

Programska podrška za infracrvenu termografiju

Gavran, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:094177>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**PROGRAMSKA PODRŠKA ZA
INFRACRVENU TERMOGRAFIJU**

Diplomski rad

Mateo Gavran

Osijek, 2021.

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. OSNOVE INFRACRVENE TERMOGRAFIJE.....	2
2.1 Infracrveno zračenje	2
2.2. Crno tijelo kao idealni emiter IC zračenja.....	4
2.3 Karakteristike zračenja tijela	6
2.3.1 Klasifikacija tijela po emisivnosti.....	8
2.3.2 Ovisnost emisivnosti o materijalu.....	9
2.3.3 Ovisnost emisivnosti o površini materijala.....	9
2.3.4 Ovisnost emisivnosti o kutu.....	10
2.3.5 Ovisnost emisivnosti materijala o valnoj duljini	11
2.3.6 Ovisnost emisivnosti materijala o temperaturi	11
2.3.7 Tehnike određivanja emisivnosti u praktičnom mjerenju.....	12
3. SUSTAV ZA DETEKCIJU IC ZRAČENJA	13
3.1. IC termografska kamera	13
3.2. Programska podrška za IC termografiju	16
4. TERMOGRAFSKA ANALIZA ZRAČENJA METALNE KUTIJE	19
4.1 Karakteristike zračenja površina metalne kutije.....	21
4.1.1 Određivanje temperature reflektiranog zračenja.....	23
4.1.2 Određivanje faktora emisivnosti površine	24
4.2. Ovisnost emitiranog zračenja o kutu	26
4.2.1. Prvo snimanje.....	27
4.2.2. Drugo snimanje	35
4.2.3. Treće snimanje	40
4.2.4. Četvrto snimanje	45
4.2.5. Peto snimanje	51

4.3. Analiza rezultata	57
5. ZAKLJUČAK	60
6. LITERATURA	61
Sažetak	62
Abstract	62
Životopis.....	63

1. UVOD

Infracrvena termografija beskontaktna je metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele po površini tijela. Vršiti se na osnovu detekcije infracrvenog zračenja i pretvaranja zračenja u vizualnu sliku.

Pretvorba se odvija u posebnom uređaju zvanom IC kamera. Rezultat je mjerenja termogram, odnosno toplinska slika koja prikazuje raspodjelu temperatura na površini objekta. Slika je prikazana sivim tonovima ili u nekom kodu boja.

IC zračenje značajnije se počelo primjenjivati tek u drugom svjetskom ratu. Najviše se razvijalo u vojne svrhe za snimanje tereta iz aviona ili umjetnih satelita te za industrijsku kontrolu.

Danas se IC termografija primjenjuje za kontrolu kojom se može postići predviđanje kvarova, a i smanjenje gubitaka energije.

U elektrotehnici IC termografija omogućava uočavanje loših spojeva na priključnicama transformatora, sabirnica, prekidača i drugih elemenata postrojenja. Time se osigurava pravovremena intervencija i smanjenje broja zastoja.

Kako bi prilikom termografskog snimanja dobili valjane rezultate potrebno je poznavati karakteristike zračenje promatranog tijela i njegove okoline. U tu svrhu u ovome radu poseban značaj će biti na tome, gdje će se uz pomoć termografske kamere i programske podrške za termografiju ispitivati utjecaj karakteristika zračenja na termogram.

U drugom se poglavlju ovoga rada nalazi pregled osnovne teorije infracrvene termografije i karakteristike zračenja tijela. U trećem su poglavlju opisani dijelovi termografskog sustava, a u četvrtom su poglavlju snimljeni, obrađeni i analizirani rezultati promatranog objekta.

2. OSNOVE INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Infracrveno zračenje otkrio je astronom William Herschel, sasvim slučajno, promatrajući svjetlost koja dolazi od Sunca.

Herschel je eksperiment započeo razdvajajući sunčevu svjetlost na spektar boja pomoću prizme. Termometrom je mjerio temperaturu pojedinačnih boja. Uočio je da su temperature veće što se više primiče crvenoj boji, čija je temperatura bila najviša. Jedan je termometar bio položen iza crvene boje, van vidljivog spektra. Na Herschelovo iznenađenje, taj je termometar pokazivao još višu temperaturu. Herschel je zaključio da se nakon crvene boje nalazi ljudskom oku nevidljivo zračenje, danas poznato kao infracrveno zračenje..

