

Eksperimentalna analiza slobodne konvekcije iznad čovjeka

Špiljar, Dora Helena

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:421066>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dora Helena Špiljar

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Dora Helena Špiljar

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Tei Žakuli na prihvaćanju mentorstva, ukazanom povjerenju, te pomoći oko izrade završnog rada. Zahvaljujem se asistentu Borutu Omerzu na velikoj pomoći i savjetima. Zahvaljujem se Laboratoriju za procesna mjerenja i asistentu Ivanu Matasu za pomoć pri mjerenju.

Posebne zahvale obitelji, dečku i svim prijateljima na pruženoj podršci tijekom preddiplomskog studija.

Dora Helena Špiljar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dora Helena Špiljar** JMBAG: 0035216327

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalna analiza slobodne konvekcije iznad čovjeka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental analysis of human thermal plume**

Opis zadatka:

Usljed zagrijavanja zraka oko čovjeka kao posljedice metabolizma dolazi do uzgonskog gibanja zraka, koje utječe na karakteristike strujanja i kvalitetu zraka u zatvorenom prostoru. Računalna dinamika fluida (u nastavku CFD) je zbog svoje učinkovitosti najčešće korištena metoda za istraživanje tog važnog procesa, no kod takve analize često je upitna točnost rezultata. Stoga se, uz CFD analize, najčešće provode i eksperimentalna mjerenja za potvrdu točnosti računalnih modela.

U radu je potrebno planirati i provesti eksperiment s ciljem analize strujanja zraka iznad čovjeka, koje nastaje uslijed djelovanja uzgonskih sila. Eksperiment je potrebno provesti u jednoj učionici na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Uz pomoć dostupne mjerne opreme, potrebno je provesti mjerenja temperature u prostoru te usporediti rezultate s CFD simulacijama prethodno provedenim u sklopu projekta „RCK Rudera Boškovića“.

Rad treba sadržavati:

- pregled osnova mjerenja temperature pomoću termoparova,
- protokol eksperimenta s detaljnim opisom eksperimentalnog postava,
- opis provedenih mjerenja, načina prikupljanja i obrade mjernih podataka te procjenu mjerne nesigurnosti,
- usporedbu rezultata mjerenja s rezultatima CFD simulacija.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadala:

Izv. prof. dr. sc. Tea Žakula

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. EKSPERIMENTALNO MJERENJE TEMPERATURNOG POLJA U OKOLINI MODEL A	4
2.1. Opis eksperimenta.....	4
2.2. Model čovjeka.....	5
2.2.1. Mjerenje temperature površine modela termografskom kamerom	5
2.3. Mjerenje temperature u prostoriji termoparovima	6
2.3.1. Osnove mjerenja termoparovima	6
2.3.2. Lokacije termoparova u prostoriji	7
2.4. Mjerenje brzine	11
3. ANALIZA PODATAKA MJERENJA	13
3.1. Mjerenja temperature	13
3.1.1. Mjerenje temperature iznad Modela 1	13
3.1.2. Mjerenja temperature iznad Modela 2.....	14
3.1.3. Mjerenja temperature ploha i iznad mjernih uređaja.....	15
3.2. Mjerenje brzine	18
3.3. Mjerna nesigurnost.....	19
3.3.1. Procjena mjerne nesigurnosti dobivenih rezultata	20
3.3.2. Mjerna nesigurnost mjerne opreme	21
3.3.3. Vremenska mjerna nesigurnost	21
4. USPOREDBA REZULTATA EKSPERIMENTA S REZULTATIMA CFD ANALIZE 24	
4.1. Rubni uvjeti u CFD simulaciji	24
4.2. Rezultati CFD simulacije.....	25
4.3. Usporedba mjerenih i simuliranih temperatura	26
4.4. Usporedba brzina dobivenih eksperimentalnim mjerenjem i CFD simulacijom....	28
5. ZAKLJUČAK	30
LITERATURA	31

POPIS SLIKA

Slika 1.	Uzgonsko gibanje zraka iznad čovjeka kao posljedica temperaturnog gradijenta između površine tijela i okolnog zraka [1].....	1
Slika 2.	Raspored modela u prostoru.....	4
Slika 3.	Model čovjeka sa žaruljama kao izvorom topline	5
Slika 4.	Raspodjela temperature po modelu snimljena termografskom kamerom.....	6
Slika 5.	Princip rada termoparova - Seebeckov efekt [3]	7
Slika 6.	Lokacije termoparova iznad modela čovjeka	8
Slika 7.	Lokacije termoparova za mjerenje temperature ploha.....	9
Slika 8.	Lokacija termoparova za mjerenje temperature zraka iznad opreme	10
Slika 9.	Model prostorije s prikazom lokacija svih termoparova	10
Slika 10.	Lokacija anemometra iznad Modela 2	12
Slika 11.	Očitavanja temperature iznad Modela 1	14
Slika 12.	Očitavanja temperature iznad Modela 2	15
Slika 13.	Očitavanja temperature ploha i iznad mjernih uređaja.....	16
Slika 14.	Prosječne izmjerene temperature svih termoparova u eksperimentu	17
Slika 15.	Usporedba prosječnih temperatura iznad modela.....	17
Slika 16.	Očitavanja brzine anemometrom iznad Modela 2	18
Slika 17.	Mjerna nesigurnost termoparova postavljenih iznad modela.....	23
Slika 18.	Rubni uvjeti korišteni u CFD simulaciji	24
Slika 19.	Ravnina korištena za usporedbu CFD simulacije i eksperimentalnog mjerenja	25
Slika 20.	Rezultati simulacije - temperaturni profil u promatranoj ravnini.....	26
Slika 21.	Usporedba mjerenja i CFD simulacije - stratifikacija temperature iznad modela	28
Slika 22.	Rezultati simulacije - polje brzine iznad Modela 2	29
Slika 23.	Usporedba mjerenja i CFD simulacije - profil brzine iznad Modela 2.....	29

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti ukupne (A), ukupne prosječne (B), osjetne (C) i latentne topline (D) koju odaje čovjek s obzirom na razinu aktivnosti [2]	3
Tablica 2. Lokacija termoparova u prostoriji	11
Tablica 3. Vremenska mjerna nesigurnost termoparova	22
Tablica 4. Proširena standardna mjerna nesigurnost termoparova	23
Tablica 5. Usporedba temperatura iznad Modela 1 dobivenih mjerenjima i CFD simulacijom	27
Tablica 6. Usporedba temperatura iznad Modela 2 dobivenih mjerenjima i CFD simulacijom	27

SAŽETAK

Čovjek svojim metabolizmom generira toplinski tok uslijed kojeg nastaje uzgonsko gibanje zraka (eng. *thermal plume*), a koje utječe na raspodjelu temperature i strujanje zraka u zatvorenom prostoru. Ovaj se efekt najčešće analizira računalnim metodama, dok se točnost simulacijskih modela može ocijeniti usporedbom s eksperimentalnim mjerenjima. Svrha ovog rada je provesti eksperimentalno mjerenje u prostoriji na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu koristeći pojednostavljene modele čovjeka, te usporediti dobivene rezultate s rezultatima CFD analize provedene u projektu „Regionalni centar kompetentnosti Ruđera Boškovića“. Pri tome je temperaturna stratifikacija iznad modela čovjeka ključan parametar za usporedbu rezultata mjerenja s računalnim simulacijama. Najviša temperatura izmjerena je neposredno iznad modela (oko 27°C), a uočen je i ustaljen temperaturni gradijent. Također je utvrđeno da se najveća temperaturna razlika između rezultata mjerenja i simulacije pojavljuje uz sami model i iznosi 2°C, dok je na ostalim lokacijama mjerenja razlika temperatura zanemariva. U zaključku, usporedbom rezultata mjerenja s rezultatima CFD simulacije zaključeno je da korišteni pojednostavljeni model čovjeka daje rezultate prihvatljive točnosti te da se može koristiti za daljnja eksperimentalna mjerenja.

Ključne riječi: strujanje zraka u prostoru, model čovjeka, eksperimentalno mjerenje, temperaturni profil, mjerna nesigurnost

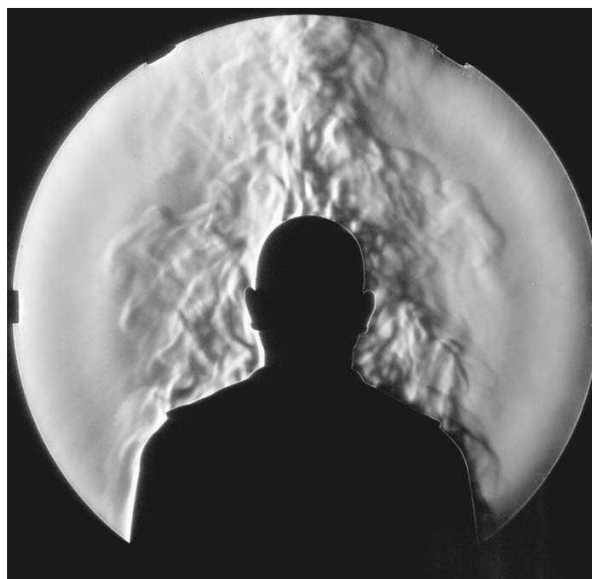
SUMMARY

Human metabolism generates a heat flow that creates a thermal plume, which then affects the temperature distribution and air flow in a closed space. A variety of computer programs are used to analyze the effects, while simulation models can be validated using experimental measurements. The goal of this work is to conduct an experiment in a room at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb using simplified human models, and to compare the obtained results with the results of the CFD analysis carried out in the project "Regional Competence Center Ruđer Bošković". The key parameter for the comparison of the experimental results with the simulation results was the temperature stratification above the human model. The highest temperature in the experiment was measured directly above the model (around 27°C). Also, there was a notable temperature gradient above the model. The biggest temperature difference between the measured and simulated results was closest to the model and is equal to 2°C. On other locations the temperature difference was negligible. By comparing the results of the experiment and CFD simulation, it was concluded that using simplified human models in the experiment gives results of acceptable accuracy and that the models can be used for further experimental measurements.

Key words: airflow in a closed space, human model, experimental measurement, temperature profile, measurement uncertainty

1. UVOD

Čovjek konstantno izmjenjuje toplinu s okolišem uslijed temperaturnog gradijenta između tijela i okolnog zraka. Najizraženiji mehanizmi izmjene topline su zračenje između čovjeka i ploha koje ga okružuju, te konvekcija, dok se latentna toplina izmjenjuje ishlapljivanjem s površine kože te respiracijom. Pri izmjeni topline konvekcijom temperaturni gradijent počinje se stvarati već pri podu gdje je strujanje u graničnom sloju oko čovjeka laminarno, odnosno bez miješanja. Strujanje zraka povećanjem visine popraćeno je, zbog efekta uzgona u graničnom sloju oko čovjeka, povećanjem brzine strujanja okolnog zraka. Uslijed toga dolazi do pojave vrtloga u razini ramena te se stvaraju područja recirkulacije iznad glave čovjeka, pri čemu strujanje načelno postaje turbulentno [1]. Iznad čovjeka stvara se uzgonsko gibanje zraka uslijed toplinskog toka generiranog metabolizmom, a koji je poznatiji po engleskom izrazu *thermal plume* (Slika 1.).



