

Utjecaj integriteta površine metalnih materijala na emisijski faktor toplinskog zračenja

Obrovac, Adriana

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:436349>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Adriana Obrovac

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Studentica:

Adriana Obrovac

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku na pomoći, trudu, savjetovanju, novim znanjima i na svakom izlasku u susret za vrijeme pisanja i završnog i diplomskog rada, što ću vrlo dugo pamtiti.

Hvala svim kolegicama i kolegama koji su mi olakšali vrijeme na fakultetu.

Zahvaljujem majci Jadranki i ocu Karlu na požrtvornosti, ljubavi i na svemu što su mi omogućili kako bi mi olakšali studiranje i mladost.

I na kraju jedno veliko hvala Tinu. Hvala ti što si bio uz mene od samog početka studiranja i što mi konstantno pružaš motivaciju.

Adriana Obrovac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Adriana Obrovac** JMBAG: 0035221404

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj integriteta površine metalnih materijala na emisijski faktor toplinskog zračenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of surface integrity of metallic materials on the emission factor of thermal radiation**

Opis zadatka:

Za analizu rezultata beskontaktnih mjerenja temperature na metalnim materijalima nužno je poznavati točnu vrijednost emisijskog faktora toplinskog zračenja. Njegove vrijednosti nalaze se u intervalu između 0 do 1 i ovise o nizu utjecajnih čimbenika koji su određeni vrstom ispitivanog materijala, stanjem površine, postupkom toplinske obrade i metodom mjerenja. Integritet površine metalnih materijala nakon primjene proizvodnih postupaka opisuje se rezultatima ispitivanja parametara hrapavosti, izgleda, kemijskog sastava, mikrostrukture i mehaničkih svojstava površine.

U teorijskom dijelu rada treba opisati mehanizam izmjene topline zračenjem, metode kontaktnih i beskontaktnih mjerenja temperature, mjerenje emisijskog faktora površine, ispitivanje integriteta površine i pojave u proizvodnim postupcima koje utječu na narušavanje integriteta površine.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti ispitivanje hrapavosti, kemijskog sastava, izgleda i emisijskog faktora toplinskog zračenja na izabranim metalnim materijalima, kojim će se obuhvatiti utjecaj vrste materijala, oksidacije i hrapavosti površine na emisijski faktor toplinskog zračenja u intervalu temperatura od 20 °C do 200 °C.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predvideni datumi obrane:

26. rujna 2024.

28. studeni 2024.

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	VIII
POPIS KRATICA	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
TEORIJSKI DIO	2
2. IZMJENA TOPLINE ZRAČENJEM	3
2.1. Crno tijelo	4
2.1.1. Planckov zakon zračenja i Wienov zakon pomaka.....	6
2.1.2. Stefan-Boltzmannov zakon	7
2.2. Zračenje stvarnih tijela.....	8
2.2.1. Kirchhoffov zakon	8
3. METODE BESKONTAKTNOG MJERENJA TEMPERATURE	13
3.1. Osnovna podjela beskontaktnih metoda	13
3.2. Infracrvena termografija	14
3.2.1. Mogući izvori pogrešaka u primjeni infracrvene termografije	17
3.3. Pirometrija.....	19
4. METODE MJERENJA EMISIJSKOG FAKTORA	21
4.1. Analitičke metode	21
4.2. Eksperimentalne metode	23
4.2.1. Eksperimentalno dobivene analitičke jednadžbe	24
4.2.2. Kalorimetrijske metode.....	24
4.2.3. Radiometrijske metode	25
4.2.4. Reflektometrijske metode	27
4.2.4.1. FTIR analiza.....	27
4.2.4.2. Leslieva kocka	30

5. ISPITIVANJE INTEGRITETA (HRAPAVOSTI) POVRŠINE	33
5.1. Parametri i metode mjerenja topografije površine	34
5.2. Utjecaj integriteta površine na mjerenje emisijskog faktora zračenja	37
5.3. Utjecaj proizvodnih postupaka na integritet površine.....	38
EKSPERIMENTALNI DIO.....	40
6. Priprema i provedba mjerenja emisijskog faktora toplinskog zračenja.....	41
6.1. Priprema uzoraka	41
6.2. Ispitivanje hrapavosti uzoraka	44
6.3. Provedba ugrijavanja i mjerenja emisijskog faktora.....	50
6.4. Matematički model za određivanje emisijskog faktora površine.....	53
6.5. Rezultati mjerenja emisijskog faktora.....	72
7. Zaključak	79
LITERATURA.....	80

POPIS SLIKA

Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja u vakuumu [1]	3
Slika 2. Raspodjela upadnog zračenja (iradijacije) na refleksiju, transmisiju i apsorpciju [1] ..	5
Slika 3. Uniformno zračenje crnog tijela (a) i neuniformno zračenje realnog tijela (b) [5].....	5
Slika 4. Raspored intenziteta zračenja crnog tijela ovisan o valnim duljinama i temperaturi [6]	7
Slika 5. Usporedba odstupanja intenziteta površinske emisije zračenja stvarnog tijela (plavo) od crnog tijela (crveno) za istu temperaturu (3000 K)	9
Slika 6. Emisijski faktori ovisni o kutu otklona zrake od normale na površinu: a) nemetala, b) metala [9].....	10
Slika 7. Ovisnost normalnog emisijskog faktora zračenja o valnoj duljini za različite materijale [10]	11
Slika 8. Praktične izvedbe a) infracrvene termalne kamere tvrtke ©Teledyne FLIR LLC i b) infracrvenog pirometra tvrtke OMEGA™ Engineering [11],[12].....	13
Slika 9. Dijelovi infracrvene kamere [14]	15
Slika 10. Princip rada infracrvene kamere [3].....	17
Slika 11. Primjer toplinskih refleksija od čovjeka koji stoji blizu površine od lakiranog drva	18
Slika 12. Tipična izvedba kalorimetrijskog uređaja [1]	25
Slika 13. Princip rada i komponente FTIR spektroskopije [30].....	28
Slika 14. Ovisnost emisijskog faktora zračenja o debljini uzoraka i valnom broju elektromagnetskog zračenja [8].....	30
Slika 15. Postav i termogrami Leslijeve kocke od bakra sa različitim površinskim obradama [10]	31
Slika 16. Shematski prikaz uvećanog dijela poprečnog presjeka površine i prikaz različitih fizikalno-kemijskih slojeva [33].....	34
Slika 17. Odstupanja površine na stvarnom profilu [34]	34
Slika 18. R_a [34]	35
Slika 19. R_z [34].....	35
Slika 20. Utjecaj hrapavosti površine i valne duljine na emisijski faktor [36]	37
Slika 21. Ispitni uzorci	41
Slika 22. Dimenzije ispitnih uzoraka u izometriji	42
Slika 23. Time® 3202 profilometar sa podesivom platformom i pripadnim softverom.....	45

Slika 24. Detalji profilometra: a) bočni pogled na pomično ticalo, b) gornji pogled na ekran profilometra sa iznosima parametara hrapavosti	45
Slika 25. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 1A	46
Slika 26. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 1B	46
Slika 27. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 2A	46
Slika 28. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 3A	47
Slika 29. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 3B	47
Slika 30. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 4A	47
Slika 31. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 4B	48
Slika 32. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 5A	48
Slika 33. Komparator izgleda površine Elcometer Shot za površinu pjeskarenu okruglom sačmom i pripadna vrijednost parametra hrapavosti R_a (ispitni uzorak 5B)	48
Slika 34. VarioCAM® HD Head, Stationary thermal imaging camera, InfraTec	50
Slika 35. Električno kuhalo sa grijaćom pločom (\varnothing 18 cm) marke Zilan.....	50
Slika 36. Cobra SMARTlink Phhywe tablet	51
Slika 37. Postav za ispitivanje.....	51
Slika 38. Zagrijavanje uzoraka.....	52
Slika 39. Princip određivanja emisijskog faktora trake, ε_1 pomoću poznatog emisijskog faktora grijaće ploče, ε_0	54
Slika 40. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja ljepljive trake na grijaćoj ploči	56
Slika 41. Krivulje ugrijavanja papirnate ljepljive trake (T1) i grijaće ploče (T2) – snimanje sa termoelementom.....	57
Slika 42. Krivulje ugrijavanja papirnate ljepljive trake (R1) i grijaće ploče (R2) – snimanje sa infracrvenom kamerom	57
Slika 43. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 1A i ljepljive trake	58
Slika 44. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 1A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera	59
Slika 45. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 1B i ljepljive trake	60
Slika 46. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 1B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera...61	61

Slika 47. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 2A i ljepljive trake	62
Slika 48. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 2A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera..	62
Slika 49. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 3A i ljepljive trake	63
Slika 50. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 3A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera..	64
Slika 51. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 3B i ljepljive trake	65
Slika 52. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 3B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera...	65
Slika 53. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 4A i ljepljive trake	66
Slika 54. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 4A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera..	67
Slika 55. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 4B i ljepljive trake	68
Slika 56. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 4B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera	68
Slika 57. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 5A i ljepljive trake	69
Slika 58. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 5A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera	70
Slika 59. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 5B i ljepljive trake (desni kraj uzorka)	71
Slika 60. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 5B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera...	71
Slika 61. $\varepsilon_1(T)$ dijagram za ljepljivu traku	72
Slika 62. $\varepsilon_2(T)$ dijagram za uzorak 1A	73
Slika 63. $\varepsilon_3(T)$ dijagram za uzorak 1B	73
Slika 64. $\varepsilon_4(T)$ dijagram za uzorak 2A	74
Slika 65. $\varepsilon_5(T)$ dijagram za uzorak 3A	74

Slika 66. $\varepsilon_6 (T)$ dijagram za uzorak 3B.....	75
Slika 67. $\varepsilon_7 (T)$ dijagram za uzorak 4A	75
Slika 68. $\varepsilon_8 (T)$ dijagram za uzorak 4B.....	76
Slika 69. $\varepsilon_9 (T)$ dijagram za uzorak 5A	76
Slika 70. $\varepsilon_{10} (T)$ dijagram za uzorak 5B	77

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti emisijskog faktora površinskog zračenja u smjeru normale, ε_n [9].....	12
Tablica 2. Pregled radiometrijskih veličina [10],[28]	26
Tablica 3. Pregled kemijskog sastava različitih materijala ispitnih uzoraka [38] – [42]	42
Tablica 4. Fizikalna i toplinska svojstva ispitnih uzoraka [43] – [50]	44
Tablica 5. Izmjereni parametri hrapavosti površina ispitnih uzoraka	49
Tablica 6. Izmjerene vrijednosti emisijskih faktora uzoraka pri ugrijavanju od 20 °C do 200 °C	78

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	–	Faktor apsorpcije
C_1	$W\mu m^4/m^2$	Prva konstanta zračenja; $3,742 \cdot 10^8$
C_2	μmK	Druga konstanta zračenja; $1,439 \cdot 10^4$
C_3	μmK	Treća konstanta zračenja; 2898
C_c	$W/m^2[100 K]^4$	Konstanta zračenja; 5,67
D	mm	Promjer obratka
d	–	Faktor dijametrije (propusnosti)
E	W/m^2	Gustoća energije koju emitira „necrno“ (stvarno) tijelo
E_c	W/m^2	Gustoća vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela
E_{ob}	W/m^2	Gustoća vlastitog emitiranog zračenja objekta snimanja
E_r	W/m^2	Gustoća energije reflektiranog zračenja
E_{zr}	W/m^2	Gustoća emitiranog zračenja okolišnog fluida (zraka)
f	m/min	Brzina posmaka
I_c	$W/m^2 \cdot \mu m$	Intenzitet infracrvenog zračenja crnog tijela na definiranoj valnoj duljini λ temperaturi T
I_{ok}	$W/m^2 \cdot \mu m$	intenzitet infracrvenog zračenja okoliša na definiranoj valnoj duljini λ i sobnoj temperaturi T_s
I_u	$W/m^2 \cdot \mu m$	Intenzitet infracrvenog zračenja uzorka na definiranoj valnoj duljini λ temperaturi T
L	$W/m^2 sr$	Radijancija
l_r	μm	Referentna dužina
n	o/min	Brzina okretanja
r	mm	Polumjer vrha alata
r	–	Faktor refleksije
R_a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje
R_p	μm	Najveća visina vrha profila

R_q	μm	Srednje kvadratno odstupanje
R_t	μm	Ukupna visina profila
R_v	μm	Najveća dubina dola profila
R_z	μm	Najveća visina profila
T	K	Termodinamička (apsolutna) temperatura
T_{ob}	K	Temperatura snimanog objekta
T_{ok}	K	Temperatura okoliša
V	m^3	Volumen
V_c	m/min	Brzina rezanja
$Z(x)$	–	Vrijednost ordinata unutar l_r
α	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Koeficijent prijelaza topline
λ	W/mK	Toplinska provodnost
λ	μm	Valna duljina
ε	–	Emisijski faktor zračenja „nečrnog“ (stvarnog) tijela
η	cm^{-1}	Valni broj
τ	–	Faktor transmisije
ρ	kg/m^3	Gustoća
ν	Hz	Frekvencija
σ	–	Stefan-Boltzmannova konstanta; $5.67 \cdot 10^{-8}$
ε_h	–	Ukupni emisijski faktor zračenja (engl. <i>hemispherical emissivity</i>)
λ_{max}	μm	Najveća vrijednost valne duljine za temperaturu zračenja crnog tijela T
ε_n	–	Normalni emisijski faktor zračenja
ε_{zr}	–	Emisijski faktor zračenja okolišnog fluida (zraka)

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3D	Trodimenzijski
ADP	Analogno digitalna pretvorba
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i> – Mikroskopija atomskom silom
CMM	<i>Coordinate Measuring Machines</i> – Koordinatni mjerni uređaj
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> – Računalno numeričko upravljanje
CT	<i>Computed Tomography</i> – Računalna tomografija
EPDM	Etilen propilen dien monomer
FIR	<i>Far-infrared</i> – Daleko infracrveno (zračenje)
FTIR	<i>Fourier Transform infrared</i> (spectroscopy) – FTIR spektroskopija
IC	Infracrveno
IR	<i>Infrared</i> – Infracrveno
IRT	<i>Infrared Thermography</i> – Infracrvena termografija
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
MIR	<i>Middle-infrared</i> – Srednje infracrveno (zračenje)
NDT	<i>Non-destructive Testing</i> – Nerazorno ispitivanje
NIR	<i>Near-infrared</i> – Blisko infracrveno (zračenje)
OOČ	Obrada odvajanjem čestica
PA	Poliamid
PAN	Poliakrilnitril
PMMA	Polimetil-metakrilat
PS	Polistiren
PVG	Polivinil glutaraldehyd
R&D	<i>Research and Development</i> – Istraživanje i razvoj
RTP	<i>Rapid Thermal Processing</i> – Brza toplinska obrada
UV	<i>Ultraviolet</i> – Ultraljubičasto
VIS	Vidljivi spektar
XLPO	Umreženi poliolefin

SAŽETAK

Cilj rada je istražiti ovisnost emisijskog faktora, ε , o temperaturi i hrapavosti površine uzoraka izrađenih od različitih materijala. U teorijskom dijelu rada opisani su fizikalni zakoni koji se javljaju pri toplinskom zračenju tijela, kao i beskontaktna metode mjerenja temperature. Eksperimentalni dio rada sastoji se od mjerenja emisijskog faktora ugljičnog i austenitnog nehrđajućeg čelika, aluminijskih legura 5083 i 6082, mjedi i čistog titanija sa metalno sjajnom i oksidiranom površinom u rasponu temperatura od 20 °C do 200 °C, regresijske analize dobivenih podataka te usporedbe s literaturnim vrijednostima emisijskog faktora. Rezultati mjerenja pokazali su da se vrijednosti emisijskog faktora svih uzoraka kontinuirano smanjuju s porastom temperature. Uzorak od oksidiranog čistog titanija, 5A, koji je imao veću hrapavost ($R_a = 1,118 \mu\text{m}$), pokazao je najviši emisijski faktor (0,87) na temperaturi od 40 °C, dok je uzorak od oksidirane mjedi, 4B, s manjom hrapavošću ($R_a = 0,160 \mu\text{m}$), na istoj temperaturi pokazao najnižu vrijednost emisijskog faktora (0,60). Ovime je potvrđena činjenica da hrapavije površine intenzivnije emitiraju zračenje, bez obzira na materijal uzorka. S porastom temperature na 200 °C kod svih ispitanih metalnih materijala emisijski faktor se smanjuje na vrijednosti u rasponu između 0,2 do 0,3, izuzev oksidiranog nelegiranog čelika gdje se vrijednost emisijskog faktora zadržava na 0,55.

Ključne riječi: toplinsko zračenje, termografija, emisijski faktor, hrapavost površine

SUMMARY

The objective of this study is to investigate the dependence of the emissivity factor, ε , on the temperature and surface roughness of samples made from various materials. The theoretical part of the study describes the physical laws governing thermal radiation of bodies, as well as non-contact temperature measurement methods. The experimental part includes measuring the emissivity factor of carbon and austenitic stainless steel, aluminium alloys 5083 and 6082, brass, and pure titanium with metallic and oxidized surfaces in the temperature range from 20 °C to 200 °C. It also encompasses regression analysis of the collected data and a comparison with literature values of emissivity. The results indicate that emissivity factor values of all samples continuously decrease with increasing temperature. The oxidized titanium sample, 5A, with higher roughness ($R_a = 1.118 \mu\text{m}$), showed the highest emissivity factor (0,87) at 40 °C, while the oxidized brass sample, 4B, with lower roughness ($R_a = 0.160 \mu\text{m}$), exhibited the lowest emissivity factor (0,60) at the same temperature. This confirms that rougher surfaces emit radiation more intensively, regardless of the sample material. As the temperature increases to 200 °C, the emissivity values for all tested metallic materials decrease to a range between 0,2 and 0,3, except for oxidized non-alloy steel, where the emissivity factor remains at 0,55.

Key words: thermal radiation, thermography, emissivity, surface roughness

1. UVOD

Toplinsko zračenje sveprisutan je mehanizam prijenosa topline i od izuzetne je važnosti u različitim inženjerskim i znanstvenim područjima. Ono se temelji na fizikalnim zakonima koji objašnjavaju ponašanje idealnih i stvarnih tijela prilikom zračenja energije. Planckov zakon, Stefan-Boltzmannov zakon, Wienov zakon pomaka i Kirchhoffov zakon daju osnovu za analizu toplinskog zračenja i njegove primjene u teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima. Pritom je emisijski faktor, ε , od velike važnosti jer opisuje sposobnost stvarnih tijela da emitiraju zračenje u odnosu na idealno crno tijelo.

Precizno određivanje emisijskog faktora zahtijeva napredne metode mjerenja, poput beskontaktnih mjernih tehnika infracrvene termografije i pirometrije. Pomoću ovih metoda moguće je mjerenje temperature i emisijskog zračenja površina s minimalnim interferencijama s uzorkom, no njihova preciznost može biti ograničena zbog različitih parametara, poput hrapavosti površine, temperature okoline i mjerne opreme.

Površinska hrapavost bitno utječe na iznos emisijskog faktora zračenja, s obzirom na to da grube površine, u pravilu, snažnije emitiraju zračenje u usporedbi s glatkim. Parametri poput srednjeg aritmetičkog odstupanja hrapavosti površine, R_a , koriste se za kvantitativnu procjenu integriteta površine. Osim toga, temperaturna ovisnost emisijskog faktora često je nelinearna i potrebno je primijeniti dodatne analitičke ili eksperimentalne pristupe za njegovo točnije određivanje.

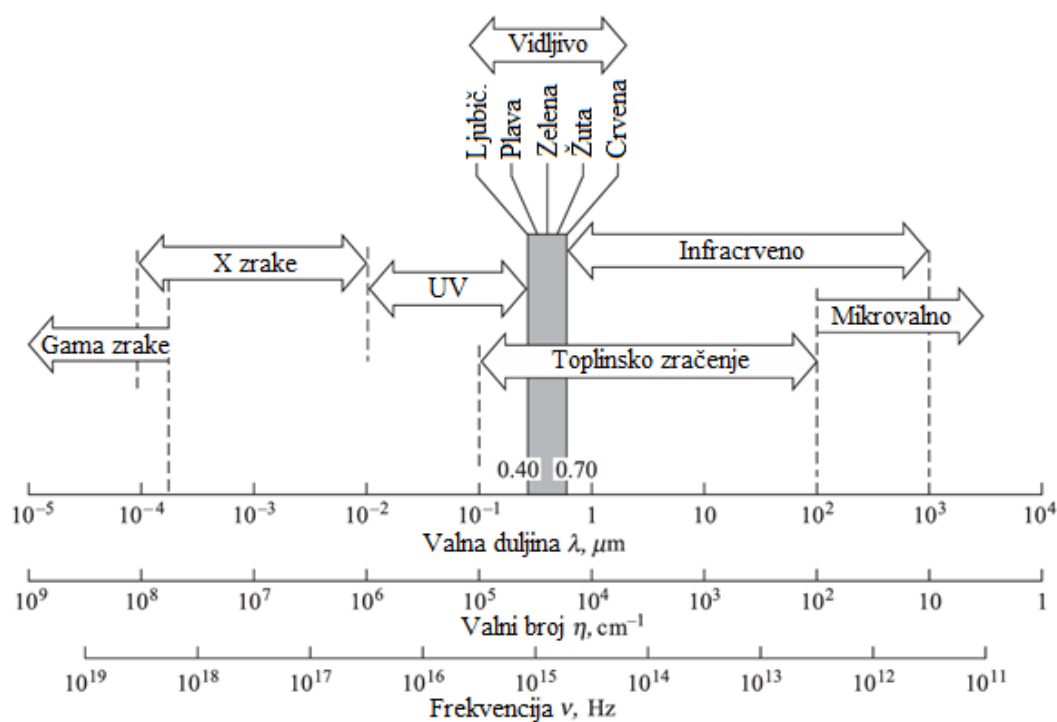
U radu će se istražiti ovisnost emisijskog faktora o temperaturi i hrapavosti površine uzoraka izrađenih od različitih materijala. U teorijskom dijelu rada opisan će se fizikalni zakoni koji se javljaju pri toplinskom zračenju tijela, kao i beskontaktna metode mjerenja temperature. U eksperimentalnom dijelu rada provest će se mjerenja emisijskog faktora uzoraka s različitim površinskim obradama, regresijska analiza dobivenih podataka te usporedba s dostupnim literaturnim vrijednostima emisijskog faktora ispitanih materijala.

TEORIJSKI DIO

2. IZMJENA TOPLINE ZRAČENJEM

Zračenje je proces kojim tvari emitiraju energiju u obliku elektromagnetskih valova ili fotona, zbog promjena u elektronskim konfiguracijama atoma ili molekula. Za razliku od druga dva načina prijenosa topline; provođenja i konvekcije, prijenos energije zračenjem ne zahtijeva prisutnost medija. Toplinsko zračenje je u nekim slučajevima vidljivo ljudskom oku, primjerice, može se primijetiti da će vrlo užareni metal sijati bijelom svjetlošću. Razlog tomu jest taj što se valna duljina toplinskog zračenja nalazi između 10^{-1} μm i 10^2 μm , a valna duljina vidljive svjetlosti je između 380 nm (ljubičasta svjetlost) i 780 nm (crvena svjetlost), što je prikazano na slici 1. Sva tijela s temperaturom iznad apsolutne nule (0 K) emitiraju toplinsko zračenje.

Zračenje je u osnovi volumetrijski fenomen, pod čime se misli na to da se emisija, apsorpcija, i prijenos zračenja odvija u cijelom volumenu materijala, a ne samo na njegovoj površini. Svi kruti, tekući i plinoviti materijali emitiraju, apsorbiraju ili prenose zračenje u različitim stupnjevima. Međutim, za neprozirne krute tvari poput metala, zračenje se obično smatra površinskim fenomenom jer zračenje iz unutrašnjosti materijala ne dopire do površine uslijed visoke koncentracije slobodnih elektrona, a svako dolazno zračenje obično se apsorpira unutar tankog površinskog debljine nekoliko mikrona [1].



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja u vakuumu [1]

2.1. Crno tijelo

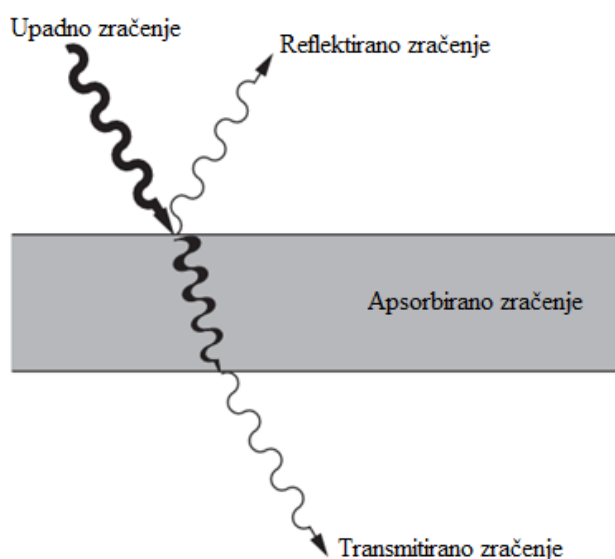
Kada je neka površina materijala izložena toku energije (koji nije toplinski tok), jedan dio tog toka će se reflektirati (ovisno o faktoru refleksije r), drugi će se apsorbirati u materijalu (ovisno o faktoru apsorpcije a), dok će treći dio proći kroz materijal bez interakcije s njim. Ova posljednja pojava naziva se propuštanjem ili dijametrijom (d – faktor propusnosti/dijametrije). Prema zakonu očuvanja energije vrijedi jednadžba (1):

$$a + r + d = 1 \quad (1)$$

Pri čemu a , r i d mogu poprimiti vrijednosti od 0 do 1. Ukoliko površina nekog tijela u potpunosti reflektira upadno zračenje, tada je $r = 1$, a ukoliko ona tu energiju apsorbira, tada se radi o crnom tijelu i vrijedi da je $a = 1$ [2].

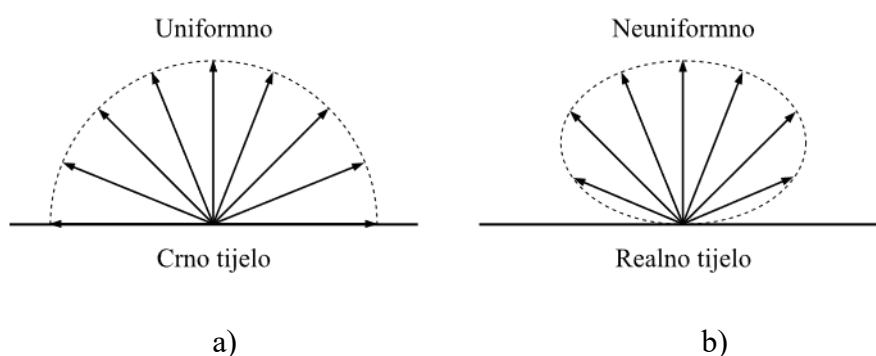
Često se u literaturi umjesto faktora dijametrije (d) u jednadžbi (1) u literaturi javlja oznaka τ , što označava faktor transmisije. Transmisija i dijametrija srodni su pojmovi vezani uz prolazak elektromagnetskog zračenja kroz materijal. Dijametrija opisuje potpuno propuštanje zračenja kroz materijal bez ikakve interakcije, poput apsorpcije ili refleksije. To znači da zračenje prolazi kroz materijal kao da on nije prisutan, tj. kao da nema nikakvu masu ni gustoću, što je teoretski idealan slučaj. Transmisija obuhvaća ukupnu količinu zračenja koje prolazi kroz realni materijal, ali uzimajući u obzir moguće gubitke uslijed apsorpcije ili refleksije. Ona može biti parcijalna, jer dio zračenja može biti apsorbiran ili reflektiran u materijalu. Prema tome, transmisija je širi pojam koji uključuje dijametriju, ali se odnosi i na djelomično propuštanje zračenja, dok je dijametrija idealizirani koncept savršenog prolaza zračenja kroz materijal [1],[2],[3],[4].

Slika 2. prikazuje različite aspekte interakcije zračenja s površinom materijala. Iradijacija je zračenje koje pada na površinu materijala (upadno zračenje). Dio tog zračenja biva reflektiran, dok drugi dio prolazi kroz materijal u obliku transmisije. Preostalo zračenje se apsorbira unutar materijala. Apsorbirano zračenje može kasnije biti reemitirano u obliku toplinskog zračenja.



Slika 2. Raspodjela upadnog zračenja (iradijacije) na refleksiju, transmisiju i apsorpciju [1]

Crno tijelo je idealizirani fizički objekt koji apsorbira svo elektromagnetsko zračenje koje na njega padne, bez obzira na frekvenciju ili kut upada. Drugim riječima, crno tijelo ne reflektira niti propušta zračenje ($r, d = 0$), već apsorbira svo upadno zračenje ($a = 1$). Crno tijelo je također idealni emiter zračenja ($\varepsilon = 1$) na određenoj temperaturi, na kojoj emitira najveću moguću količinu zračenja. Emisijsko zračenje crnog tijela opisano je Planckovim zakonom te se koristi kao referentni model u termodinamici i kvantnoj fizici. Primjer takvog ponašanja u stvarnom svijetu ne postoji, ali su se razvili materijali koji imaju sposobnost približno slično imitirati karakteristike crnog tijela. Crno tijelo ravnomjerno (uniformno) emitira energiju u svim smjerovima po jedinici površine, pa se naziva idealnim difuznim emiterom. Za razliku od crnog tijela, površine realnih tijela emitiraju i apsorbiraju zračenje na neujednačen način (neuniformno), ovisno o različitim faktorima kao što su hrapavost površine, kemijski sastav materijala, prisutnost oksidnih slojeva i dr., slika 3 [5].



Slika 3. Uniformno zračenje crnog tijela (a) i neuniformno zračenje realnog tijela (b) [5]

2.1.1. Planckov zakon zračenja i Wienov zakon pomaka

Planckov zakon opisuje emisiju elektromagnetskog zračenja idealnog crnog tijela kao funkciju temperature i valne duljine, prema jednadžbi (2). Prema ovom zakonu, intenzitet zračenja crnog tijela na određenoj valnoj duljini kontinuirano raste s temperaturom tijela, dok je distribucija zračenja šira i pomiče se prema kraćim valnim duljinama s porastom temperature. Planckov zakon smatra se jednim od najvažnijih otkrića u kvantnoj fizici.

$$E_{\lambda,c}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (2)$$

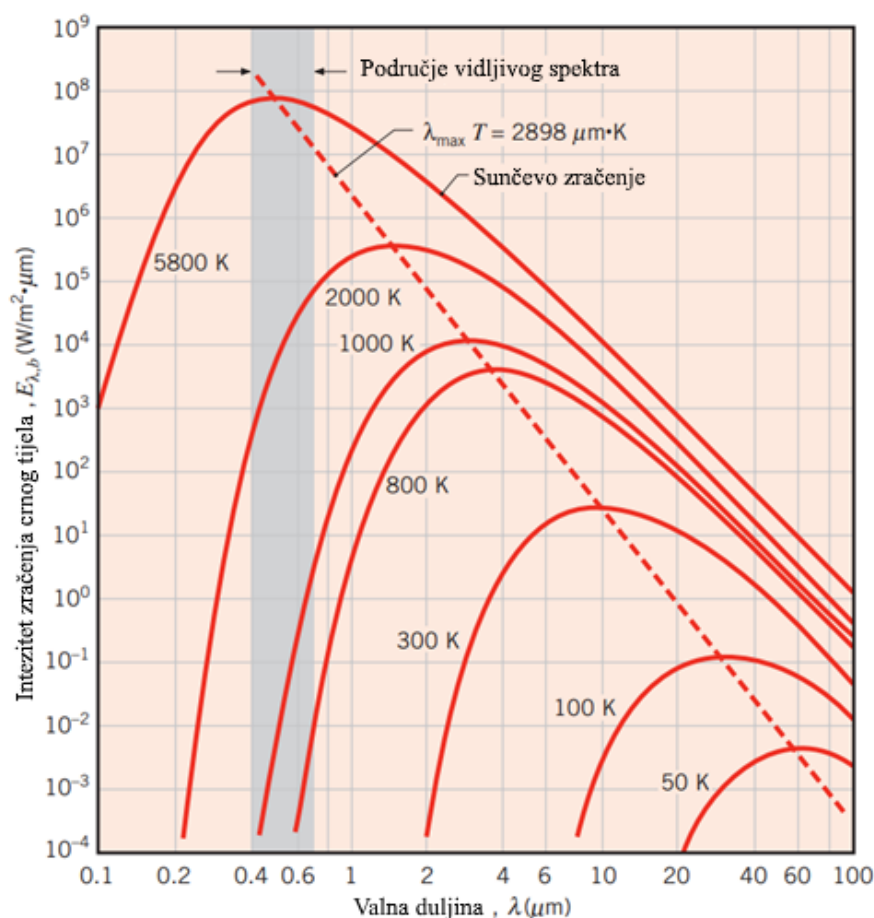
$E_{\lambda,c}$	W/m ² μm	Intenzitet zračenja crnog tijela (postoji još i oznaka I)
λ	μm	Valna duljina elektromagnetskog zračenja
C_1	Wμm ⁴ /m ²	Prva konstanta zračenja; 3,742·10 ⁸
C_2	μmK	Druga konstanta zračenja; 1,439·10 ⁴
T	K	Apsolutna temperatura crnog tijela

Planckovim zakonom može se opisati spektralna raspodjela zračenja crnog tijela te se njime pokazuje da zračenje nije ravnomjerno raspoređeno po svim valnim duljinama, već postoji specifična valna duljina za svaku izotermnu krivulju na kojoj crno tijelo emitira najviše energije, što opisuje Wienov zakon pomaka, naveden jednadžbom (3).

$$\lambda_{\max} \cdot T = C_3 \quad (3)$$

λ_{\max}	μm	Najveća vrijednost valne duljine za temperaturu zračenja crnog tijela T
C_3	μmK	Treća konstanta zračenja; 2898

Slika 4. prikazuje Planckov zakon zračenja crnog tijela, gdje se intenzitet zračenja crnog tijela (y -os) prikazuje kao funkcija valne duljine (x -os) za različite temperature tijela, od 50 K do 5800 K (temperatura površine Sunca). Viša temperatura uzrokuje pomak zračenja prema kraćim valnim duljinama (vidljivom svjetlu), dok niže temperature emitiraju više zračenja u infracrvenom spektru. Snižanjem temperature T , točke najvišeg intenziteta zračenja na svakoj izotermi pomiču se u desno, prema većim valnim duljinama. Spajanjem tih točaka dobiva se krivulja koja predstavlja Wienov zakon pomaka [6].