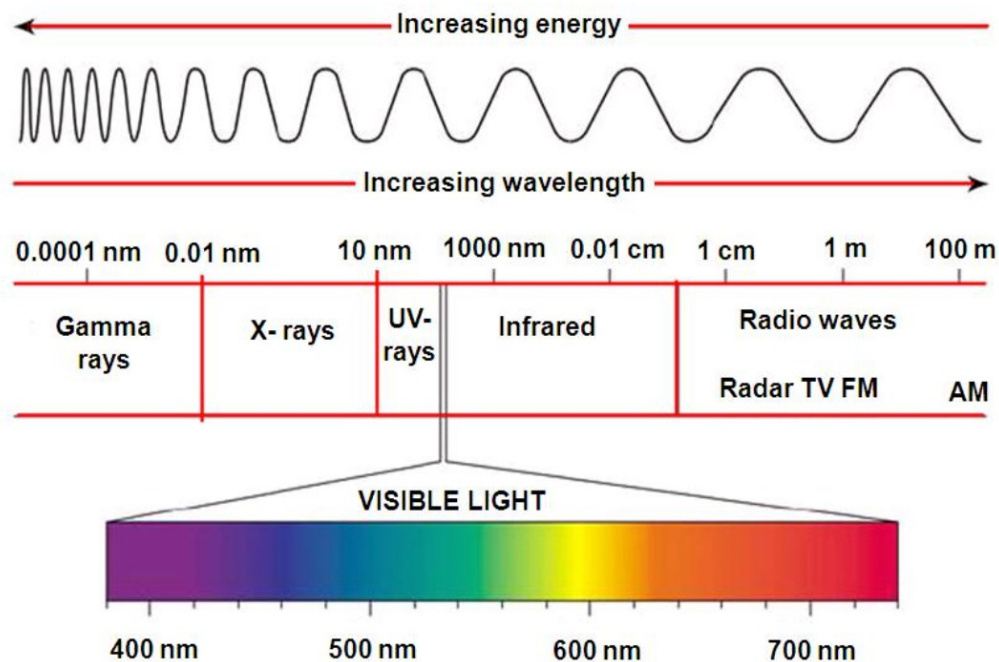
2.1 Infracrveno zračenje

Infracrvena termografija omogućava nam da nevidljivo infracrveno zračenje, pomoću termografskih kamera, pretvorimo u nama vidljivo.

Ljudsko oko može vidjeti zračenja sa valnim duljinama između 380nm – 780nm. Razlike u valnim duljinama unutar tog spektra vidimo kao boje.

Svaki objekt pri temperaturama iznad apsolutne nule od 0 K emitira elektromagnetsko zračenje.

Na slici 2.2 prikazan je spektar elektromagnetskih valova.



Slika 2.2. Elektromagnetski spektar [3]

Na slici je vidljivo da infracrveno zračenje ima veće valne duljine od nama vidljivog spektra te se na skali nalazi iza crvene boje. Raspon u kojem se nalazi IC zračenje je od 780nm – 1mm. [1]

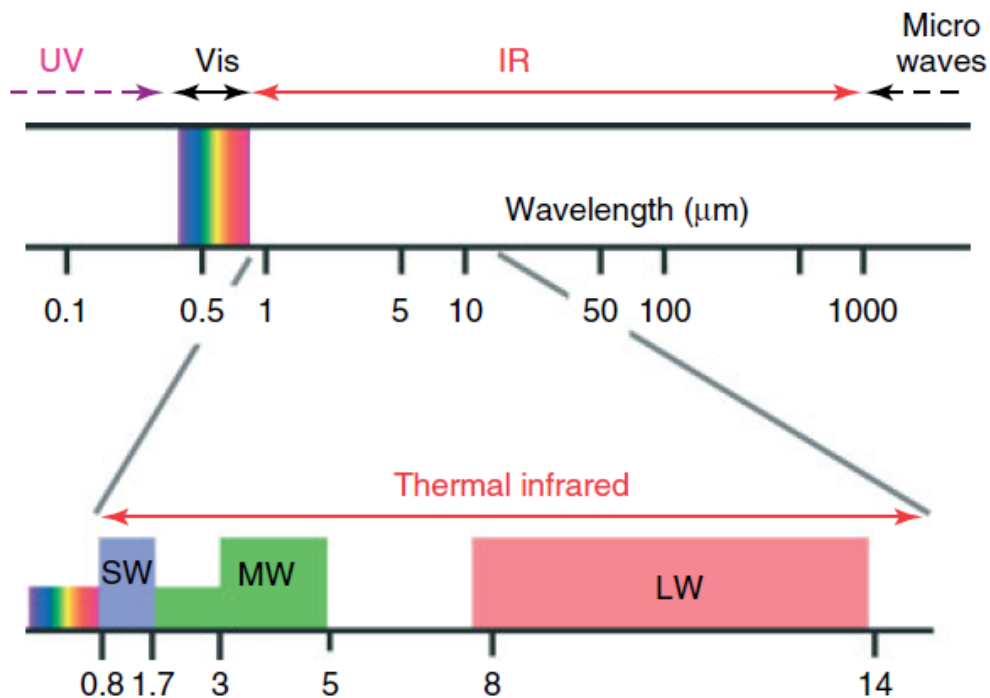
U infracrvenoj termografiji koristi se samo mali dio raspona infracrvenog zračenja. Tri su spektralna raspona definirana:

- dugovalni (LW- long-wave): nalazi se u rasponu od 7-14 μm
- srednjevalni (MW- mid-wave): nalazi se u rasponu od 3-5 μm
- kratkovalni (SW- short- wave): u rasponu od 0.9-1.7 μm .

Komercijalne kamere dostupne su za ova tri raspona.

Količina zračenja i njegova distribucija ovise o temperaturi i o svojstvima materijala objekta ili tijela.

Na slici 2.3 prikazana su tri spektralna raspona infracrvenog zračenja.



Slika 2.3. Spektralni položaj podjela raspona infracrvenog zračenja [1]

2.2. Crno tijelo kao idealni emiter IC zračenja

Ako tijelo upija svo zračenje koje padne na njega, onda se to tijelo naziva idealno crno tijelo. Kolikom snagom će zračiti ovisi samo o temperaturi objekta, a to emitirano zračenje nazivamo termalnim ili toplinskim zračenjem. Za razliku od crnih tijela, kod realnih tijela u obzir dolaze svojstva materijala i emisivnosti.

Svako tijelo emitira, ali i upija elektromagnetsko zračenje do određenog stupnja.

Ako tijelo upija svo zračenje koje padne na njega, onda se to tijelo naziva idealno crno tijelo.

Osim što apsorbira, crno tijelo i emitira zračenje. Apsorpcija je crnog tijela jednaka emisiji jer se upadno zračenje od njega ne može reflektirati niti kroz njega proći.

Idealno crno tijelo ne postoji, ali ga može prilično dobro zamijeniti zatvorena šupljina sa malim otvorom. Otvor mora biti mali kako bi šanse da upadno zračenje izađe bile minimalne. Također, takvo tijelo mora biti neprozirno kako bi jedva odbilo zračenje.

Svojstva crnog tijela:

- Crno tijelo apsorbira svo upadno zračenje, neovisno o valnoj duljini i smjeru zračenja.
- Ne postoji površina koja može emitirati više energije od crnog tijela.
- Emitirano zračenje crnog tijela ovisi o valnoj duljini, ali ne ovisi o smjeru zračenja.

U praksi postoje uređaji koji simuliraju crno tijelo. Jedan takav simulator prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4 Praktična realizacija crnog tijela [1]

Emisiju elektromagnetskog zračenja od tijela nazivamo ukupna emisivna snaga E. Emisivna snaga energija je emitirana kao jedinica vremena i površine. S obzirom na to da ukupna emitirana snaga nije jednaka na svim valnim duljinama imamo i spektralnu emisivnu snagu E_λ . E_λ je energija emitirana u jedinici površine, vremena i raspona valnih duljina.

Wienov zakon govori nam da se valna duljina vrha krivulje zračenja crnog tijela smanjuje kako se temperatura povećava. Opisan je izrazom:

$$\lambda_{\max} = \frac{\alpha}{T} \quad (2.1)$$

, gdje λ_{\max} predstavlja valnu duljinu vrha krivulje, α je Wienova konstanta koja iznosi $2.897 \cdot 10^{-3}$ m K, T je apsolutna temperatura u kelvinima. [2]

Stefan- Boltzmannov zakon govori nam da su ukupna emitirana snaga ili energija zračenja crnog tijela proporcionalne četvrtoj potenciji apsolutne temperature:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (2.2)$$

, gdje E predstavlja ukupnu emitiranu snagu (energiju zračenja), σ je Stefan- Boltzmannova konstanta koja iznosi $5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m² K⁻⁴, a T je temperatura u kelvinima. [2]

Stefan-Boltzmannov zakon nam pokazuje da male promjene u temperaturi uzrokuju velike promjene u energiji zračenja.