Slika 1. Uzgonsko gibanje zraka iznad čovjeka kao posljedica temperaturnog gradijenta između površine tijela i okolnog zraka [1]

Utjecaj uzgonskog strujanja iznad čovjeka bitan je faktor za potrebe detaljnijih analiza strujanja zraka u prostoru. Pri projektiranju i odabiru sustava grijanja, hlađenja i ventilacije ovaj se efekt ne analizira, iako ima utjecaj na raspodjelu temperature i brzinu strujanja u prostoru. Za opisivanje i izračunavanje tog utjecaja potrebno je poznavati iznose izmijenjenog toplinskog toka između ljudskog tijela i okolnog zraka. U proračunima

vrijednost osjetne topline koju odaje čovjek ovisi o spolu, dobi i temperaturi unutar prostora, dok vrijednost ukupne osjetne topline u prostoriji ovisi o broju ljudi koji borave u njoj. Veliki utjecaj na toplinu koju odaje čovjek ima i njegova razina aktivnosti s obzirom da se povećanjem razine aktivnosti povećava udio latentne topline čovjeka. Okvirne vrijednosti koje se uzimaju u proračunu za različite razine aktivnosti pri temperaturi okoline od 24°C prikazane su u Tablici 1. Stupac A odnosi se na odavanje topline odraslog muškarca, dok su u stupcu B prikazane prosječne vrijednosti odavanja topline na osnovi procijenjenog udjela odraslih osoba i djece. U stupcu C i stupcu D prikazane su vrijednosti osjetne, odnosno latentne topline. Također je bitan i faktor koji uzima u obzir vrijeme boravka ljudi u prostoriji [2]. S ciljem bržeg i jednostavnijeg proračuna često se koristi prosječna vrijednost za toplinu koju odaje čovjek, a koja iznosi 80 – 120 W.

Za dobivanje cjelovite slike strujanja u praksi se često koriste podaci dobiveni računalnim simulacijama korištenjem računalnih softvera za računalnu dinamiku fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics*, dalje u tekstu CFD). Međutim, rezultati dobiveni CFD analizom nisu u potpunosti pouzdani iz nekoliko razloga. Prvo, takve se simulacije temelje na pojednostavljenjima i računalnim modelima koji nikada nisu u potpunosti točni. Nadalje, iskustvo osobe koja provodi analizu CFD simulacijama također utječe na točnost rezultata. Iz tog je razloga važno provoditi eksperimentalna mjerenja kojima se takve analize validiraju, odnosno provjerava se njihova točnost.

Glavni je cilj ovog rada eksperimentalno mjerenje raspodjele temperature koja nastaje uslijed toplinskog toka generiranog čovjekovim metabolizmom te usporedba rezultata dobivenih eksperimentalnim mjerenjima s rezultatima CFD simulacije. Kao pojednostavljen model čovjeka korištene su kartonske kutije sa žaruljama. Usporedba s CFD simulacijom je provedena na temelju mjerenja temperature iznad čovjeka termoparovima, te brzine strujanja pomoću anemometra sa žarnom niti. Pri tome su korišteni rezultati CFD simulacije bili prethodno validirani dostupnim mjerenjima iz literature u sklopu drugog rada. Eksperiment je proveden u uredskoj prostoriji na 3. katu istočne zgrade Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Tablica 1. Vrijednosti ukupne (A), ukupne prosječne (B), osjetne (C) i latentne topline (D) koju odaje čovjek s obzirom na razinu aktivnosti [2]

Opis aktivnosti	Primjer	A [W]	B [W]	C [W]	D [W]
Sjedenje	Kazalište	115	105	70	35
Sjedenje, vrlo laki rad	Ured	130	115	70	45
Laki rad	Prodavaona	160	130	75	55
Rad uz sjedenje - stajanje	Banka	160	145	75	70
Sjedenje	Restoran	185	160	80	80
Laki rad uz sjedenje	Tvornica	235	220	80	140
Ples	Plesna sala	265	250	90	160
Laki rad uz stroj	Tvornica	295	295	110	185
Kuglanje	Kuglana	440	425	170	255
Teški rad	Tvornica	440	425	170	255
Vrlo teški rad	Tvornica	470	470	185	285
Sport	Vježbaona	585	525	210	315

A - ukupno odavanje topline kod odrasle osobe, muškarca
B - ukupno prosječno odavanje topline na osnovu procijenjenog udjela odraslih osoba i djece
C - odavanje osjetne topline
D - odavanje latentne topline

2. EKSPERIMENTALNO MJERENJE TEMPERATURNOG POLJA U OKOLINI MODELA

2.1. Opis eksperimenta

Eksperiment je proveden u prostoriji 325 na 3. katu istočne zgrade Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Eksperiment je započeo 4. svibnja 2022. godine u 15:45 sati i trajao je do 5. svibnja 2022. godine do 10:45 h. Dimenzije prostorije u kojoj je provedeno mjerenje su 10,8 x 5,4 x 3,5 m. Na sredini prostorije nalazi se stol koji je poslužio za postavljanje potrebne opreme za mjerenje termoparovima. Ostali je namještaj zadržan u prostoriji za vrijeme provedbe mjerenja s obzirom da je procijenjeno da ne utječe značajno na strujanje zraka u prostoriji za ovaj tip eksperimenta. Vrata i prozori bili su zatvoreni za vrijeme trajanja eksperimenta kako bi se eliminiralo strujanje zraka koje nije direktna posljedica uzgona iznad modela. Dva su modela čovjeka postavljena dijagonalno te su označeni oznakama Model 1 i Model 2 kao što je prikazano na Slici 2. S obzirom da je cilj eksperimenta analiza uzgonskog strujanja zraka nastalog uslijed slobodne konvekcije modela čovjeka, bilo je potrebno eliminirati sve ostale toplinske dobitke. Iz tog je razloga eksperimentalno mjerenje provedeno tijekom noći kako bi se eliminirao utjecaj sunčevog zračenja. Također, odabrana lokacija modela u prostoriji približno je ista rasporedu modela u CFD simulaciji.



Slika 2. Raspored modela u prostoru

2.2. Model čovjeka

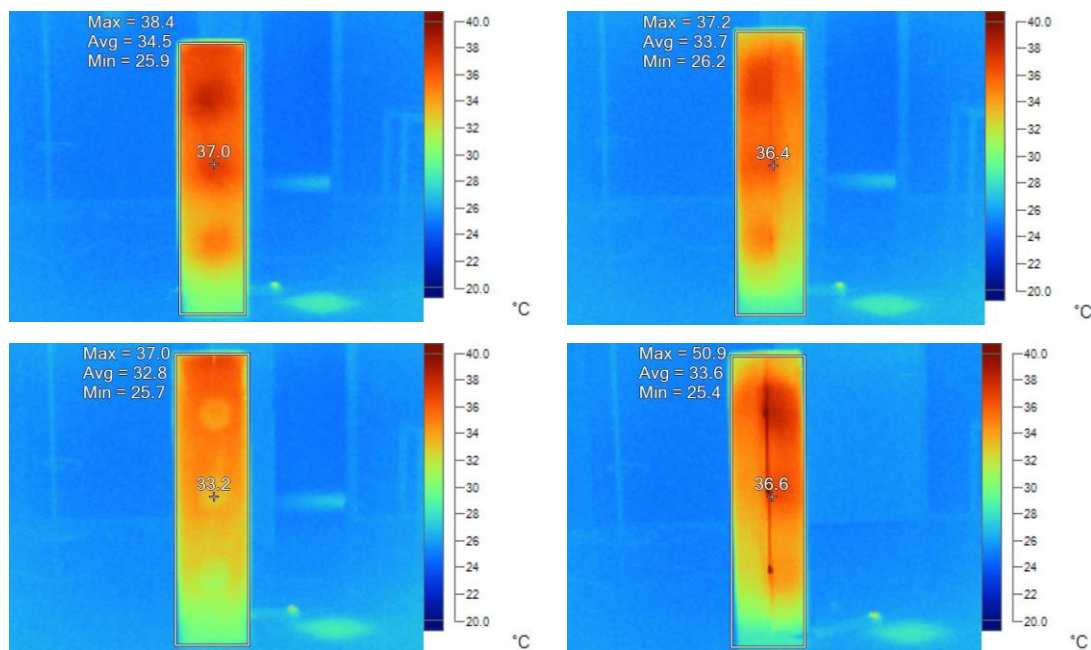
Model čovjeka izrađen je od kartonske kutije dimenzija 1,3 x 0,3 x 0,3 m. U svaku kartonsku kutiju postavljene su po tri žarulje sa žarnom niti, ukupne snage 40 W po žarulji, odnosno ukupno 120 W za cijeli model. Model je prikazan na Slici 3. gdje je jedna strana kutije otvorena kako bi se prikazao unutarnji raspored žarulja. Žarulje su korištene kao izvor topline kako bi se osigurao efekt zagrijavanja okolnog zraka te uzgonsko gibanje koje nastaje kao posljedica tog zagrijavanja.



Slika 3. Model čovjeka sa žaruljama kao izvorom topline

2.2.1. Mjerenje temperature površine modela termografskom kamerom

Radi osiguravanja ravnomjerne temperature po cijelom modelu, provedena je provjera raspodjele temperature. Za provjeru se koristila termografska kamera s obzirom da je njom moguće beskontaktno mjeriti i odrediti raspodjelu temperature po površini objekta. Termografska kamera registrira infracrveno zračenje koje emitira tijelo, te ga pretvara u temperaturnu sliku promatranog objekta. Na Slici 4. je vidljivo da je temperatura po modelu jednolika. Također je utvrđeno da su se na strani modela prema kojoj su bile usmjerene žarulje formirala 3 područja zanemarivo veće temperature.

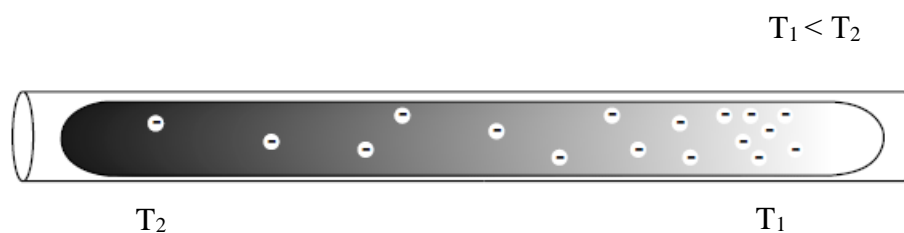


Slika 4. Raspodjela temperature po modelu snimljena termografskom kamerom

2.3. Mjerenje temperature u prostoriji termoparovima

2.3.1. Osnove mjerenja termoparovima

Termoparovi rade na principu spajanja dvije žice različitih metala na oba kraja pri čemu se pojava električne struje očituje ukoliko postoji razlika temperatura na njihovim krajevima. Pojava pri kojoj se, kao posljedica temperaturnog gradijenta, stvara termoelektromotorna sila naziva se Seebeckov efekt (Slika 5.). Rad termopara tipa E temelji se na Seebeckovom efektu. Osim Seebeckovog efekta, termoparovi rade i na principu Peltierovog i Thomasovog efekta. Peltierov efekt se odnosi na prijenos elektrona kroz žice termoparova. Na strani termopara gdje je veća temperatura elektroni se kreću iz metala gdje imaju veću potencijalnu energiju prema metalu gdje imaju nižu potencijalnu energiju. Prolaskom kroz spoj dvije žice dio energije se rasipa, što se makroskopski očituje kao toplina. Na strani termopara niže temperature elektroni preuzimaju energiju prolazeći kroz spoj te se time hlade. Thomasov se efekt pojavljuje kada je prisutna razlika temperatura na krajevima žice kroz koju protječe električna struja. Smjer prijenosa topline ovisi o smjeru gibanja elektrona. Ako se elektroni gibaju prema toplijem kraju žice, toplina se prenosi na okoliš. U suprotnom, prijenos topline je sa žice prema okolišu.