Slika 4. Raspored intenziteta zračenja crnog tijela ovisan o valnim duljinama i temperaturi [6]

2.1.2. Stefan-Boltzmannov zakon

Integriranjem Planckovog zakona navedenog u jednadžbi (2) po svim mogućim valnim duljinama ($d\lambda$) dobiva se Stefan-Boltzmannov zakon opisan jednadžbom (4):

$$E_c = \sigma T^4 \quad (4)$$

Gdje su

E_c W/m² Gustoća vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela

σ W/m² K⁴ Stefan-Boltzmannova konstanta; $5,67 \cdot 10^{-8}$

Stefan-Boltzmannov zakon opisuje ukupnu energiju zračenja crnog tijela (energija zračenja emitirana u svim smjerovima) kao funkciju njegove temperature. On govori da je ukupna energija zračenja (emisijaska moć) crnog tijela proporcionalna četvrtoj potenciji apsolutne temperature [7].

2.2. Zračenje stvarnih tijela

Crno tijelo je idealni emiter u smislu da nijedna površina ne može emitirati više zračenja nego crno tijelo na istoj temperaturi. Stoga je prikladno koristiti crno tijelo kao referentnu točku pri opisivanju zračenja stvarnih površina. Svojstvo površinskog zračenja poznato kao emisijski faktor može se definirati kao omjer zračenja koje emitira površina u odnosu na zračenje koje emitira crno tijelo na istoj temperaturi. Površine stvarnih tijela uvijek će emitirati manje zračenja od idealnog crnog tijela, što se može izraziti jednadžbom (5):

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_c(T)} \quad (5)$$

Pri čemu su

ε – Emisijski faktor zračenja stvarnog tijela; $0 < \varepsilon < 1$

$E(T)$ W/m² Energija koju emitira „necrno“, tj. stvarno tijelo

Prema tome, energija koju emitira stvarno tijelo određuje se jednadžbom (6):

$$E = \varepsilon E_c = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_c \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (6)$$

u kojoj je C_c konstanta zračenja koja iznosi 5,67 W/m² [100 K]⁴ [2],[7].

Važno je napomenuti da, općenito, spektralno zračenje koje emitira stvarna površina materijala odstupa od Planckovog zakona. Na slici 5. može se vidjeti usporedba krivulja intenziteta zračenja idealnog crnog tijela (crvena linija) i krivulja zračenja stvarnog tijela na istoj temperaturi (plava linija).

2.2.1. Kirchhoffov zakon

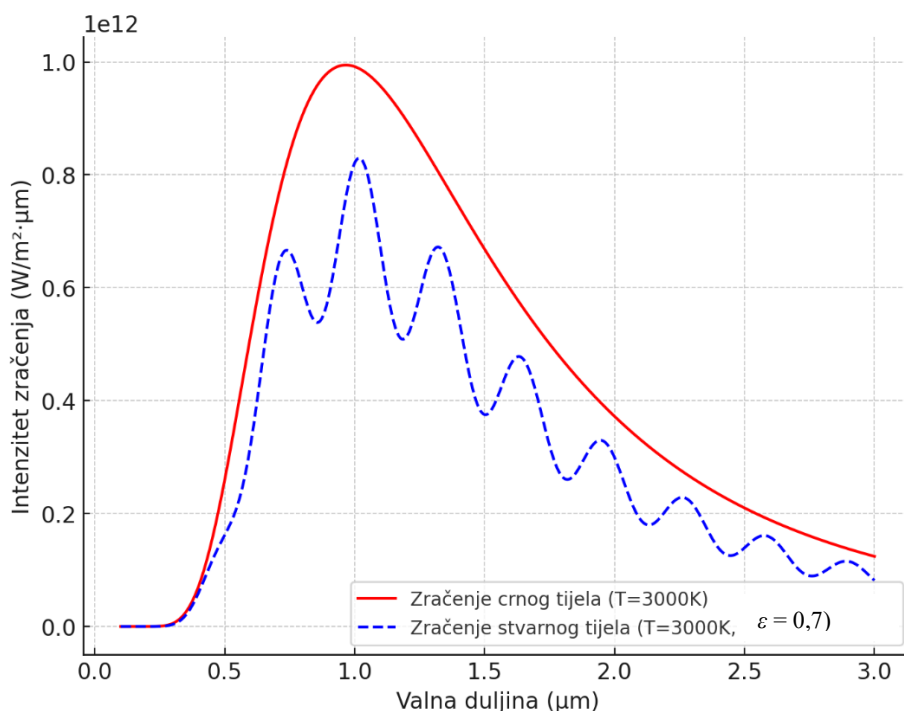
Kirchhoffov zakon govori da materijal koji dobro apsorbira zračenje na određenoj valnoj duljini također dobro emitira zračenje na toj valnoj duljini. Kada je temperatura tijela konstantna, tj. kada je ono u toplinskoj ravnoteži s okolinom (stacionarno stanje), količina energije koju apsorbira jednaka je količini energije koju emitira, tj. $\varepsilon = a$, pa za tanke i prozirne predmete vrijedi jednadžba (7).

$$\varepsilon = 1 - r - \tau \quad (7)$$

dok za neprozirne i debele predmete ($\tau = 0$) vrijedi jednažba (8):

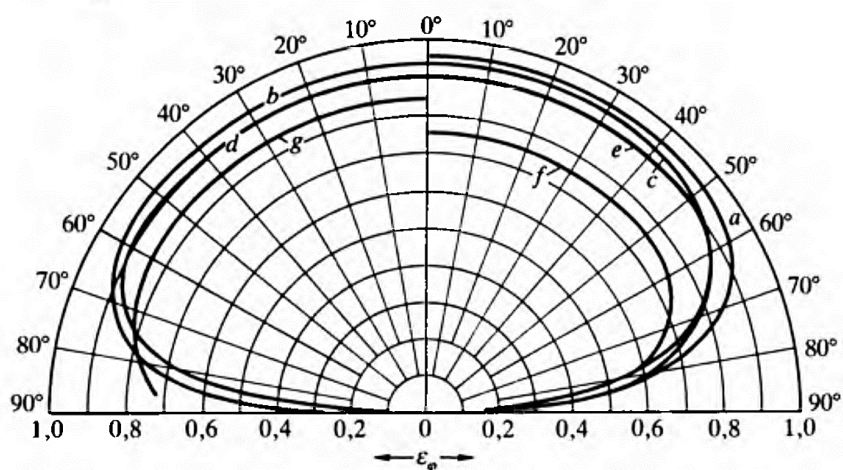
$$\varepsilon = 1 - r \quad (8)$$

Idealno crno tijelo, s $a = \varepsilon = 1$, maksimalno apsorbira i emitira zračenje [7][8].



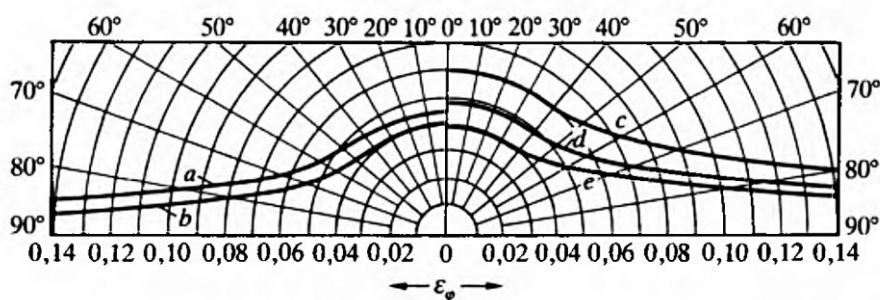
Slika 5. Usporedba odstupanja intenziteta površinske emisije zračenja stvarnog tijela (plavo) od crnog tijela (crveno) za istu temperaturu (3000 K)

Stvarna tijela imaju neuniformno zračenje, za razliku od crnog tijela za koje se smatra da zrači uniformno. Različiti materijali i različite površinske obrade materijala, tj. različiti intenziteti hrapavosti mogu bitno promijeniti kut i iznos emisijskog faktora zračenja određenog tijela. Primjerice, emisijski faktor za površine nemetala poprimat će vrijednosti bliže 1, a za čiste metalne površine emisijski faktor bit će bliže 0. Na slici 6. mogu se vidjeti različiti iznosi emisijskih faktora nemetala i metala, u ovisnosti o kutu odklona φ mjerenom od vektora normale na površinu materijala [9].



a) vlažni led, b) drvo, c) staklo, d) papir e) ilovača, f) bakreni oksid, g) hrapavi korund

a)



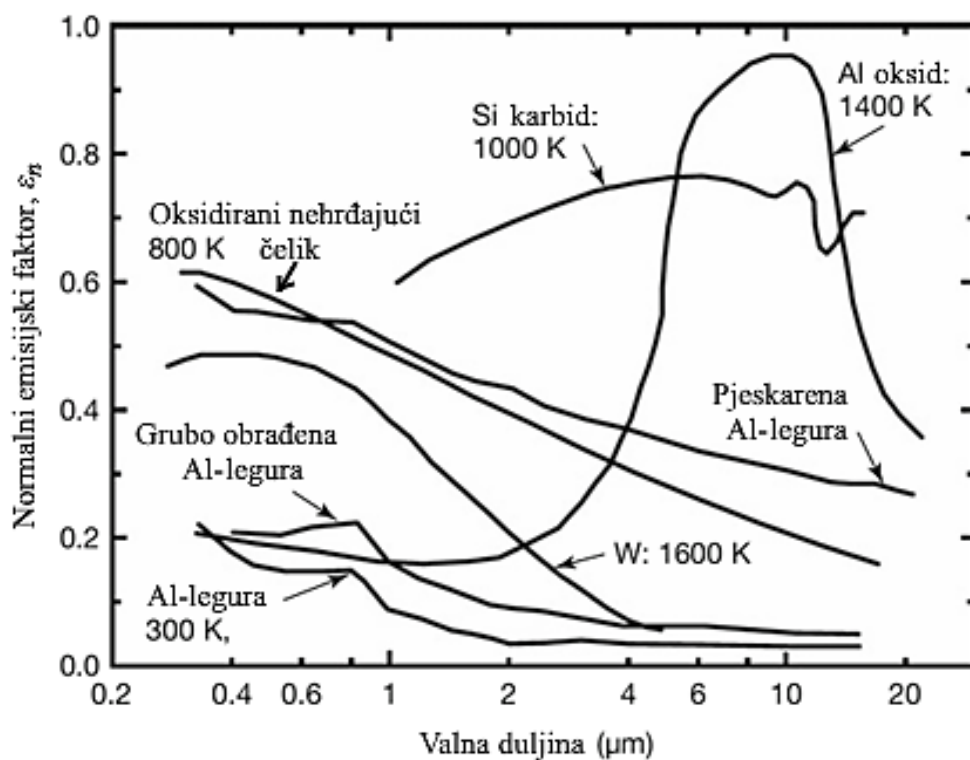
a) polirani nikal, b) nepolirani nikal, c) krom, d) mangan, e) aluminij

b)

Slika 6. Emisijski faktori ovisni o kutu otklona zrake od normale na površinu: a) nemetala, b) metala [9]

Dakle, može se zaključiti da će emisijski faktor zračenja biti ovisan o slijedećim utjecajnim čimbenicima:

- Temperaturi materijala, slika 4,
- Stanju površine (hrapavost, nečistoće, površinska zaštita, oksidi), slika 7
- Valnoj duljini zračenja, slika 5,
- Kutu zračenja (difuzno ili usmjereno zračenje), slika 6,
- Vrsti materijala (kemijski sastav, metali, nemetali), slika 7,
- Debljini materijala te
- Okolišnim uvjetima (npr. prisutnost plinova može utjecati na način na koji površina emitira zračenje)



Slika 7. Ovisnost normalnog emisijskog faktora zračenja o valnoj duljini za različite materijale [10]

U tablici 1. mogu se vidjeti različite vrijednosti emisijskog faktora površinskog zračenja u smjeru normale (ϵ_n) za različite tvari, stanja površine i njihove temperature. Uočava se da će hrapavije površine pri višim temperaturama poprimati najveće iznose faktora emisijskog zračenja u smjeru normale na površinu [9].

Tablica 1. Vrijednosti emisijskog faktora površinskog zračenja u smjeru normale, ε_n [9]

<i>Tvar</i>	<i>Stanje površine</i>	$\vartheta, ^\circ\text{C}$	ε_n
Aluminij	valjana	170	0,039
	sjajno polirana	225	0,039
Bakar	polirana	20	0,030
	slabo zagasita	20	0,037
	oksidirana	130	0,76
Mangan	glatko valjana	120	0,048
Mjed	polirana	20	0,050
	zagasita	20	0,222
Nikal	polirana	230	0,070
	poniklani željezni lim	20	0,054...0,060
Zlato	polirana	20	0,020...0,030
	polirana	225	0,018
Željezo	sjajno brušena	20	0,24
	crveno zahrđala	20	0,61
	lijevana	100	0,80
	jako zahrđala	20	0,85
Drvo	glatka	20	0,80...0,90
Glina	pečena	70	0,91
Led	glatka, voda	0	0,96
	sirova ledena kora	0	0,98
Opeka	sirova, neožbukana	20	0,93
Papir	–	20	0,80...0,90
Porculan	ocakljena	20	0,92
Silikatni kamen	hrapava	1000	0,80
Staklo	glatka	20	0,94
Guma	–	–	0,95
Ugljen	brušena	620	0,79

3. METODE BESKONTAKTNOG MJERENJA TEMPERATURE

3.1. Osnovna podjela beskontaktnih metoda

Beskontaktnim metodama mjerenja temperature moguće je precizno određivanje toplinskih vrijednosti bez fizičkog dodira s objektom. Jedna od najčešće korištenih metoda je infracrvena termografija (engl. IRT; *Infrared Thermography*), koja koristi infracrvene kamere (hrv. IC; *Infracrveno*, engl. IR; *Infrared*) za mjerenje emisijskog faktora toplinskog zračenja s veće površine objekta. Ova je metoda učinkovita za određivanje temperature tijela i detektiranje temperaturnih nepravilnosti i distribucije u industrijskim procesima, medicini i građevinarstvu. Druga često korištena metoda je pirometrija, koja koristi uređaje pirometre za mjerenje temperature preko lokalno emitiranog infracrvenog zračenja. Pirometri se često koriste u industrijskim primjenama, na primjer u metalurgiji, gdje je uslijed visokih temperatura onemogućena upotreba kontaktnih senzora. Pirometrija je jednostavan, brz i pouzdan postupak, ali zahtijeva poznavanje emisijskog faktora materijala kako bi se osigurala točnost mjerenja. Poput termalnih kamera, pirometri ili infracrveni termometri mjere temperaturu analizom infracrvenog zračenja emitiranog s površine objekta. Međutim, pirometri mjere temperaturu na jednom točno određenom mjestu, umjesto na cijelom području te ne generiraju sliku (termogram) koja prikazuje vruće ili hladne točke na objektu, za razliku od termografskih kamera. Na slici 8. može se vidjeti primjer usporedbe praktičnih izvedbi 1.a) infracrvene termalne kamere i 1.b) infracrvenog pirometra [10].



Slika 8. Praktične izvedbe a) infracrvene termalne kamere tvrtke ©Teledyne FLIR LLC i b) infracrvenog pirometra tvrtke OMEGA™ Engineering [11],[12]

Ove su metode dobar izbor za brza i precizna mjerenja u znanstvenim istraživanjima, industriji i u ekstremnim uvjetima, kao što su visoke temperature, opasni uvjeti u ispitivanju materijala ili teško dostupna mjesta.

Spektralni režimi su dijelovi elektromagnetskog spektra u kojima se vrši detekcija infracrvenog zračenja. Ovi režimi odnose se na specifične intervale vrijednosti valnih duljina zračenja koje pirometri i termalne kamere mogu detektirati, kao na primjer [13]:

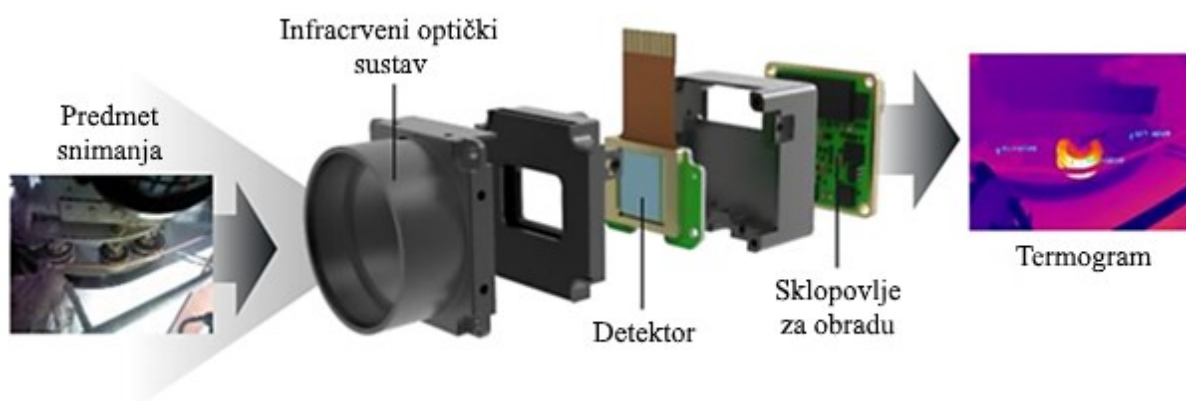
- ultraljubičasta/vidljiva svjetlost (engl. UV/VIS; *ultraviolet/visible spectrum*)
- blisko infracrveno zračenje (engl. NIR; *Near-Infrared*) – 780...3000 nm
- srednje infracrveno zračenje (engl. MIR; *Mid-Infrared*) – 3000...5000 nm
- daleko infracrveno zračenje (engl. FIR; *Far-Infrared*) – 5000...10000 nm

Zbog različitih svojstava materijala i primjena, odabir spektralnog režima ovisi o području spektra elektromagnetskog zračenja koje se mjeri.

3.2. Infracrvena termografija

Područje infracrvene termografije (toplinskog snimanja) brzo se razvija zbog velikog napretka u posljednja tri desetljeća u mikroelektronici, dizajnu infracrvenih detektora, elektronici i računalnim znanostima. Termografija se danas primjenjuje u znanstvenim istraživanjima, razvoju proizvoda i industriji. Industrijsku primjenu nalazi u nerazornim ispitivanjima (engl. NDT; *Non-Destructive Testing*), praćenju stanja i održavanju opreme. Povećana potreba i ubrzan razvoj doveli su do termalnih kamera dostupnih po nižim cijenama, te se time omogućila šira primjena, npr. za analizu učinkovitosti toplinske izolacije zgrada, grijanja i električnih komponenti u domaćinstvima [10].

Infracrvena kamera radi na principu detekcije infracrvenog zračenja koje emitiraju objekti. Kamera koristi leću za fokusiranje IC zraka na detektor osjetljiv na toplinsko zračenje, koji mjeri količinu zračenja i pretvara ga u električni signal (ADP; *Analogno-digitalna pretvorba*). Digitalni signal se analizira u mikroprocesoru kamere, a na zaslonu se zatim prikazuje termogram gdje različite boje predstavljaju različite temperature, čime se postiže identifikacija toplijih (bijela, žuta, narančasta, crvena boja) i hladnijih (plava, ljubičasta, crna) područja na objektu, slika 9 [14].



Slika 9. Dijelovi infracrvene kamere [14]

Kada infracrvena kamera obavlja snimanje objekta unutar nekog okoliša ispunjenim fluidom, npr. zrakom, do leća kamere dolazi nekoliko različitih izvora zračenja, slika 10 [2],[3]:

- 1) **Infracrveno emitirano zračenje snimanog objekta**, tj. gustoća vlastitog emitiranog zračenja „necrnog“ tijela, jednadžba (9):

$$E_{ob} = \varepsilon_{ob} E_c(T_{ob}) \quad (9)$$

Gdje su

E_{ob}	W/m ²	Gustoća vlastitog emitiranog zračenja objekta snimanja
ε_{ob}	–	Emisijski faktor zračenja objekta snimanja; $0 < \varepsilon_{ob} < 1$
T_{ob}	K	Temperatura snimanog objekta

- 2) **Infracrveno reflektirano zračenje okoliša oko snimanog objekta**, tj. gustoća reflektiranog zračenja „necrnog“ tijela, jednadžba (10):

$$E_r = r E_c(T_{ok}) \quad (10)$$

Pri čemu su

E_r	W/m ²	Gustoća reflektiranog zračenja
r	–	Faktor refleksije (omjer upadnog i reflektiranog zračenja); $0 < r < 1$
T_{ok}	K	Temperatura okoliša (zraka)

3) **Infracrveno emitirano zračenje okolišnog fluida (zraka)** – kod vrlo visokih temperatura i troatomnih te višeatomnih plinova zračenje plinova bitno utječe na izmjenu topline i ne može se zanemariti kao što se to u praksi primjenjuje kod proračuna zračenja za jednoatomne i dvoatomne plinova na nižim, sobnim temperaturama, zbog čega je bitno u proračunu ukupnog zračenja dodati i zračenje okolišnog fluida, tj. zraka, jednadžba (11):

$$E_{zr} = \varepsilon_{zr} E_c(T_{ok}) \quad (11)$$

Kada su

E_{zr}	W/m ²	Gustoća emitiranog zračenja okolišnog fluida (zraka)
ε_{zr}	–	Emisijski faktor zračenja okolišnog fluida (zraka); $0 < \varepsilon_{zr} < 1$
T_{ok}	K	Temperatura okoliša (zraka)

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, faktor transmisije τ obuhvaća ukupnu količinu zračenja koje prolazi kroz materijal, ali uzimajući u obzir moguće gubitke uslijed apsorpcije ili refleksije. Transmisija može biti parcijalna, jer dio zračenja može biti apsorbiran ili reflektiran od strane materijala. Prema tome, infracrveno emitirano i reflektirano zračenje snimanog objekta može biti umanjeno za faktor transmisije. Ukupna energija zračenja u slučaju snimanja jednog objekta okruženog zrakom koju registriraju leće infracrvene kamere je suma svih prethodno navedenih zračenja, uz korekciju faktora transmisije, jednadžba (12):

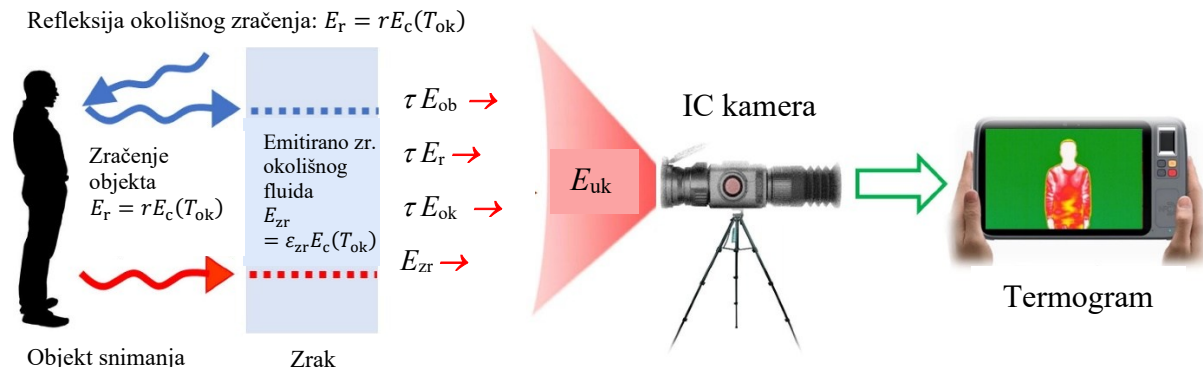
$$E_{uk} = \tau E_{ob} + E_{zr} + \tau E_r \quad (12)$$

Kada bi primarni objekt snimanja bio okružen okolnim predmetima sa temperaturom iznad apsolutne nule, energija zračenja tih tijela bi također utjecala na ukupnu energiju zračenja prilikom snimanja infracrvenom kamerom. U tom slučaju, u jednadžbu (12) dodaje se član koji označava gustoću emitiranog zračenja okolišnih predmeta (E_{ok}), također umanjenog za faktor transmisije pa ona poprima novi oblik (13) [15]:

$$E_{uk} = \tau E_{ob} + E_{zr} + \tau E_r + \tau E_{ok} \quad (13)$$

Ili pojednostavljeno (14):

$$E_{uk} = \tau(E_{ob} + E_{ok} + E_r) + E_{zr} \quad (14)$$



Slika 10. Princip rada infracrvene kamere [3]

3.2.1. *Mogući izvori pogrešaka u primjeni infracrvene termografije*

Kako bi točnost mjerenja infracrvenom kamerom bila na najvišoj razini, bitno je poznavati izvore potencijalnih pogrešaka koje se mogu javiti pri mjerenju i nastojati ih minimizirati. Literaturni izvori [10],[16] nude pregled mogućih izvora pogrešaka u primjeni infracrvene termografije koji mogu utjecati na točnost izlaznih podataka. One se mogu podijeliti prema mjestu i načinu nastanka na:

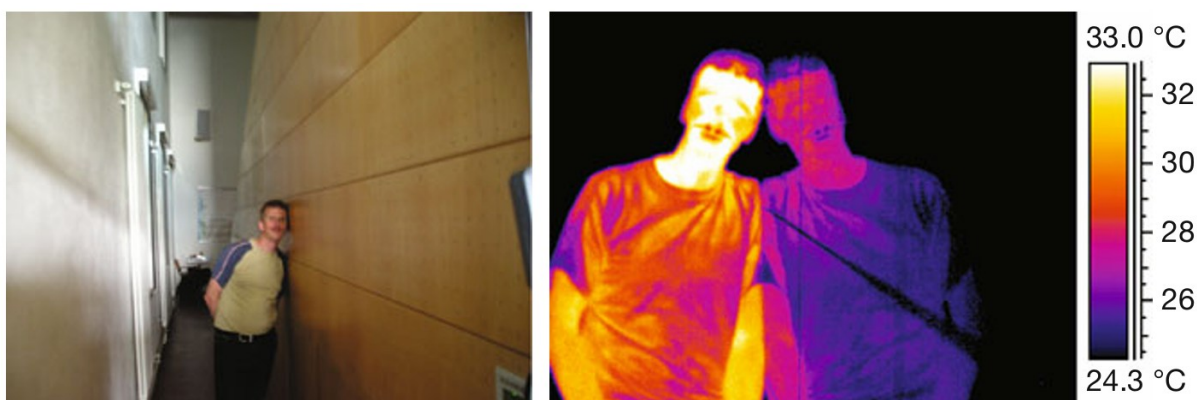
- metodološke pogreške,
- pogreške kalibracije te
- pogreške u elektronici prilikom A/D konverzije signala

1) **Metodološke pogreške** mogu nastati zbog nepravilnog određivanja emisijskog faktora snimanog objekta (ϵ_{ob}), utjecaja ambijentalnog zračenja (izravnog i reflektiranog), pogrešne procjene atmosferske transmisije i radijacije, te šuma detektora. Pogreška u procjeni emisijskog faktora posebno je izražena kada se na termogramu prikazuje više objekata različitih emisijskih faktora. U modernim sustavima moguće je zasebno odrediti emisijski faktor zračenja za pojedina područja na termogramu, čime se smanjuje utjecaj nehomogenosti površine. Međutim, potpuna eliminacija utjecaja emisije zračenja okolnih objekata nije moguća, ali se može ublažiti primjenom višestrukih mjerenja iz različitih kutova i bojenjem površine mat crnom bojom ili ovlaživanjem, što je jednostavno u laboratorijskim uvjetima, ali teško primjenjivo u industriji. U praksi se često sjajne ispitivane površine prekrivaju mat ljepljivom trakom kako bi se infracrvenom termalnom kamerom moglo točnije očitati emisijski faktor.

Utjecaj zračenja iz okoline raste kad je emisijski faktor objekta nizak, a vanjski izvori zračenja, poput Sunca, mogu dodatno smanjiti točnost mjerenja. Sunčevo zračenje, kao zračenje crnog tijela, ovisi o atmosferskim uvjetima i može otežati mjerenje u vanjskim uvjetima, osobito kada

objekt reflektira zračenje neba, okolnih zgrada i tla – to se može uočiti na termogramima gdje su svi snimani objekti slične boje, iako su od različitih materijala i različitih emisijskih faktora.

Na slici 11 b) prikazana su netočna očitavanja infracrvene kamere, uzrokovana refleksijom zračenja s površine čovjeka na glatku, lakiranu drvenu podlogu. U praktičnoj primjeni često je nemoguće potpuno eliminirati pogreške u očitavanju infracrvenim kamerama kao i na samom mjestu ispitivanja, no primjena teorijskih znanja može pomoći pri ispravljanju takvih pogrešaka tijekom naknadne analize.



Slika 11. Primjer toplinskih refleksija od čovjeka koji stoji blizu površine od lakiranog drvna
a) fotografija, b) termogram [10]

2) **Pogreške kalibracije** infracrvenih kamera mogu nastati zbog:

- razlika u vlastitom zračenju optičkih komponenti kamere,
- različite udaljenosti kamere od objekta tijekom kalibracije i mjerenja,
- netočne procjene emisijskog faktora objekta tijekom kalibracije te
- ograničene točnosti referentnog standarda i broja kalibracijskih točaka.

Ove pogreške mogu značajno utjecati na točnost mjerenja temperature u stvarnim uvjetima. Za umanjivanje ovakvih vrsta pogreški, bitna je redovita kalibracija uređaja koristeći referentne materijale s poznatim emisijskim faktorima i praktične imitacije crnog tijela – što omogućuje točnija očitavanja. Kalibracija se obično provodi promatranjem najboljih dostupnih eksperimentalnih aproksimacija crnog tijela, tzv. kalibracijskih standarda crnog tijela. Nacionalni instituti koji su odgovorni za standarde (npr. u SAD-u NIST, u Njemačkoj PTB) razvili su standarde za mjerenje emisijskog faktora zračenja (npr. $\varepsilon > 0.9996$ u obliku šupljina s karakteristikama crnog tijela sa toplinskim cijevima) [17].

Također se može izravno mjeriti temperatura na nekoliko točaka površine pomoću termoparova i koristiti te podatke za kalibraciju infracrvenih slika. U ovom slučaju, bitno je osigurati dobar toplinski kontakt, uspostaviti toplinsku ravnotežu te – što je važno za male objekte – paziti da sam termoelement ne promijeni temperaturu objekta zbog provođenja topline. Koristan uvjet je da toplinski kapacitet termopara mora biti mnogo manji od kapaciteta mjerenog objekta [10].

3) Pogreške u elektronici prilikom A/D pretvorbe signala nastaju zbog sljedećih neželjenih utjecaja poput:

- šuma detektora zračenja,
- nestabilnosti sustava hlađenja (u kamerama s rashladnim sustavima u blizini detektora),
- fluktuacija u pojačanju predpojačala i/ili drugih elektroničkih sustava,
- ograničene širine pojasa detektora i/ili drugih elektroničkih komponenti te
- ograničene razlučivosti i nelinearnosti A/D pretvarača.

Ovakve pogreške su prisutne ispod 1% za ambijentalne temperature od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. U netipičnim situacijama, ova vrsta pogrešaka može doseći i do nekoliko posto te tako predstavljaju glavni izvor pogrešaka u beskontaktnim mjerenjima temperaturnih polja infracrvenim kamerama.

3.3. Pirometrija

Postoje različite vrste detektora, spektralni režimi i metode detekcije u pirometrima za precizno mjerenje temperature na daljinu. Širokopojasni pirometri detektiraju oko 90% spektra elektromagnetskog zračenja te tako pokrivaju širok temperaturni raspon od sobne temperature do nekoliko tisuća Kelvina. Takvi pirometri koriste Stefan-Boltzmannov zakon za izračun temperature na temelju emisijskog spektra. S druge strane, spektralni i *bandpass* pirometri fokusiraju se na manji dio spektra i koriste Planckov zakon za precizno mjerenje temperature, posebno u specijaliziranim primjenama gdje je potrebna visoka osjetljivost.

Spektralni pirometri se koriste u industriji gdje su materijali poput metala i plinova posebno osjetljivi na određene dijelove spektra. *Bandpass* pirometar je vrsta pirometra koja mjeri temperaturu objekta detekcijom infracrvenog zračenja unutar ograničenog spektralnog područja, odnosno unutar specifičnog raspona valnih duljina uz pomoć pojasno-propusnog filtra (engl. *bandpass filter*).

Na primjer, metalne površine mogu imati različite iznose emisijskog faktora ovisno o spektralnom režimu, pa spektralni pirometri pružaju veću točnost.

Poluvodički detektori važna su komponenta prirometara jer se oslanjaju na kristalnu rešetku i energetske razine poluvodiča za detekciju zračenja. Komercijalno dostupni pirometri pružaju mjerenje temperature s točnošću od $\pm 0,5$ °C i imaju vrijeme odziva od oko 250 ms. Ovakvi uređaji omogućuju osjetljivost na različite spektralne režime i visoku točnost mjerenja, posebno u mjerenjima objekata visokih temperatura [18],[19].

4. METODE MJERENJA EMISIJSKOG FAKTORA

Metode mjerenja emisijskog faktora zračenja površine mogu se podijeliti na analitičke i eksperimentalne. Analitičke metode upotrebljavaju fizikalne zakone poput Stefan-Boltzmannovog, Kirchhoffovog ili Planckovog zakona. Numeričke i kompjutorske simulacije također spadaju u analitičke metode jer kombiniraju različite fizikalne zakone iz više prirodnih područja kako bi se što točnije mogao opisati željeni problem te kako bi rezultati što bliži stvarnosti. Naravno, numeričke simulacije i analitičke metode ne mogu u potpunosti točno opisati stvarni problem ili dobiti potpuno točna predviđanja.