Za realne je površine Stefan-Boltzmannova jednadžba modificirana i u obzir uzima faktor emisivnosti:

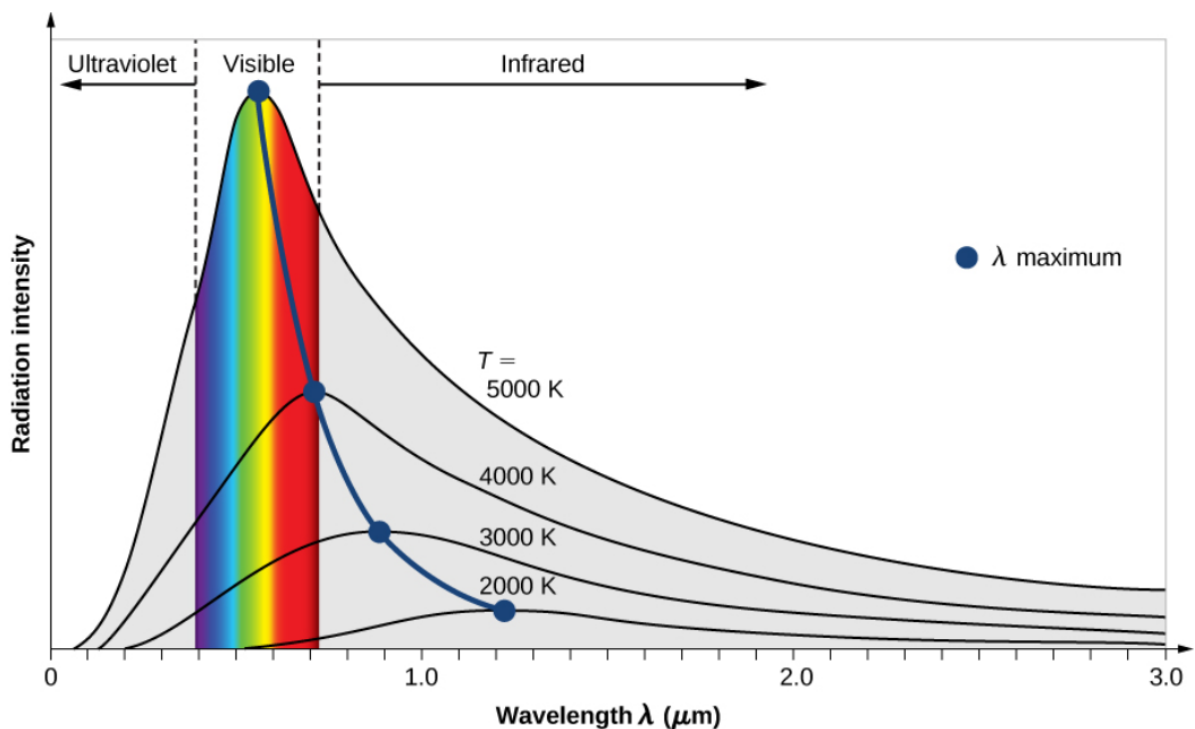
$$E_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

Ponašanje grafa spektralne gustoće zračenja sa promjenom temperature dobro objašnjava Planckov zakon. Planckov zakon govori da spektralna gustoća snage zračenja crnog tijela određene temperature u intervalu valnih duljina može biti prikazana pomoću izraza:

$$E_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.4)$$

, gdje $E_\lambda(\lambda, T)$ predstavlja spektralnu gustoća zračenja kao funkciju valne duljine i temperature, λ je valna duljina, T temperatura u kelvinima, h je Planckova konstanta ($h = 6.6256 \cdot 10^{-34}$ Js), c je brzina svjetlosti ($c = 2.998 \cdot 10^8$ ms⁻¹), k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ J/K).[2]

Planckov zakon govori nam da je spektralna gustoća zračenja ovisna o valnoj duljini i temperaturi. Povećanjem temperature krivulja se primiče nižim vrijednostima valnih duljina, što možemo i vidjeti na slici 2.5.