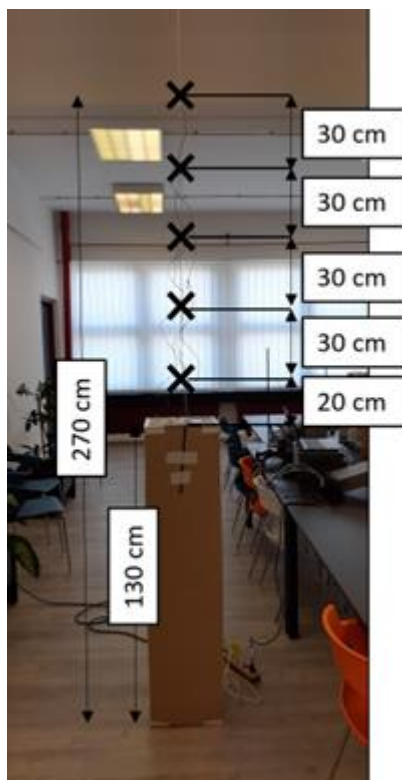


Slika 5. Princip rada termoparova - Seebeckov efekt [3]

Standardni se termoparovi za mjerenje temperature u industriji koriste zbog svoje jednostavnosti i široke primjenjivosti, a odabiru se s obzirom na materijal žica od kojeg su sastavljeni. U eksperimentu su se za mjerenje temperature koristili termoparovi tipa E kod kojeg je jedna žica nikal krom legura, a druga bakar nikal legura. Termopar tipa E ima izvrsna mehanička svojstva i ima najviši napon po stupnju promjene temperature, te je pogodan za oksidirajući, inertni okoliš. Područje primjene tih termoparova u industriji je široko te su pogodni za mjerenje nižih temperatura s obzirom da im je maksimalna temperatura 870°C [4].

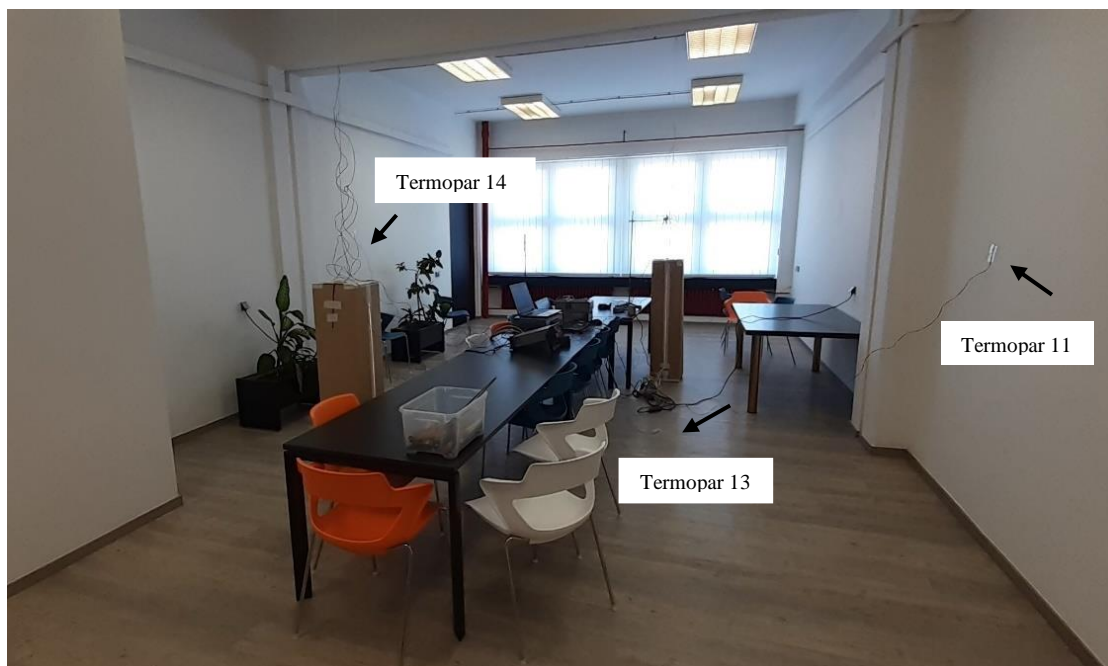
2.3.2. Lokacije termoparova u prostoriji

Za mjerenje temperature korišteno je ukupno 14 termoparova tipa E. Svi podaci termoparova prikupljeni su pomoću Agilent akvizicijskog sustava, a obrađeni su pomoću programa *LabView*. Odabrano je očitavanje rezultata svakih 30 sekundi. Iznad svakog modela postavljeno je po 5 termoparova pri čemu su termoparovi označeni od 1 do 5 postavljeni iznad Modela 1, a termoparovi označeni od 6 do 10 iznad Modela 2. Termoparovi koji su postavljeni najbliže modelu nalazili su se na visini od 1,5 m, te je svaki slijedeći postavljen na 0,3 m većoj visini od prethodnoga. Za postavljanje mjerila temperature korišteno je užo omotano oko svjetla na stropu, te zalijepljeno na model, a kako bi se dobila raspodjela temperature okomito iznad modela. Slika 6. prikazuje visine, mjereno od poda, na kojima su bili postavljeni termoparovi.



Slika 6. Lokacije termoparova iznad modela čovjeka

Osim iznad modela, termoparovi su postavljeni na zidove lijevo i desno (termoparovi 11 i 14), te na podu (termopar 13), otprilike na sredini svakog zida i na sredini poda. Lokacije na kojima su bili postavljeni termoparovi za mjerenje temperature ploha prikazuje Slika 7. Temperature ploha su mjerene zbog njihovog utjecaja na temperaturu zraka u prostoriji, ali i na temperaturu samih modela. Također, te su temperature bile važne za postavljanje rubnih uvjeta u CFD simulaciji.

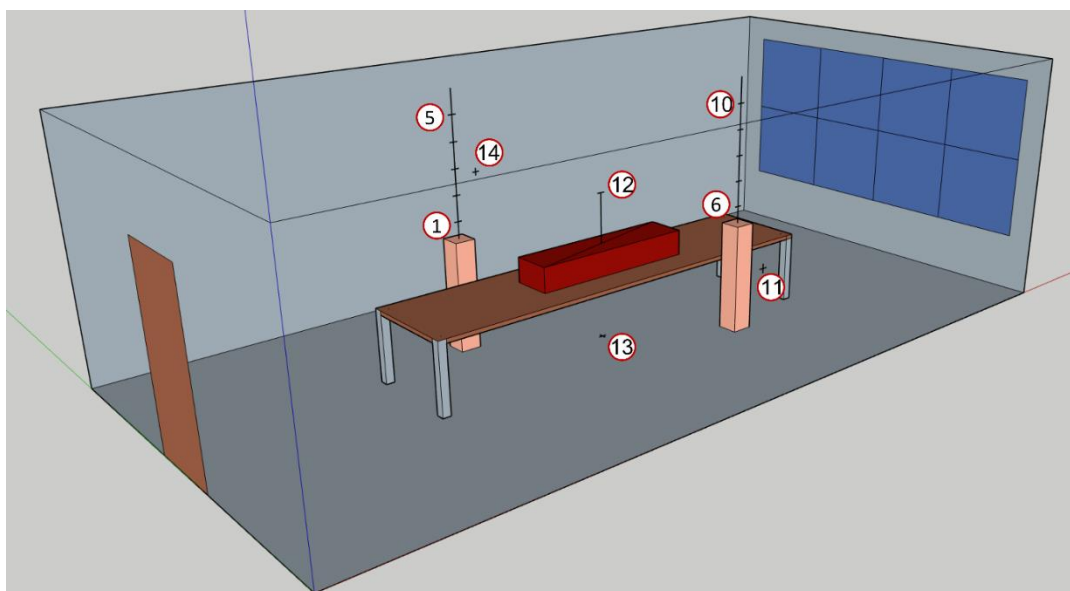


Slika 7. Lokacije termoparova za mjerenje temperature ploha

S obzirom da su mjerni uređaji te računala koji su bili postavljeni na stol u sredini prostorije odavali toplinu koja nije predmet ove analize, bilo je nužno provjeriti i temperaturu zraka u okolini tih uređaja. Iz tog je razloga iznad mjernih uređaja postavljen jedan termopar pod brojem 12 kako bi se utvrdila temperatura iznad mjernih uređaja, odnosno zaključilo koliko mjerni uređaji utječu na temperaturu u prostoru i na strujanje zraka u prostoru. Termopar je postavljen iznad uređaja, na visini od otprilike 1,7 m, kako je prikazano na Slici 8. Slika 9. prikazuje termoparove raspoređene po prostoriji s pripadajućim oznakama svakog termopara uz napomenu da su naznačeni samo najniži i najviši termoparovi iznad oba modela. Tablica 2. prikazuje oznaku, visinu i lokaciju, svakog termopara u prostoru.



Slika 8. Lokacija termoparova za mjerenje temperature zraka iznad opreme



Slika 9. Model prostorije s prikazom lokacija svih termoparova

Tablica 2. Lokacija termoparova u prostoriji

Redni broj termopara	Lokacija	Visina [m]
1	Model 1	1,5
2	Model 1	1,8
3	Model 1	2,1
4	Model 1	2,4
5	Model 1	2,7
6	Model 2	1,5
7	Model 2	1,8
8	Model 2	2,1
9	Model 2	2,4
10	Model 2	2,7
11	Desni zid	Nije specificirano
12	Iznad uređaja	Nije specificirano.; cca. 1,7 m
13	Pod	Nije specificirano
14	Lijevi zid	Nije specificirano

2.4. Mjerenje brzine

Uz mjerenje temperature u prostoriji, iznad Modela 2 je postavljen anemometar sa žarnom niti za mjerenje brzine strujanja zraka, a koju uzrokuje promjena temperature uslijed slobodne konvekcije iznad čovjeka. Korišten je TSI anemometar sa žarnom niti čiji je mogući raspon mjerenja 0 – 50 m/s, a izlaz 0 – 5 V. Slika 10. prikazuje anemometar postavljen iznad modela.