S druge strane, eksperimentalnim se metodama izravno mjere parametri zračenja pomoću kalorimetara i radiometara. Ovim metodama dobivaju se precizniji rezultati, ali zahtijevaju skupu opremu i kontrolirane uvjete. Također, prilikom eksperimentalnih ispitivanja mogu se javiti različite smetnje u okolišu ili nepravilnosti prilikom mjerenja (utjecaj čovjeka ili uređaja) koje mogu utjecati na ishod.

Za kompleksne probleme u praksi često se koristi kombinacija analitičkih i eksperimentalnih metoda, poglavito u industrijsko-znanstvenom sektoru istraživanja i razvoja (engl. R&D, *Research and Development*). Primjerice, u eksperimentalnom dijelu ovog rada korišten je softver InfraTec IRBIS zajedno s infracrvenom kamerom za fizikalno mjerenje zračenja materijala. Temperature su precizno kalibrirane pomoću kontaktnih termoparova. Na taj način su u analizi i provedbi mjerenja kombinirane analitičke metode (specijalizirani softver) s eksperimentalnim pristupima (integrirani mjerni sustav i kalibracija).

4.1. Analitičke metode

Najpoznatije i već prethodno opisane analitičke metode određivanja emisijskog faktora zračenja površine koriste Stefan-Boltzmannov (jednadžba 4), Kirchhoffov (jednadžbe 7-8) i Planckov zakon (jednadžba 1). Primjerice, norma ISO 19618:2017 opisuje metodu koja se koristi za određivanje normalnog emisijskog koeficijenta zračenja tehničke keramike koristeći referencu crnog tijela s Fourierovim infracrvenim spektrometrom (FTIR) na povišenim temperaturama. Dolje navedena analitička jednadžba (15) primjenjiva je i za proračun zračenja kod ispitivanja i drugih materijala [20].

$$\varepsilon_n = \frac{I_u - I_{ok}}{I_c - I_{ok}} \quad (15)$$

Pri čemu su

ε_n	–	Normalni emisijski faktor zračenja na definiranoj valnoj duljini λ i temperaturi T
I_u	W/m ² μm	Intenzitet infracrvenog zračenja uzorka na definiranoj valnoj duljini λ i temperaturi T
I_c	W/m ² μm	Intenzitet infracrvenog zračenja crnog tijela na definiranoj valnoj duljini λ i temperaturi T
I_{ok}	W/m ² μm	Intenzitet infracrvenog zračenja okoliša na definiranoj valnoj duljini λ i sobnoj temperaturi T_s

Pomoću specijaliziranih računalnih programa moguće je brzo i precizno odrediti spektralne karakteristike materijala te izračunati emisijski faktor zračenja prilikom ispitivanja različitih površina. Računalni programi kao što su FLIR Tools, InfraTec IRBIS, ThermoVision EXAMINE, COMSOL Multiphysics, MATLAB, SpectralCalc i ThermoCalc sposobni su provesti automatiziranu analizu prikupljenih podataka i simulaciju toplinskih svojstava tijela [21].

Sa specijaliziranim računalnim programima moguće je značajno ubrzati proces obrade podataka jer nude mogućnosti za analizu infracrvenog zračenja, usporedbu sa zračenjem crnog tijela, te izračun emisijskog faktora kroz različite spektralne domene. Uz to, računalni programi poput COMSOL Multiphysics-a i MATLAB-a sposobni su provesti napredne simulacije toplinskih i optičkih svojstava materijala na temelju fizikalnih modela, što je korisno u slučajevima gdje izravno eksperimentalno mjerenje nije moguće ili je nepraktično/neisplativo.

Računalne simulacije pomažu u predviđanju ponašanja materijala pri različitim temperaturama i uvjetima čime je moguće optimizirati svojstva materijala za specifične primjene. Uporaba navedenih programskih rješenja povećava točnost i pouzdanost rezultata i smanjuje vrijeme potrebno za složene proračune i analize u toplinskoj i spektroskopskoj karakterizaciji.

U svojoj biti, specijalizirani softveri spadaju u analitičke metode jer se oslanjaju na matematičke modele i fizikalne zakone, a ne na izravna mjerenja. Oni koriste simulacije za proračun emisijskog faktora na temelju unesenih parametara kao što su temperatura, valna duljina i optička svojstva materijala, bez fizičkog zračenja ili mjernih instrumenata.

4.2. Eksperimentalne metode

Eksperimentalne metode mogu podijeliti u tri glavne kategorije, ovisno o temeljnom fizikalnom principu koji se koristi, a one su *kalorimetrijske metode*, koje mjere jakost toplinskog toka emitiranog s površine, *radiometrijske metode*, koje izravno mjere intenzitet zračenja, i *reflektometrijske metode*, pomoću kojih se emisijski faktor zračenja može dobiti na temelju reflektiranog zračenja. Svaka od ovih metoda koristi specifične pristupe za određivanje parametara zračenja materijala u različitim uvjetima.

Dodatno, eksperimentalne metode mogu se nadalje podijeliti na *direktne* i *indirektne* metode, ovisno o načinu dobivanja rezultata. Kalorimetrijske metode izravno mjere ukupnu toplinu emitiranu s površine, dok radiometrijske metode izravno registriraju infracrveno zračenje koje materijal emitira. Stoga, navedene metode spadaju u direktne metode mjerenja emisije zračenja. Nasuprot tome, reflektometrijske metode spadaju u indirektne metode, jer zaključuju emisijski faktor putem mjerenja refleksije zračenja, uz primjenu zakona očuvanja energije, gdje se ε računa kao dopuna refleksiji (Kirchhoffov zakon). Različiti instrumenti za mjerenje emisijskog faktora dizajnirani su prema ovim načelima, koji su imaju dobre mjerne karakteristike na visokim temperaturama. Međutim, ove metode i instrumenti nisu dovoljni kada se primjenjuju na sobnoj temperaturi. U industrijskoj primjeni, a i podlozi ovog rada, uglavnom se radi o visokim ili povišenim temperaturama.

Eksperimentalne metode mogu uključivati fizikalne zakone i formule opisane u prethodnim poglavljima, uz često kombiniranje različitih pristupa tijekom mjerenja ili izvođenje analitičkih jednadžbi iz eksperimentalno dobivenih podataka za specifične sustave. Glavna značajka ovih metoda je prilagodljivost – u eksperimentalnim istraživanjima često se koristi improvizirana mjerna oprema ili se postojeća oprema modificira kako bi zadovoljila specifične zahtjeve pojedinog istraživačkog slučaja. Zanimanje za eksperimentalne metode proučavanja pojave zračenja doseglo je vrhunac 1960-ih godina tijekom ubrzanog razvoja svemirske industrije. Isto zanimanje je 1970-ih i 1980-ih godina oslabilo, ali je krajem 20. i početkom 21. stoljeća ponovno poraslo zbog razvoja naprednijih inženjerskih materijala koji se koriste na vrlo visokim temperaturama. Iako se tehnike mjerenja razlikuju, u većini ispitivanja javljaju se slični optički instrumenti [1],[22],[23].

4.2.1. *Eksperimentalno dobivene analitičke jednadžbe*

Također, u proračunima emisijskog faktora moguće je koristiti i analitičke jednadžbe dobivene iz eksperimentalnih podataka. To znači da su jednadžbe izrađene temeljem stvarnih mjerenja, gdje su eksperimentalno prikupljeni podaci o emisijskom zračenju analizirani i modelirani u obliku matematičkih jednadžbi. Primjer daje literatura [24] gdje je opisana eksperimentalno dobivena analitička formula (16) u kojoj se koristi omjer $\varepsilon/\varepsilon_n$ kojim se može vrlo precizno procijeniti ukupan emisijski faktor metalnih materijala na temelju normalnog emisijskog faktora, koji je mnogo lakši za mjerenje u praksi.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} = 1.3217 - 1.8766 \cdot \varepsilon_n + 4.6586 \cdot \varepsilon_n^2 - 5.8349 \cdot \varepsilon_n^3 + 2.7406 \cdot \varepsilon_n^4 \quad (16)$$

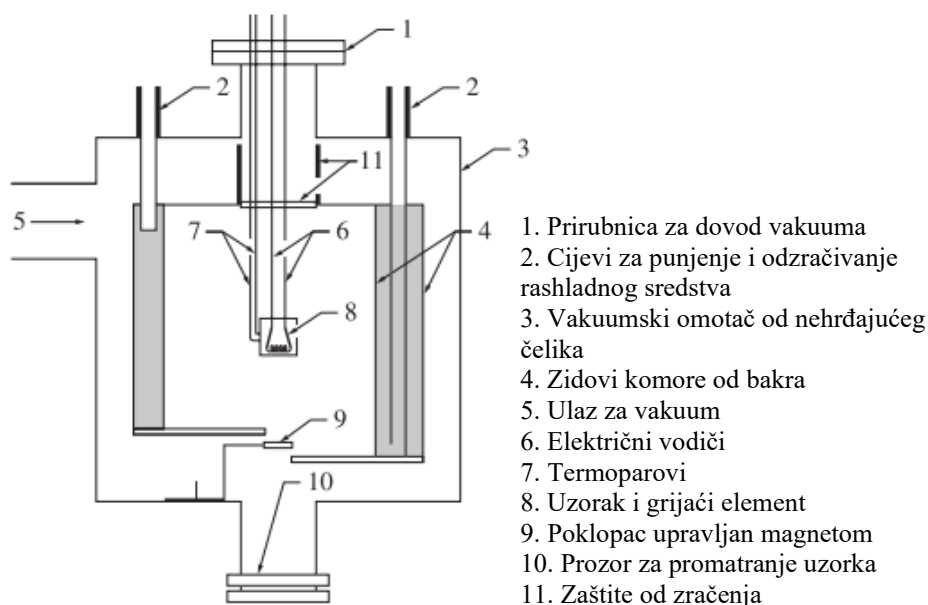
4.2.2. *Kalorimetrijske metode*

Kalorimetrijske metode mjerenja emisijskog faktora koriste se za izravno mjerenje toplinskog zračenja s površine materijala. Njima se mjeri ukupan emisijski faktor pomoću mjerenja topline prenesene sa zagrijanog uzorka na njegovu okolinu pod vakuumom. Najprije slijedi zagrijavanje uzorka, često pomoću kontroliranih izvora topline, dok se detaljno prate njegove promjene temperature i toplinski tok. Ovisno o vrsti kalorimetrije – stacionarnoj ili tranzijentnoj (nestacionarnoj) – uzorak može biti zagrijan na stabilnu temperaturu ili kroz dinamički temperaturni profil. Iz izmjerenih podataka o toplinskom toku emisijski faktor se računa usporedbom sa zračenjem crnog tijela, jednadžba (5).

Kalorimetrijske metode su korisne za ispitivanje materijala s visokim emisijskim faktorom, uz preciznu kontrolu uvjeta okoline jer su osjetljive na gubitke topline i promjene u atmosferi. Osim toga, česta je upotreba vakuumskih komora za minimiziranje konvekcijskih gubitaka, čime se dodatno poboljšava preciznost mjerenja [25].

Metoda kalorimetrijskog mjerenja emisijskog faktora ima mnogo prednosti, posebno mogućnost kontinuiranog praćenja vrijednosti emisijskog faktora unutar širokog temperaturnog raspona, od niskih do sobne temperature. Jednostavna priprema uzorka i upravljanja instrumentima, kao i mogućnost praćenja u stvarnom vremenu glavne su prednosti ove metode. Ipak, metoda ima ograničenja, poput nesigurnosti zbog veličine uzorka, preciznosti termometra i kontrole snage zagrijavanja. Također, vremenski je zahtjevna zbog potrebne dugotrajne pripreme i provođenja mjerenja [26].

Općenito, kalorimetrijski uređaj za mjerenje emisijskog faktora sastoji se od vakuumske komore s bakrenim zidovima (ili od nekog drugog metala visoke provodnosti) koja smanjuje toplinske gubitke konvekcijom, a radijacijski štitnici dodatno izoliraju uzorak – oni reflektiraju zračenje natrag prema uzorku i tako smanjuju utjecaj vanjskih izvora topline, čime se izolira mjerenje samo na toplinsko zračenje koje dolazi iz uzorka. Uzorak se zagrijava grijačem, dok termoparovi registriraju njegovu temperaturu. Magnetno upravljani zatvarač omogućuje kontrolirano izlaganje uzorka tijekom mjerenja. Vakuum i rashladne cijevi osiguravaju stabilne uvjete unutar komore. Emisijski faktor se izračunava na temelju toplinskog zračenja koje emitira uzorak, pri čemu se precizna kalibracija postiže kontroliranjem temperature i energetske gubitaka. Svi kalorimetrijski uređaji funkcioniraju na istom principu i često sadrže iste ili slične konstrukcijske elemente. Primjer izvedbe tipičnog kalorimetrijskog uređaja prikazuje slika 12 [27],[1].



Slika 12. Tipična izvedba kalorimetrijskog uređaja [1]

4.2.3. Radiometrijske metode

Radiometrija proučava mjerenje elektromagnetskog zračenja, posebno unutar IC spektra. Tipična mjerna jedinica za slikovnu radiometriju je radijancija, koja se izražava u jedinicama W/cm^2sr . Kratica „sr“ označava steradian; bezdimenzionalni geometrijski omjer koji izražava prostorni (konusni) kut koji zatvara dio površine sfere ekvivalentan kvadratu radijusa. Jednostavnije, termografija se može shvatiti kao „koliko je vruć“ objekt, dok se radiometrija

odnosi na „koliko energije“ objekt emitira. IC kamere inherentno mjere upadno zračenje, a ne temperaturu, ali termografija (određivanje temperature objekta iz informacija o njegovu zračenju) proizlazi iz radijancije.

U praksi, kod radiometrijskih metoda, uzorak se zagrijava na određenu temperaturu, a zatim se infracrveni detektor koristi za snimanje količine emitirane energije. Na temelju tih podataka i poznate temperature izračunava se emisijski faktor površine uzorka. Prednost ovih metoda jesu precizna mjerenja, ali uz osiguravanje kontroliranih uvjeta, poput vakuuma, kako bi se smanjili toplinski gubici i postigla što veća točnost. Infracrvena termografija opisana u prijašnjem poglavlju bazira se na radiometrijskim metodama mjerenja emisijskog faktora zračenja.

Tablica 2 nudi sažeti pregled važnih radiometrijskih veličina koje se javljaju u radiometrijskim metodama [10],[28].

Tablica 2. Pregled radiometrijskih veličina [10],[28]

Naziv	Simbol	Mjerna jedinica	Definicija
Tok energije	Φ	W	Emisija energije po jedinici vremena u hemisferi.
Izlaznost	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	W/m ²	Snaga po jedinici površine emitiranu s površine u okolinu, gdje je dA diferencijalna površina koja emitira.
Iradijancija	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	W/m ²	Snaga po jedinici površine primljena na površinu iz hemisfere, gdje je dA površina koja prima zračenje.
Radijantni intenzitet	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	W/sr	Radijantna snaga emitirana po jedinici prostornog kuta, gdje je dΩ prostorni kut.
Radijancija	$L = \frac{d^2\Phi}{\cos \delta d\Omega dA}$	W/cm ² sr	Radijantna snaga emitirana po jedinici površine i po jedinici prostornog kuta, gdje je δ kut između vektora smjera mjerenja i normale na površinu.
Spektralna gustoća	$X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda}$	μm ⁻¹	Spektralna gustoća bilo koje radijantne veličine X u funkciji valne duljine λ.

Ukratko, emisijski faktor izmjeren radiometrijskim uređajima određuje se usporedbom izmjerene radiometrijske veličine uzorka s referentnom veličinom (imitacije) crnog tijela na istoj temperaturi, na primjer poput jednadžbe (5) gdje se emisijski faktor zračenja odredio omjerom energije zračenja koju emitira stvarno tijelo sa energijom zračenja crnog tijela. Izbor radiometrijske veličine ovisi o vrsti mjerenja (usmjereno, spektralno ili ukupno zračenje) i dostupnoj opremi.

4.2.4. Reflektometrijske metode

Svim reflektometrijskim metodama zajednička je primjena Kirchoffovog zakona za indirektno određivanje emisijskog faktora zračenja površine. Literatura [29] nudi primjer uporabe reflektometrijske metode za određivanje emisijskog faktora silicijevih poluvodičkih pločica (engl. *wafers*) prilikom provođenja RTP metode (engl. *Rapid Thermal Processing*), tj. „brze toplinske obrade“ materijala. RTP je metoda zastupljena u proizvodnji poluvodiča koja brzo zagrijava i hladi materijale na visokim temperaturama kako bi omogućila preciznu kontrolu toplinskih procesa za modifikaciju strukture materijala, poput difuzije i žarenja.

Reflektometrijske metode imaju dva glavna ograničenja koja treba uzeti u obzir kako bi se točno moglo ekstrapolirati mjerenja emisijskog faktora na višim temperaturama iz mjerenja refleksije na sobnoj temperaturi. Prvo, uzorak mora biti dovoljno neproziran pri sobnoj temperaturi, tj. ne smije imati transmisiju kroz podlogu. Drugo, podloga i potencijalne prevlake moraju imati poznatu ili malu temperaturnu ovisnost. Uvjet poznate temperaturne ovisnosti teže je predvidjeti, stoga je kao prvi eksperiment ispitivana izravna korelacija između refleksije i emisije, ignorirajući potencijalnu temperaturnu ovisnost. U eksperimentu opisanom u literaturi [29] odabrano je nekoliko pločica s različitim emisijskim faktorima. Vrijednosti refleksije mjerene su pomoću reflektometra, a emisijski faktori su mjereni u RTP komori na približno 1100 °C. Emisijski faktor je u ovom slučaju dobiven primjenom Kirchoffovog zakona ($1 - r$) te kalibracijom mjerenja emisijskih faktora na najviše i najniže vrijednosti refleksije pločica.

Drugim riječima, najviša izmjerena refleksija postavljena je kao referentna za najniži emisijski faktor, a najniža refleksija kao referentna za najviši emisijski faktor. Na taj način, sve druge vrijednosti faktora refleksije mogu se točno interpretirati u smislu emisijskog faktora, čime se postiže veća preciznost.

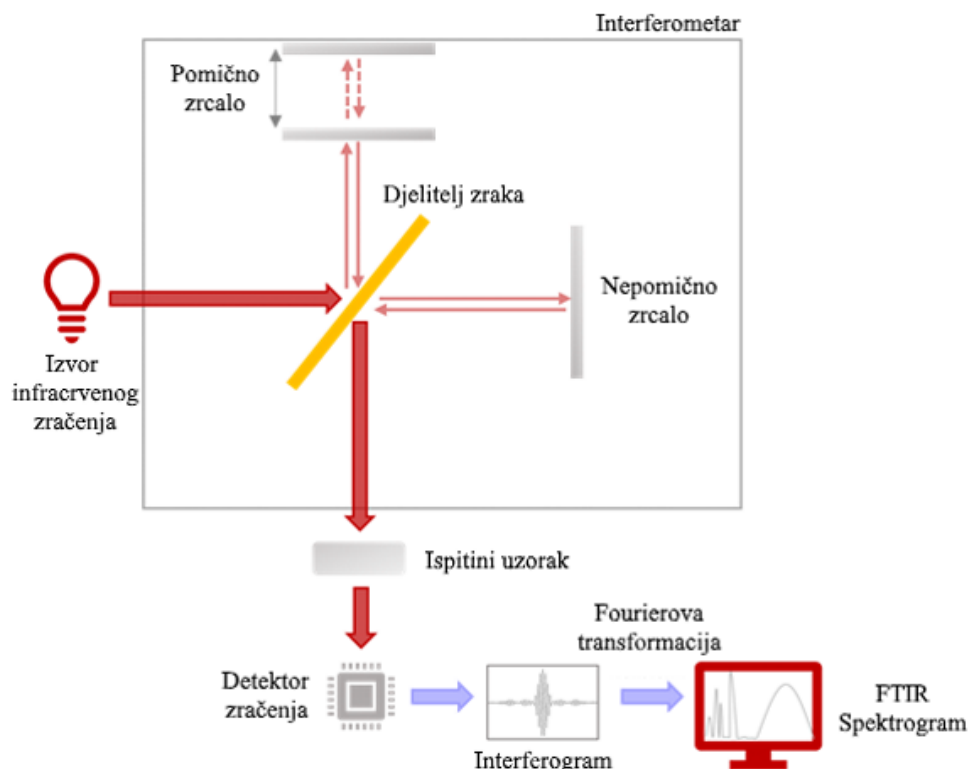
4.2.4.1. FTIR analiza

FTIR (engl. *Fourier-Transform Infrared*) analizom također je moguće indirektno odrediti emisijski faktor zračenja te spada u reflektometrijske metode. Takva se metoda u praktičnoj primjeni ponajprije koristi za identifikaciju kemijskih spojeva i proučavanje molekularne strukture pomoću infracrvenog zračenja. FTIR analiza ima vrlo široku primjenu, jer nudi proučavanje spektroskopskih svojstava materijala u svim fizičkim stanjima – čvrstom, tekućem i plinovitom.

Analizira se apsorpcija, odnosno transmisija infracrvenog zračenja u analiziranoj tvari ili materijalu te se tako dobivaju informacije o kemijskim vezama i vibracijskim stanjima molekula. Pomoću ovih podataka (spektralnih informacija) moguće je primijeniti Kirchhoffov zakon za određivanje emisijskog faktora.

FTIR uređaj koristi Fourierovu transformaciju za pretvaranje apsorbiranih podataka u spektralni zapis, gdje se prikazuje apsorpcija energije u ovisnosti o valnim duljinama ili frekvencijama. Emisijski faktor zračenja površine može se odrediti pomoću FTIR spektroskopije analizom spektra emitiranog zračenja s površine uzorka poznate temperature.

FTIR spektrometar koristi interferometar s dva snopa koji dijeli infracrveno svjetlo na dvije putanje pomoću djelitelja snopa. Jedan snop reflektira se od fiksnog zrcala, a drugi od pokretnog, čime se stvara razlika u duljini putanje. Ova razlika uzrokuje interferenciju snopova, što detektor bilježi kao interferogram u vremenskoj domeni. Fourierova transformacija zatim pretvara ovaj interferogram u frekvencijsku domenu za dobivanje IR spektra. Ovaj sustav sastoji se od izvora zračenja, razdjelnika snopa (engl. *beamsplitter*), pomičnog i nepomičnog zrcala te fotodetektora, slika 13.



Slika 13. Princip rada i komponente FTIR spektroskopije [30]

Uzorak se obično postavlja ispred detektora. Kada monokromatsko infracrveno zračenje koje je emitirano iz izvora dođe do razdjelnika snopa, koji je u osnovi djelomično prozirno zrcalo, tada dio zračenja prolazi kroz razdjelnik dok se drugi dio reflektira. Ove dvije zrake zatim dopiju do dva zrcala (jedno pomično i drugo fiksno) gdje se reflektiraju natrag prema razdjelniku. U razdjelniku se obje zrake ponovno dijele što uzrokuje da dio zračenja bude reflektiran od fiksnog i pokretnog zrcala rekombinira i prolazi kroz uzorak u detektor. Međutim, drugi dio zračenja koji se reflektira od zrcala vraća se IC izvoru zračenja.

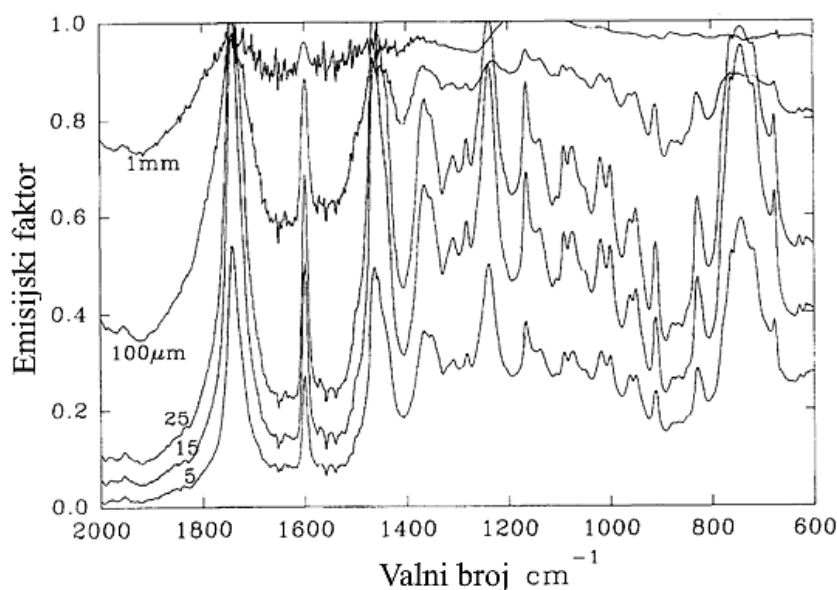
Kada su oba zrcala postavljena na jednakoj udaljenosti od razdjelnika to uzrokuje da dvije zrake koje dopiru do detektora budu u istoj fazi, tj. javlja se konstruktivna interferencija. U ovoj točki zračenje koje dopire do detektora ima najveći intenzitet. Međutim, ako se jedno od zrcala pomakne za malu udaljenost, intenzitet zračenja koje dopire do detektora naglo opada. To je zato što dvije rekombinirane zrake više nisu u istoj fazi i međusobno se poništavaju, odnosno događa se destruktivna interferencija. Dakle, da bi se provelo mjerenje zrcalo se pomiče od točke A do točke B i kao rezultat dobiva se interferogram mjerenjem različitih vrijednosti intenziteta zračenja koje dolazi do detektora. Taj se interferogram zatim može pretvoriti u spektar kroz proces poznat kao Fourierova transformacija.

Dakle, da bi se proučavao supstrat, prvo se snima interferogram pozadine, a zatim interferogram zračenja koje je prošlo kroz uzorak. Ti se intrferogrami zatim pretvaraju u spektre i kombiniraju kako bi se vidjelo koje je valne duljine zračenje apsorbirao supstrat. Interferogram pozadine snima se bez uzorka kako bi se zabilježili svi signali iz okoline i uređaja, poput zračenja razdjelnika snopa ili detektora. Ovaj interferogram predstavlja „pozadinski šum“ koji se kasnije oduzima kako bi mjerenja bila preciznija [31].

Literatura [8] opisuje određivanje emisijskog faktora zračenja površine polimernih materijala (EPDM, PMMA, PAN, PA, PVC, PS) prilikom njihove toplinske razgradnje koristeći FTIR emisijsku spektroskopiju, pri čemu su se prikupljeni podatci referencirali s idealnim crnim tijelom (Viton guma, $\varepsilon \approx 0,95$). Na ovaj način, emisija uzorka mjerena je u odnosu na emisiju crnog tijela i referencu platine, koja je imala vrlo nizak emisijski faktor. FTIR uređaji i oprema poput ogledala, interferometra i detektora mogu emitirati infracrveno zračenje zbog vlastite temperature te ovakva pozadinska emisija može utjecati na ukupni rezultat ako nije pravilno identificirana i uklonjena. Platina je dobar referentni materijal za ovu svrhu jer se pomoću njega može mjeriti ukupno pozadinsko emisijsko zračenje uređaja bez ometanja stvarnog zračenja iz uzorka.

Slika 14. prikazuje rezultate nakon kalibracije podataka o emisijskom faktoru u odnosu na crno tijelo i uzorak od platine. Različite linije na dijagramu predstavljaju emisijske spektre uzoraka različitih debljina (1 mm, 100 μm , 25 μm , 15 μm i 5 μm), gdje deblji uzorci (npr. 1 mm) pokazuju veće emisijske faktore na većim valnim brojevima, dok tanji uzorci pokazuju niži emisijski faktor. Vrlo izraženi vrhovi (engl. *peaks*) između 1000 cm^{-1} i 1800 cm^{-1} odgovaraju vibracijskim karakteristikama organskog materijala (XLPO; umreženi poliolefin), poput vibracija unutar funkcionalnih skupina (npr. C-H, C-O veze). S povećanjem debljine uzorka, emisijski faktor se povećava na nekim spektralnim područjima, što je osobito vidljivo u područjima većih valnih brojeva.

Ovaj efekt ukazuje na to da deblji uzorci emitiraju više zračenja u određenim spektralnim područjima, dok tanji uzorci imaju ograničenu sposobnost apsorpcije i ponovnog emitiranja infracrvenog zračenja.



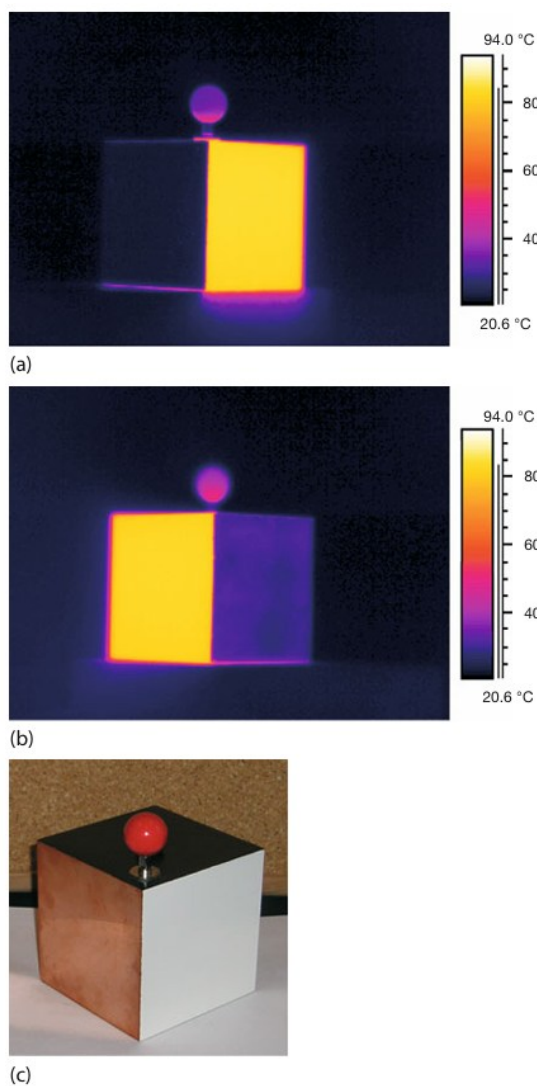
Slika 14. Ovisnost emisijskog faktora zračenja o debljini uzorka i valnom broju elektromagnetskog zračenja [8]

4.2.4.2. Lesliejeva kocka

Za ilustraciju utjecaja materijala i strukture površine na iznos emisijskog faktora zračenja, u praksi je poznata uporaba tzv. Lesliejeve kocke (engl. *Leslie cube*). To je šuplja pravilna bakrena kocka ($V = 10 \text{ cm}^3$) čije su površine stranice obrađene na različite načine. Jedna je stranica prekrivena tankim slojem bijele boje, druga crnom bojom, dok je treća strana kocke polirana bakrena površina, a četvrta strana hrapava. Kocka se potom postavi na toplinsku

izolaciju i napunjeni vrućom vodom. Zbog dobre toplinske vodljivosti bakra, sve strane kocke brzo su se zagrijale na istu temperaturu, čak i tanki slojevi boje. Infracrvenom kamerom se zatim provodi analiza toplinskog zračenja sa svake strane.

Na slici 15 prikazani su primjeri rezultata infracrvenog snimanja izvedbe Lesliejeve kocke koju nudi literatura [10].



Slika 15. Postav i termogrami Lesliejeve kocke od bakra sa različitim površinskim obradama [10]

Za dvije obojene strane, odabrani emisijski faktor zračenja od 0,96 dao je približno točnu temperaturu (što je potvrđeno i kontaktnim termoparom). Hrapava bakrena površina imala je znatno manje zračenje, a polirana bakrena površina još manje te su zbog toga one imale lažno niske iznose temperatura na termogramima. Korištenjem računalnog programa za analizu izmjerenih temperatura, emisijski faktor se može prilagoditi tako da i bakrene površine

pokazuju točnu temperaturu zidova kocke. U ovom primjeru, emisijski faktor polirane bakrene površine iznosila je oko 0,03, dok je emisijski faktor hrapave površine iznosio oko 0,11.

Iako su sve strane kocke na istoj temperaturi (čak i one strane presvučene tankim slojevima boje), termalna kamera će prikazati različite prividne temperature za svaku stranu. To je zato što materijali s višim emisijskim faktorom emitiraju više infracrvenog zračenja, pa izgledaju „toplije“ na termogramu, dok materijali s nižim emisijskim faktorom emitiraju manje zračenja i izgledaju „hladnije“. Jedan od načina određivanja točnih vrijednosti emisijskog faktora zračenja površine jest istovremenim mjerenjem temperature objekta kontaktnom sondom (termoparom) i termalnom kamerom. Potom se u računalnom programu kamere može kalibrirati emisijski faktor mjerene površine sve dok se na termogramu kamere ne prikaže točna vrijednost temperature.

Također, za približno točne rezultate i brzu analizu na terenu, dio ispitivane površine može se prekriti crnom bojom (sprejom) ili zaštititi crnom polimernom trakom (simulacija idealnog crnog tijela) poznatog iznosa emisijskog faktora zračenja (≈ 1), a emisijski faktor promatrane površine može se procijeniti kalibriranjem infracrvene kamere sve dok izmjerene temperature na obojenoj i neobojenoj površini ne postanu jednake [32].

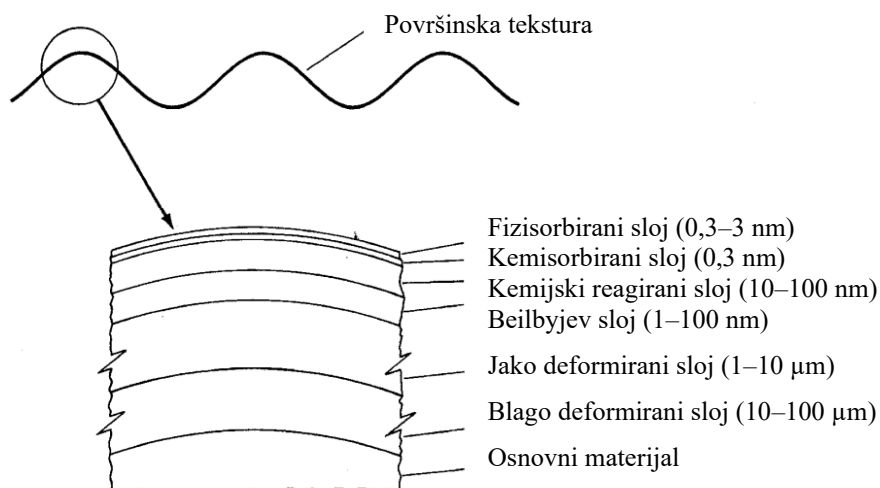
5. ISPITIVANJE INTEGRITETA (HRAPAVOSTI) POVRŠINE

Svaka čvrsta površina ima određeni stupanj hrapavosti (nepravilnosti) i svojstva koja ovise o svojstvima materijala, potencijalnim modifikacijama poput prevlaka, načinu obrade (izrade) i kemijskoj ili fizikalnoj interakciji s okolinom. Kod aspekta inženjerstva površina, odnosno interakcijom strojnog dijela (materijala) s okolinom od velike su važnosti površinska svojstva jer utječu na kontaktnu površinu, stupanj trenja, trošenja i podmazivanje. Osim triboloških parametara, svojstva površine imaju važnu ulogu u optičkim, električnim, toplinskim performansama, kao i u estetskim aspektima poput boje i izgleda.