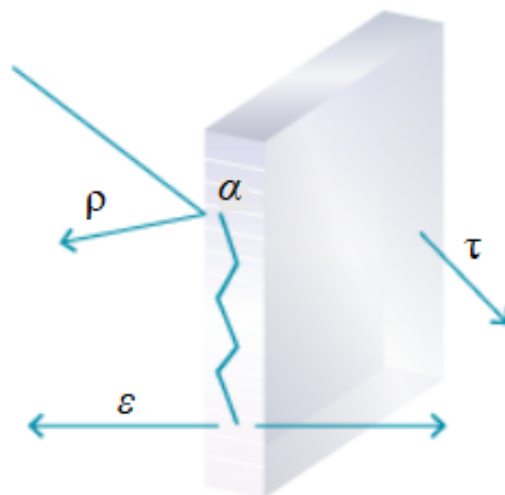
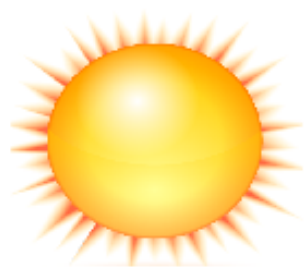
Slika 2.5. Grafički prikaz ponašanja krivulje crnog tijela ovisno o temperaturi [4]

2.3 Karakteristike zračenja tijela

Infracrveno zračenje koje stigne na tijelo ili objekt može biti:

- Apsorbirano (α)
- Emitirano (ϵ)
- Reflektirano (ρ)
- Transmitirano (τ)

Na slici 2.6 prikazane su karakteristike zračenje nekog tijela.



ε - emitirano zračenje

α - apsorbirano zračenje

ρ - reflektirano zračenje

τ - transmitirano zračenje

Slika 2.6. Karakteristike zračenja tijela

Realno emisijsko zračenje tijela određujemo pomoću crnog tijela. Emisivnost objekta omjer je zračenja s površine promatranog tijela i zračenja crnog tijela pri istoj temperaturi.

Kirchhoffov zakon govori da je količina apsorbiranog zračenja bilo kojeg tijela jednaka količini zračenja koja je emitirana od istog. To se zapisuje kao:

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.5)$$

koji ovise o temperaturi promatranog tijela i stanju njegove površine, ali i o valnoj duljini toplinske zrake.

Materijali koji su dobri emiteri, isto tako dobri su i apsorberi, i obrnuto.

Energija zračenja Φ_0 bilo kojeg tijela je reflektirana $\Phi \rho$ (bilo to direktno po zakonu refleksije ili zbog grube površine tijela), propuštena ($\Phi \tau$) kroz objekt (tijelo), ili apsorbirana $\Phi \alpha$.

$$\Phi_0 = \Phi \rho + \Phi \tau + \Phi \alpha \quad (2.6)$$

Uzimajući u obzir i upadno zračenje vrijedi:

$$1 = \rho + \tau + \alpha \quad (2.7)$$

, gdje ρ predstavlja faktor refleksije, τ faktor propusnosti i α faktor apsorpcije

Ako uzmemo primjer neprozirne krutine, u tom slučaju kombinirajući prvu i treću formulu dobijemo slijedeći izraz:

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (2.8)$$

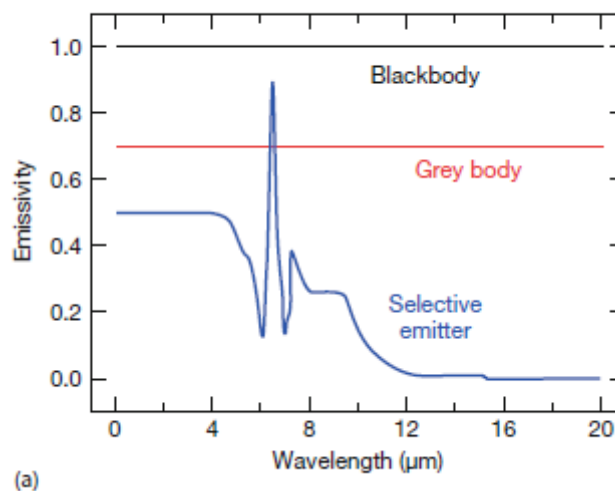
faktor refleksije ρ ne uključuje samo direktnu refleksiju, kao što je uobičajeno kod savršeno ispoliranih površina, nego i difuznu refleksiju koja se pojavljuje kod nesavršenih površina.

2.3.1 Klasifikacija tijela po emisivnosti

U praktičnoj primjeni termografije emisivnost je neovisna o valnoj duljini nalik sivom tijelu.

Supstance koje imaju apsorpciju i emisiju u IC spektru, kao što su plinovi i plastične folije, tu se radi o selektivnim emiterima.