Slika 10. Lokacija anemometra iznad Modela 2

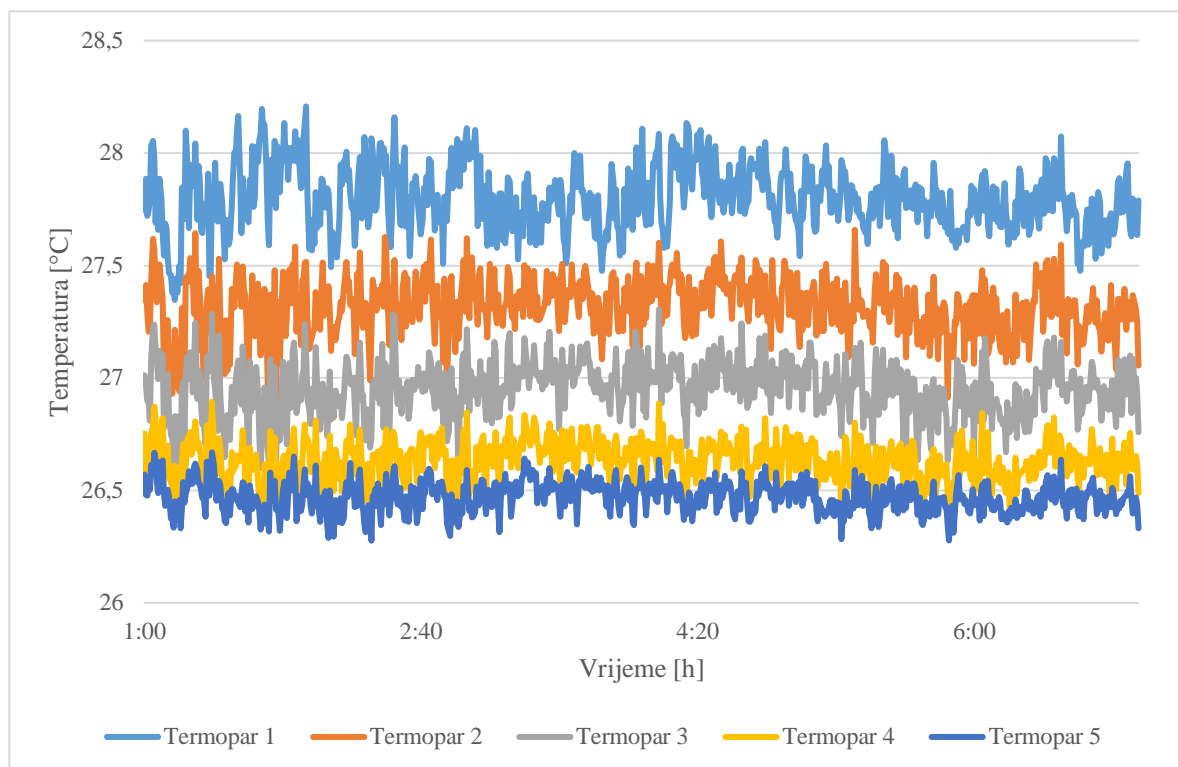
3. ANALIZA PODATAKA MJERENJA

Iako je eksperiment trajao približno 20 sati, analizirana su samo mjerenja prikupljena 5. svibnja 2022. godine od 1:00 h do 7:00 h. Taj je period odabran zbog približno stacionarnog stanja u prostoriji. Naime, u tom periodu vanjska temperatura nije značajno oscilirala te se strujanje zraka uslijed uzgona stabiliziralo nakon početnih poremećaja (nastalih uslijed kretanja u prostoriji i postavljanja mjerne opreme). Provjerom sa Državnim hidrometeorolškim zavodom utvrđeno je da je vanjska temperatura za vrijeme provođenja eksperimenta bila približno konstanta te je iznosila 20°C. Ovaj je podatak važan zbog osiguravanja stacionarnih uvjeta, te za definiranje vanjskog rubnog uvjeta korištenog u CFD simulaciji. Očitane temperature su uprosječene za promatrani period, te je prosječna temperatura uzeta kao izmjerena temperatura.

3.1. Mjerenja temperature

3.1.1. Mjerenje temperature iznad Modela 1

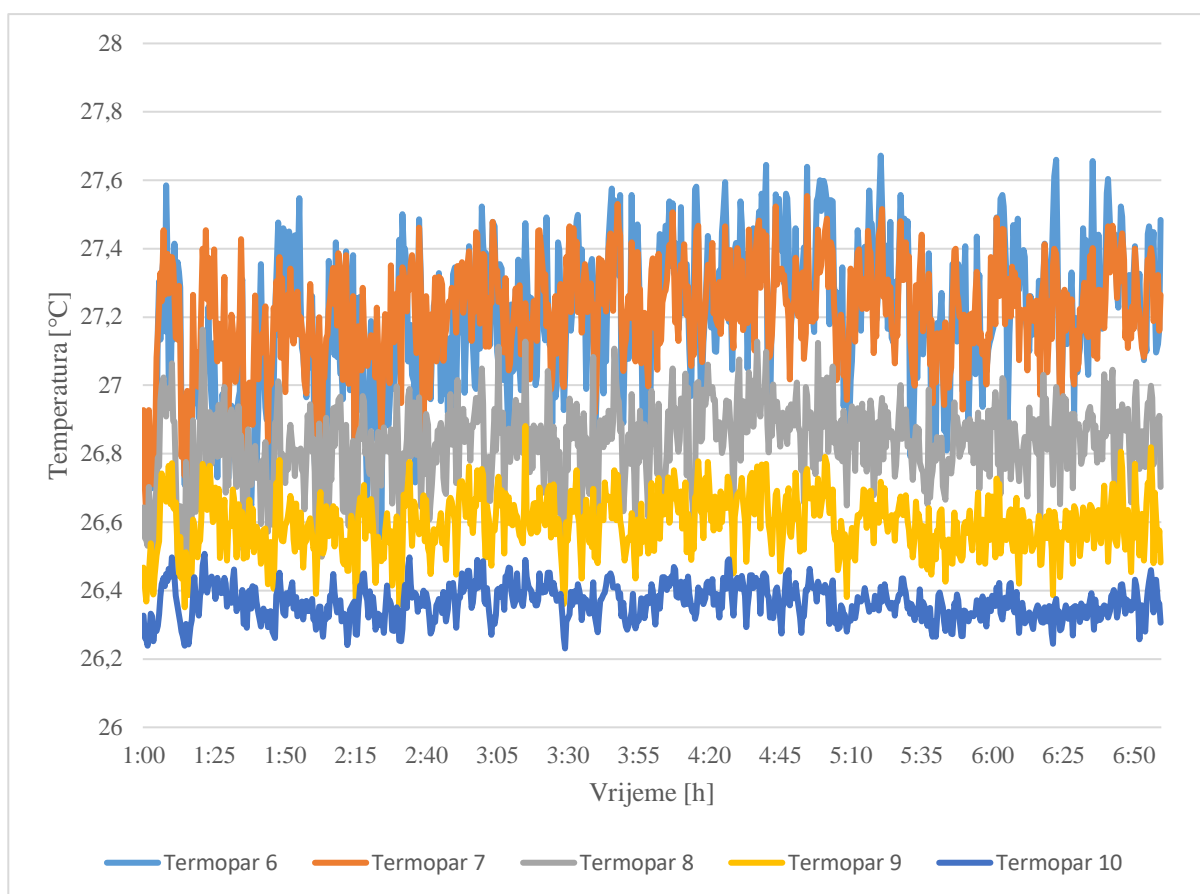
Prema ranije spomenutom opisu, Model 1 bio je udaljen od vanjskog zida, odnosno bliže unutarnjem zidu veće temperature. Očitavanja temperature prikazana su na Slici 11. te je vidljivo kako su temperature za vrijeme mjerenja bile približno konstantne za svaki od termoparova. Promatrajući period od 1:00 h do 7:00 h vidljivo je da je temperatura očitana na termoparu 1 (neposredno iznad modela) očekivano najviša i iznosi 27,8°C. Svaki idući termopar postavljen je 30 cm iznad prethodnog te se jasno uočava postignuta temperaturna stratifikacija. Povećanjem visine prosječna izmjerena temperatura se smanjuje te iznosi redom 27,3°C, 27,0°C, 26,6°C i 26,5°C. Sve su vrijednosti temperatura zaokružene na jednu decimalu.



Slika 11. Očitavanja temperature iznad Modela 1

3.1.2. Mjerenja temperature iznad Modela 2

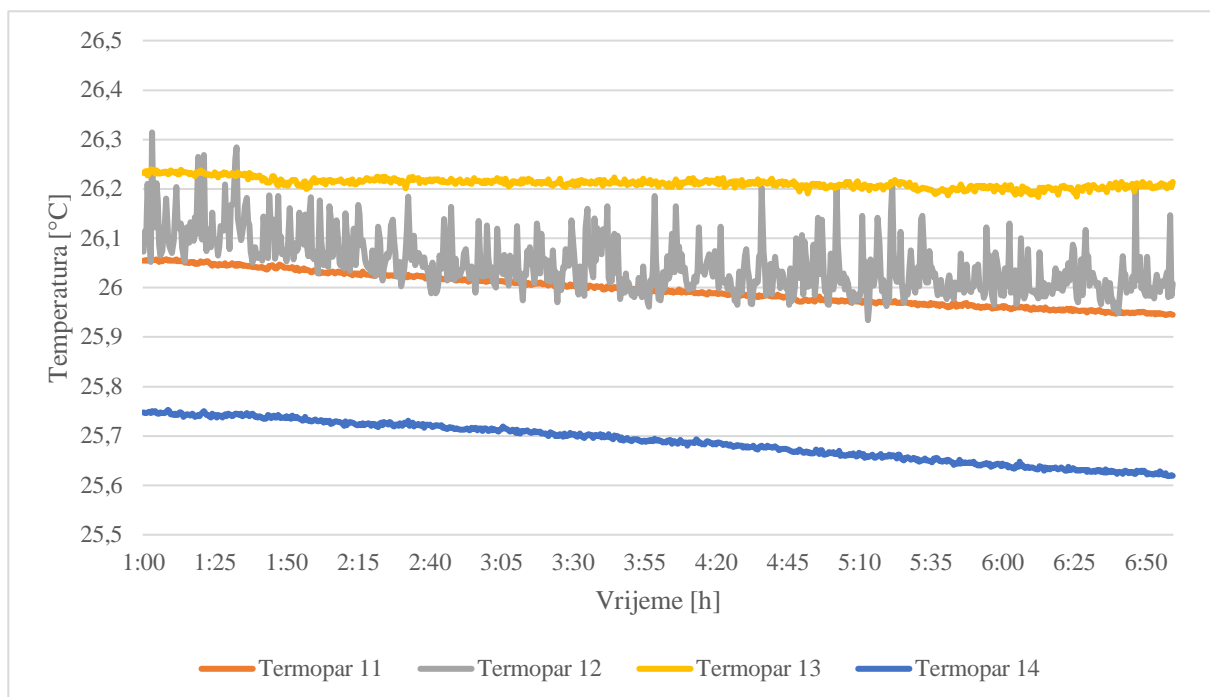
Analiza je provedena na isti način za Model 2 kao i za Model 1, odnosno za razdoblje od 1:00 h do 7:00 h. Slika 12. prikazuje očitavanja temperature iznad Modela 2. Razlika između dva modela je očita u prosječnim temperaturama. Za Model 2 vrijednosti temperature zaokružene na jednu decimalu iznose redom 27,2°C, 27,2°C, 26,8°C, 26,6°C i 26,4°C. Razlog nešto nižih temperatura u odnosu na Model 1 jest činjenica da se Model 2 nalazi bliže vanjskom zidu, a koji ima nižu temperaturu od ostalih ploha.