Površine, bez obzira na način nastanka, sadrže nepravilnosti ili odstupanja od idealnog geometrijskog oblika. Te nepravilnosti mogu varirati, od ljudskom oku primjetnih odstupanja u obliku do mikroskopskih nepravilnosti reda veličine međuatomske udaljenosti. Trenutno ne postoji vrsta strojne obrade koja može stvoriti molekularno ravnu površinu na standardnim materijalima. Čak i „najglade“ površine, poput onih dobivenih cijepanjem kristala, sadrže nepravilnosti čije visine prelaze međuatomske udaljenosti. U tehnološkim primjenama važna je i makro- i mikro/nanotopografija površine, poznata kao hrapavost površine.

Tijekom obrade metala i legura, nastaje zona radno-učvršćenog materijala, iznad koje se nalazi mikro-kristalni ili amorfni sloj, tzv. Beilbyjev sloj. Slika 16 daje shemu poprečnog presjeka čvrste površine koja se sastoji od nekoliko slojeva s fizikalno-kemijskim svojstvima koja se razlikuju od mase materijala. Prisutnost navedenih slojeva utječe na trenje i trošenje materijala, ali i na iznos emisijskog faktora zračenja njegove površine [33].

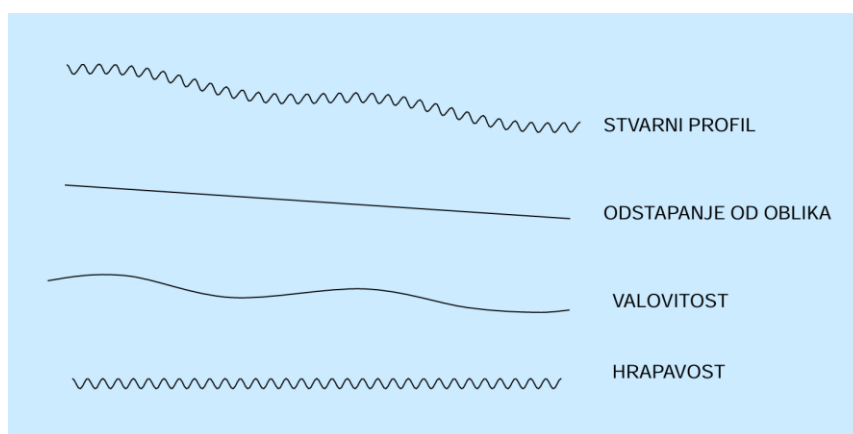
U ovom poglavlju obradit će se utjecaj integriteta površine na emisijski faktor zračenja materijala, objasniti će se parametri prilikom mjerenja hrapavosti površine te različite metode mjerenja hrapavosti i njihova važnost u industriji.



Slika 16. Shematski prikaz uvećanog dijela poprečnog presjeka površine i prikaz različitih fizikalno-kemijskih slojeva [33]

5.1. Parametri i metode mjerenja topografije površine

Pojam tekstura površine odnosi se na sitne nepravilnosti, poput ispupčenja i udubljenja, koje nastaju oblikovanjem površine. Prema konvenciji, tekstura se sastoji od dviju osnovnih komponenti: hrapavosti i valovitosti. Za razliku od valovitosti, hrapavost je mjera površinskih nepravilnosti kraćih valnih duljina koje odstupaju od idealne glatkoće. Ove nepravilnosti utječu na performanse materijala u različitim primjenama, posebno na kontakt, trenje, trošenje i sposobnost prijenosa topline. Slika 17 nudi prikaz različitih vrsta odstupanja na stvarnom profilu materijala [34].



Slika 17. Odstupanja površine na stvarnom profilu [34]

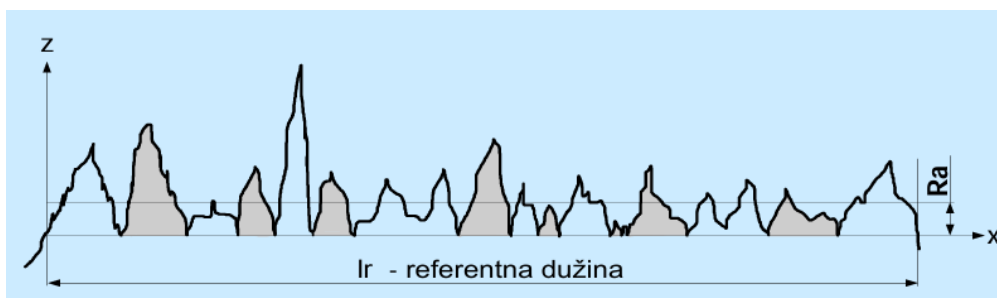
Hrapavost se obično opisuje skupom standardiziranih parametara koji kvantificiraju visinu, dubinu i distribuciju tih nepravilnosti na određenoj duljini vrednovanja profila (l_n).

Navedeni parametri hrapavosti dijele se na amplitudne (visinske), uzdužne i hibridne. Za opću strojarsku primjenu dovoljno je poznavati iznose amplitudnih parametara R_a i R_z , a nerijetko i R_q .

- R_a je srednja aritmetička vrijednost apsolutnih odstupanja od srednje linije profila hrapavosti. R_a predstavlja prosječnu hrapavost i najčešće se koristi kao opći pokazatelj hrapavosti površine. Može se izračunati korištenjem jednadžbe (17):

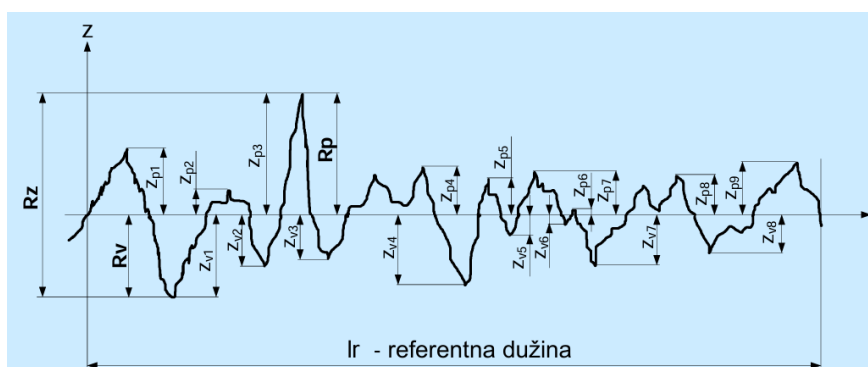
$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (17)$$

Gdje je l_r referentna dužina mjerenja, a $Z(x)$ odstupanje od srednje linije profila, slika 18.



Slika 18. R_a [34]

- R_z predstavlja najveću visinu profila unutar mjernog područja, slika 19. R_z je često korišten parametar kada je važno opisati maksimalne vrhove i udubine površine. Pomaže kod materijala gdje su visoki vrhovi i duboke udubine bitni za eksploatacijske uvjete, kao što su podmazivanje ili prljanje.



Slika 19. R_z [34]

- R_q je kvadratna sredina odstupanja visine profila od srednje linije i predstavlja standardnu devijaciju visinskog profila. R_q se koristi u određenim tehničkim primjenama kada je potrebno preciznije odrediti hrapavost. Može se izračunati uporabom jednadžbe (18):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (18)$$

Osim navedenih parametara u mjerenju hrapavosti javljaju se i R_p (najveća visina vrha profila), R_v (najveća dubina dola profila), R_t (ukupna visina profila), itd.

Hrapavost površine mjeri se različitim metodama i uređajima, ovisno o preciznosti i zahtjevima analize. Jedan od najčešćih uređaja je profilometar, koji koristi sondu za određivanje visinskih promjena na površini. Profilometri se mogu podijeliti na kontaktne, gdje sonda fizički prati površinu, te optičke, koji koriste laserski ili svjetlosni snop za mjerenje refleksije bez dodira.

3D optički mikroskopi, kao što su konfokalni mikroskopi i bijela svjetlost interferometri, mogu snimiti detaljne trodimenzionalne slike površine za analizu teksture i hrapavosti na mikrorazini. Konfokalni mikroskop koristi fokusirane zrake na različitim dubinama za precizno mjerenje visinskih varijacija, dok interferometar koristi interferenciju bijele svjetlosti kako bi precizno prikazao male nepravilnosti. U mikroskopiji atomskih sila, engl. *Atomic Force Microscope* (AFM), koristi se vrlo uska sonda koja prolazi blizu površine i bilježi promjene u sili između sonde i površine. Na taj način stvara se detaljna mapa hrapavosti na nanometarskoj razini.

Za veće površine koristi se stroj za mjerenje koordinata (CMM; engl. *Coordinate Measuring Machines*), koji ima sposobnost postavljanja sonde na različite točke površine za bilježenje visinskih vrijednosti i analizu makroskopske hrapavosti.

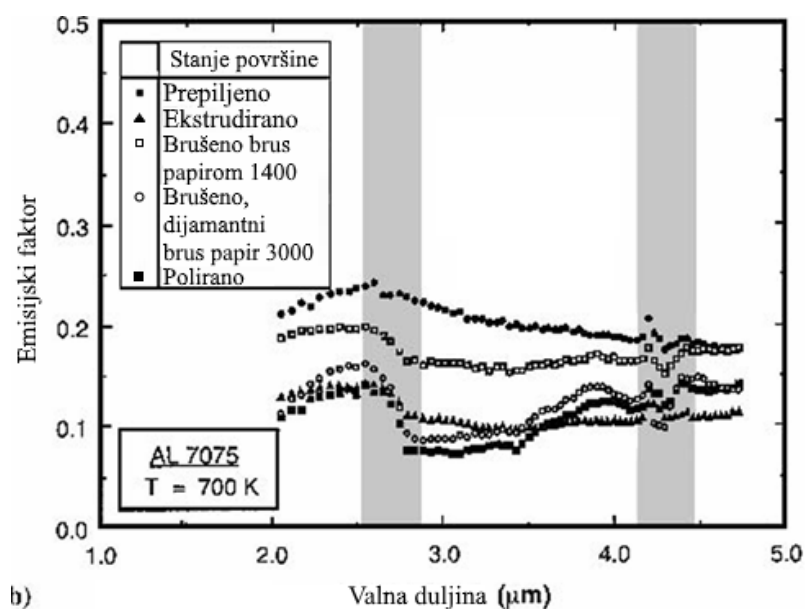
Postoje i metode difrakcije svjetlosti, gdje se snop svjetlosti difraktira od nepravilnosti površine, a kutovi difrakcije procjenjuju prosječnu hrapavost. Ova metoda je brza, ali manje precizna.

Računalna tomografija (CT skeniranje) također se koristi za mjerenje hrapavosti. CT (engl. *Computed Tomography*) skeneri pogodni su za analizu složenih oblika i površinskih struktura, posebno kad je potrebna detaljnija analiza unutarnje strukture materijala.

5.2. Utjecaj integriteta površine na mjerenje emisijskog faktora zračenja

Materijali sa niskim emisijskim faktorom zračenja bitni su u primjeni raznih uređaja za rad na visokim temperaturama kako bi se smanjio utjecaj infracrvenog zračenja na okolinu. Važna primjena materijala s niskim emisijskim faktorom na visokim temperaturama javlja se kod aeronautičkih materijala koji se koriste u visokotemperaturnim okruženjima. Velike brzine u aeronautici pogoduju nastajanju visokih temperatura na površini materijala. Osim toga, masa i dimenzije (poglavito debljina) također se moraju uzeti u obzir u aeronautičkim i drugim industrijskim primjenama. Nanošenje filmova s niskim emisijskim faktorom mogu smanjiti prijenos topline dok dodaju vrlo nisku masu sustavu, te tako predstavljaju dobar pristup za rješavanje ovog problema [35].

Literatura [36] i slika 20 prikazuju da hrapavost površine značajno mijenja emisijski faktor, što rezultira njegovim povećanjem za 2 do 3 puta kod hrapavih u usporedbi s poliranim metalnim površinama, ali se raspodjela emisijskog faktora izjednačava s povećanjem hrapavosti. Emisijski faktori zračenja metalnih materijala u navedenoj literaturi su mjereni unutar područja infracrvenog zračenja (2-5 μm) uporabom radiometrijske mjerne opreme.



Slika 20. Utjecaj hrapavosti površine i valne duljine na emisijski faktor [36]

5.3. Utjecaj proizvodnih postupaka na integritet površine

Proizvodni postupci i obrada metala značajno utječu na hrapavost površine, što može promijeniti kako materijal funkcionira u praksi. Hrapavost utječe na trenje, otpornost na trošenje i izgled. Različiti proizvodni postupci na različite načine utječu na integritet površine materijala:

- a) Obrada odvajanjem čestica (OOČ) često ostavlja tragove na površini zbog načina na koji alat reže materijal. Veličina tih tragova ovisi o brzini obrade, obliku alata i posmaku. Na primjer, sporiji posmak obično stvara glatke površine, dok brži posmak može ostaviti grublje tragove.
- b) Brušenje s finim česticama može jako smanjiti hrapavost i rezultirati glatkom površinom, dok poliranje još više povećava sjaj i smanjuje trenje.
- c) Kod lijevanja, površine često ostaju hrapave zbog materijala kalupa, nepravilnog hlađenja ili protoka materijala, što može stvoriti male neravnine i rupice. Kovanje, ako je pravilno izvedeno, može rezultirati glađom površinom zbog pritiska koji izravnavaju nepravilnosti.
- d) Valjanje može zagladiti površinu metala, posebno kod hladnog valjanja, gdje je površina izložena jakom pritisku. Hladno valjanje obično daje finiju završnu obradu u odnosu na toplo valjanje, koje može stvoriti oksidne slojeve na površini.
- e) Kemijska i elektrolitička obrada (jetkanje, anodizacija) – jetkanje može povećati hrapavost stvaranjem sitnih neravnina, dok anodizacija često stvara glatku površinu.
- f) Procesi toplinske obrade, kao što su žarenje i kaljenje mogu neizravno utjecati na hrapavost jer mijenjaju unutarnja naprezanja u materijalu, a također mogu značajno povećati debljinu oksidnog sloja, ako nije primijenjena dovoljno reducirajuća zaštitna atmosfera. Ove promjene mogu uzrokovati dodatne deformacije i povećati hrapavost površine.

Primjer utjecaja različitih parametara CNC tokarilice kao što su brzina posmaka i brzina rezanja, na hrapavost površine različitih materijala, uključujući aluminij, meki čelik i mesing daje literatura [37].

Razlikuju se dva glavna izvora hrapavosti: primarna hrapavost, na koju utječu geometrija alata za rezanje, brzina posmaka i brzina rezanja, te prirodna hrapavost, koja ovisi o uvjetima stroja i varijacijama kao što su trošenje alata i neuravnoteženost sustava obrade. Korištena je sljedeća formula za teorijsko modeliranje hrapavosti površine, jednadžba (19):

$$R_{a(\text{teorijski})} = 1.22 \times 10^5 \times r^{-0.714} \times (\text{HB})^{-0.323} \times f^{1.004} \times V_c^{-1.252} \quad (19)$$

Gdje su

R_a	μm	Prosječna hrapavost površine
r	mm	Polumjer vrha alata
V_c	o/min	Brzina rezanja
f	m/min	Brzina posmaka
HB	–	Tvrdoća po Brinellu

Eksperimentalne i teorijske vrijednosti za svaki materijal uspoređene su kako bi se identificirale razlike. Dokazano je da veće brzine posmaka povećavaju su hrapavost površine kod svih materijala. Dokazana je i pozitivna korelacija između brzine posmaka i hrapavosti, pripisanu povećanoj toplini i trošenju alata pri većim brzinama posmaka, što zauzvrat utječe na hrapavost. Povećanje brzine rezanja imalo je suprotan učinak u odnosu na brzinu posmaka, gdje su veće brzine općenito smanjile hrapavost površine zbog bolje stabilnosti rezanja i smanjenja stvaranja naslaga na oštreci.

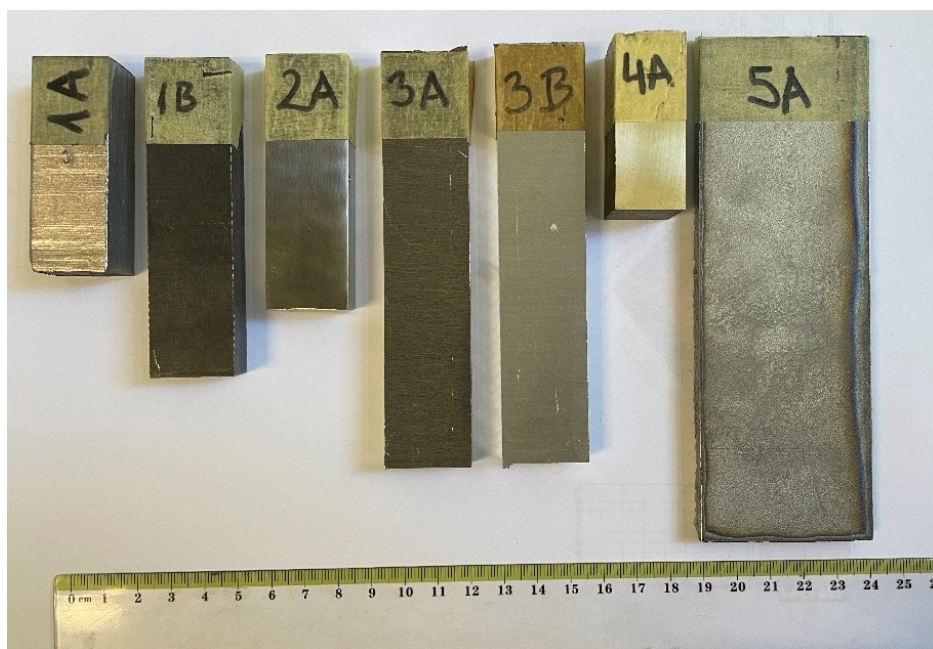
EKSPERIMENTALNI DIO

6. Priprema i provedba mjerenja emisijskog faktora toplinskog zračenja

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je mjerenje emisijskog faktora toplinskog zračenja prema planu pokusa u kojemu je obuhvaćen utjecaj vrste materijala (niskougljični nelegirani čelik, nehrđajući austenitni čelik, aluminijske legure, mjed, titanij), stanje površine (sjajna, brušena i oksidirana) na emisijski faktor toplinskog zračenja u intervalu temperatura od 20 °C do 200 °C na devet različitih stanja uzoraka.

6.1. Priprema uzoraka

U pokusu su ispitivani iznosi emisijskih faktora zračenja sedam različitih uzoraka i devet različitih površinskih hrapavosti pri ugrijavanju, prikazanih na slici 21. Oznaka A obilježava brušene ili polirane (sjajne) površine, bez prisutnosti oksidnog sloja (neoksidirane), dok oznaka B označava oksidirane (hrapave) površine. Uzorak 4 na polegnutoj strani sadrži oksidiranu površinu oznake B. Uzorak 2 od austenitnog nehrđajućeg čelika sadržavao je samo poliranu površinu (oznake A) te se nije ispitivala oksidirana površina. Na polovini uzorka 5 naknadno se ispolirala površina, dok je druga polovica ostala hrapavija.



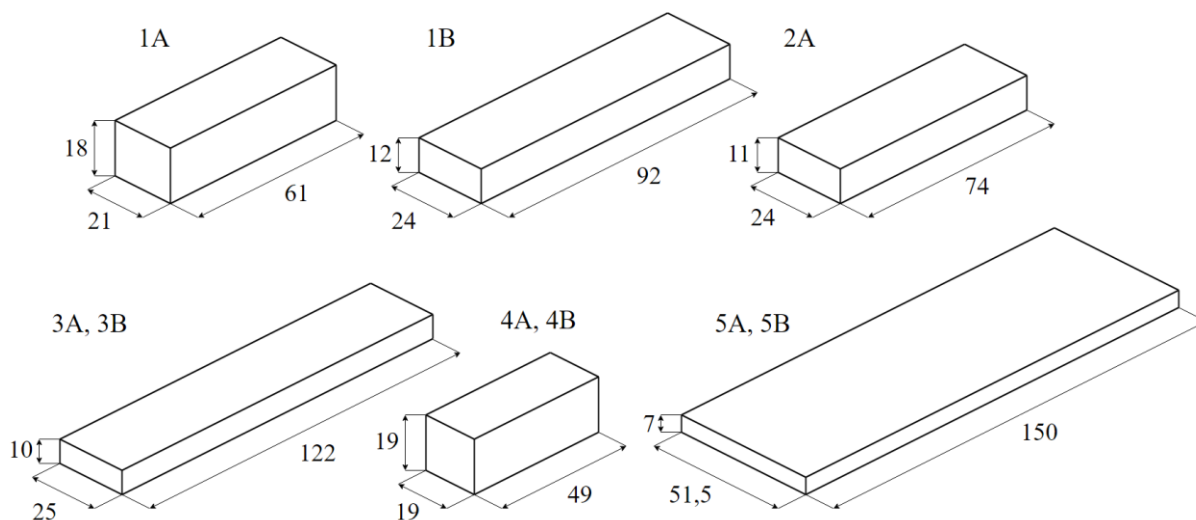
Slika 21. Ispitni uzorci

Tablica 3. nudi pregled materijala ispitnih uzoraka, njihovih kemijskih sastava i oznaka.

Tablica 3. Pregled kemijskog sastava različitih materijala ispitnih uzoraka [38] – [42]

Materijal	Oznaka	Kemijski sastav							
		%C	%Si	%Mn	%P	%S	%N	%Cu	
S235JR	1A, 1B	0,17	–	< 1,40	< 0,035	< 0,035	< 0,012	< 0,55	
X5CrNi18-10	2A	0,07	1	2	8-10,5	0,045	0,015	0,11	17,5-19,5
AlMg4,5Mn0,7	3A	0,4	0,4	0,4-1	0,05-0,25	0,15	0,1	4-4,9	0,25 ost.
AlSi1MgMn	3B	0,5	0,7-1,3	0,4-1	0,25	0,1	0,1	0,6-1,2	0,2 ost.
CuZn36Pb3	4A, 4B	0,3	0,3	0,05	60-62	0,05	0,2	ost.	
Čisti Ti	5A, 5B	99% Ti + < 1% nečistoća (N, C, H, Fe, O)							

Dimenzije korištenih ispitnih uzoraka u izometriji prikazane su na slici 22.



Slika 22. Dimenzije ispitnih uzoraka u izometriji

Fizikalna i toplinska svojstva uzoraka sažeta su u tablici 4. Zbog ograničenosti literature i zahtjevnosti mjerenja, precizni podaci o emisijskim faktorima za različite temperaturne intervale, površinske obrade i specifične legure često su teško dostupni.

Tablica sadrži opće (okvirne) vrijednosti emisijskih faktora za čelik, nehrđajući čelik, aluminij, mjed i titan preuzete iz izvora [43] – [50].

Šesti stupac prikazuje intervalni raspon iznosa emisijskog faktora za polirani i oksidirani čelik, polirani nehrđajući čelik, polirani i oksidirani aluminij, poliranu i oksidiranu mjed te polirani i oksidirani čisti titan, za temperature od 20 °C do 100 °C ili 200 °C (kutovi mjerenja nisu poznati).

Sedmi stupac daje iznose Biotovog broja za svaki uzorak. Biotov broj predstavlja omjer kondukcijskog i konvekcijskog otpora koji se izračunava pomoću jednadžbi (20) i (21):

$$Bi = \frac{\alpha l_0}{\lambda} = \frac{l_0}{\frac{\lambda}{\alpha}} = \frac{\text{kondukcijski otpor}}{\text{konvekcijski otpor}} \quad (20)$$

Pri čemu je l_0 karakteristična (linearna) dimenzija presjeka krutog tijela (21):

$$l_0 = \frac{V}{A_s} \quad (21)$$

V m^3 Ukupni volumen predmeta

A_s m^2 Grijana površina predmeta

U procesu provođenja topline u krutom tijelu javljaju se zanemarivo mali otpori naspram konvekcijskog prijenosa topline sa njegove površine na fluid (ili obrnuto). To znači da je temperaturni gradijent u njegovoj unutrašnjosti značajno manji od temperaturnog gradijenta između tijela i okolne tekućine. Takvu pojavu moguće je promatrati jedino kod brzog ugrijavanja razmjerno tankih presjeka visoko vodljivih materijala poput metala. U tom slučaju radi se o tzv. „termodinamički tankom predmetu“ ($Bi \leq 0,25$), dok bi se u suprotnom takav predmet smatrao „termodinamički masivnim“ ($Bi > 0,25$).

Uočava se da je Biotov broj kod svih uzoraka $< 0,25$ što znači da se može pretpostaviti ravnomjeren raspored topline unutar ispitnog uzorka prilikom zagrijavanja (prijenosa topline), odnosno da se ispitni uzorci mogu smatrati „termodinamički tankima“. Za proračun Biotovog broja nužno je poznavati koeficijent prijelaza topline, α . Za miran zrak, α se pretpostavlja da je $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ [51].

Poznato je da je α ovisan o temperaturi okolišnog fluida i predmeta te o njegovim dimenzijama i drugim toplinskim svojstvima. U ovom radu α je pretpostavljen i korišten samo u svrhe proračuna Biotovog broja. Čak ukoliko bi se uvrstio čak i 5 puta veći α od 10, uzorci bi i dalje bili „termodinamički tanki“.

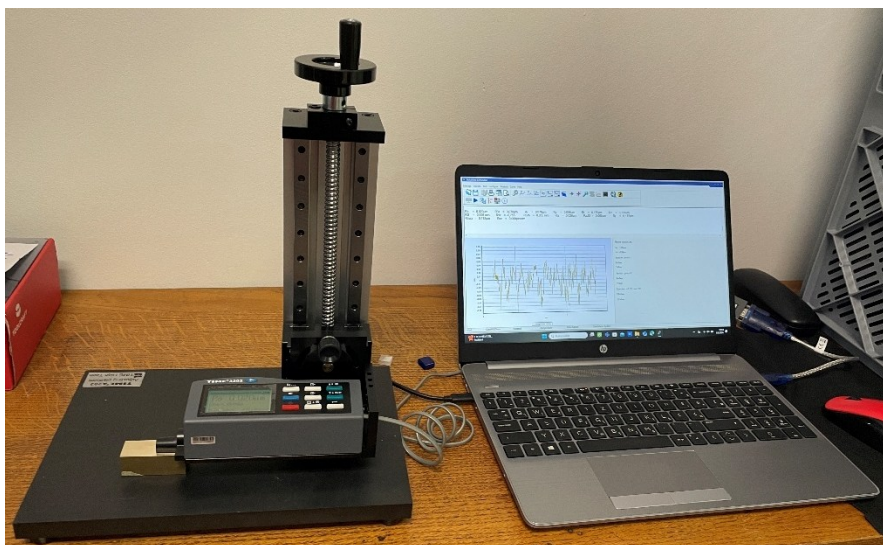
Tablica 4. Fizikalna i toplinska svojstva ispitnih uzoraka [43] – [50]

Materijal	Oznaka	ρ , kg/m ³	λ , W/mK	V , m ³	ϵ literaturni	Bi	A_{IR}^* , m ²
S235JR	1A	7800	27,5	23,058·10 ⁻⁶	0,07-0,08	0,007	12,81·10 ⁻⁴
	1B			26,496·10 ⁻⁶	0,79-0,80	0,004	22,08·10 ⁻⁴
X5CrNi18-10	2A	7900	16,2	19,536·10 ⁻⁶	0,16-0,19	0,007	17,76·10 ⁻⁴
AlMg4,5Mn0,7	3A	2700	110	30,5·10 ⁻⁶	0,02-0,09	0,0009	30,5·10 ⁻⁴
AlSi1MgMn	3B	2700	160		0,11-0,3	0,0006	
CuZn36Pb3	4A	8490	115	17,689·10 ⁻⁶	0,03-0,035	0,002	9,31·10 ⁻⁴
	4B				*-0,61		
Čisti Ti	5A	4500	17	54,075·10 ⁻⁶	0,19-*	0,004	77,25·10 ⁻⁴
	5B				0,63-*		

A_{IR}^* – označava gornju površinu uzorka okomito snimanu sa infracrvenom kamerom pri ugrijavanju. Dimenzije snimane površine jednake su dimenzijama grijane površine svakog uzorka.

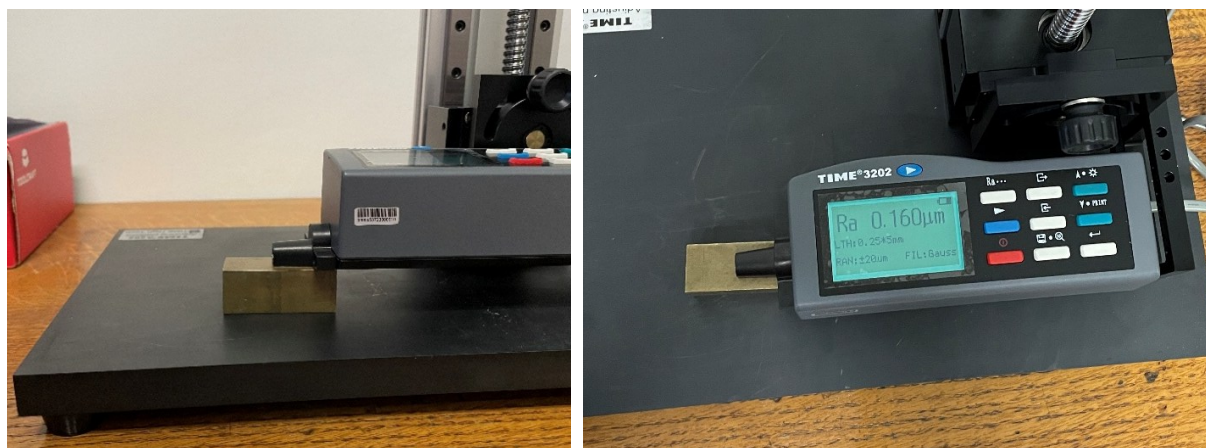
6.2. Ispitivanje hrapavosti uzoraka

Mjerenje hrapavosti ispitnih uzoraka provelo se pomoću Time® 3202 uređaja sa ticalom (profilometra) sa podesivom platformom i pripadnim računalnim programom slika 23. Softver se mora prethodno instalirati na računalo kako bi se mogao konstruirati profil hrapavosti i prikazati parametri hrapavosti površine izmjereni pomičnim ticalom. Duljina uzorkovanja iznosila je 0,8 mm.



Slika 23. Time® 3202 profilometar sa podesivom platformom i pripadnim softverom

Slika 24 prikazuje različite poglede i detalje korištenog profilometra te pomičnog ticala.

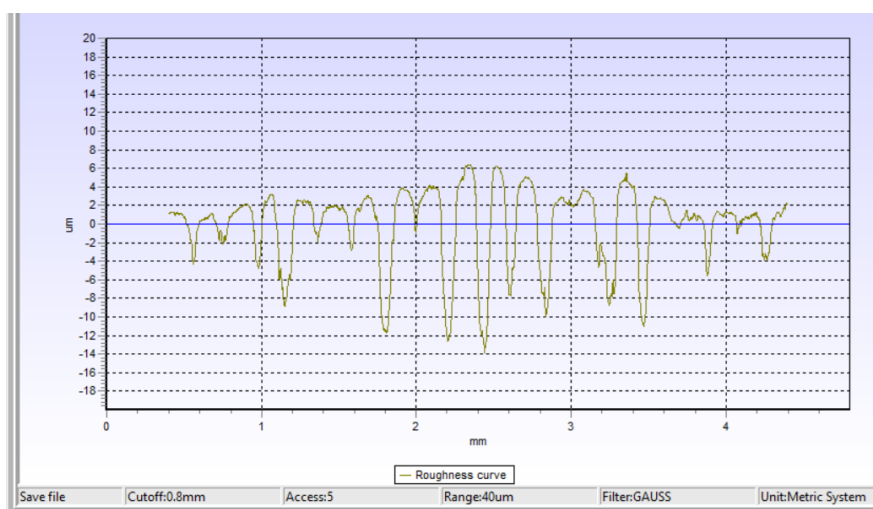


a)

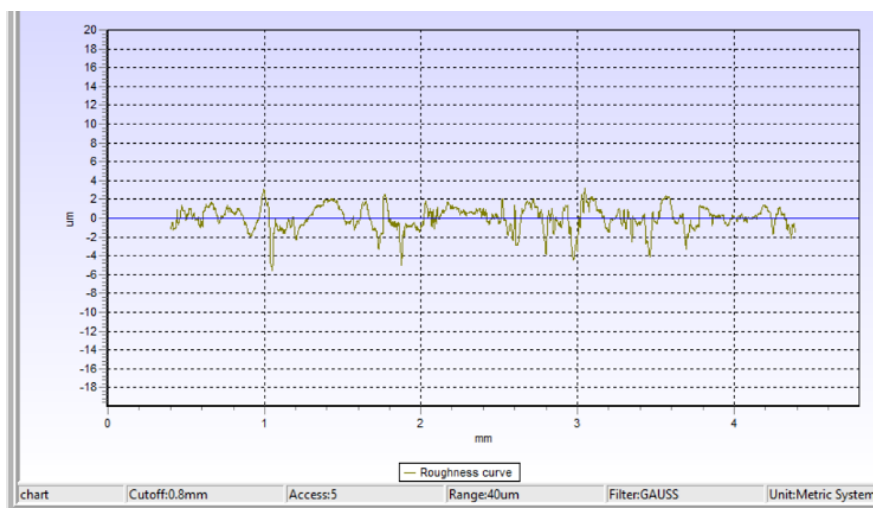
b)

Slika 24. Detalji profilometra: a) bočni pogled na pomično ticalo, b) gornji pogled na ekran profilometra sa iznosima parametara hrapavosti

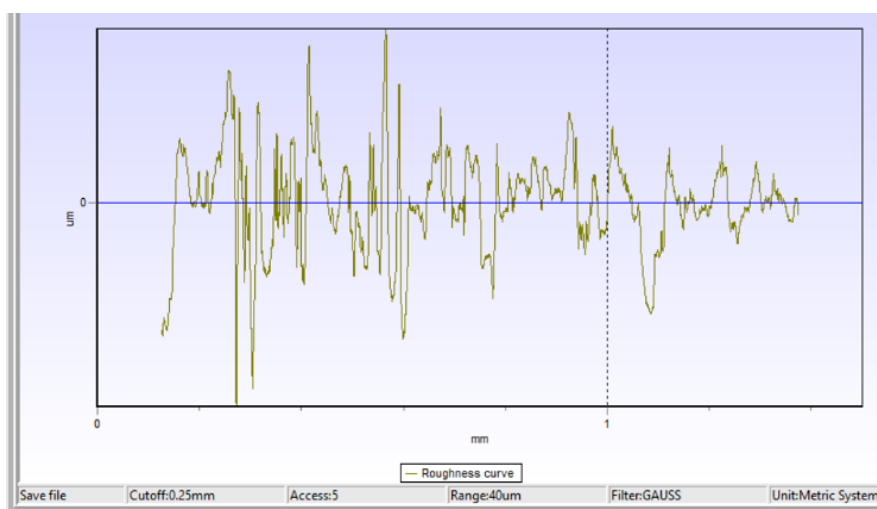
Na slikama 25. – 32. prikazani su izmjereni profili hrapavosti za 8 poliranih (brušenih) i oksidiranih površina na ispitnim uzorcima. Profil hrapavosti pjeskarene i oksidirane površine pločice od čistog titanija nalazio se izvan mjernog područja uređaja Time 3202 te je za njegovo određivanje primjenjena usporedba izgleda površine uzorka s površinom usporedbene pločice prema normi prema ISO 8503-2. Površina pjeskarenog titanija uspoređena je s Elcometer Shot pločicom za pjeskarenje s okruglom sačmom. Iz usporedbe izgleda oksidirane hrapave površine uzorka titanija i izgleda površina na komparatoru zaključuje se da je srednja hrapavost uzorka $R_a \approx 25 \mu\text{m}$, slika 33.



