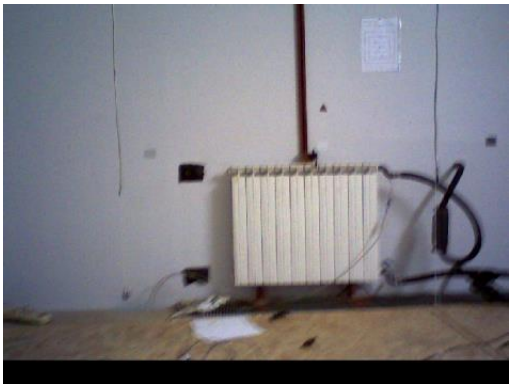
Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	17.11°C	0.93	22°C

Inspected By:

Inspection Date:	12/15/2016 11:55:35 AM	Area	
Location		Compass	
Description		Weather Conditions:	
Indoor Air Temperature		Outdoor Air Temperature	
Indoor Relative Humidity:		Outdoor Relative Humidity:	
Dew Point (inside):		Wind Speed	
Problem		Repair Priority:	
Emissivity:	0.93	Reflected Temperature:	20°C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	09010758



IR004858.IS2



Visible Light Image

Image Info

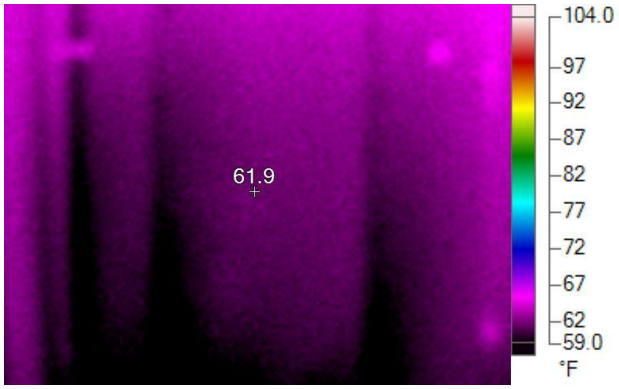
Average Temperature	27.72°C
Image Range	14.83°C to 49.1°C
Camera Model	Ti25
IR Sensor Size	160 x 120
DSP Version	1.2.7
OCA Version	1.2.7
Lens description	20mm
Lens serial number	-
Image Time	12/15/2016 11:55:35 AM
File Location	D:\ diplomski tomorad\ IR004858.IS2
Calibration Range	-22°C to 125°C

Main Image Markers

Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	42.8°C	0.93	20°C

Inspected By:

Inspection Date:	12/15/2016 11:58:57 AM	Area	
Location		Compass	
Description		Weather Conditions:	
Indoor Air Temperature		Outdoor Air Temperature	
Indoor Relative Humidity:		Outdoor Relative Humidity:	
Dew Point (inside):		Wind Speed	
Problem		Repair Priority:	
Emissivity:	0.93	Reflected Temperature:	20 °C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	09010758



IR004885.IS2

Visible Light Image

Image Info

Average Temperature	16.39°C
Image Range	13.5°C to 19°C
Camera Model	Ti25
IR Sensor Size	160 x 120
DSP Version	1.2.7
OCA Version	1.2.7
Lens description	20mm
Lens serial number	-
Image Time	12/15/2016 11:58:57 AM
File Location	D:\ diplomski tomorad\ IR004885.IS2
Calibration Range	-22°C to 125°C

Main Image Markers

Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	16.61°C	0.93	20°C