Slika 12. Očitavanje temperature iznad Modela 2

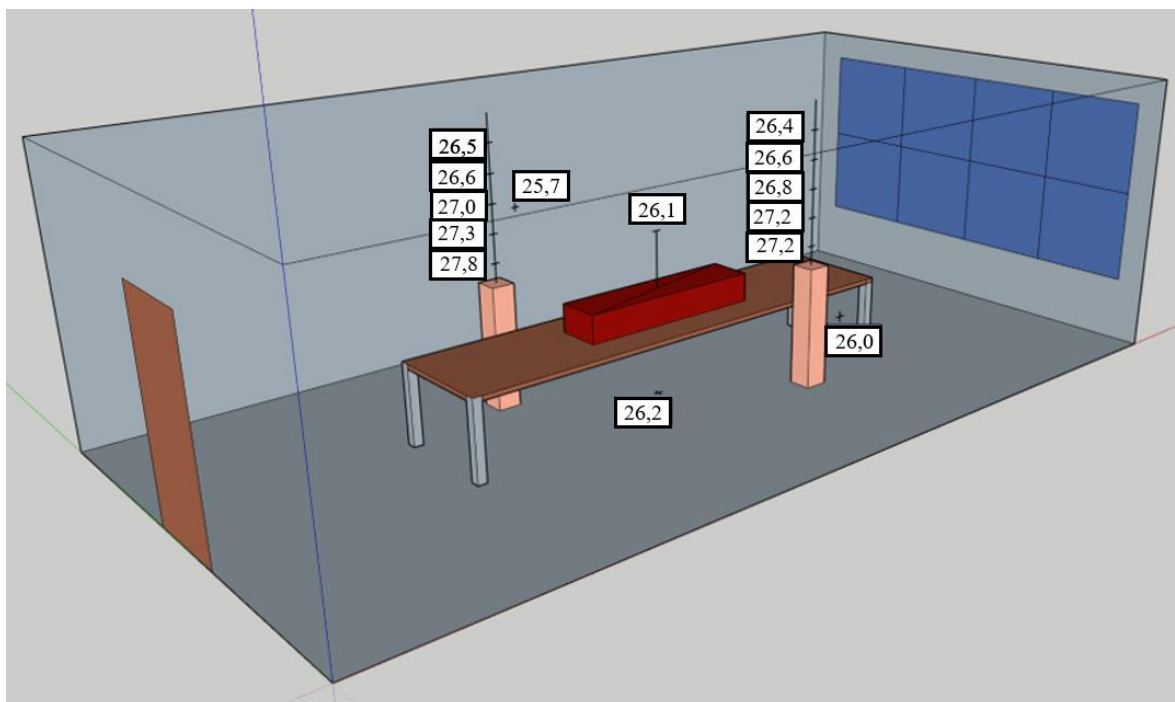
3.1.3. Mjerenja temperature ploha i iznad mjernih uređaja

Slika 13. prikazuje očitavanja temperature na ostalim lokacijama, odnosno na lijevom i desnom zidu, na podu, te iznad mjernih uređaja. Iz slike je vidljivo da su temperature zidova relativno konstantne te iznose 26°C. Iako temperatura iznad uređaja varira, njena uprosječna vrijednost približna je onoj izmjerenoj na desnom zidu, odnosno iznosi 26,1°C. Iz prikazanih podataka zaključeno je da mjerna oprema nije značajnije zagrijavala vanjski zrak. Nadalje, temperatura iznad modela značajno je veća od temperature iznad mjernih uređaja koja je približno jednaka temperaturi ploha.

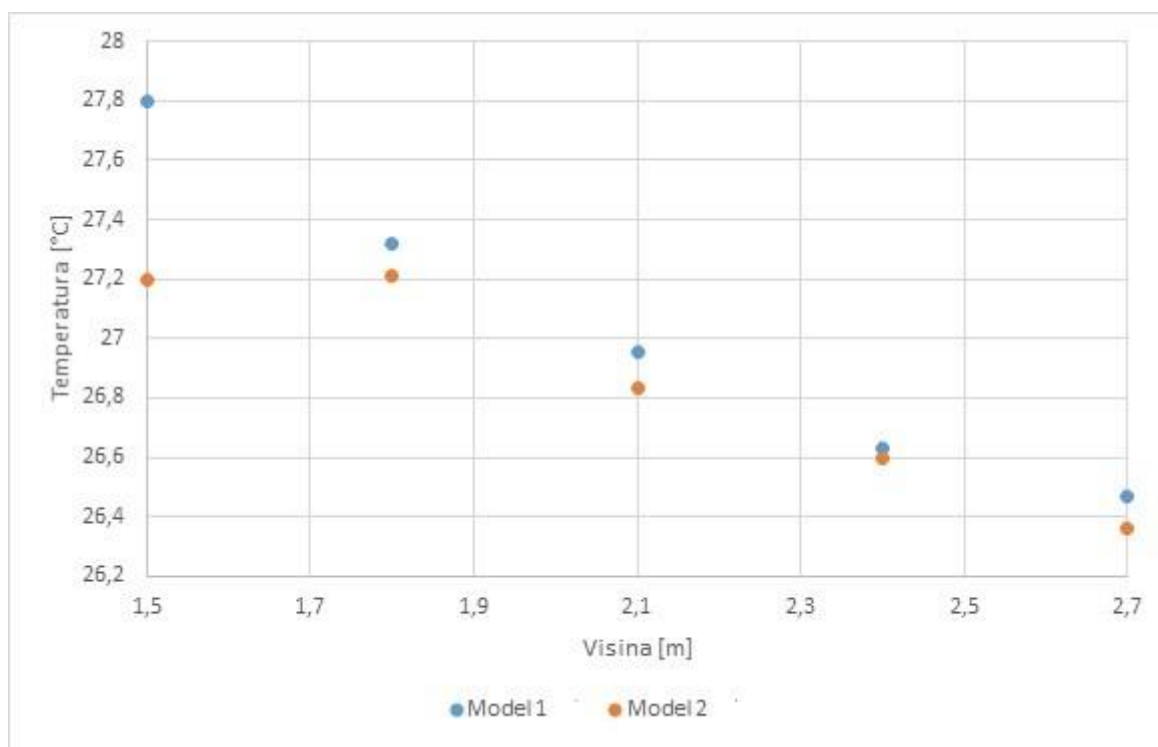


Slika 13. Očitavanja temperature ploha i iznad mjernih uređaja

Na Slici 14. prikazana je shema prostorije s prosječnim vrijednostima za svako mjerno mjesto u periodu od 6 sati. Najveća razlika temperatura između modela je na 1,5 m visine, mjereno od poda, odnosno najbliže pojedinom modelu. Na toj lokaciji razlika temperatura između dva modela iznosi $0,6^{\circ}\text{C}$ što je vidljivo na Slici 15. Osim spomenute razlike, na ostalim lokacijama su temperature između modela na jednakim visinama približno jednake. Razlike temperatura između modela, na jednakim visinama, nisu više od $0,1^{\circ}\text{C}$ što može biti posljedica i mjerne nesigurnosti samih termoparova.



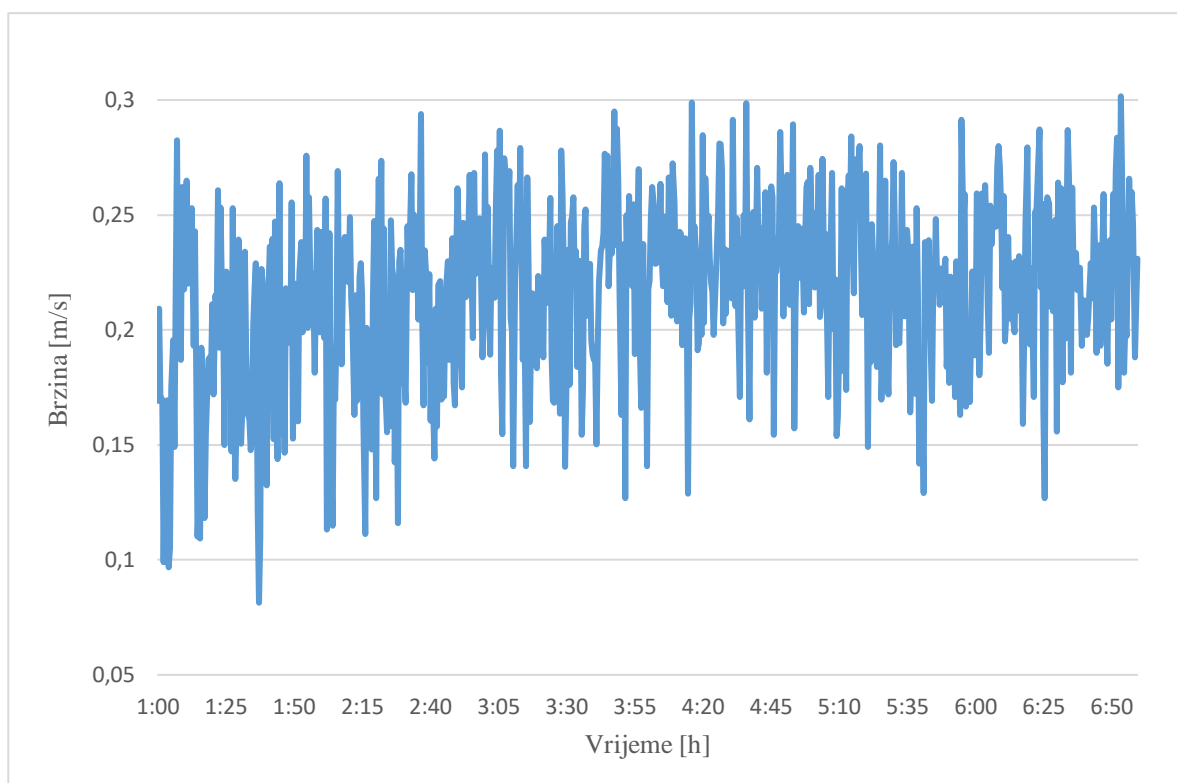
Slika 14. Prosječne izmjerene temperature svih termoparova u eksperimentu



Slika 15. Usporedba prosječnih temperatura iznad modela

3.2. Mjerenje brzine

Iako se usporedba između eksperimentalnog mjerenja i CFD simulacije prikazana u ovom radu temelji na usporedbi temperatura, mjerenje brzine poslužilo je kao kontrolno mjerenje i usporedba s CFD simulacijom. Nadalje, provedena je kontrola brzine strujanja u prostoriji za vrijeme eksperimenta. Očekivana vrijednost brzina strujanja zraka iznad čovjeka je 0,25 m/s. Kako je ranije spomenuto, mogući raspon korištenog anemometra je 0 – 50 m/s, a za mjerenja u ovom radu odabran je očekivani raspon 0 – 1 m/s. Na Slici 16. prikazana su očitavanja anemometra za vrijeme provedbe eksperimenta, pri čemu su mjerenja napona pretvorena u brzinu strujanja zraka u prostoru. Prosječna brzina strujanja za promatrani period iznosi 0,22 m/s uz standardno odstupanje 0,038 m/s. S obzirom da brzine dobivene anemometrom značajno osciliraju, zaključak je da su rezultati dobiveni mjerenjem nepouzdana, te da se preporuča promjena mjernog uređaja. Primjerice, poželjno je koristiti mjerni instrument s mogućim mjernim rasponom do 2 m/s.