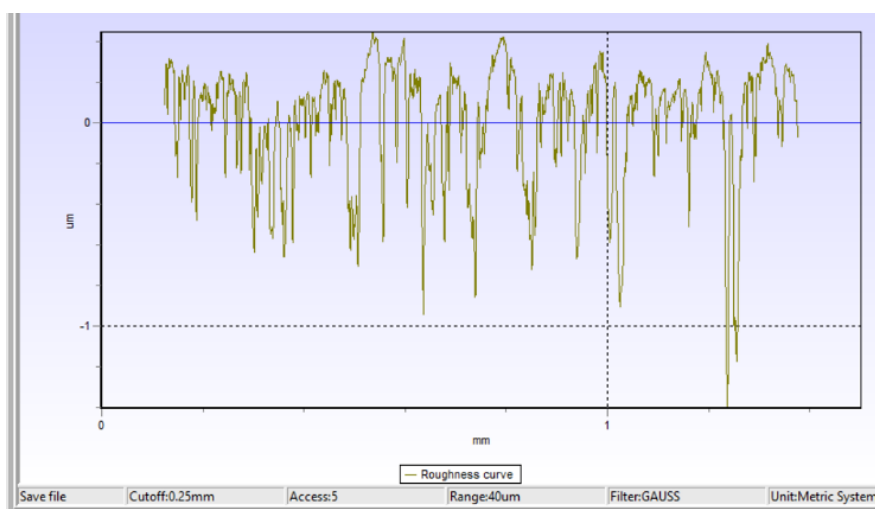
Slika 25. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 1A



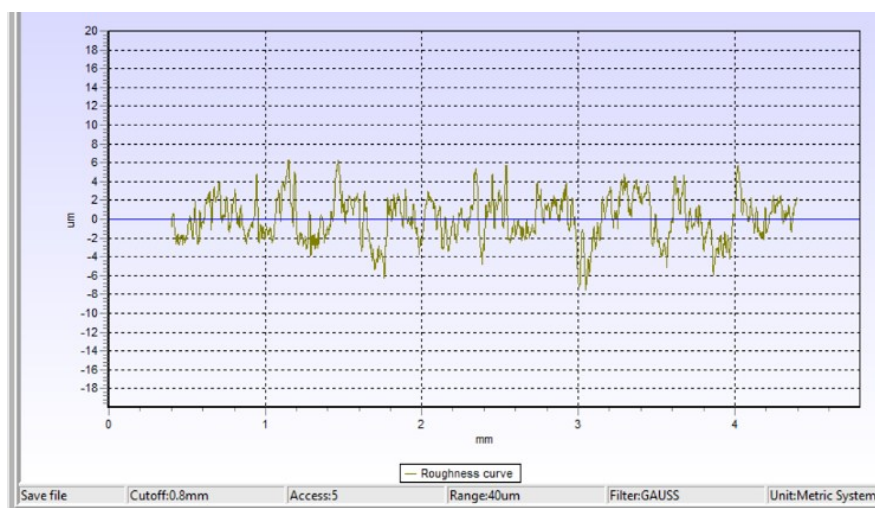
Slika 26. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 1B



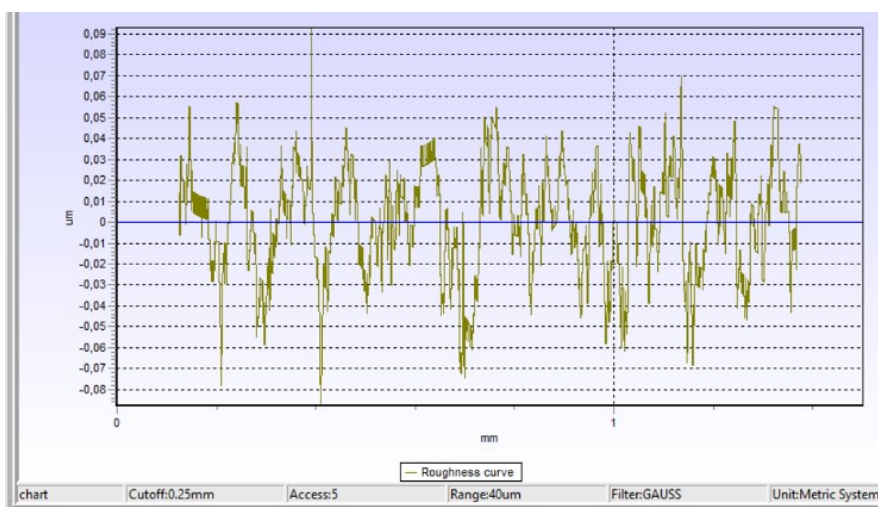
Slika 27. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 2A



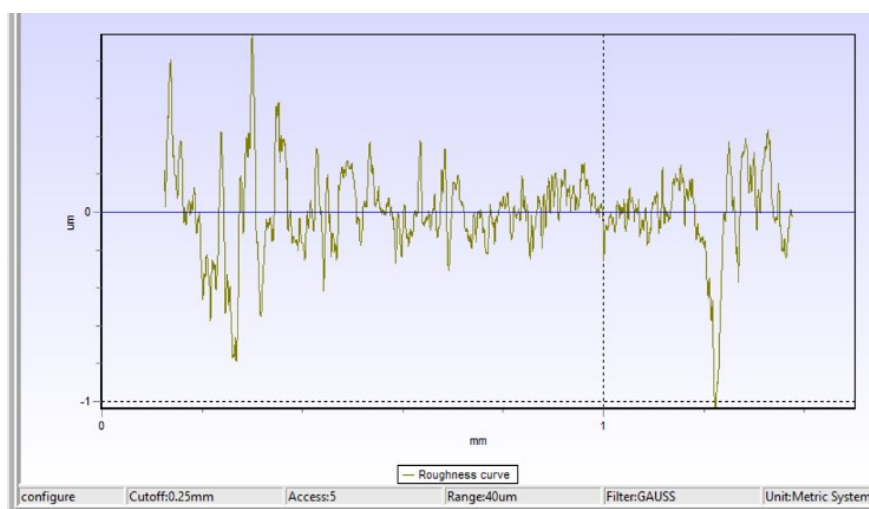
Slika 28. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 3A



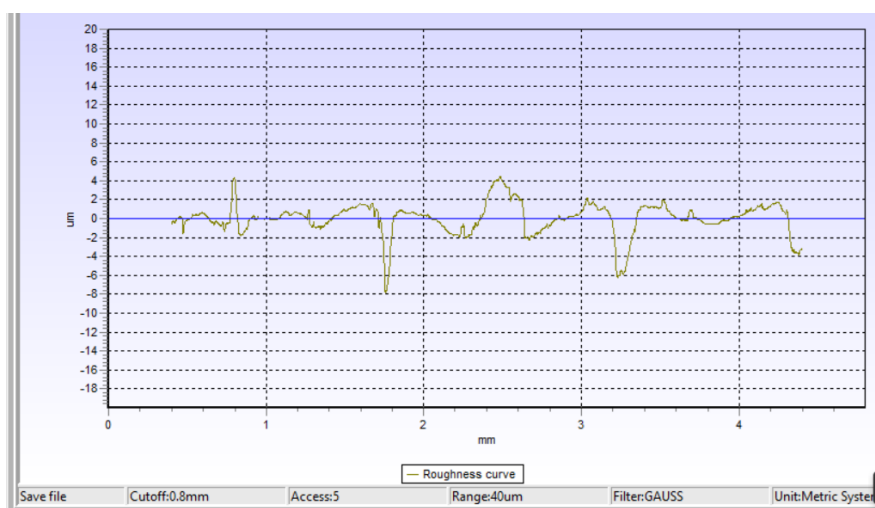
Slika 29. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 3B




Slika 30. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 4A



Slika 31. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 4B



Slika 32. Profil hrapavosti izmjeren na ispitnom uzorku 5A

	$R_a = 25 \mu\text{m}$	$R_a = 40 \mu\text{m}$
	$R_a = 100 \mu\text{m}$	$R_a = 70 \mu\text{m}$

Slika 33. Komparator izgleda površine Elcometer Shot za površinu pjeskarenu okruglom sačmom i pripadna vrijednost parametra hrapavosti R_a (ispitni uzorak 5B)

Tablica 5. daje pregled dobivenih glavnih parametara hrapavosti ispitanih površina. Općenito, neobrađene površine (označene s B) imaju znatno veće vrijednosti parametara hrapavosti u usporedbi s obrađenim površinama (označenima s A). Oksidni slojevi prisutni na površinama oznake B povećavaju njihovu hrapavost.

Tablica 5. Izmjereni parametri hrapavosti površina ispitnih uzoraka

Uzorak/ Ispitna površina	R_a, μm	R_{max}, μm	R_p, μm	R_z, μm	R_q, μm
1A	3,049	20,220	4,078	13,470	3,772
1B	0,961	8,691	2,439	6,332	1,232
2A	0,136	1,455	0,410	0,861	0,174
3A	0,225	1,845	0,375	1,302	0,289
3B	1,864	13,760	5,746	11,160	2,296
4A	0,020	0,175	0,058	0,136	0,026
4B	0,160	1,972	0,474	1,031	0,206
5A	1,118	12,320	2,873	6,583	1,612
5B	25	/	/	/	/

Na temelju R_a (srednje aritmetičko odstupanje profila), poredak površina od najhrapavije do najmanje hrapave je:

- 1) **5B**: $R_a = 25 \mu\text{m}$
- 2) **1A**: $R_a = 3,049 \mu\text{m}$
- 3) **3B**: $R_a = 1,864 \mu\text{m}$
- 4) **5A**: $R_a = 1,118 \mu\text{m}$
- 5) **1B**: $R_a = 0,961 \mu\text{m}$
- 6) **3A**: $R_a = 0,225 \mu\text{m}$
- 7) **4B**: $R_a = 0,160 \mu\text{m}$
- 8) **2A**: $R_a = 0,136 \mu\text{m}$
- 9) **4A**: $R_a = 0,020 \mu\text{m}$

6.3. Provedba ugrijavanja i mjerenja emisijskog faktora

Iako kut snimanja također utječe na iznos ukupnog emisijskog faktora (engl. *hemispherical emissivity*), on u ovom eksperimentu nije uzet u obzir. Uzorci su snimani IC kamerom čiji je položaj bio postavljen okomito iznad njih prilikom zagrijavanja, što znači da se u ovom eksperimentu mjerio normalni emisijski faktor zračenja površine, ε_n .

Postav za ispitivanje prikazan je na slikama 34. – 37., a sastojao se od:

- a) Stacionarne infracrvene termalne kamere naziva VarioCAM® HD Head, tvrtke InfraTec
- b) Električnog kuhala sa grijaćom pločom (Ø 18 cm) marke Zilan snage 1500 W
- c) Tableta Cobra SMARTlink marke Phywe
- d) Ispitnih uzoraka i termoelemenata tipa K



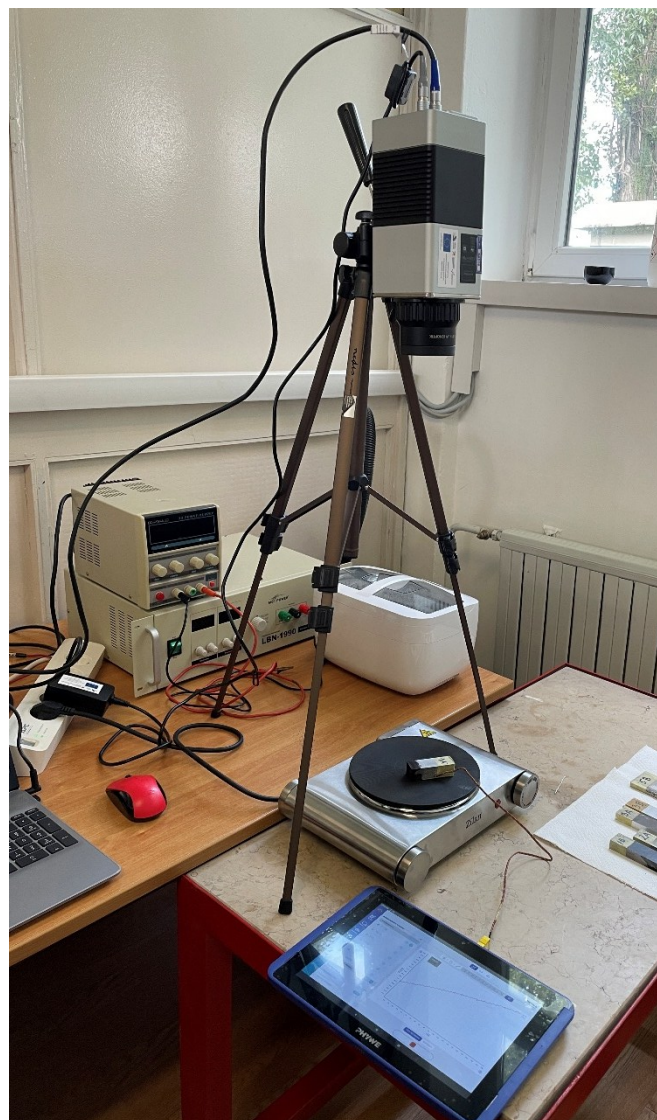
Slika 34. VarioCAM® HD Head, Stationary thermal imaging camera, InfraTec



Slika 35. Električno kuhalo sa grijaćom pločom (Ø 18 cm) marke Zilan

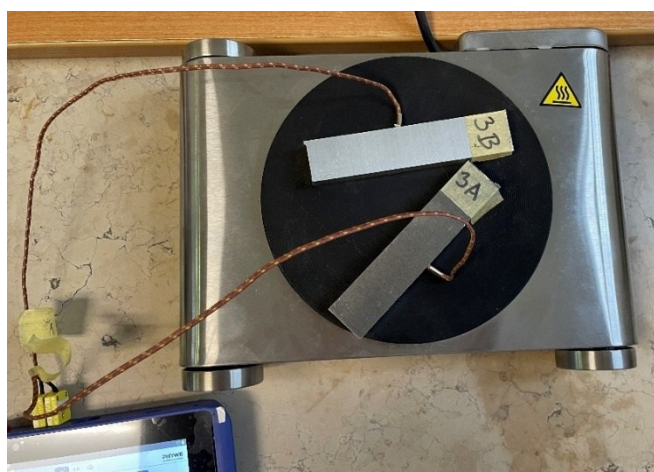


Slika 36. Cobra SMARTlink Phywe tablet



Slika 37. Postav za ispitivanje

Uzorci su zagrijavani na električnom grijaču od početne temperature od 20 °C do približno 200 °C. Na bočnim stranama uzoraka izbušeni su uvrta promjera manjeg od 3 mm, u koje je postavljen kraj termoelementa radi mjerenja „stvarne“ temperature unutar uzoraka tijekom zagrijavanja, slika 38. Međutim, izmjerene temperature putem termoelementa predstavljaju samo aproksimaciju stvarnih temperatura uzoraka zbog toplinskog otpora između površine uvrta i kraja sonde te zbog vremenske konstante kašnjenja signala.



Slika 38. Zagrijavanje uzoraka

Tijekom zagrijavanja i hlađenja, „stvarne“ temperature uzoraka mjerene termoelementom korištene su za bilježenje temperaturnih promjena u vremenu, što je prikazano u $\mathcal{I}(t)$ dijagramima dobivenih pomoću pametnog Cobralink tableta na koji se spojilo „hladne“ krajeve termoelementa, engl. *Cold Junction*. Svaki uzorak zagrijavan je 9 minuta.

Paralelno, tijekom cijelog eksperimenta, infracrvena kamera snimala je termograme kako bi se precizno zabilježile temperaturne promjene na površini uzoraka. Udaljenost objektiva infracrvene kamere od uzorka iznosio je 570 mm. Na temelju podataka dobivenih infracrvenom kamerom i dijagrama zagrijavanja i hlađenja izmjerenih termoelementom, određeni su emisijski koeficijenti za svaki uzorak, odnosno za svaku vrstu površine. Temperatura prostorije tijekom svih provedenih ispitivanja bila je konstantna i iznosila je 25 °C.

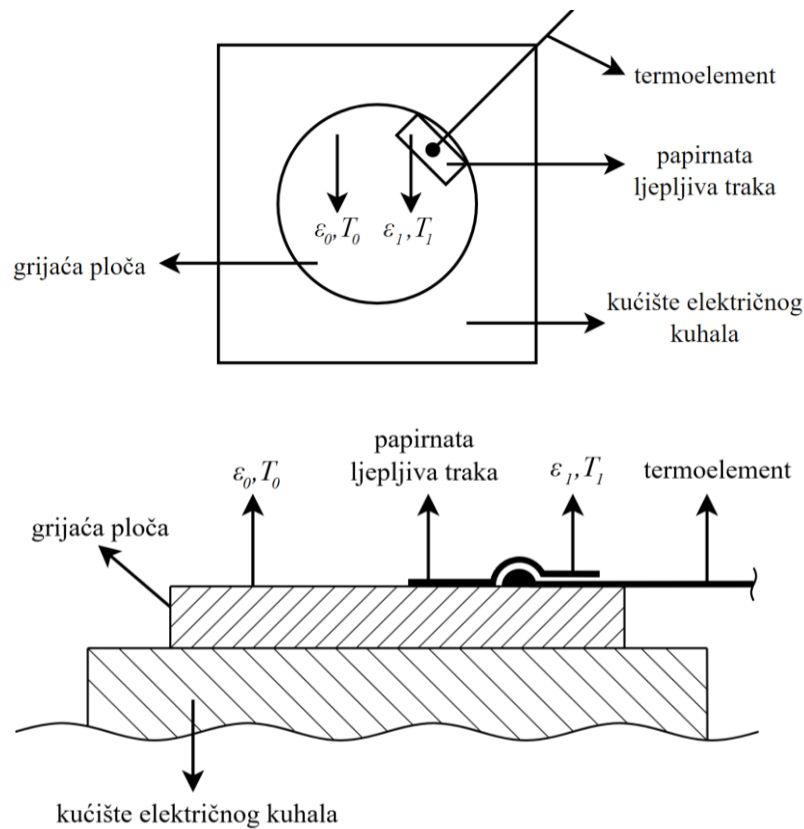
6.4. Matematički model za određivanje emisijskog faktora površine

Krajevi svih uzoraka prekriveni su tankom (približno 0,15 mm debljine) papirnatom ljepljivom trakom na kojoj su prethodno markerom napisane oznake uzoraka i vrste površine. Pošto je toplinska provodnost ljepljive trake vrlo niska ($< 1 \text{ W/mK}$), kao i njezina debljina, može se pretpostaviti da je temperatura trake približno jednaka temperaturi površine na koju je nalijepljena. Jednakost temperatura ljepljive trake i uzorka iskorištena je u izradi matematičkog modela za određivanje emisijskog faktora toplinskog zračenja površine.

1) *Određivanje emisijskog faktora ljepljive trake, ε_1*

Kako bi se odredila ovisnost emisijskog faktora uzoraka o njihovoj temperaturi, $\varepsilon(T)$, pomoću infracrvene kamere, najprije se odredio emisijski faktor ljepljive trake koji je korišten kao referentni parametar. Emisijski faktor ljepljive trake odredio se preko emisijskog faktora grijače ploče, ε_0 , koji se pretpostavio na 0,98 zbog visoko matirane crne površine [48]. Kako je ranije objašnjeno, temperatura trake bit će približno jednaka temperaturi grijače ploče na koju je nalijepljena.

Slika 39. pokazuje princip pomoću kojeg se odredio emisijski faktor trake, ε_1 . Ispod ljepljive trake (dužine 5 cm) postavio se termoelement kako bi se tijekom zagrijavanja kontinuirano bilježila stvarna temperatura grijače ploče, a na ljepljivu traku drugi termoelement kako bi se bilježila temperatura trake.



Slika 39. Princip određivanja emisijskog faktora trake, ε_1 pomoću poznatog emisijskog faktora grijaće ploče, ε_0

Energiju zračenja koju emitira ljepljiva traka, nazvat će se E_1 , jednadžba (22):

$$E_1 = \varepsilon_1 E_c = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 = \varepsilon_1 C_c \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \quad (22)$$

Energiju zračenja koju emitira grijaća ploča, nazvat će se E_0 , jednadžba (23):

$$E_0 = \varepsilon_0 E_c = \varepsilon_0 \sigma T_0^4 = \varepsilon_0 C_c \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \quad (23)$$

Kako vrijedi uvjet $T_0 = T_1$, slijedi jednadžba (24):

$$\frac{E_0}{\varepsilon_0} = \frac{E_1}{\varepsilon_1} \quad (24)$$

Prema tome, emisijski faktor trake bit će (25):

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0}{E_0} \cdot E_1 \quad (25)$$

Odnosno (26):

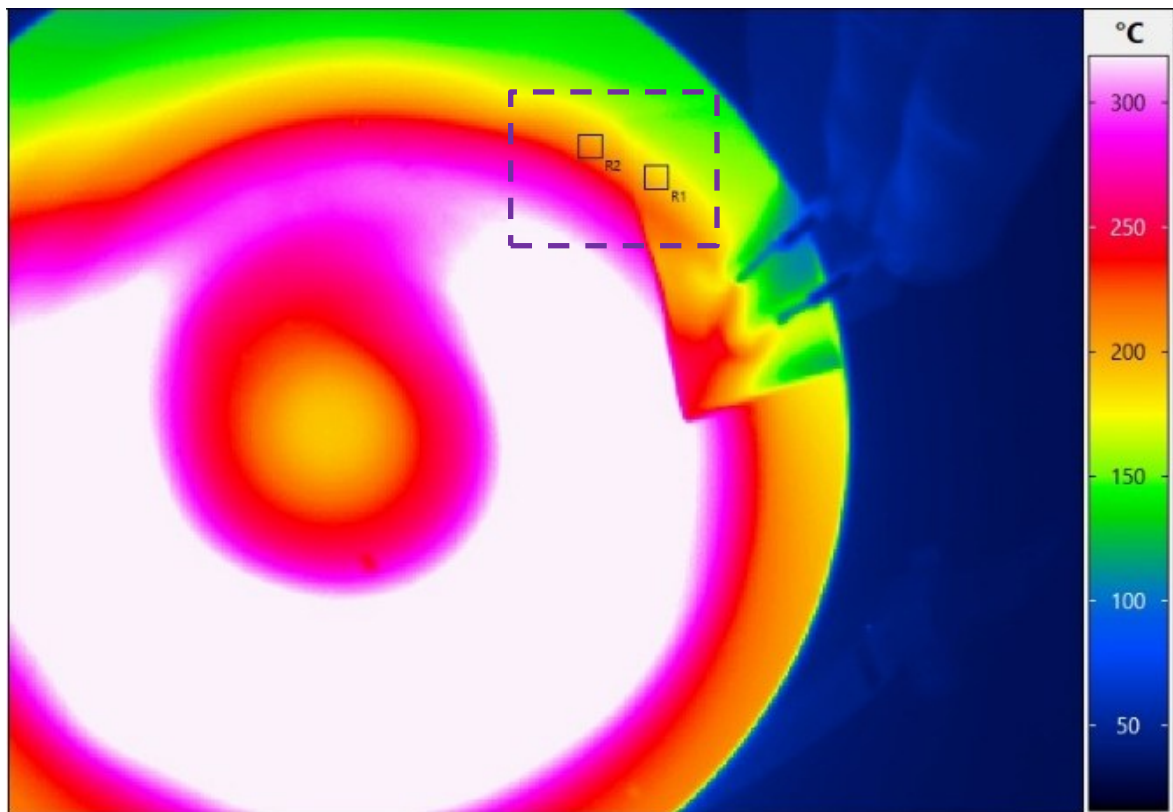
$$\varepsilon_1(E_0, E_1) = \frac{0,98}{E_0} \cdot E_1 \quad (26)$$

Infracrvene termalne kamere detektiraju infracrveno (toplinsko) zračenje koje emitira površina objekta i pretvaraju ga u temperaturne vrijednosti pomoću napredne elektronike i ugrađenih algoritama temeljenih na fizikalnim zakonima, poput Planckovog zakona i Stefan-Boltzmannovog zakona. Očitavanje kamere ne predstavlja izravno temperaturu, već energijski tok (snagu zračenja) koji ovisi o emisijskom faktoru površine, temperaturi objekta i okolini. Kamera koristi ovaj podatak te uzima u obzir emisijski faktor objekta i reflektirano zračenje iz okoline, kako bi izračunala stvarnu površinsku temperaturu.

Dakle, svaka vrijednost temperature na termogramu je direktna posljedica iznosa snage zračenja površine u toj točki. Prema tome, može se reći da su E_0 i E_1 direktno povezani sa temperaturama koje softver prikazuje na termogramu. Temperature grijače ploče i ljepljive trake očitane sa termograma nazvat će se $T_{0,IC}$ i $T_{1,IC}$. Zbog ove povezanosti, emisijski faktor ljepljive trake izračunao se iz „prividnih“ temperatura očitanih iz snimljenih termograma koristeći jednadžbu (27):

$$\varepsilon_1(T_{0,IC}, T_{1,IC}) = 0,98 \left(\frac{T_{1,IC}}{T_{0,IC}} \right)^4 \quad (27)$$

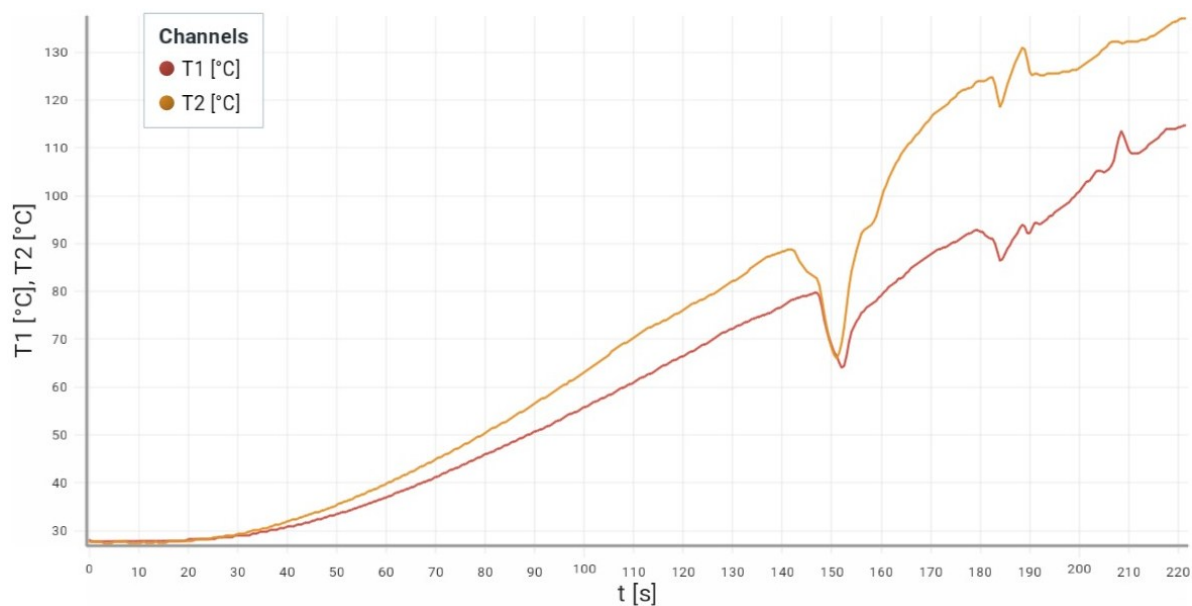
Temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_1 , a temperatura grijače ploče ($T_{0,IC}$) očitana je na isti način unutar kvadratića R_2 , prikazanih na termogramu na slici 40.



Slika 40. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja ljepljive trake na grijaćoj ploči

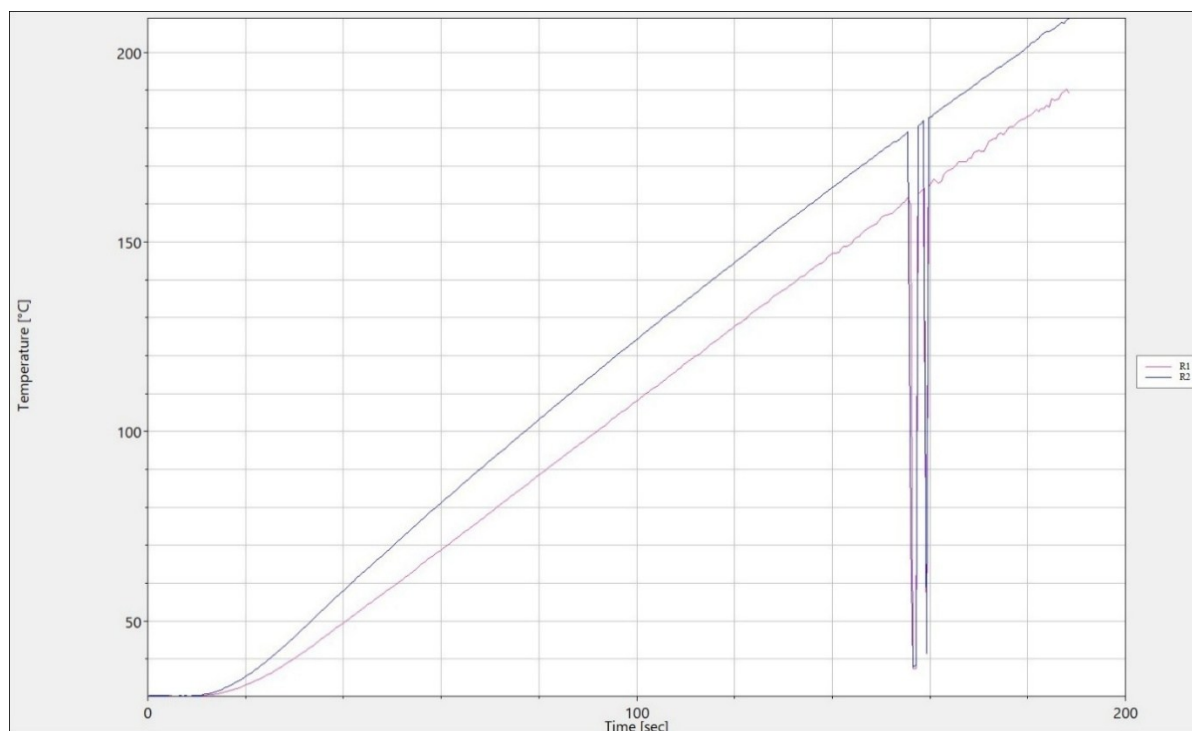
Na slici 41 prikazane su krivulje zagrijavanja ljepljive trake (T1) i grijaće ploče (T2) dobivene termoelementima i tabletom Phywe. Nakon približno 100 sekundi zagrijavanja, ljepljiva traka i sloj ljepila počinju omekšavati, što dovodi do djelomičnog odvajanja termoelementa od grijaće ploče. U početnoj fazi grijanja, termoelement je bio čvrsto pritisnut trakom uz površinu grijaće ploče, te se tako osiguravao dobar toplinski kontakt. Međutim, nakon određenog vremena pri povišenoj temperaturi, lijepilo trake se kreće sušiti te dolazi do djelomičnog odvajanja trake od grijaće ploče. Tako se na tom mjestu odvajanja stvara prostor ispunjen vrućim zrakom. Ovaj sloj zraka, koji djeluje kao toplinski izolator, smanjuje prijenos topline s grijaće ploče na termoelement, te tako utječe na točnost mjerenja temperature, odnosno, stvaraju se veće temperaturne razlike između grijaće ploče i ljepljive trake.

Unatoč ovoj pojavi, prilikom formiranja matematičkog modela za određivanje emisijskog faktora zračenja pretpostavljeno je da su temperature ljepljive trake i površine grijaće ploče jednake. Ova pretpostavka temelji se na idealnim uvjetima, pod kojima bi, uz savršen toplinski kontakt, te temperature doista bile jednake.