Na slici 2.7. prikazana je emisivnost crnog tijela, sivog tijela i selektivnih emitera, gdje vidimo da vrijednost emisivnosti selektivnih emitera varira u ovisnosti o valnoj duljini.



Slika 2.7. Ovisnost emisivnosti o valnoj duljini [1]

2.3.2 Ovisnost emisivnosti o materijalu

Emisivnost tijela varira ovisno o materijalu od kojeg je ono izrađeno. Klasifikacija materijala pojednostavljeno može se svesti na dvije kategorije: metale i nemetale.

Većina nemetalnih materijala koji se koriste u praksi sivi su emiteri i imaju veliki faktor emisije od preko 0.8. Metali pak, posebice ispolirani metali, imaju iznimno nizak faktor emisivnosti koji je većinom manji od 0.2.

2.3.3 Ovisnost emisivnosti o površini materijala

Za svaki materijal, emisivnost može varirati kao rezultat površinske strukture materijala. To stvara problem pri određivanju emisivnosti jer za isti materijal dobijemo različite vrijednosti faktora emisije.

Najizraženije razlike emisivnosti uočavamo kod metala. Ispolirani metali mogu dosegnuti ϵ vrijednosti 0.02, dok ϵ materijala sa hrapavom površinom može dosegnuti i preko 0.8.

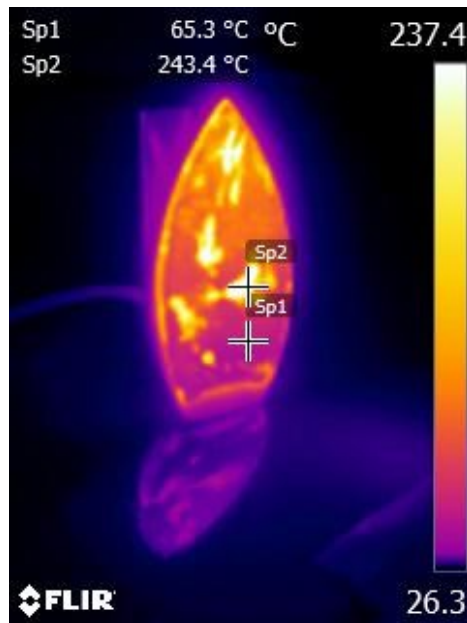
Na promjenu emisijskog faktora metala može utjecati i oksidacija/korozija tijekom vremena.

Ako su neki metalni dijelovi izloženi vanjskim utjecajima (kisik iz zraka, voda iz kiše itd.), vrijednost im se emisivnosti mijenja sa njihovom promjenom. Za oksidirani bakar vrijednost ϵ može biti visoka čak oko 0.78.

Na slici 2.8 vidimo glačalo koje ima mrlje po sebi, a na slici 2.9. to isto glačalo snimano termografskom kamerom.



Slika 2.8. Glačalo

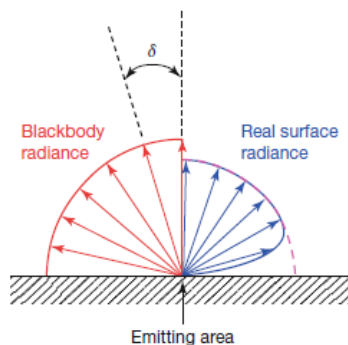


Slika 2.9. Utjecaj različitih emisivnosti na prividne temperature termograma

Možemo uočiti da, iako su svi dijelovi površine glačala približno jednake temperature, termografska kamera ne prikazuje jedinstven rezultat. Razlog su tomu crne mrlje i metalna površina glačala koje imaju različite emisivnosti.

2.3.4 Ovisnost emisivnosti o kutu

Za razliku od crnih tijela, bilo koja realna površina nekog tijela pokazuje varijacije u zračenju ovisno o smjeru emisije.