Slika 16. Očitavanja brzine anemometrom iznad Modela 2

3.3. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je parametar koji se utvrđuje zajedno s mjerenim rezultatima, a opisuje rasipanje vrijednosti koje se može dodijeliti izmjerenoj vrijednosti mjerenja. Posljedica mjerne nesigurnosti može biti neiskustvo osobe koja mjeri, te mjerna nesigurnost opreme i vremenska mjerna nesigurnost. Mjerenjem temperature termoparovima može doći do pogreške u mjerenju najčešće zbog nesigurnosti mjerne opreme. Izračunavanje mjerne nesigurnosti važno je kod provedbe eksperimenta jer može ukazati na nedovoljno točno mjerenje.

Pri mjerenju temperature termoparovima najčešće se javljaju pogreške uslijed:

- izoternosti referentne i mjerne temperature
- toplinskog efekta
- nehomogenosti materijala
- interferencije s okolinom
- otpora žice
- interpolacije.

Sve pogreške, osim pogreške interpolacije i interferencije s okolinom, nastaju zbog nesavršenosti pri proizvodnji samog termopara. Postoje načini smanjivanja pogrešaka, primjerice izolacija žica termoparova za smanjivanje pogreške izoternosti referentne i mjerne temperature. Nadalje, kvalitetna toplinska obrada materijala može smanjiti utjecaj nehomogenosti materijala žice na grešku pri mjerenju. Pogreške toplinskog efekta nastaju zbog utjecaja zračenja s okolinom ili efekta toplinskog kapaciteta termometra. Jedan od načina smanjenja toplinskog efekta je ugradnja u posebno konstruirane sonde. S obzirom da se produljenjem žice povećava elektromagnetski utjecaj okoline na žicu, te su pogreške interferencije veće, potrebno je koristiti što kraće termoparove. Korištenjem standardnog strujnog izlaza (4 – 20 mA) efekt interferencije s okolinom se smanjuje s obzirom da strujni signal nije osjetljiv na elektromagnetska polja. Smanjivanje pogreške zbog otpora žice sprječava se zamjenom termopara s obzirom da je velika promjena otpora pri promjeni temperature znak neispravnog termopara. Konačno, pogreška interpolacije nije vezana za proizvodnju ili rad termoparova, već se odnosi na matematičku pogrešku pri izračunavanju

temperature iz poznatog generiranog napona s obzirom da napon i temperatura nisu linearni [3].

3.3.1. Procjena mjerne nesigurnosti dobivenih rezultata

Pri procjeni mjerne nesigurnosti analizirana je mjerna nesigurnost mjerne opreme i vremenska mjerna nesigurnost. Kako bi se dobila ukupna mjerna nesigurnost mjerenja potrebno je uzeti u obzir sve mjerne nesigurnosti koje se pojavljuju, te se njihov rezultat naziva kombinirana standardna mjerna nesigurnost, u_c i računa se kao:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1)$$

gdje su:

u_A standardna mjerna nesigurnost tipa A [°C]

u_B standardna mjerna nesigurnost tipa B [°C]

Standardna mjerna nesigurnost tipa A označava eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti, dok se standardna mjerna nesigurnost tipa B temelji na znanstveno utvrđenim metodama, odnosno, očitava se iz proizvođačkih specifikacija ili iz priručnika.

Radi jednostavnosti, u industriji se koristi proširena standardna mjerna nesigurnost, U , kako bi se povećala sigurnost i vjerodostojnost rezultata. Proširena standardna mjerna nesigurnost izračunava se prema:

$$U = k u_c \quad (2)$$

gdje su:

U proširena standardna mjerna nesigurnost [°C]

k faktor pokrivanja [-]

u_c standardna mjerna nesigurnost [°C]

Faktor pokrivanja je pretpostavljena vrijednost koja ovisi o točnosti predviđanja rezultata, odnosno, označava sigurnost u dobiveni rezultat. Uobičajene vrijednosti faktora pokrivanja iznose 2 ili 3, a u ovoj je analizi standardna mjerna nesigurnost proširena faktorom pokrivanja 2, što je uobičajeno u mjernoj tehnici.

3.3.2. *Mjerna nesigurnost mjerne opreme*

Mjerna nesigurnost mjerne opreme ovisi o termoparu, odnosno vezana je uz proizvodnju mjerne opreme. Pogreška mjerne opreme ovisi o izabranom termoparu. Tako se za standardne termoparove uzima mjerna nesigurnost od 1 do 2,8°C, dok se za specijalne termoparove uzima polovica te vrijednosti. Mjerna nesigurnost mjerne opreme definira se na temelju rezultata umjeravanja i vremenske stabilnosti opreme. U slučaju da mjerna oprema nije umjerena, mjernu nesigurnost opreme moguće je naći u literaturi. Primjerice, budući da su u eksperimentu korišteni termoparovi tipa E, potrebno je uzeti vrijednost koja se odnosi na taj termopar. S obzirom da je u eksperimentu korištena umjerena mjerna oprema, njena mjerna nesigurnost je poznata na temelju rezultata umjeravanja, a iznosi $\pm 0,175^\circ\text{C}$ za temperaturno područje od -40°C do 150°C .

3.3.3. *Vremenska mjerna nesigurnost*

Pri određivanju vremenske mjerne nesigurnosti potrebno je osigurati približno stacionarne uvjete. Vremenska promjena temperature određuje se kroz period od najmanje 30 minuta u kojem je potrebno prikupiti 30 mjerenih vrijednosti u približno jednakim vremenskim intervalima. S obzirom da se mjerenje provodilo kroz 6 sati, te su očitavanja svakih 30 sekundi, ispunjen je uvjet za izračun vremenske mjerne nesigurnosti. Za standardnu mjernu nesigurnost, vremenska se mjerna nesigurnost izračunava prema:

$$u(\delta T_{instab}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \text{Max}|\bar{T} - T_i| \quad (3)$$

gdje su:

- u standardna mjerna nesigurnost [$^{\circ}\text{C}$]
 δT_{instab} vremenska temperaturna nestabilnost [$^{\circ}\text{C}$]
 \bar{T} vremenska srednja temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
 T_i izmjerena vrijednost temperature za lokaciju i [$^{\circ}\text{C}$]

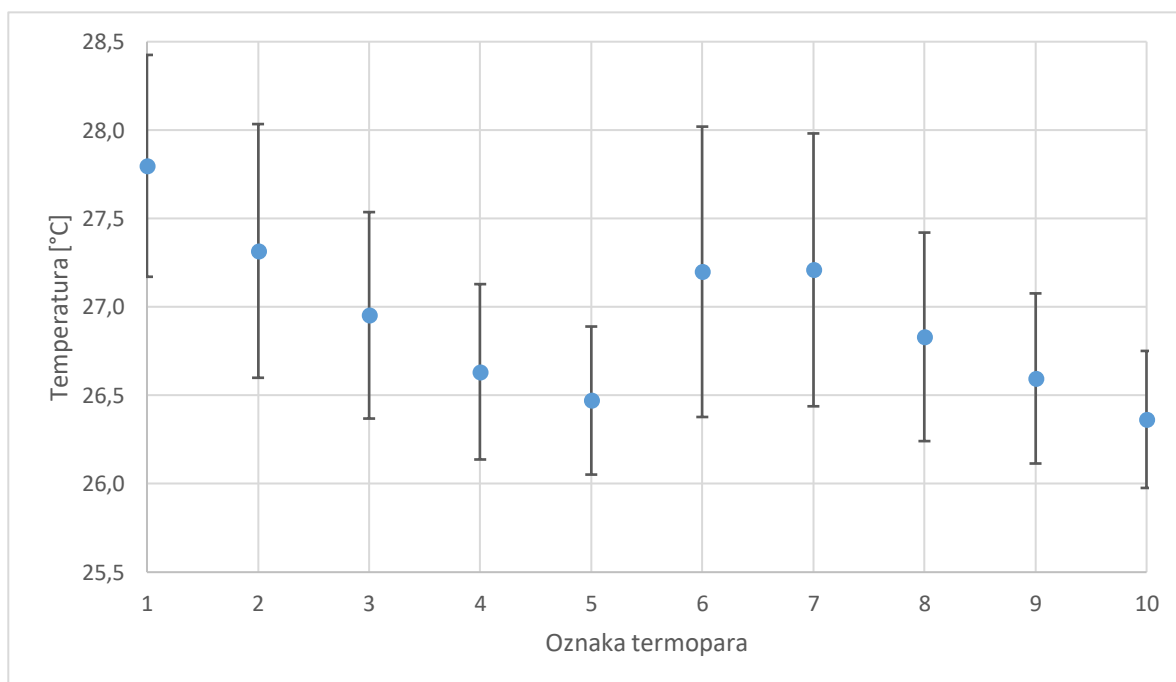
Tablica 3. prikazuje standardnu vremensku mjernu nesigurnost termoparova. Standardna vremenska mjerna nesigurnost termopara određena je najvećom razlikom izmjerene temperature i vremenski osrednjene temperature za pojedini termopar. Poznavajući standardnu mjernu nesigurnost moguće je izračunati vrijednosti kombinirane, te proširene standardne mjerne nesigurnosti (Tablica 4.). Vrijednosti mjerne nesigurnosti zaokružene su na jednu decimalu. Slika 17. prikazuje prosječne temperature termoparova uz standardnu mjernu nesigurnost pojedinog termopara.