Slika 41. Krivulje ugrijavanja papirnate ljepljive trake (T1) i grijaće ploče (T2) – snimanje sa termoelementom

Slika 42. prikazuje krivulje ugrijavanja papirnate ljepljive trake (T1) i grijaće ploče (T2) dobivene temeljem podataka snimljenih infracrvenom kamerom. Uočavaju se velike temperaturne razlike (+40...70 °C) naspram podataka koje je snimio termoelement i tablet prikazanih na slici 41. Razlog tomu je nepravilno postavljen (nepoznat) ε ljepljive trake unutar IRBIS softvera.



Slika 42. Krivulje ugrijavanja papirnate ljepljive trake (R1) i grijaće ploče (R2) – snimanje sa infracrvenom kamerom

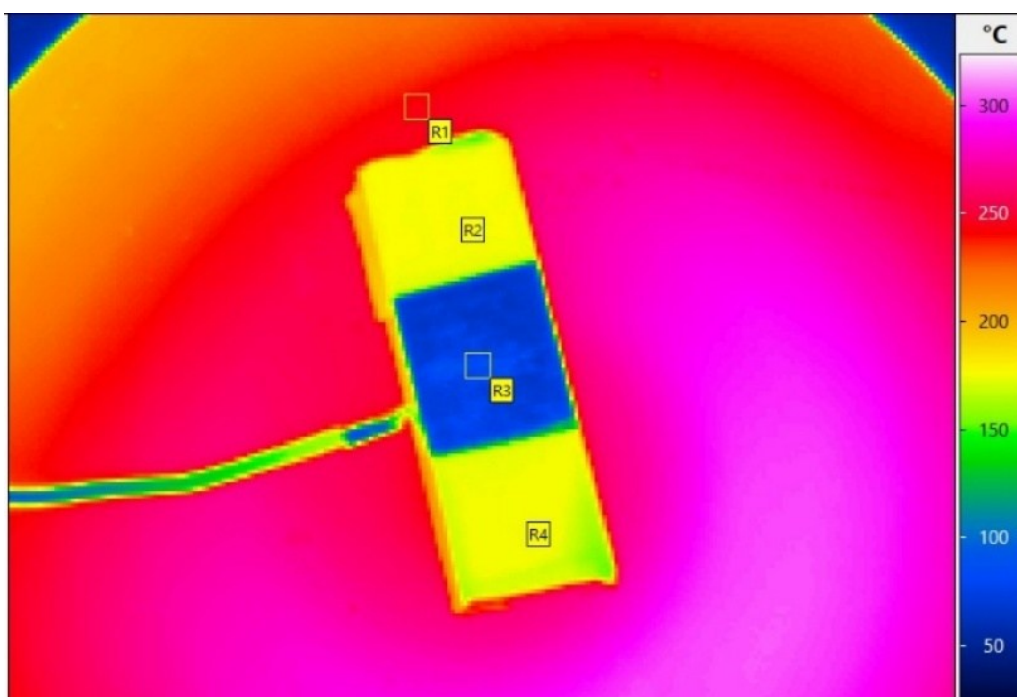
Emisijski faktori svih uzoraka, odnosno površina, određeni su istim postupkom, tj. usporedbom s emisijskim faktorom ljepljive trake koja je bila nalijepljena na uzorke. S obzirom na ranije objašnjenje, pretpostavljeno je da ljepljiva traka i površina uzoraka imaju jednake temperature.

2) Određivanje emisijskog faktora uzorka 1A, ε_2

Emisijski faktor uzorka 1A, ε_2 , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 , po istom principu usporedbe opisanom u prvom dijelu ovog potpoglavlja prema jednadžbi (28). Temperature površine uzorka 1A nazvat će se $T_{2,IC}$.

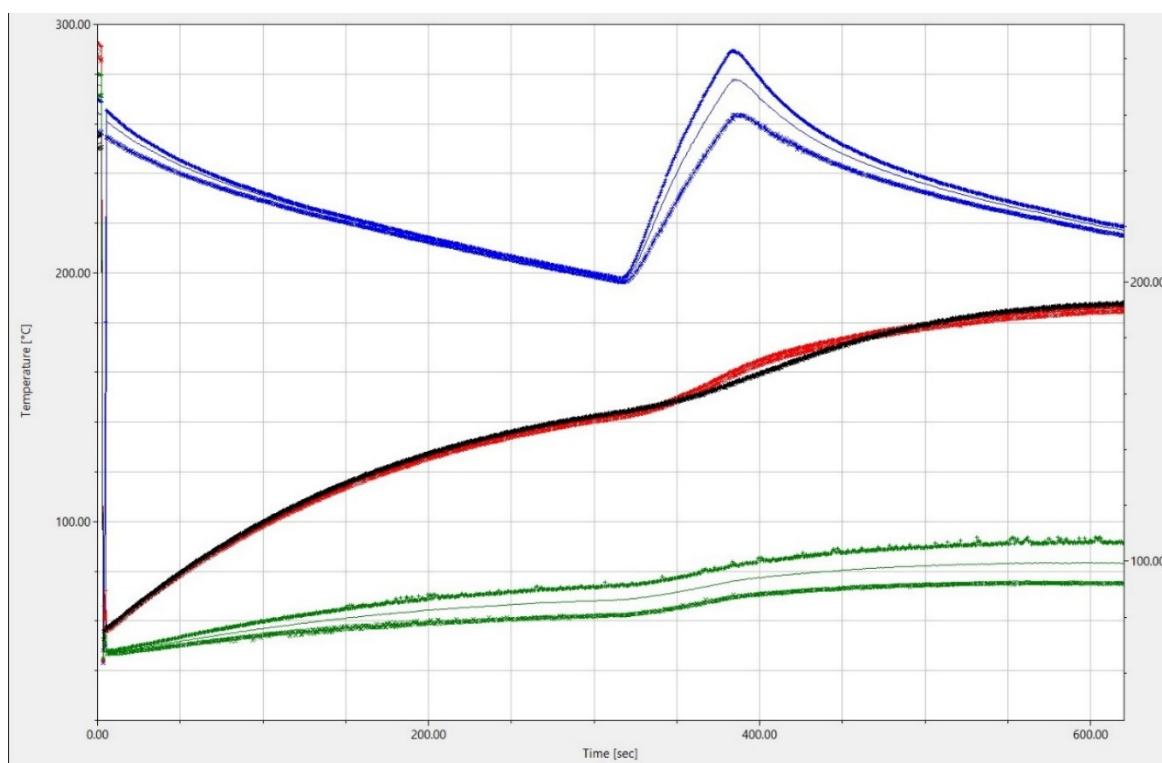
$$\varepsilon_2(T_{1,IC}, T_{2,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{2,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (28)$$

Temperatura površine uzorka 1A ($T_{2,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_3 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijaće ploče očitana je na isti način unutar kvadratića R_2 i R_1 , prikazanih na termogramu na slici 43.



Slika 43. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 1A i ljepljive trake

Slika 44. pokazuje $\mathcal{A}(t)$ dijagrame promjene temperature grijaće ploče (plava linija, R1), ljepljive trake (crvena linija, R2) i neprekrivene površine uzorka 1A (zeleno linija, R3) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.



Slika 44. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaae ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 1A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

Za svaku pojedinačnu površinu tijekom procesa zagrijavanja, na slici 44. prikazane su tri različite temperaturne krivulje. Ove krivulje odgovaraju promjeni najviše, najniže i srednje temperature unutar analiziranog područja na uzorku, odnosno kvadratića na termogramu na slici 43. Razlog za postojanje ovih krivulja je razlika u temperaturama unutar površine uzorka, koja može nastati zbog neravnomjernog zagrijavanja, toplinskih gubitaka ili varijacija u materijalu i njegovim svojstvima.

Prilikom određivanja emisijskog faktora za uzorak 1A, kao i za ostale uzorke, korištene su srednje vrijednosti temperature (prikazane središnjom, tanjom linijom na grafu) za kvadratić R3. Isto vrijedi za određivanje temperaturnih promjena kod svih uzoraka.

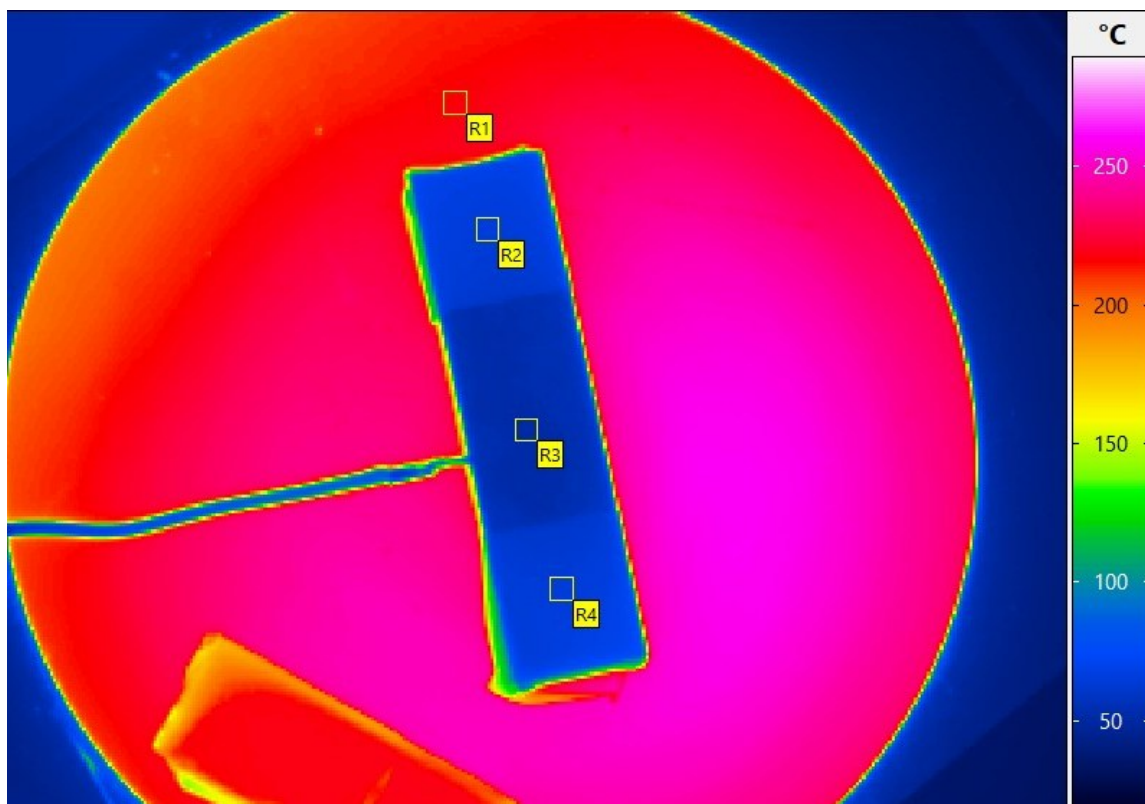
Velike temperaturne razlike između uzorka i ljepljive trake uzrokovane su netočnom postavkom emisijskog faktora trake unutar IRBIS softvera. S obzirom da infracrvena kamera koristi emisijski faktor kako bi izračunala temperaturu na temelju zračenja koje detektira, nepravilno postavljena vrijednost emisijskog faktora rezultira pogrešnim očitanjem temperature.

3) Određivanje emisijskog faktora uzorka 1B, ε_3

Emisijski faktor uzorka 1B, ε_3 , odredio se, također, usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 , jednadžba (29). Temperature površine uzorka 1B očitane sa termograma nazvat će se $T_{3,IC}$.

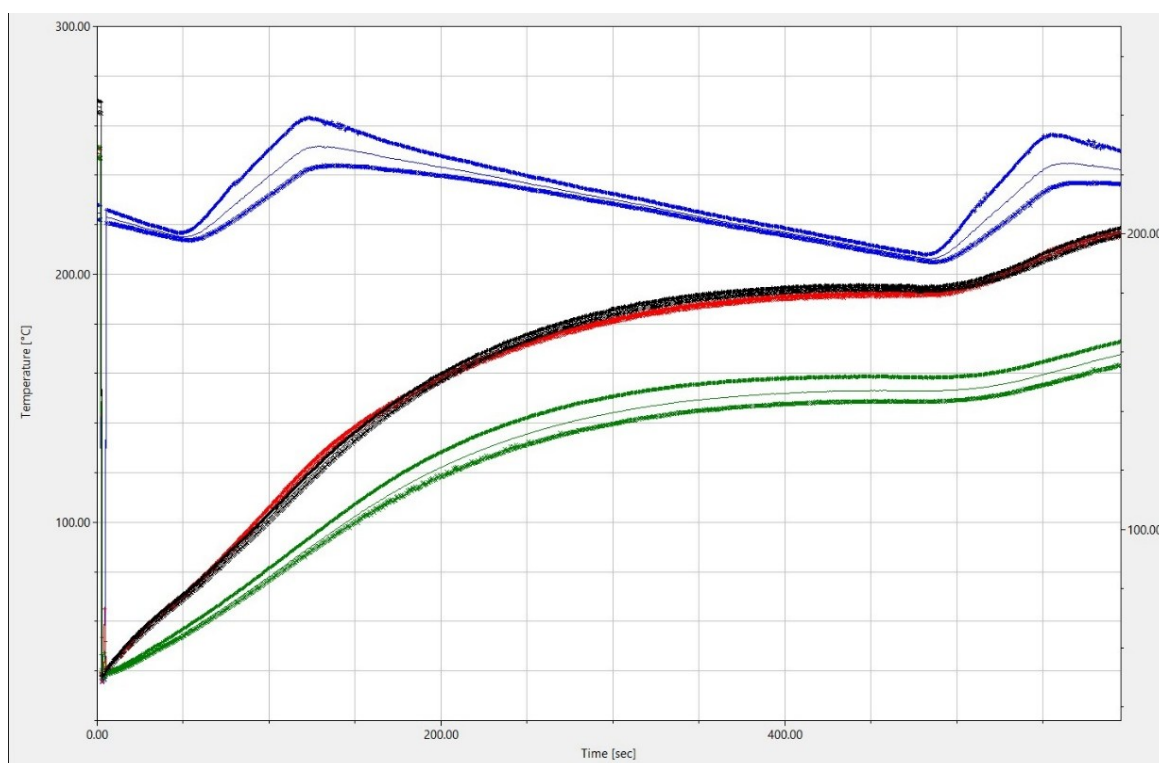
$$\varepsilon_3(T_{1,IC}, T_{3,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{3,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (29)$$

Temperatura površine uzorka 1B ($T_{3,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_3 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijaće ploče očitana je na isti način unutar kvadratića R_2 , i R_1 , prikazanih na termogramu na slici 45.



Slika 45. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 1B i ljepljive trake

Slika 46. pokazuje $\mathcal{G}(t)$ dijagrame promjene temperature grijaće ploče (plava linija, R1), ljepljive trake (crvena linija, R2) i neprekrivene površine uzorka 1B (zelena linija, R3) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.



Slika 46. $\mathcal{A}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaae ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 1B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

4) Određivanje emisijskog faktora uzorka 2A, ε_4

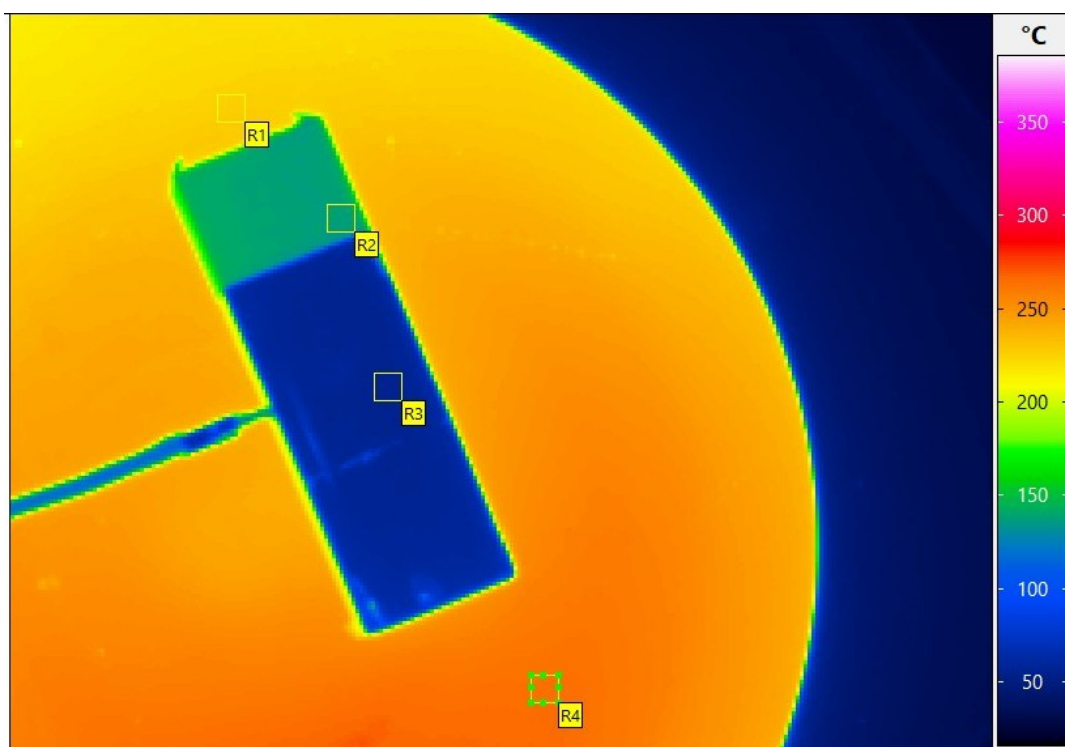
Emisijski faktor uzorka 2A, ε_4 , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 , jednađba (30). Temperature površine uzorka 2A očitane sa termograma nazvat će se $T_{4,IC}$.

$$\varepsilon_4(T_{1,IC}, T_{4,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{4,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (30)$$

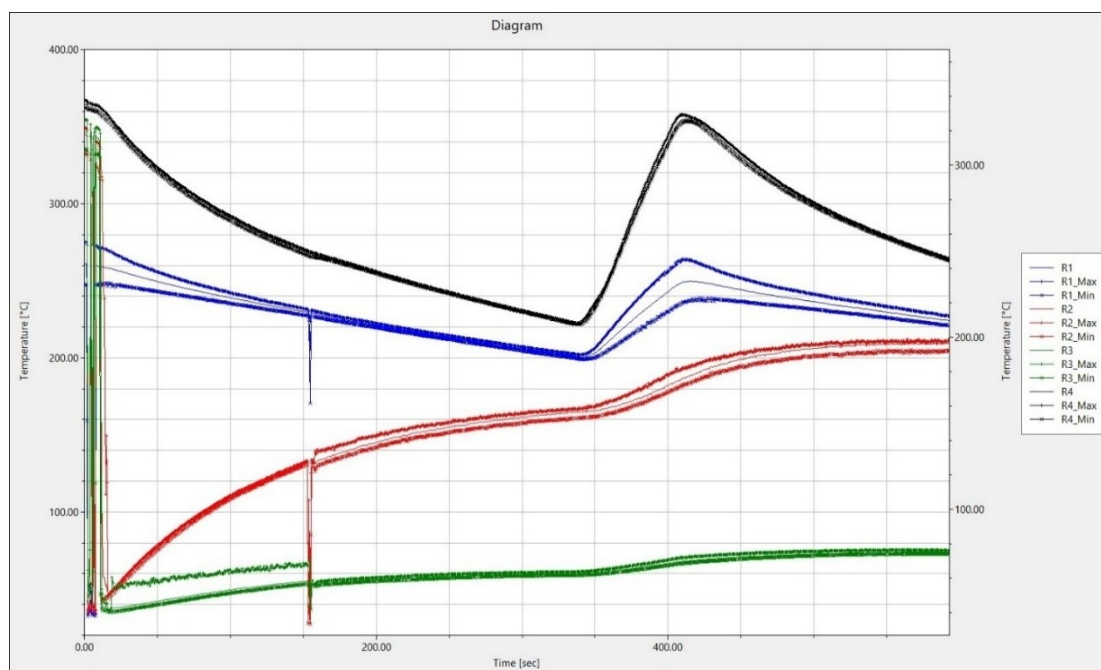
Temperatura površine uzorka 2A ($T_{4,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_3 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijaae ploče očitana je na isti naaun unutar kvadratića R_2 , i R_1 , prikazanih na termogramu na slici 47.

Slika 48. pokazuje $\mathcal{A}(t)$ dijagrame promjene temperature grijaae ploče (plava linija, R_1), ljepljive trake (crvena linija, R_2) i neprekrivene površine uzorka 2A (zeleno linija, R_3) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.

Temperaturne oscilacije vidljive na slici 48. na $\mathcal{A}(t)$ dijagramima blizu 150. sekunde ugrijavanja posljedica su lokaliziranih nesavršenosti u mjerenju te nisu uzete u obzir prilikom prorauna emisijskog faktora za uzorak 2A.



Slika 47. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 2A i ljepljive trake



Slika 48. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 2A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

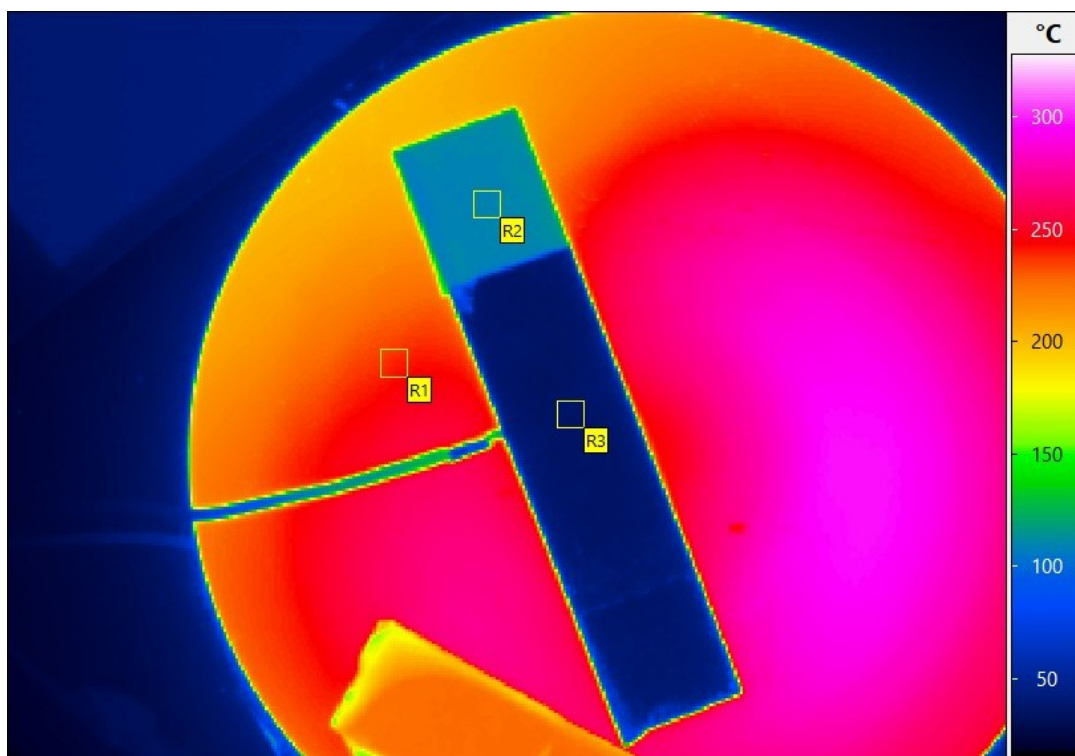
5) Određivanje emisijskog faktora uzorka 3A, ε_5

Emisijski faktor uzorka 3A, ε_5 , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 , jednačba (31). Temperature površine uzorka 3A očitane sa termograma nazvat će se $T_{5,IC}$.

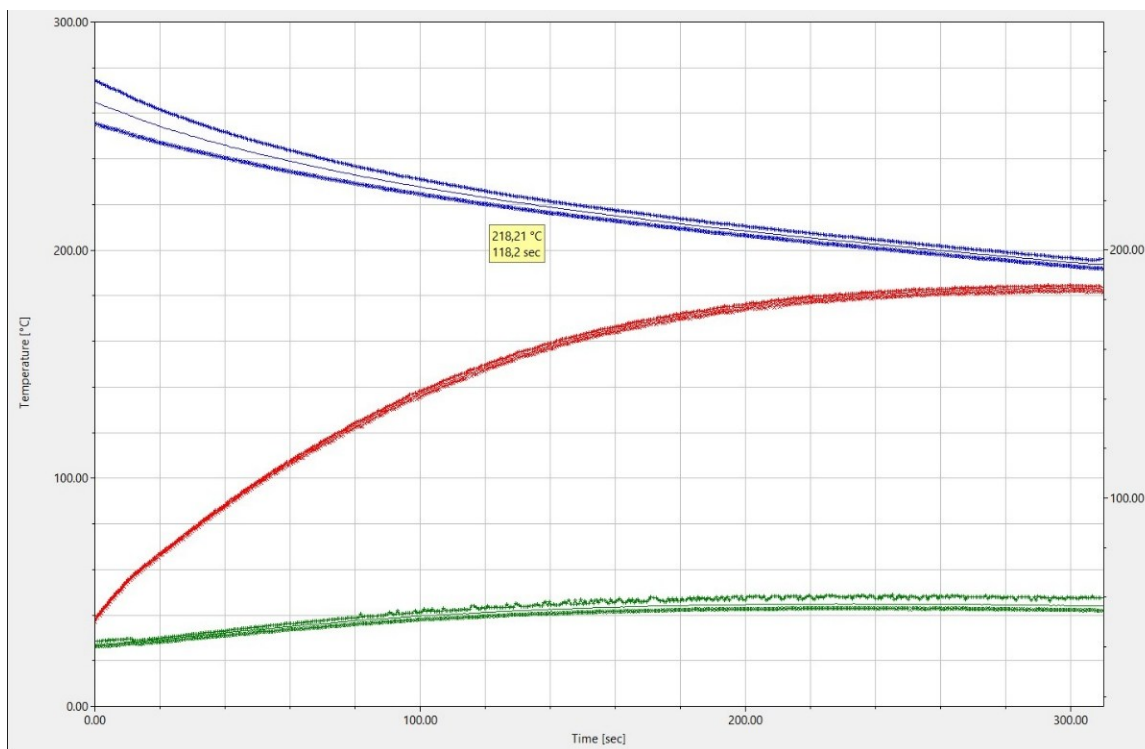
$$\varepsilon_5(T_{1,IC}, T_{5,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{5,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (31)$$

Temperatura površine uzorka 3A ($T_{5,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R₃, a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijače ploče očitana je na isti način unutar kvadratića R₂, i R₁, prikazanih na termogramu na slici 49.

Slika 50. pokazuje $\mathcal{A}(t)$ dijagrame promjene temperature grijače ploče (plava linija, R1), ljepljive trake (crvena linija, R2) i neprekrivene površine uzorka 3A (zeleno linija, R3) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.



Slika 49. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 3A i ljepljive trake



Slika 50. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 3A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

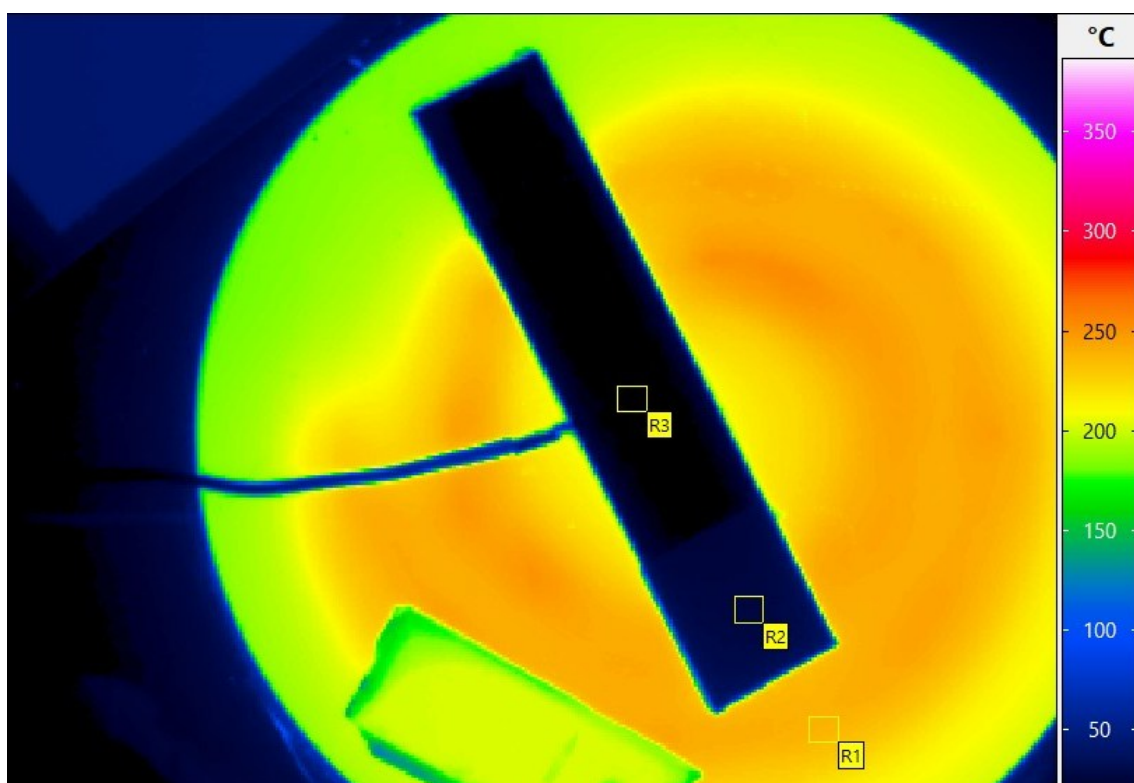
6) Određivanje emisijskog faktora uzorka 3B, ε_6

Emisijski faktor uzorka 3B, ε_6 , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 , jednadžba (32). Temperatura površine uzorka 3B očitane sa termograma nazvat će se $T_{6,IC}$.

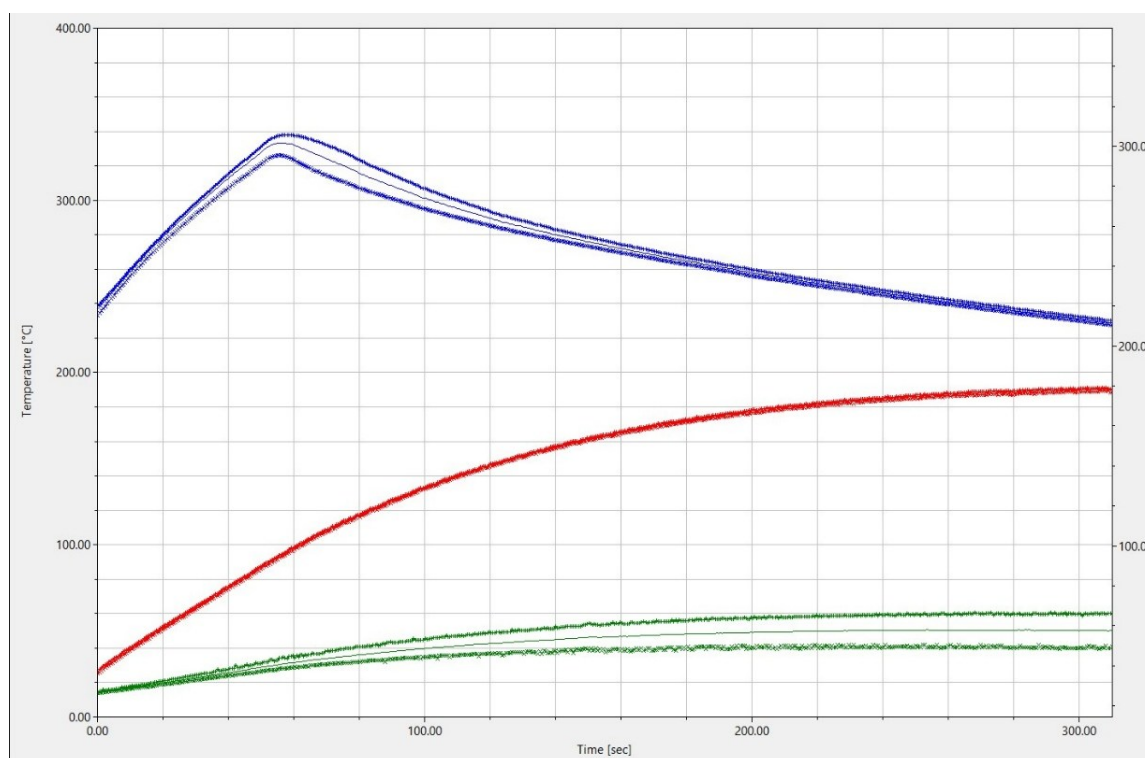
$$\varepsilon_6(T_{1,IC}, T_{6,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{6,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (32)$$

Temperatura površine uzorka 3B ($T_{6,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_3 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijaće ploče očitana je na isti način unutar kvadratića R_2 , i R_1 , prikazanih na termogramu na slici 51.

Slika 52. pokazuje $\mathcal{Q}(t)$ dijagrame promjene temperature grijaće ploče (plava linija, R_1), ljepljive trake (crvena linija, R_2) i neprekrivene površine uzorka 3B (zeleno linija, R_3) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.