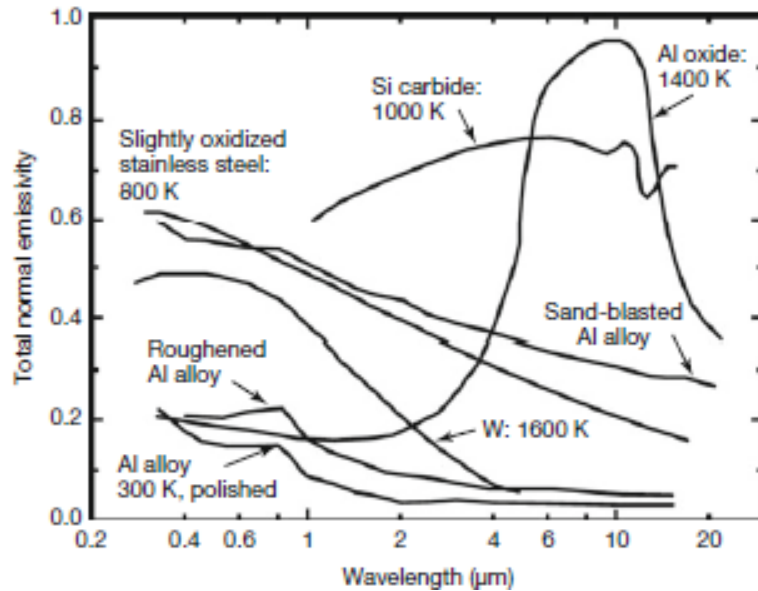


Slika 2.10. Ovisnost emitiranog zračenja o kutu [1]

Bilo koji objekt koji je promatran direktno nasuprot površine ($\delta = 0^\circ$) emitirat će više zračenja nego kad je promatran pri kosim kutovima.

2.3.5 Ovisnost emisivnosti materijala o valnoj duljini

Emisivnost materijala ovisi i o valnoj duljini. Na slici 2.11 prikazana je ovisnost emisivnosti o valnoj duljini.



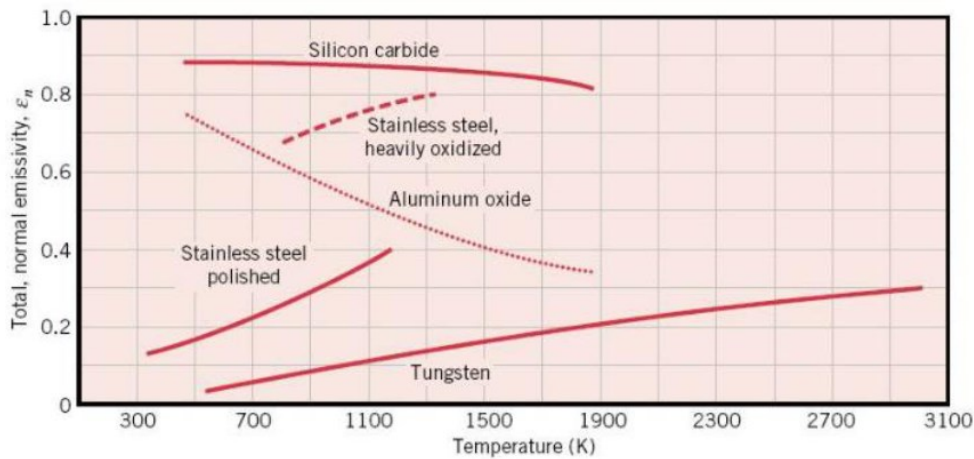
Slika 2.11. Ovisnost emisivnosti o valnoj duljini za različite materijale [1]

Kao što vidimo, emisivnost se metala većinom smanjuje s povećanjem valne duljine. Za razliku od njih, oksidi i nemetali mogu imati povećanje emisivnosti s valnom duljinom.

2.3.6 Ovisnost emisivnosti materijala o temperaturi

Svojstva se materijala obično mijenjaju s temperaturom te nije neuobičajeno da to vrijedi i kada je riječ o emisivnosti. Kod nekih materijala javlja se značajna promjena emisivnosti s promjenom temperature te je prilikom praktičnog mjerenja potrebno znati hoće li temperatura biti u zadanim intervalima kako bismo emisivnost mogli smatrati konstantnom.

Slika 2.12. prikazuje promjenu emisivnosti različitih materijala ovisno o temperaturi.



Slika 2.12. Ovisnost emisivnosti o temperaturi za različite materijale [2]

2.3.7 Tehnike određivanja emisivnosti u praktičnom mjerenju

U praksi je uobičajeno da se često mjeri ϵ , a najjednostavnija metoda za mjerenje je pomoću trake ili boje čiju emisivnost znamo.

Najprije izmjerimo temperaturu površine promatranog predmeta, npr trake. Zatim u korisničkom sučelju kamere ili računalnoj programskoj podršci podešavamo emisivnosti tako da nam temperatura odgovara očitanoj temperaturi trake.

Točnost ove metode mjerenja ovisi o točnosti poznate emisivnosti trake ili druge poznate površine.