Tablica 3. Vremenska mjerna nesigurnost termoparova

Termopar	\bar{T}	$Max \bar{T} - T_i $	$u(\delta T_{instab})$
1	27,8	0,5	0,3
2	27,3	0,5	0,3
3	27,0	0,4	0,2
4	26,6	0,3	0,2
5	26,5	0,2	0,1
6	27,2	0,6	0,4
7	27,2	0,6	0,3
8	26,8	0,4	0,2
9	26,6	0,3	0,2
10	26,4	0,1	0,1

Tablica 4. Proširena standardna mjerna nesigurnost termoparova

Termopar	Kombinirana standardna mjerna nesigurnost	Proširena standardna mjerna nesigurnost
1	0,3	0,6
2	0,4	0,7
3	0,3	0,6
4	0,2	0,5
5	0,2	0,4
6	0,4	0,8
7	0,4	0,8
8	0,3	0,6
9	0,2	0,5
10	0,2	0,4



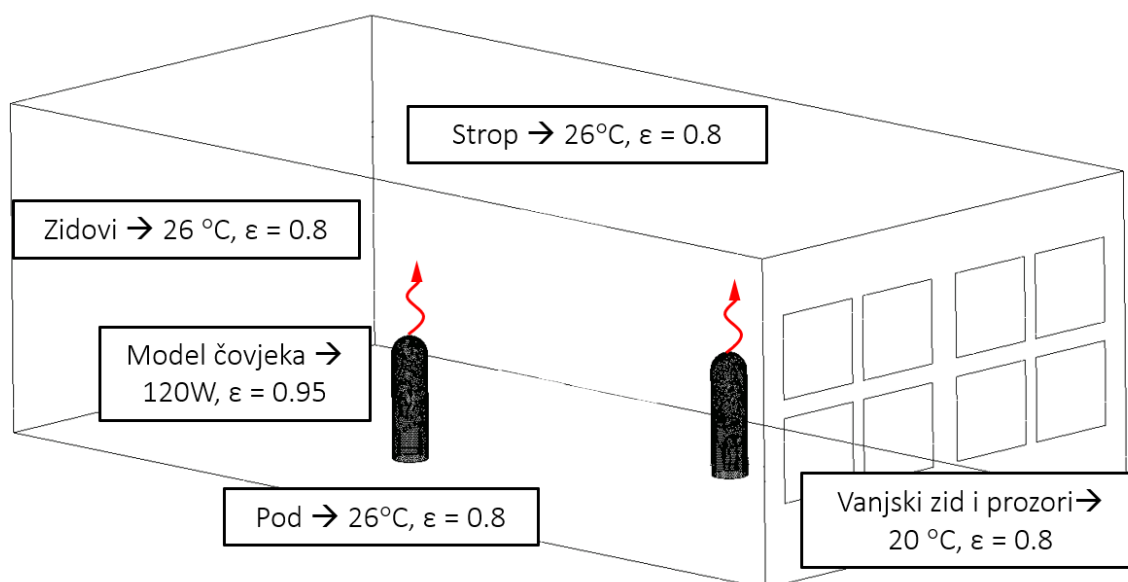
Slika 17. Mjerna nesigurnost termoparova postavljenih iznad modela

4. USPOREDBA REZULTATA EKSPERIMENTA S REZULTATIMA CFD ANALIZE

Rezultati eksperimentalnog mjerenja uspoređeni su s rezultatima CFD simulacije. Pri tome provođenje simulacije nije bilo dio ovog rada već je provedeno za potrebe projekta „Regionalni centar kompetentnosti Ruđera Boškovića“. Rezultati CFD simulacije prethodno su validirani korištenjem rezultata dostupnih u literaturi [5]. Za prikaz cjelovite slike strujanja fluida u prostoru u praksi se koriste CFD simulacije jer je njima moguće simulirati uvjete koji se ne mogu postići eksperimentom.

4.1. Rubni uvjeti u CFD simulaciji

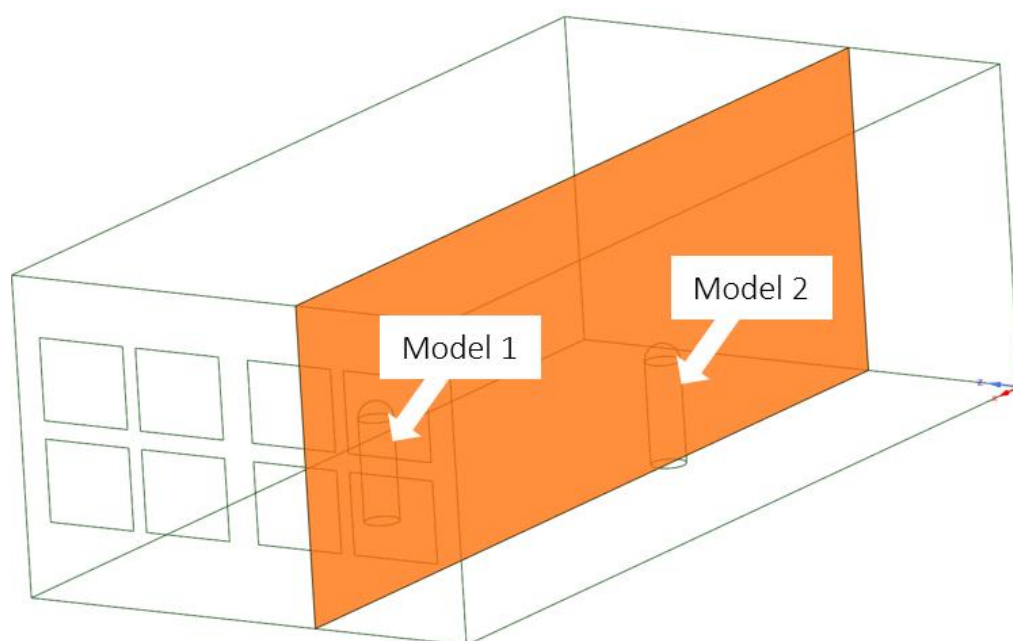
Pri simulaciji uvjeta provedenih u eksperimentu zadržane su dimenzije prostorije kao i raspored modela, odnosno ljudi po prostoru. Temperature svih unutarnjih zidova i stropa jednake su i iznose 26°C , dok je rubni uvjet temperature na vanjskom zidu 20°C (Slika 18.).



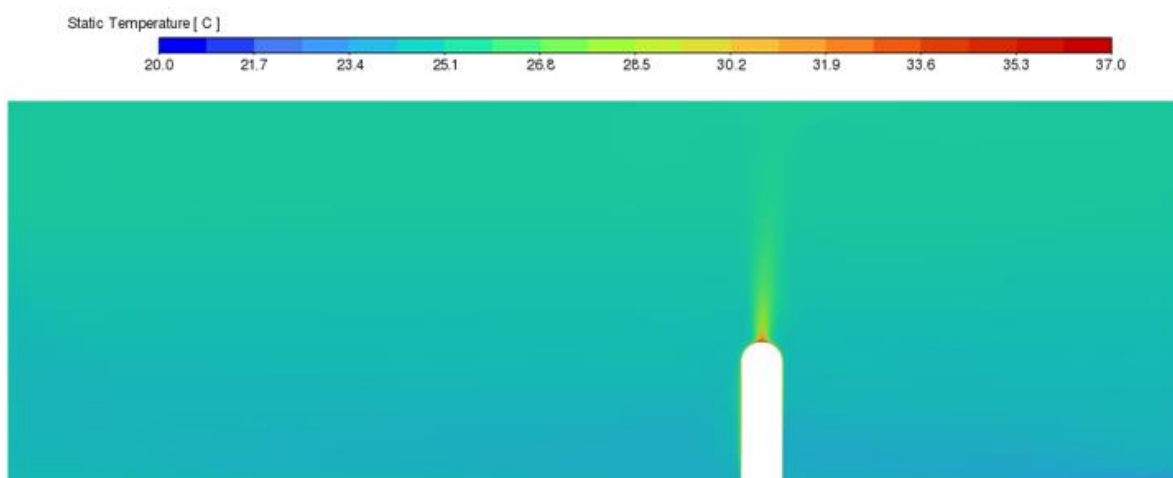
Slika 18. Rubni uvjeti korišteni u CFD simulaciji

4.2. Rezultati CFD simulacije

Rezultati CFD simulacije korišteni za usporedbu s eksperimentalnim mjerenjima prikazani su za ravninu paralelnu s duljom stranom prostorije (Slika 19.). Specifično, prikazana je ravnina koja presijeca Model 2. Na Slici 20. prikazana je raspodjela temperature iznad modela u promatranoj ravnini. Rezultati simulacije pokazuju da je uz model čovjeka temperatura najviša i iznosi oko 37°C. Ovo je očekivani rezultat s obzirom na to da je temperatura čovjekove kože 37°C. Također je vidljiv temperaturni gradijent od čovjeka do stropa, a koji je bio u fokusu eksperimentalnih mjerenja u ovom radu.



Slika 19. Ravnina korištena za usporedbu CFD simulacije i eksperimentalnog mjerenja



Slika 20. Rezultati simulacije - temperaturni profil u promatranoj ravnini

4.3. Usporedba mjerenih i simuliranih temperatura

Izmjerene temperature iznad Modela 1 prikazane su u Tablici 5. usporedno s rezultatima CFD simulacije, dok je razlika u izmjerenoj i simuliranoj stratifikaciji temperature po visini (iznad modela ljudi) prikazana na Slici 21. Iz usporedbe se može zaključiti da je temperaturni profil dobiven CFD simulacijom približno jednak provedenim mjerenjima. Razlika temperatura je zanemariva te se njen uzrok može naći u mjernoj nesigurnosti mjernog uređaja, ali i uvjetima koji su postavljeni tijekom CFD simulacije (primjerice, konstantna temperatura ploha). Veća temperaturna razlika javlja se na visini od 1,5 m zbog načina modeliranja čovjeka u prostoru. Specifično, u CFD simulaciji temperatura čovjeka, tj. tjemena, iznosi 37°C, dok u eksperimentu to nije slučaj. Razlog tome je taj što zadatak eksperimenta nije bilo postići jednoliku temperaturu modela, već odavanje topline iznosa 120 W, odnosno prosječno odavanje topline čovjeka.