Slika 51. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 3B i ljepljive trake



Slika 52. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 3B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

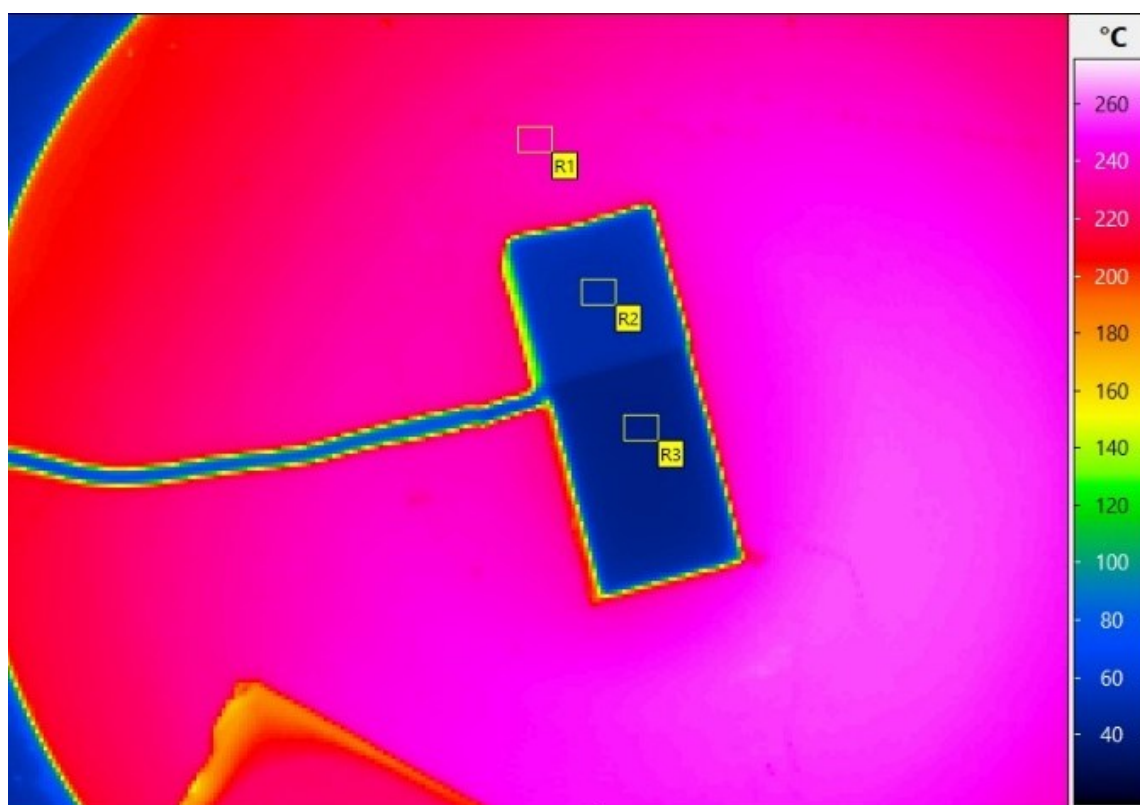
7) Određivanje emisijskog faktora uzorka 4A, ε_7

Emisijski faktor uzorka 4A, ε_7 , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 . Jednadžba (33). Temperatura površine uzorka 4A očitana sa termograma nazvat će se $T_{7,IC}$.

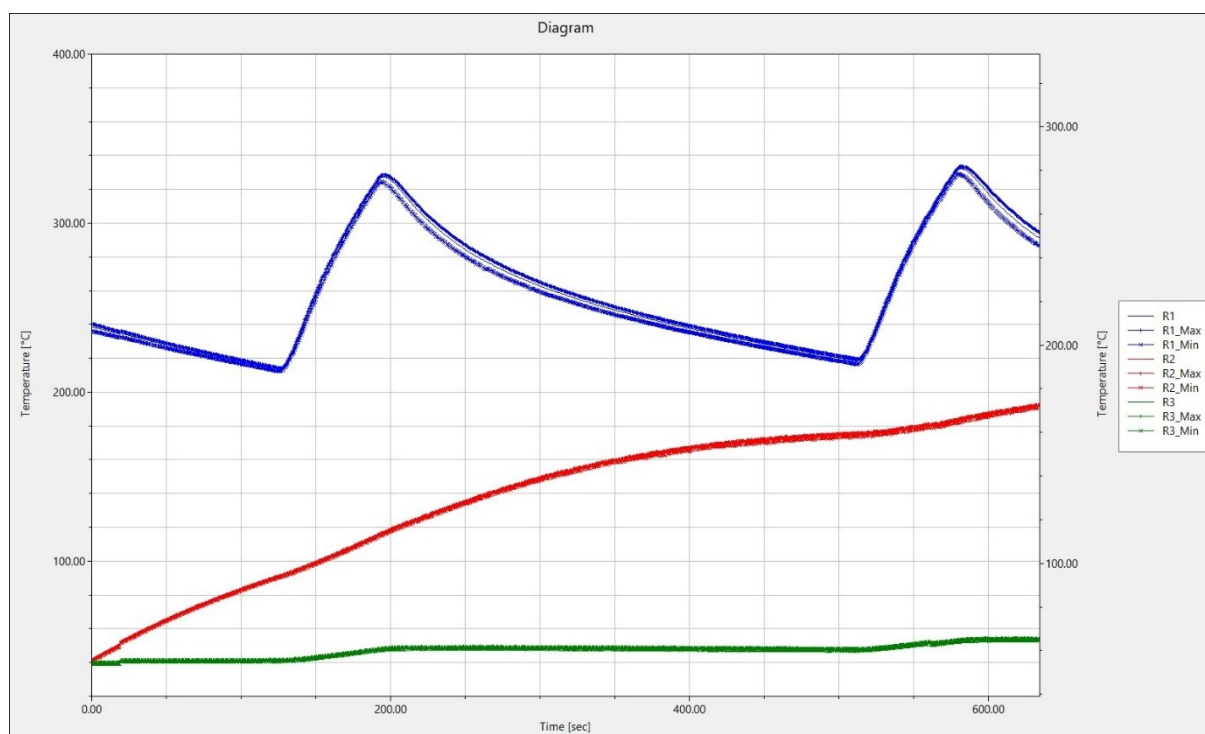
$$\varepsilon_7(T_{1,IC}, T_{7,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{7,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (33)$$

Temperatura površine uzorka 4A ($T_{7,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_3 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijače ploče očitana je na isti način unutar kvadratića R_2 , i R_1 , prikazanih na termogramu na slici 53.

Slika 54. pokazuje $\mathcal{A}(t)$ dijagrame promjene temperature grijače ploče (plava linija, R_1), ljepljive trake (crvena linija, R_2) i neprekrivene površine uzorka 3B (zeleno linija, R_3) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.



Slika 53. Termogram očitavanja „pravidnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 4A i ljepljive trake



Slika 54. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 4A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

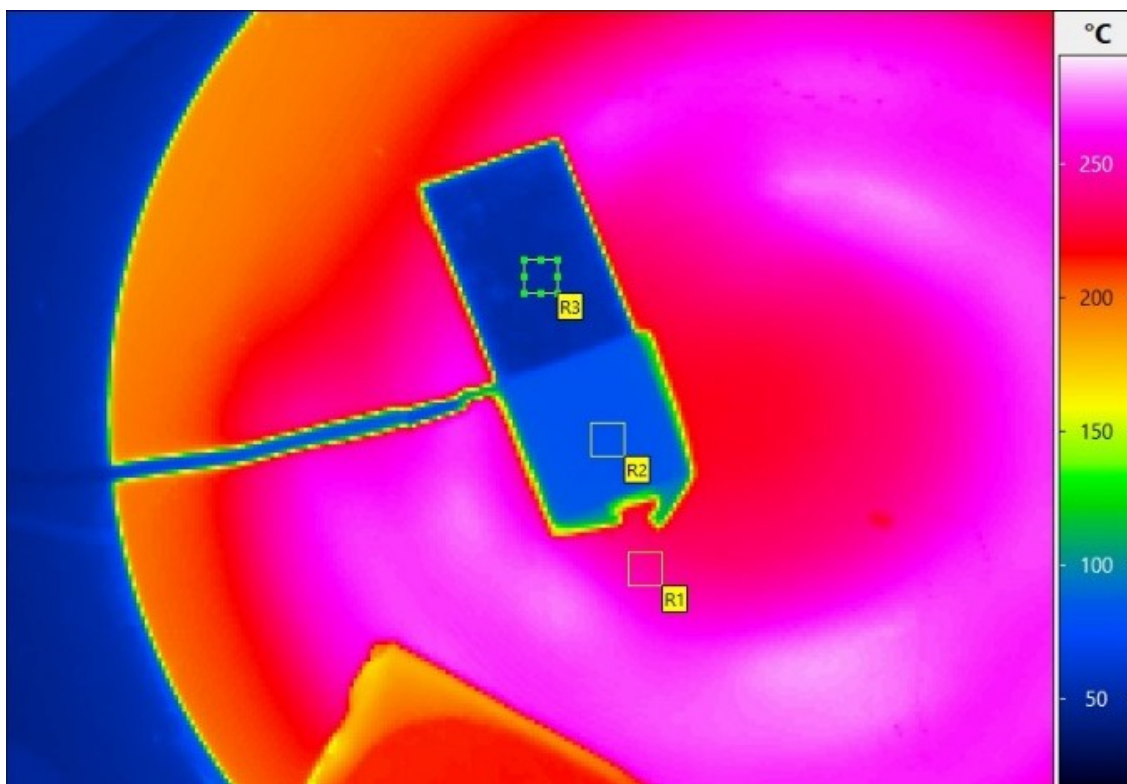
8) Određivanje emisijskog faktora uzorka 4B, ε_8

Emisijski faktor uzorka 4B, ε_8 , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 , jednačba (34). Temperature površine uzorka 4B očitane sa termograma nazvat će se $T_{8,IC}$.

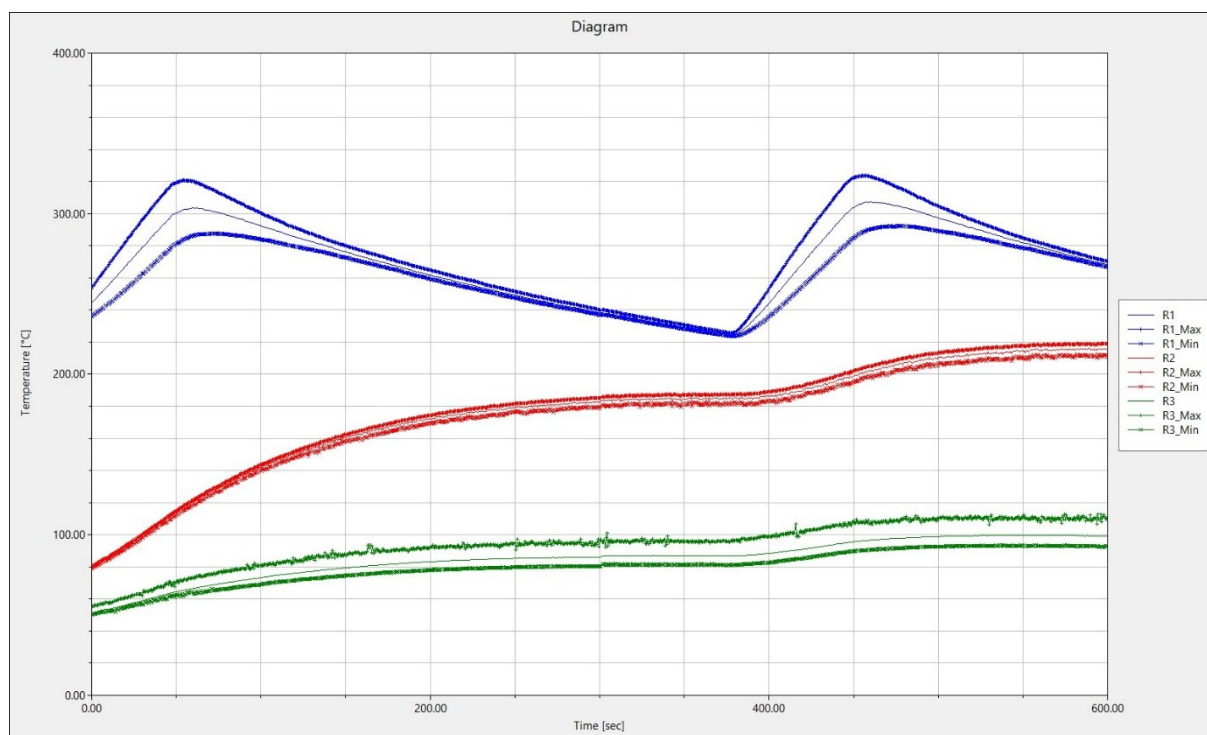
$$\varepsilon_8(T_{1,IC}, T_{8,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{8,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (34)$$

Temperatura površine uzorka 4B ($T_{8,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_3 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijaće ploče očitana je na isti način unutar kvadratića R_2 , i R_1 , prikazanih na termogramu na slici 55.

Slika 56. pokazuje $\mathcal{Q}(t)$ dijagrame promjene temperature grijaće ploče (plava linija, R1), ljepljive trake (crvena linija, R2) i neprekrivene površine uzorka 4B (zeleno linija, R3) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.



Slika 55. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 4B i ljepljive trake



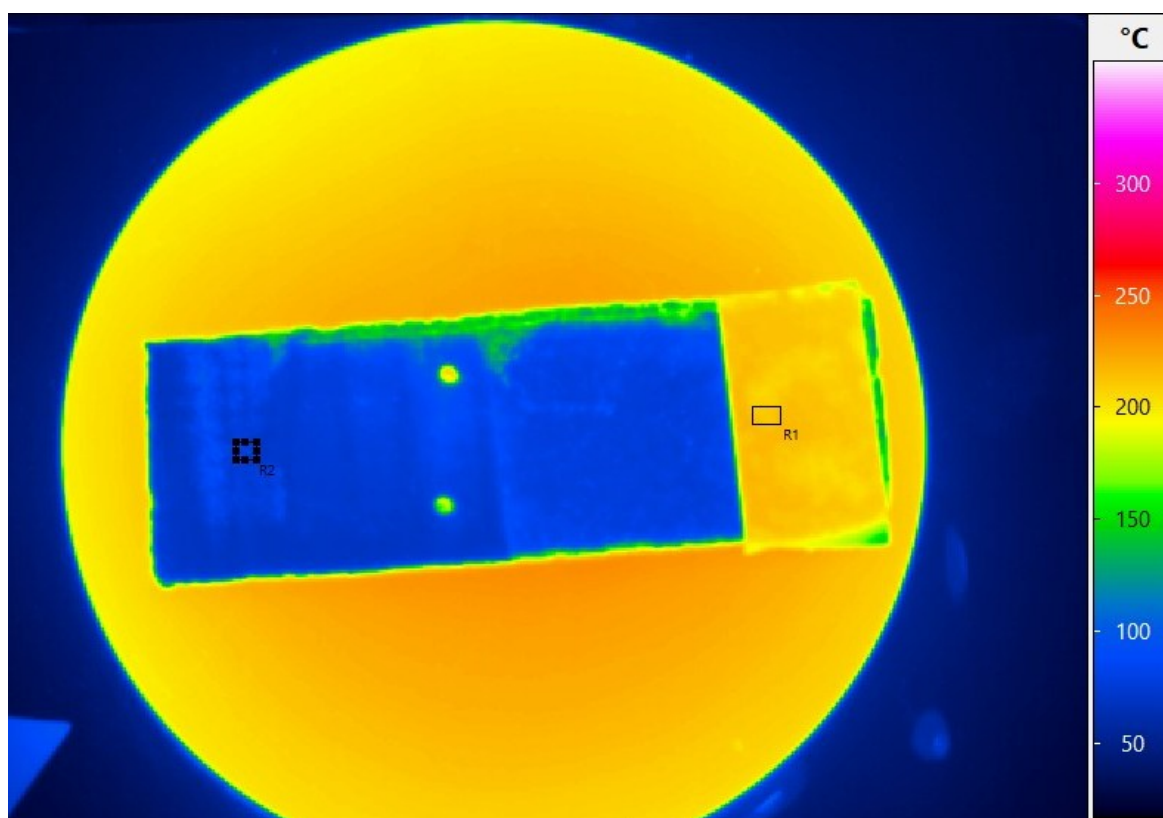
Slika 56. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 4B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

9) Određivanje emisijskog faktora uzorka 5A, ε_9

Emisijski faktor uzorka 5A, ε_9 , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 , jednačba (35). Temperature površine uzorka 5A nazvat će se $T_{9,IC}$.

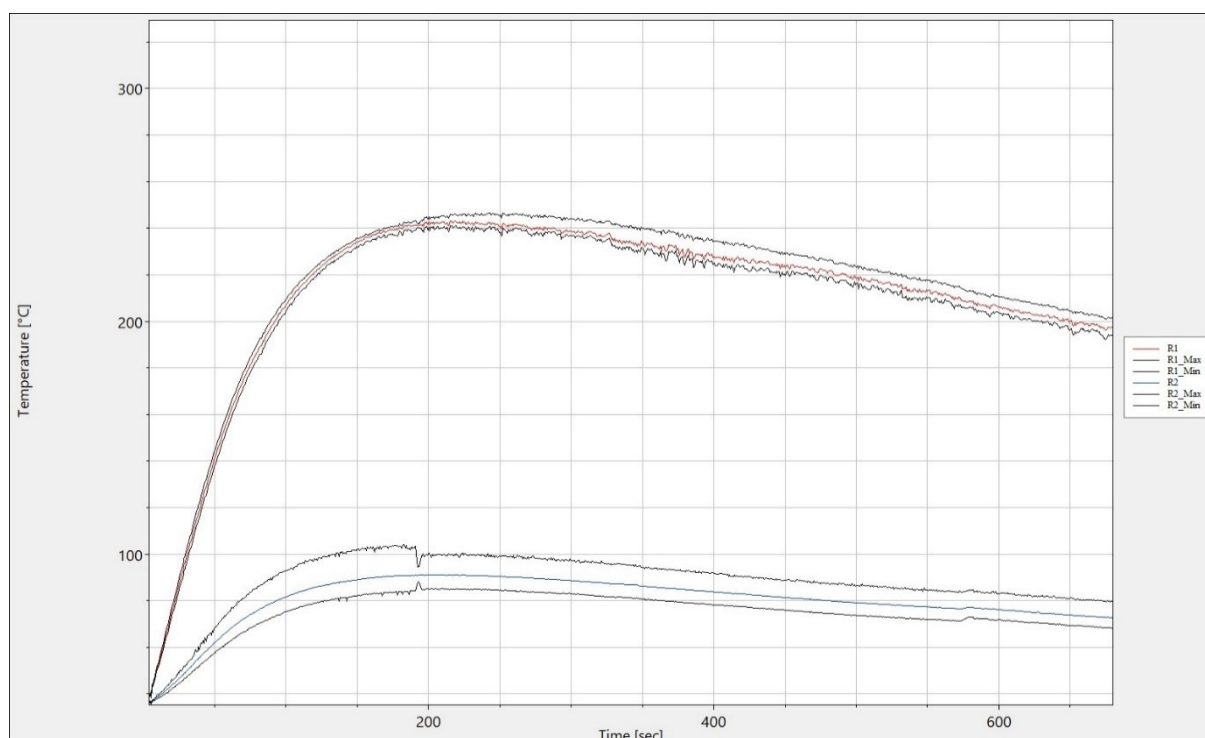
$$\varepsilon_9(T_{1,IC}, T_{9,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{9,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (35)$$

Temperatura površine uzorka 5A ($T_{9,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_2 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) očitana je na isti način unutar kvadratića R_1 , prikazanih na termogramu na slici 57.



Slika 57. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 5A i ljepljive trake

Slika 58. pokazuje $\mathcal{A}(t)$ dijagrame promjene temperature ljepljive trake (crvena linija, R1) i neprekrivene površine uzorka 5A (zelena linija, R2) izmjerenih pomoću IRBIS softvera.



Slika 58. $\mathcal{Q}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaae ploae (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 5A (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

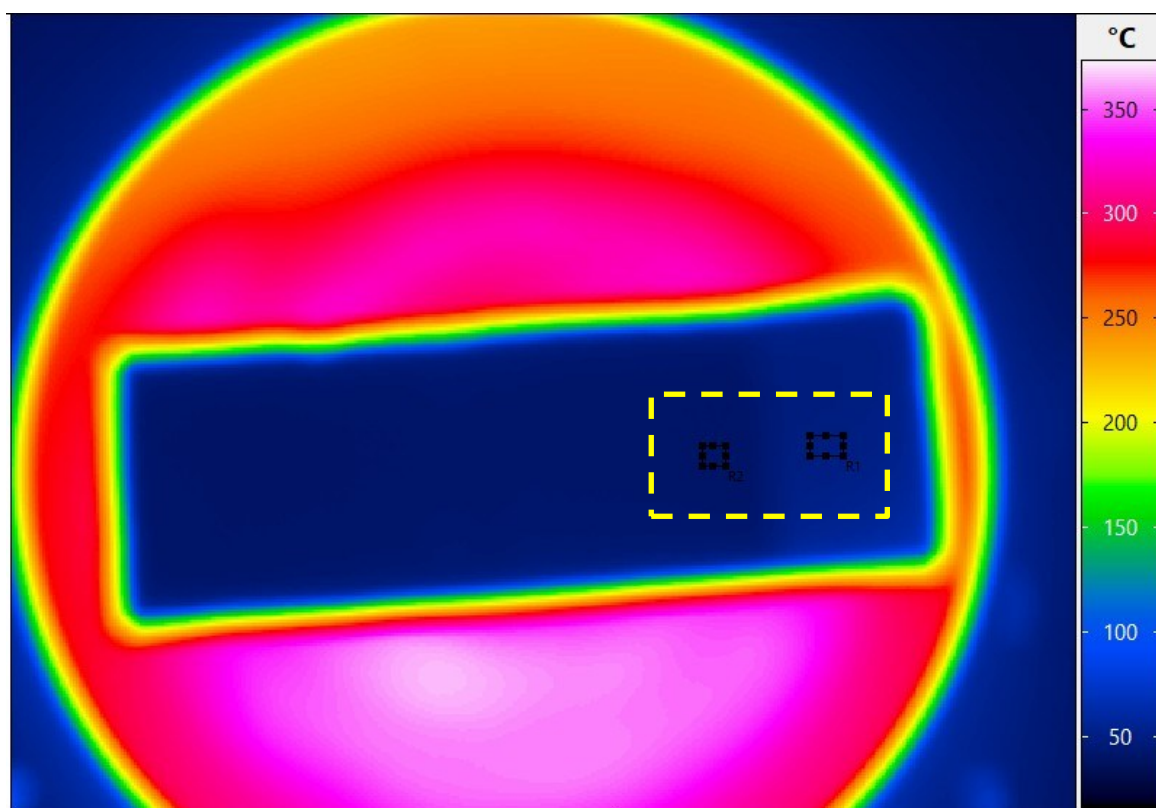
10) Određivanje emisijskog faktora uzorka 5B, ε_{10}

Emisijski faktor uzorka 5B, ε_{10} , odredio se usporedbom sa emisijskim faktorom trake, ε_1 . jednadžba (36). Temperature površine uzorka 5B nazvat će se $T_{10,IC}$.

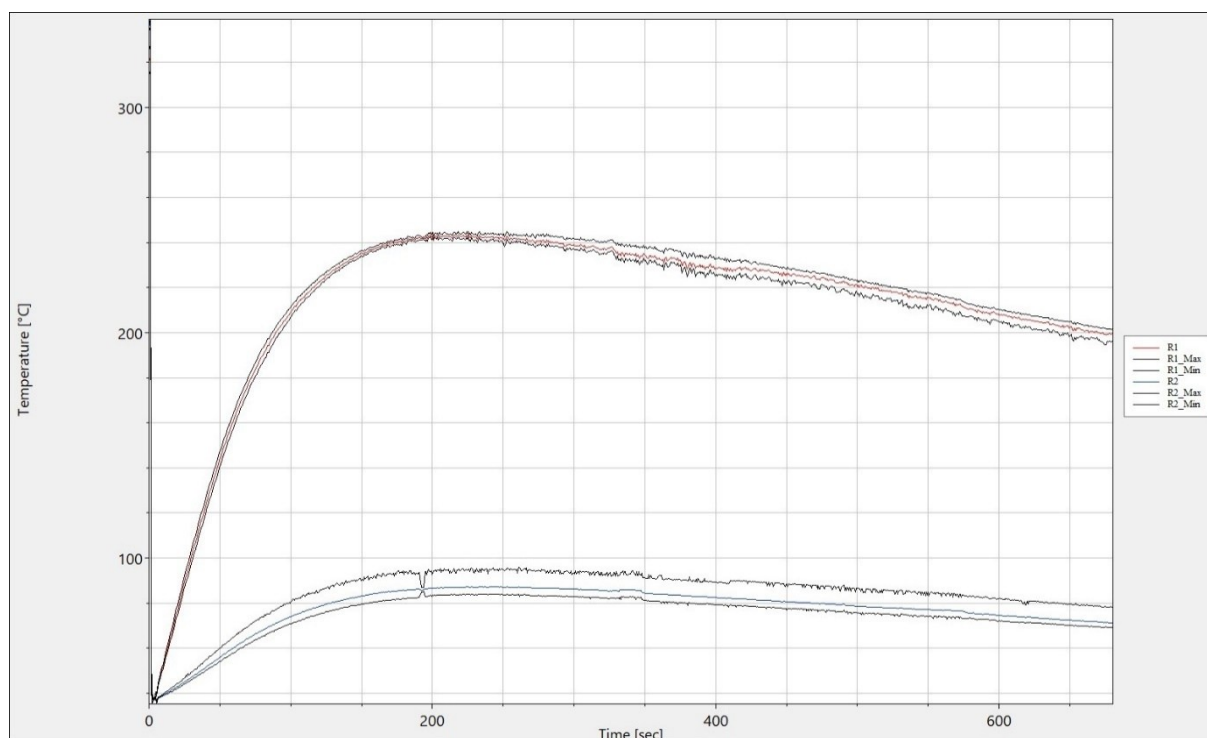
$$\varepsilon_{10}(T_{1,IC}, T_{10,IC}) = \varepsilon_1 \left(\frac{T_{10,IC}}{T_{1,IC}} \right)^4 \quad (36)$$

Temperatura površine uzorka 5B ($T_{10,IC}$) očitana je kao srednja vrijednost iz vrijednosti temperatura svih piksela unutar kvadratića R_3 , a temperatura ljepljive trake ($T_{1,IC}$) i grijaae ploae očitana je na isti način unutar kvadratića R_2 , i R_1 , prikazanih na termogramu na slici 59.

Slika 60. pokazuje $\mathcal{Q}(t)$ dijagrame promjene temperature grijaae ploae (plava linija, R1), ljepljive trake (crvena linija, R2) i neprekrivene površine uzorka 5B (zeleno linija, R3).



Slika 59. Termogram očitavanja „prividnih“ temperatura prilikom snimanja ugrijavanja uzorka 5B i ljepljive trake (desni kraj uzorka)

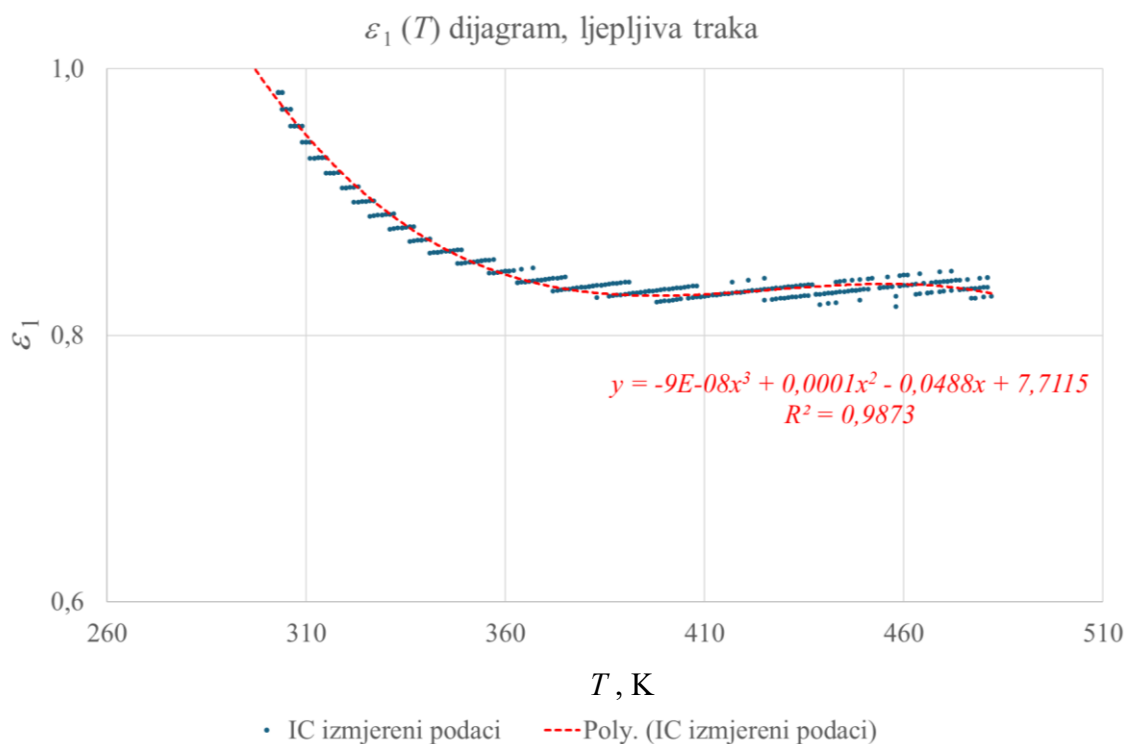


Slika 60. $\mathcal{A}(t)$ dijagrami ugrijavanja grijaće ploče (plavo), ljepljive trake (crveno) i površine uzorka 5B (zeleno) dobiveni pomoću termografskih podataka iz IRBIS softvera

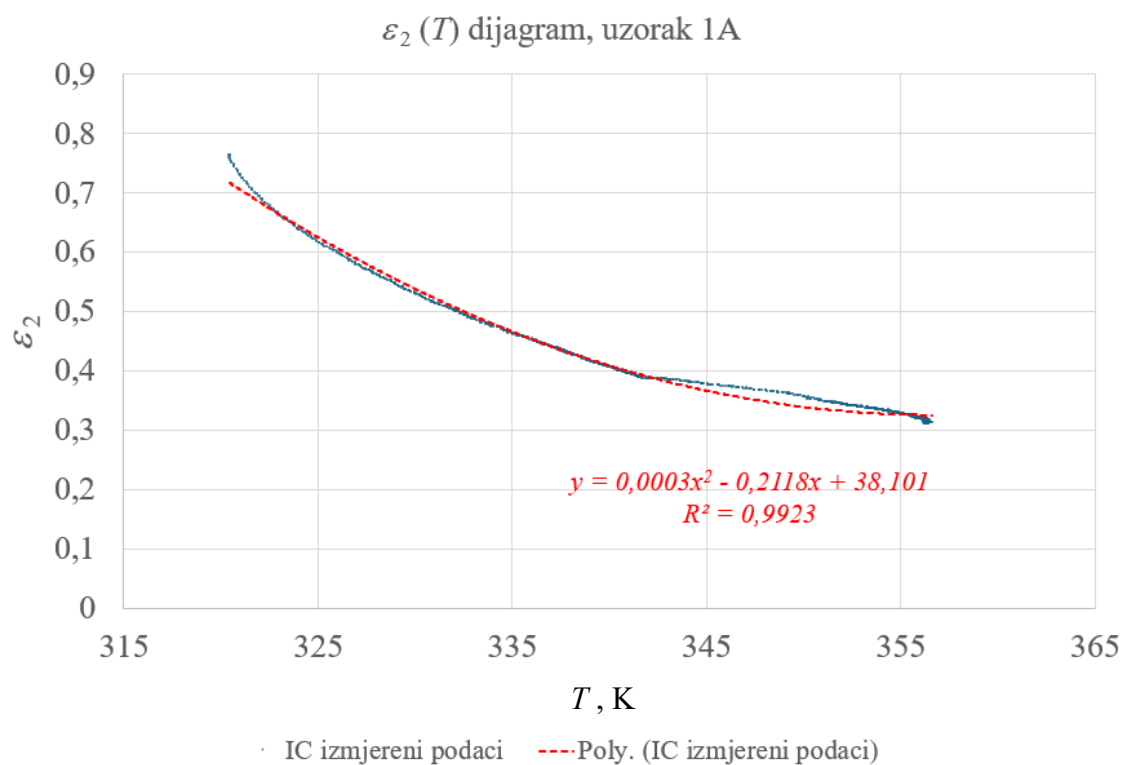
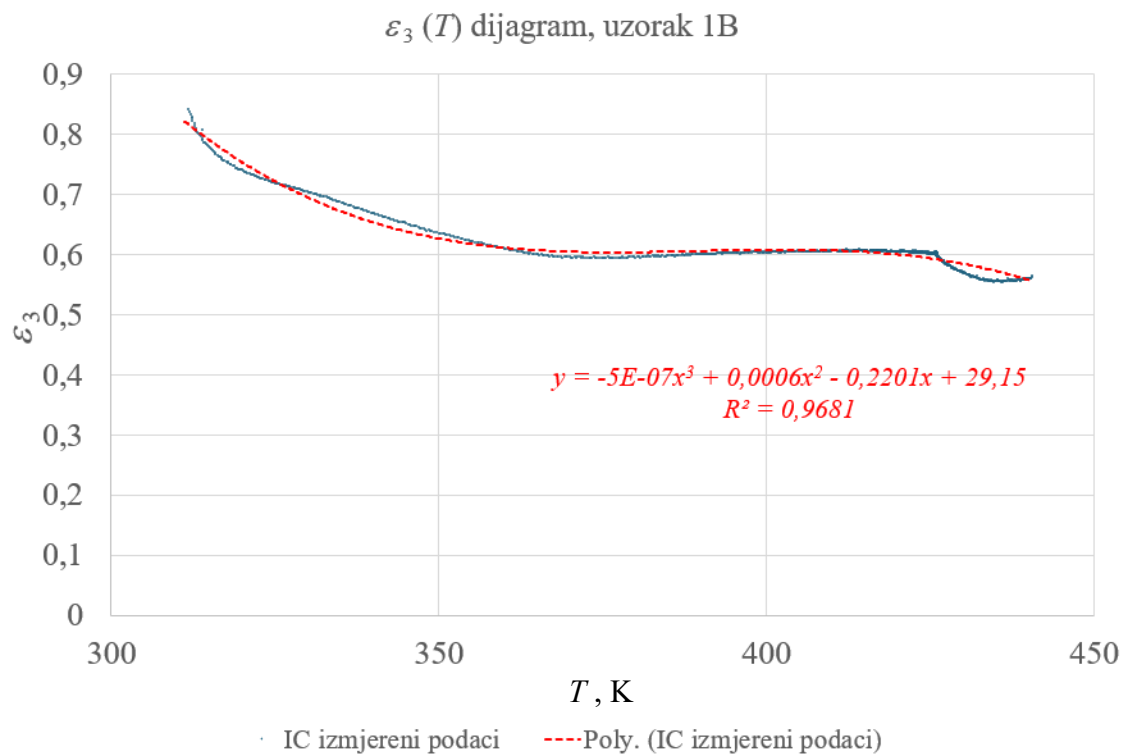
6.5. Rezultati mjerenja emisijskog faktora

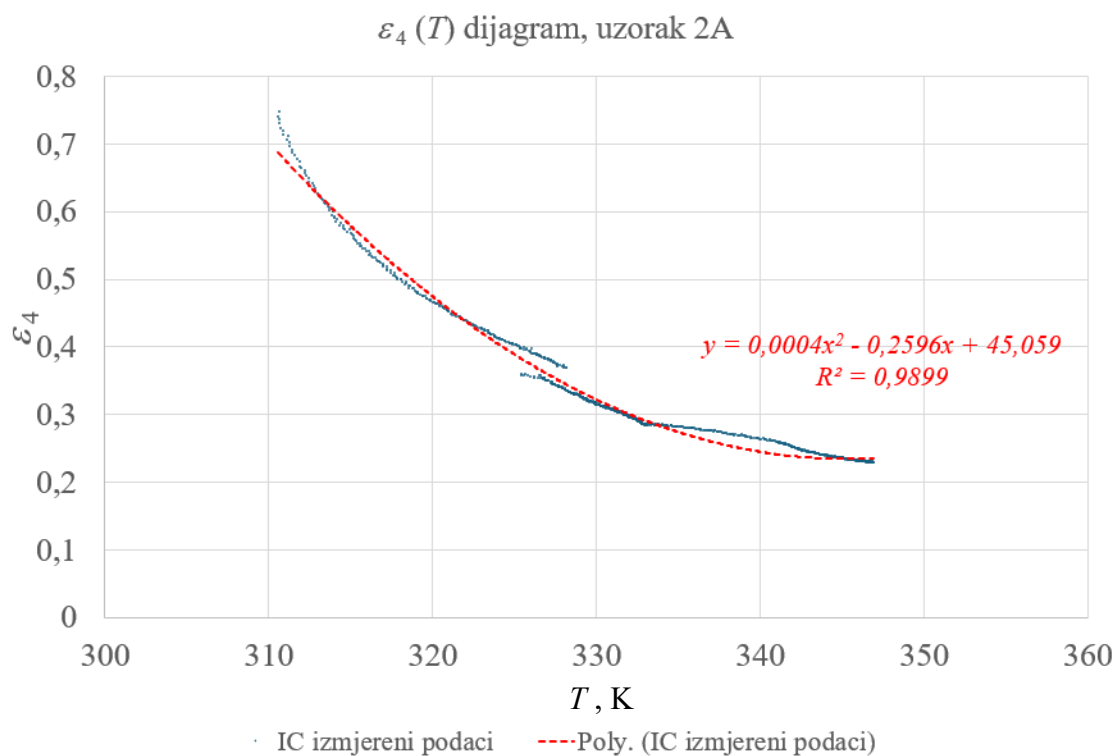
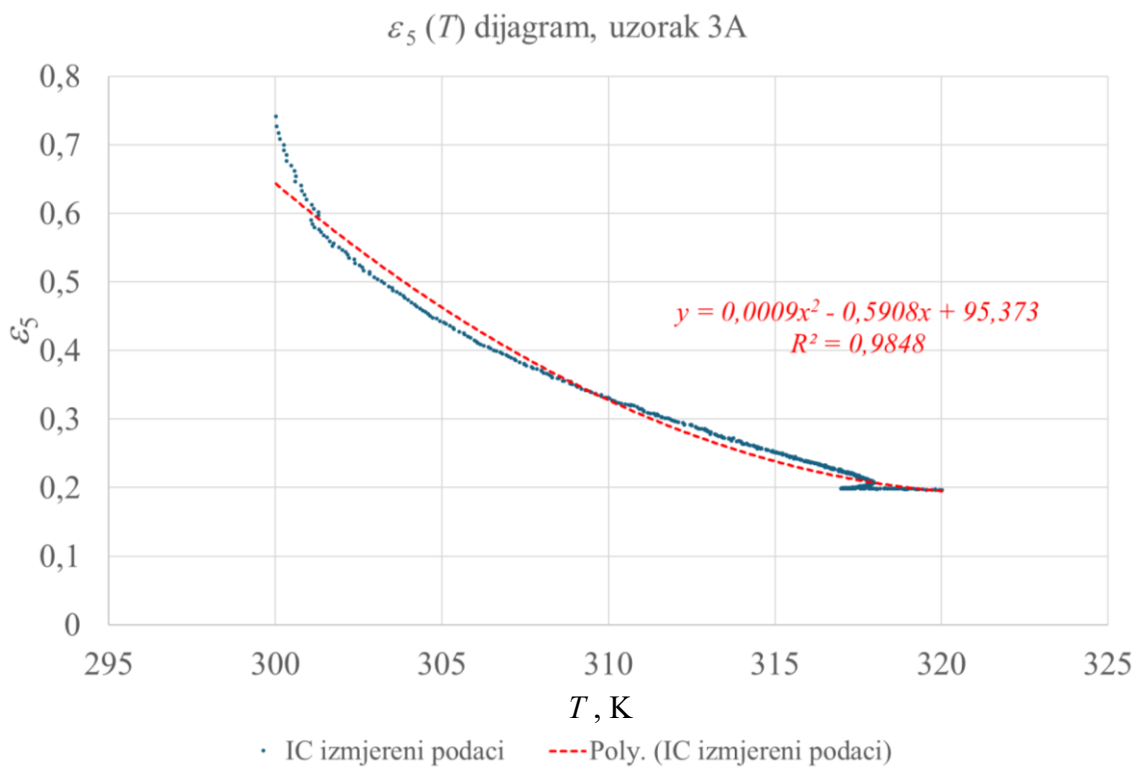
Nakon provedenog ugrijavanja svakog uzorka, odnosno vrste površine, sa prikupljenim podacima iz IRBIS softvera, iskonstruirani su pojedinačni $\varepsilon(T)$ dijagrami dani na slikama od 62. do 70.

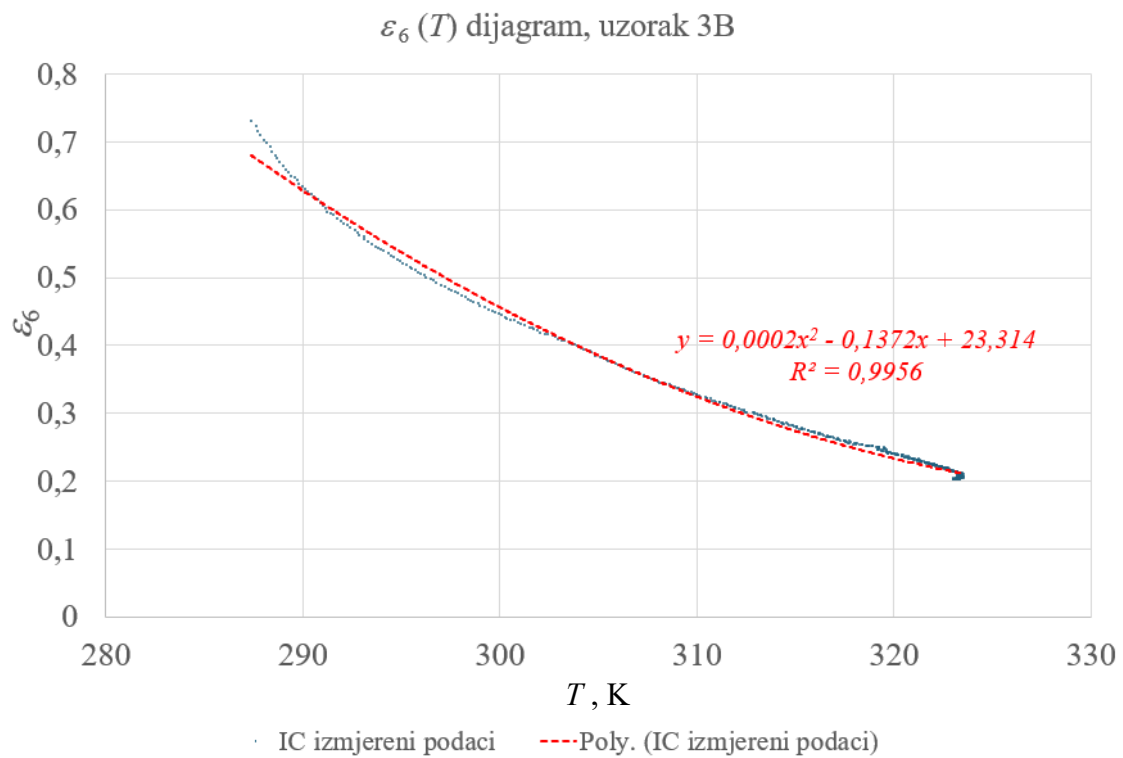
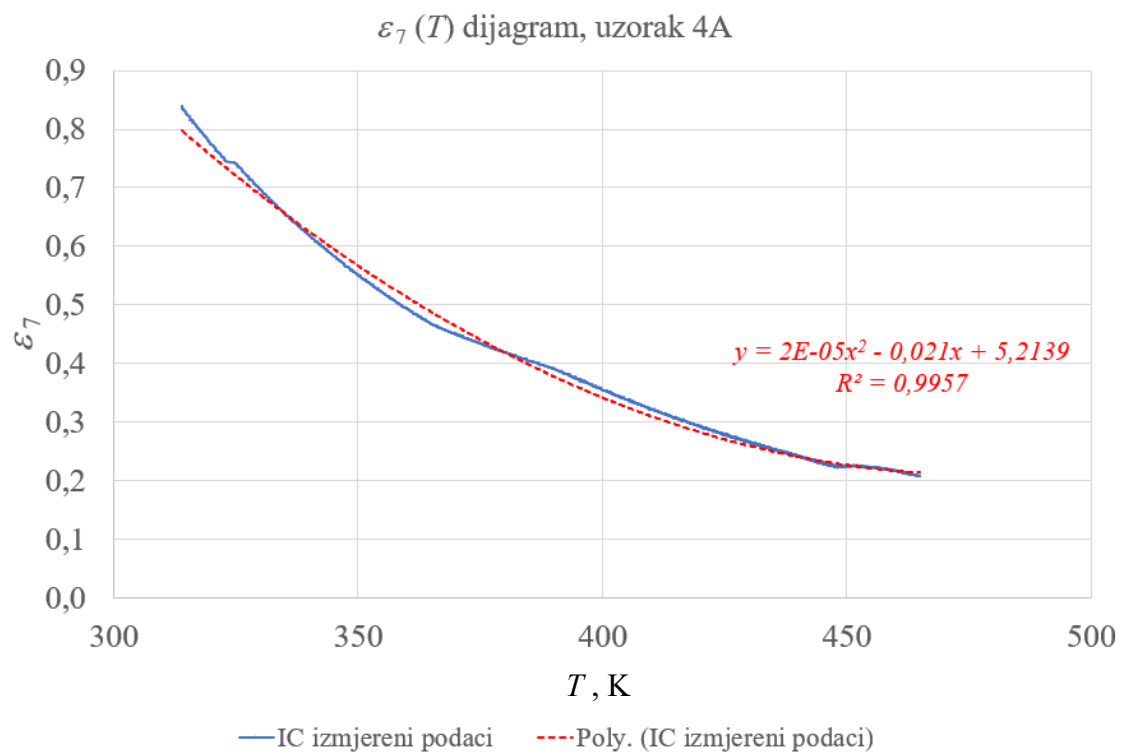
Slika 61. pokazuje promjenu emisijskog koeficijenta ε_1 ljepljive trake u ovisnosti o temperaturi. Pošto se radi o vrlo tankom materijalu koji se brzo ugrije, nema značajne promjene emisijskog koeficijenta (za razliku od ugrijavanja uzoraka). Zbog toga se odredila prosječna vrijednost emisijskog faktora ljepljive trake (0,853) kako bi se pomoću njega moglo odrediti $\varepsilon(T)$ ovisnost za uzorke, prema prethodno objašnjenom matematičkom modelu.

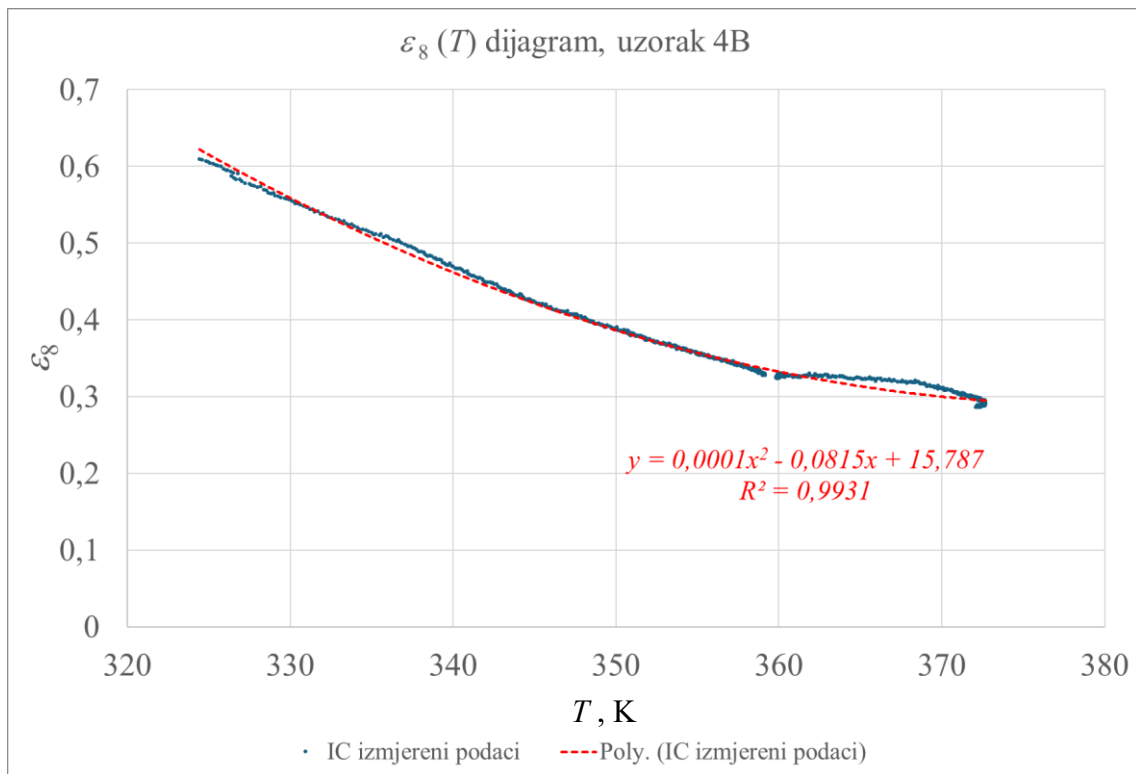
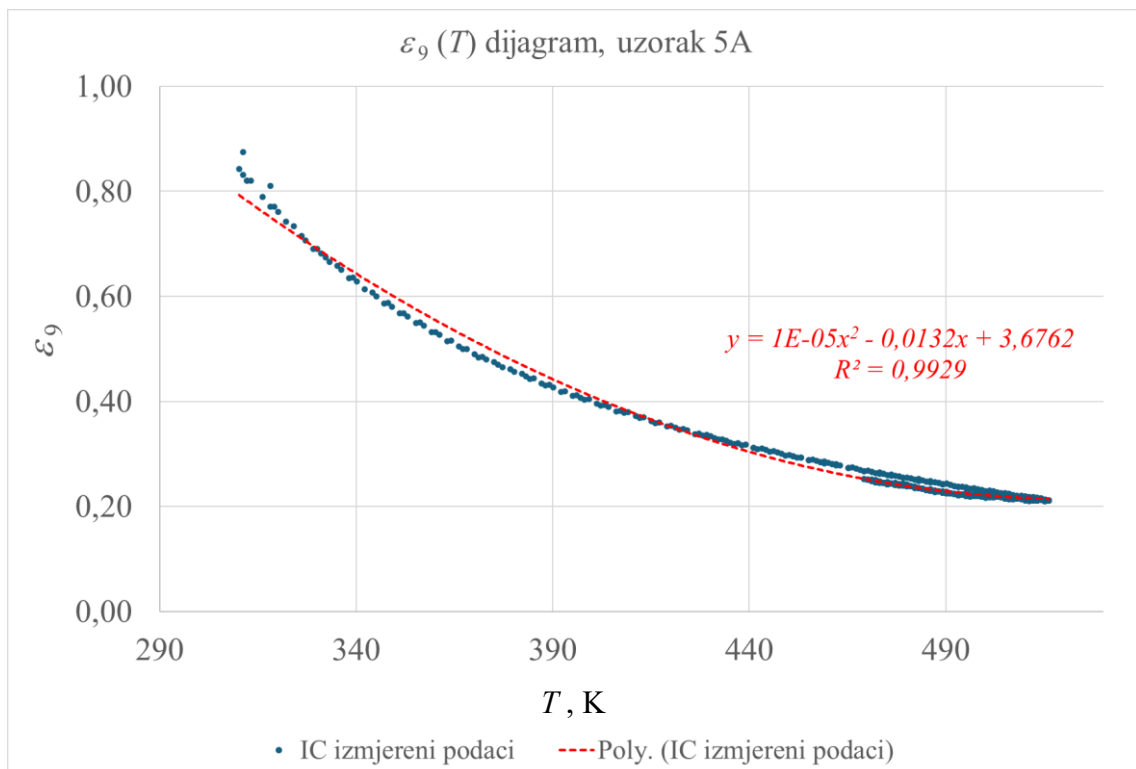


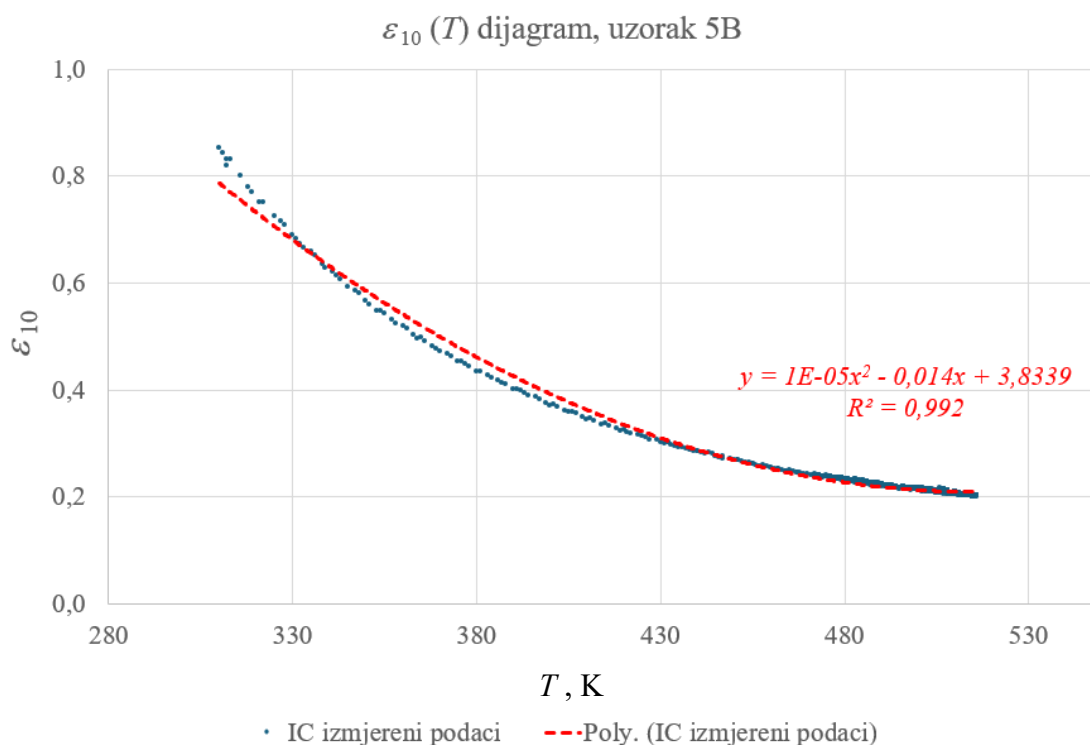
Slika 61. $\varepsilon_1(T)$ dijagram za ljepljivu traku

Slika 62. $\varepsilon_2(T)$ dijagram za uzorak 1ASlika 63. $\varepsilon_3(T)$ dijagram za uzorak 1B

Slika 64. $\varepsilon_4(T)$ dijagram za uzorak 2ASlika 65. $\varepsilon_5(T)$ dijagram za uzorak 3A

Slika 66. $\varepsilon_6(T)$ dijagram za uzorak 3BSlika 67. $\varepsilon_7(T)$ dijagram za uzorak 4A

Slika 68. $\varepsilon_8 (T)$ dijagram za uzorak 4BSlika 69. $\varepsilon_9 (T)$ dijagram za uzorak 5A



Slika 70. $\varepsilon_{10}(T)$ dijagram za uzorak 5B

S obzirom na to da se uočava da su sve ovisnosti $\varepsilon(T)$ kontinuirane, u tablici 6. sažeto su prikazani su rasponi promjene emisijskog faktora zračenja za svaki uzorak, odnosno njihove minimalne i maksimalne vrijednosti.

Uočava se da emisijski faktori izmjereni kod svih uzoraka kontinuirano padaju sa porastom temperature, odnosno od početka ugrijavanja. Provedena je regresijska analiza ovisnosti emisijskog faktora o temperaturi površine uzorka. Koeficijenti determinacije (R^2) za sve aproksimacijske polinomne krivulje veći su od 0,99, što ukazuje na dobru korelaciju podataka.

U tablici 6. prikazani su dobiveni rasponi emisijskih faktora za svaki uzorak. Primjećuje se da je na kraju ugrijavanja uzorak 5A imao najviši emisijski faktor (0,87), a uzorak 4B najniži.

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti emisijskih faktora uzoraka pri ugrijavanju od 20 °C do 200 °C

Oznaka uzorak	Materijal uzorka	Hrapavost površine, R_a [μm]	Raspon ε
1A	S235JR	3,049	0,31–0,76
1B	S235JR	0,961	0,55–0,83
2A	X5CrNi18-10	0,136	0,22–0,74
3A	AlMg4,5Mn0,7	0,225	0,19–0,72
3B	AlSi1MgMn	1,864	0,20–0,72
4A	CuZn36Pb3	0,020	0,20–0,73
4B	CuZn36Pb3	0,160	0,28–0,60
5A	Čisti Ti	1,118	0,24–0,87
5B	Čisti Ti	25	0,23–0,84

Uzorak 5A imao je sedam puta veću hrapavost ($R_a = 1,118 \mu\text{m}$) od uzorka 4B ($R_a = 0,160 \mu\text{m}$), što odgovara tvrdnji da će hrapaviji materijali snažnije emitirati zračenje, a u skladu s time imati i viši emisijski faktor. Odmah nakon uzorka 5A slijedi 5B po veličini iznosa emisijskog faktora, iako je uzorak 5B imao najveću hrapavost.

Literaturni podaci za emisijski faktor različitih materijala i površinskih obrada navedeni u tablici 4 prilično se razlikuju od dobivenih eksperimentalnih rezultata, no to je bilo i očekivano s obzirom da na mjerenje emisijskog faktora zračenja utječe mnogo različitih parametara, kao što je opisano u teorijskom dijelu rada, a uvjeti mjerenja nisu poznati u literaturi. Kod mjerenja za uzorak 1B (oksidirani čelik) te za uzorak 4B (polirana mjed) uočeno je da dobivene vrijednosti približno odgovaraju literaturnim vrijednosti emisijskih koeficijenta za vrijednosti pri 200 °C (0,80; 0,61), navedenih u tablici 4.

7. Zaključak

U radu su opisani fizikalni zakoni i metode relevantne za razumijevanje i mjerenje emisijskog faktora zračenja, kao i utjecaj hrapavosti površine na toplinsko zračenje. Teorijski dio rada obuhvatio je prirodne zakone za zračenje stvarnog i crnog tijela, poput Planckovog, Wienovog, Stefan-Boltzmannovog i Kirchhoffovog zakona. Nadalje, analizirane su metode beskontaktnog mjerenja temperature, s posebnim naglaskom na infracrvenu termografiju i pirometriju, te su istaknuti potencijalni izvori pogrešaka pri primjeni ovih metoda. Navedene su analitičke i eksperimentalne metode za određivanje emisijskog faktora zračenja, te kalorimetrijske, radiometrijske i reflektometrijske metode. Na kraju, opisani su bitni postupci i parametri pri ispitivanju integriteta površine, te utjecaj hrapavosti na emisijski faktor.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je mjerenje normalnog emisijskog faktora u ovisnosti o temperaturi, vrsti materijala i površinskoj hrapavosti pomoću infracrvene kamere, IRBIS softvera te razvijenog matematičkog modela. Uzorci su ugrijavani unutar 9 minuta sa sobne temperature na prethodno zagrijanoj grijaćoj podlozi od 200 °C. Rezultati mjerenja pokazali su da emisijski faktor svih uzoraka kontinuirano opada s porastom temperature. Uzorak 5A, koji je imao veću hrapavost ($R_a = 1,118 \mu\text{m}$), pokazao je najviši emisijski faktor na kraju mjerenja (0,87), dok je uzorak 4B, s manjom hrapavošću ($R_a = 0,160 \mu\text{m}$), imao najniži emisijski faktor, što potvrđuje da hrapavije površine snažnije emitiraju zračenje.

Regresijska analiza pokazala je visoke vrijednosti koeficijenta determinacije ($R^2 > 0,99$) za sve uzorke, što ukazuje na dobru korelaciju podataka. Usporedba s literaturnim podacima pokazala je razlike, što je bilo očekivano s obzirom na različite i nedovoljno poznate uvjete mjerenja u literaturi. No, vrijednosti emisijskih faktora za uzorke 1B i 4B bile su približno u skladu s literaturnim podacima za 100 °C. U ovom radu dokazano je da ε značajno ovisi o temperaturi i hrapavosti površine.

Za buduća i/ili opsežnija istraživanja, preporuča se standardizirati ili detaljno opisati uvjete mjerenja te provoditi više mjerenja kako bi se rezultati mogli uspoređivati i primjenjivati za rješavanje različitih inženjerskih ili znanstvenih problema.

LITERATURA

- [1] Modest M. F, Mazumder S.: Radiative Heat Transfer, Fourth Edition, Elsevier Inc., 2023.
- [2] Halasz B.: Uvod u termodinamiku, FSB, Zagreb, 2021.
- [3] Ji Q., Chen X., Laude V., Liang J., Fang G., Wang C., Alae R., Kadic M.: Selective thermal emission and infrared camouflage based on layered media, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 36, Issue 3, pp. 212-219, 2023.
- [4] Schowengerdt R. A.: Chapter 2 – Optical Radiation Models, Remote Sensing (Third edition), Models and Methods for Image Processing, pp. 45-73, AP, 2007.
- [5] Cengel Y. A.: Heat Transfer – A Practical Approach, Second Edition, McGraw-Hill, 2002.
- [6] Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P.: Introduction to Heat Transfer, Sixth Edition, John Wiley&Sons, Inc., 2011.
- [7] Galović A.: Termodinamika 2, FSB, Zagreb, 2020.
- [8] Celina M., Ottesen K., Gillen K. T., Clough R. L.: FTIR emission spectroscopy applied to polymer degradation, Polymer Degradation and Stability, Elsevier Science Limited, 1996.
- [9] Termodinamika, Prijenos Topline, Hrvatska tehnička enciklopedija, https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/termodinamika_prijenos_topline.pdf,
Pristupljeno: 18. 11. 2024.
- [10] Vollmer M., Mollmann K. P.: Infrared Thermal Imaging – Fundamentals, Research and Applications, Second Edition, Wiley-VCH, Weinheim, Njemačka, 2018.
- [11] Teledyne Flir, Flir Ex Pro, <https://www.flir.eu>, Pristupljeno: 18. 11. 2024.
- [12] Omega™, Performance Infrared Thermometer, <https://www.omega.co.uk/pptst/OS1300-SERIES.html>, Pristupljeno 19. 11. 2024.
- [13] Tsai S. R., Hamblin M. R.: Biological effects and medical applications of infrared radiation, PMC, 2018.
- [14] GSTiR, Technical Principles of Thermal Camera, <https://www.gst-ir.net/news-events/infrared-knowledge/278.html>, Pristupljeno: 18. 11. 2024.
- [15] Li Y., Zhang P., Chen G., Li Y., Hua W., Li Y., Jiao Z.: Study on Method for Measuring Coating Emissivity by Applying Active Irradiation Based on Infrared Thermal Imager, PMC, 2022.
- [16] Minkina W., Dudzik S.: Infrared Thermography – Errors and Uncertainties, Czestochowa University of Technology, Poland, John Wiley&Sons, 2009.

- [17] Church, J. S., Cook, N. J., Schaefer, A. L.: Recent applications of infrared thermography for animal welfare and veterinary research: Everything from chicks to elephants. *Inframation 2009, Proceedings*, vol. 10, pp. 215–224, 2009.
- [18] Abeykoon C.: *Measurement: Sensors – Sensing technologies for process monitoring in polymer extrusion: A comprehensive review on past, present and future aspects*, Volume 22, Elsevier, 2022.
- [19] Reichel D.: *Temperature Measurement during Milisecond Annealing – Ripple Pyrometry for Flash Lamp Annealers*, Springer, Dresden, 2015.
- [20] ISO 19618:2017 – *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Measurement method for normal spectral emissivity using blackbody reference with an FTIR spectrometer*
- [21] Mohr G., Nowakowski S., Altenburg S. J., Maiehofer C., Hilgenberg K.: Experimental Determination of the Emissivity of Powder Layers and Bulk Material in Laser Powder Bed Fusion Using Infrared Thermography and Thermocouples, Volume 10, Issue 11, *Advanced Characterization and On-Line Process Monitoring of Additively Manufactured Materials and Components*, Metals 2020, 2020.
- [22] Li Y., Zhang P., Chen G., Hua W., Li Y., Jiao Z.: Study on Method for Measuring Coating Emissivity by Applying Active Irradiation Based on Infrared Thermal Imager, *Sensors*, 2022, MDPI
- [23] Monchau J. P., Ibos L., Marchetti M., Dumoulin J., Feuillet V.: Importance and limitation of spectral measurements for emissivity measurement, *Themacs Ingenierie*
- [24] Rubin M., Arasteh D., Hartmann J.: A Correlation Between Normal and Hemispherical Emissivity of Low-Emissivity Coatings on Glass, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 14, Berkley, Kalifornija, 1987.
- [25] Zhang S. Y. et al: A review of devices and methods for measuring thermal emissivity at cryogenic temperatures, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2022.
- [26] Pelinska-Olko E.: Emissivity measurement of black paint using the calorimetric method, *Archives of Thermodynamics*, Vol. 44, PAN, 2023.
- [27] Masuda H., Higano M.: Measurement of Total Hemispherical Emissivities of Metal Wires by Using Transient Calorimetric Technique, *Institute of High Speed Mechanics*, Vol. 110, *Transactions of the ASME*, 1988.
- [28] *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals – A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry*, FLIR Systems, AB

- [29] Hunter A., Adams B., Ramanujam R.: Traceable Emissivity Measurements in RTP Using Room Temperature Reflectometry, 11th EEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors – RTP 2003.
- [30] What is FTIR Spectroscopy?, <https://www.edinst.com/blog/what-is-ftir-spectroscopy/>,
Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [31] Griffiths P. R., Haseth J. A.: Fourier Transform Infrared Spectrometry, John Wiley&Sons, Inc., 2007.
- [32] Barriera E., Almeida R. M. S. F., Simoes M. L.: Emissivity of Building Materials for Infrared Measurements, Sensors, PMC, 2021.
- [33] Bhushan B.: Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques, The Ohio State University, 2000.
- [34] Predavanja iz kolegija „Teorija i tehnika mjerenja“: Ispitivanje hrapavosti tehničkih površina, Zavod za kvalitetu, Katedra za mjerenje i kontrolu, FSB, Zagreb, 2021.
- [35] Huang Z., Zhou W., Tang X., Zhu D., Luo F.: Effects of substrate roughness on infrared-emissivity characteristics of Au films deposited on Ni alloy, Thin Solid Films, Elsevier B. V., 2010.
- [36] Wen C. D., Mudawar I.: Experimental Investigation of Emissivity of Aluminum Alloys and Temperature Determination Using Multispectral Radiation Thermometry (MRT) Algorithms, ASM International, 2002.
- [37] Ghazali M. H. M.: Effect of Machining Parameters on the Surface Roughness for Different Type of Materials, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.
- [38] X5CrNi18-10,
https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=100,
Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [39] Kraut B.: Krautov strojarski priručnik, Axiom, Zagreb, 1997.
- [40] ENAW-ALMg4.5Mn0.7 (ENAW-5083),
https://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1093,
Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [41] ENAW-ALSi1MgMn (ENAW-6082),
https://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1157,
Pristupljeno: 19. 11. 2024.

- [42] CuZn36Pb3 (CW603N),
https://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1353,
Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [43] X5CrNi1810 Austenitic Stainless Steel for medical instruments,
<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=6a6ed08ba3d34b56a45af5fcc28251f5&n=1&ckck=1>, Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [44] Constellium ALPLAN® 5083 Rolled Precision Aluminum Plate, Milled Both Sides,
<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=40ab94341f2c4b5b94d8abc89d24a03>, Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [45] Constellium PLAN 6082 Aluminum Rolled Plate,
<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0823ba4108834d9b830043339e68339a>, Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [46] Free-Cutting Brass, UNS C36000,
<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bae961d2d6ed497a9096986641162def>, Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [47] Titanium, Ti, <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=METi00>,
Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [48] Richmond J. C.: Measurement of Thermal Radiation Properties of Solids, A Symposium Held at Dayton, Ohio, September 5, 6, 7, 1962, NASA, Washington, 1962.
- [49] Table Of Emissivity Of Various Surfaces:
https://www.transmetra.ch/images/transmetra_pdf/publikationen_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity_table.pdf, Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [50] Surface Emissivity Coefficients, https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html, Pristupljeno: 19. 11. 2024.
- [51] Yener T., Yener S. C., Mutlu R.: Convection Coefficient Estimation of Still Air Using an Infrared Thermometer And Curve Fitting, Journal of Engineering Technology and Applied Sciences, 2019.