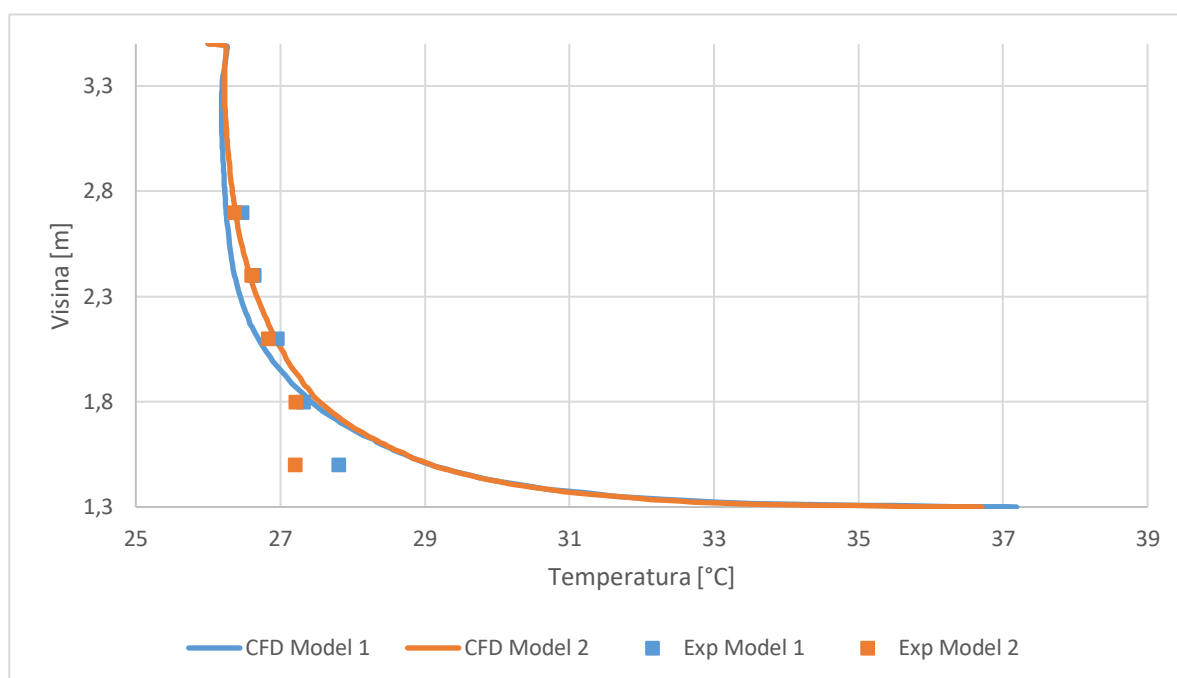
Tablica 5. Usporedba temperatura iznad Modela 1 dobivenih mjerenjima i CFD simulacijom

Visina [m]	Mjerenja Model 1	CFD Model 1
1,5	27,8	29,08
1,8	27,3	27,43
2,1	27,0	26,69
2,4	26,6	26,37
2,7	26,5	26,25

Slično kao kod Modela 1, razlika temperatura između vrijednosti dobivenih mjerenjem i CFD simulacijama za Model 2 su relativno male što, prikazuje Tablica 6. Također, kod Modela 2, razlika temperatura u blizini modela (na visini 1,5 m) je najveća, te iznosi čak 2,43°C (Slika 21.). Na Modelu 2 je vidljiv utjecaj niže temperature gornje strane modela na izmjerenu temperaturu u prostoru, kao kod Modela 1. Povećanjem visine razlika temperatura se smanjuje, te na visini od 2,7 m je zanemariva i iznosi tek 0,08°C.

Tablica 6. Usporedba temperatura iznad Modela 2 dobivenih mjerenjima i CFD simulacijom

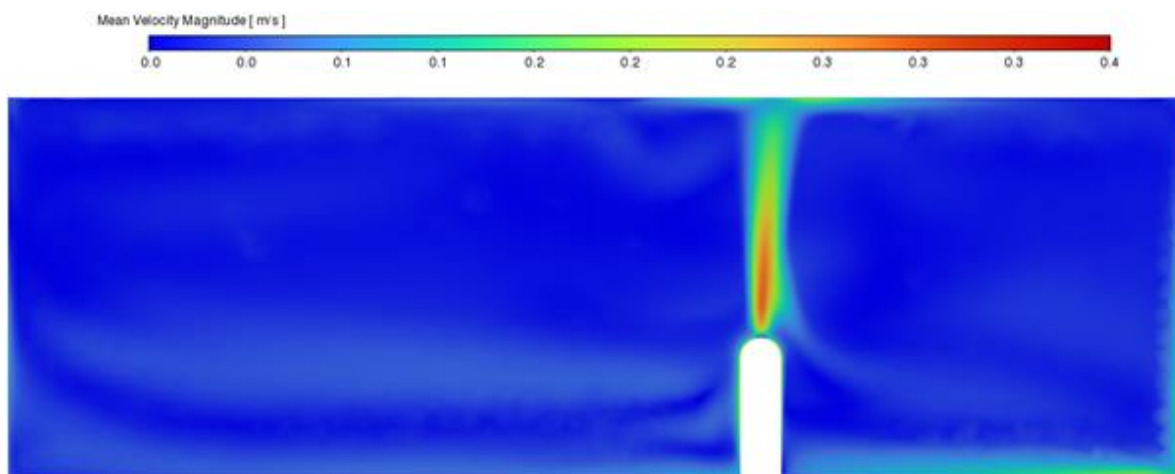
Visina [m]	Mjerenja Model 2	CFD Model 2
1,5	27,2	29,63
1,8	27,2	27,92
2,1	26,8	27,16
2,4	26,6	26,69
2,7	26,4	26,44



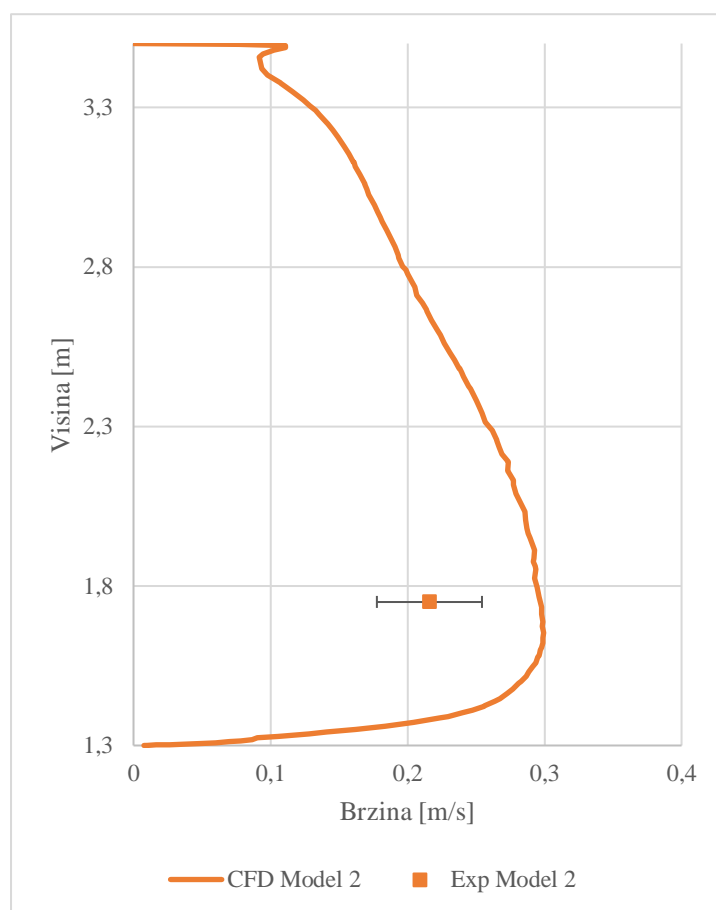
Slika 21. Usporedba mjerenja i CFD simulacije - stratifikacija temperature iznad modela

4.4. Usporedba brzina dobivenih eksperimentalnim mjerenjem i CFD simulacijom

S obzirom da je korišten jedan anemometar, usporedba s CFD simulacijom napravljena je za brzinu iznad Modela 2. Slika 22. prikazuje profil brzine iznad Modela 2 dobiven pomoću simulacije, pri čemu je vidljivo da je toplinski tok koji generira čovjek potaknuo strujanje zraka. Za razliku od temperature za koju su eksperimentalna mjerenja i CFD simulacija dali približno jednake podatke, raspodjela brzine razlikuje se između eksperimenta i simulacije (Slika 23.). Pretpostavlja se da je uzrok velike razlike između brzina različita geometrija modela. Naime, u eksperimentu je korištena kartonska kutija s ravnim vrhom, dok je u simulaciji vrh modela bio zaobljen. Ravni vrh kod modela uzrokuje nastajanje vrtloga koji usporavaju strujanje zraka u usporedbi sa zaobljenim vrhom koji postiže bolju konvergenciju od ravnog vrha te je simulacija je stabilnija. U eksperimentu nije korišten model sa zaobljenim vrhom zbog jednostavnosti izrade fizičkog model.



Slika 22. Rezultati simulacije - polje brzine iznad Modela 2



Slika 23. Usporedba mjerenja i CFD simulacije - profil brzine iznad Modela 2

5. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran utjecaj čovjeka na distribuciju temperature u prostoru korištenjem eksperimentalnih mjerenja, te su rezultati uspoređeni s dostupnim rezultatima CFD simulacije. Eksperiment je proveden u prostoriji na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za potrebe analize korištene su dvije kartonske kutije kao pojednostavljeni modeli čovjeka. Svaki model bio je opremljen s tri žarulje sa žarnim nitima kako bi se osiguralo odavanje topline jednako generiranom toplinskom toku prosječne osobe, odnosno 120 W. Za mjerenje temperature korišteno je 14 termoparova tipa E. Iznad svakog modela postavljeno je 5 termoparova, te je ostalih 4 postavljeno na razne lokacije po prostoriji. Nadalje, iznad jednog modela bio je postavljen anemometar za mjerenje utjecaja povećane temperature na brzinu strujanja zraka. Podaci su prikupljeni tijekom noći, odnosno od 1:00 h do 7:00 h kako bi se osiguralo približno stacionarno stanje, te eliminirao utjecaj sunčevog zračenja.

Prilikom analize zabilježen je temperaturni gradijent iznad modela. Najviša temperatura izmjerena je neposredno iznad modela, a iznosi 27,8°C iznad Modela 1, te 27,2°C iznad Modela 2. Udaljavanjem od modela temperatura pada te na visini 2,7 m, odnosno na najviše postavljenoj termoparskoj žici, izmjerena temperatura iznosi 26,5°C iznad Modela 1 i 26,4°C iznad Modela 2. Prosječne temperature ostalih ploha, te iznad mjernih uređaja iznosile su otprilike 26°C. Također, vjerodostojnost dobivenih rezultata procijenjena je izračunom mjerne nesigurnosti mjerne opreme, te vremenskom mjernom nesigurnosti.

Izmjerene temperature uspoređene su s rezultatima CFD simulacije, te je bilo vidljivo da su temperature izmjerene eksperimentalno i one dobivene analizom približno jednake. Najveće razlike, koje su iznosile i 2°C, pojavile su se u području neposredno iznad modela čovjeka. Razlog tome je što je u simulaciji temperatura čovjeka zadana i iznosila je 37°C, dok se u eksperimentu nije mogla postići ta temperatura na gornjoj strani modela. Zaključak je da pojednostavljeni eksperimentalni model dobro opisuje uzgonsko gibanje zraka iznad čovjeka, osim u neposrednoj blizini čovjeka. Stoga je modele moguće koristiti za daljnja ispitivanja utjecaja čovjek na strujanje zraka u prostoru. Analiza je također pokazala i važnost primjene eksperimentalnih mjerenja dodatno uz provođenje CFD simulacija, pri čemu oba pristupa imaju svoje prednosti i nedostatke. Konačno, pri ponovnom postavljanju eksperimenta, preporuka je koristiti model čovjeka sa zaobljenim vrhom kako bi strujanje bilo sličnije realnom slučaju.

LITERATURA

- [1] Craven, B. A., Settles, G. S. (March 19, 2006). "A Computational and Experimental Investigation of the Human Thermal Plume." ASME. *J. Fluids Eng.*
- [2] Galaso I. Određivanje toplinskog opterećenja prostorije. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1992.
- [3] Nicholas, J.V., White, D.R.: Traceable temperature, John Wiley & Sons Ltd, New York, 2001.
- [4] Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, Fourth Edition, ASTM MNL-12, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.
- [5] B. A. Craven and G. S. Settles, "A computational and experimental investigation of the human thermal plume," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 128, no. 6, 2006.