Postoje i druge metode za određivanje emisivnosti. Jedna od njih direktno je mjerenje temperature pomoću kontaktnih termometara (termoelemenata).

3. SUSTAV ZA DETEKCIJU IC ZRAČENJA

Termografski sustav sastoji se od uređaja za detekciju IC zračenja (IC termografska kamera) koji u sebi sadrži programsku podršku koja nam osigurava informaciju o temperaturi objekta na osnovu podataka o kalibraciji i poznavanju osnovnih veličina emisivnosti, reflektirane temperature i vlažnosti zraka kako bi od prividne temperature mogli dobiti podatak o stvarnoj temperaturi objekta.

U realnim uvjetima termografske analize teško je ustanoviti sve parametre snimanja koji utječu na dobivene rezultate te zbog toga od velikog je značaja programska podrška za IC termografiju. Programska podrška omogućava nam daljnju obradu snimljenog materijala te nam omogućuje potrebne korekcije i analize objekata sa višestrukim koeficijentima emisije.

3.1. IC termografska kamera

Termografske kamere sa svojom programskom podrškom osnova je termografskog sustava te nam omogućuju beskontaktno mjerenje temperature.

Glavna svrha termografskih kamera pretvaranje je infracrvenog zračenja u vizualni prikaz kojeg nazivamo termogram. Na slici 3.1 vidimo prikaz termograma autora diplomskog rada, tijekom provedbe praktične analize provedene u radu.



Slika 3.1. Termogram autora rada

Na prikazanom termogramu vidimo da naočale reflektiraju zračenje okoline te su manje temperature od lica jer ne propuštaju infracrveno zračenje. Prilikom snimanja termograma, promatrana osoba je udahнула, što jer rezultiralo hladnijim prikazom boja dijelova maske na području nosa i usta.

U IC kameri je integrirana IC optika, detektor (osjetnik), elektronika za obradu slike i signala, monitor i memorija za pohranu podataka. Detektor u termografskoj kameri mjeri količinu energije koja padne na njega. Ta se energija pretvara u električni signal. Dobivene informacije vizualno se prikazuju na ekranu termografske kamere te pohranjuju u memoriji IC kamere. Mjerni rezultati mogu se obrađivati pomoću programske podrške na računalu.

Leće termografskih kamera moraju biti propusne za infracrveno zračenje. Napravljene su od propusnih materijala kao što su: cink sulfid, germanij, cink selenid za dugovalna infracrvena zračenja, silikon, safir i kvarc.

Bitne karakteristike IC kamere su:

- prostorna razlučivost
- temperaturno područje rada
- točnost
- razlučivost temperaturne razlike
- brzina obnove slike (frekvencija).

Prostorna razlučivost govori nam o veličini najmanjeg objekta kojeg je moguće razlučiti na termogramu. Ovisi o broju osjetnika u detektoru kamere, gdje detektori omogućuju skeniranje vidnog polja. Podatak o prostornoj razlučivosti označavamo kao FOV (eng. Field Of View) i IFOV (eng. Instantaneous Field Of View)

Temperaturno područje rada ovisi o vrsti osjetnika IC kamere, tj. o njegovom području osjetljivosti.

IC kamere čiji osjetnici rade sa osjetljivošću u području većih valnih duljina, koriste se za mjerenje nižih temperatura. IC Kamere koje imaju osjetljivost u području kraćih valnih duljina, koriste se za mjerenje većih temperatura.

Točnost IC kamere govori nam o pouzdanosti mjernog rezultata, ali jedino ako su svi ostali uvjeti podešeni. Točnost se izražava rasponom dopuštenog odstupanja temperature.

Razlučivost temperaturne razlike pokazuje najmanju temperaturnu razliku koju će kamera registrirati.

Brzina obnove slike (frekvencija) brzina je promjene temperature i drugih parametara kamere.

Mjerna informacija o objektu prenosi se preko optike na matricu detektora koja se sastoji od stotinu linija. Svaka linija sastoji se od stotinu detektorskih elemenata koji pokrivaju čitavu površinu na kojoj se projicira slika. Takav tip detektora nazivamo FPA (eng. Focal Plane Array).

Polje se sastoji od mnoštva detektorskih elemenata, a ti detektorski elementi zovu se pikseli. Na slici 3.1 prikazan je utjecaj piksela na veličinu vidljivog polja.



Slika 3.2. Prikaz različite razlučivosti IC termalnih kamera [1]

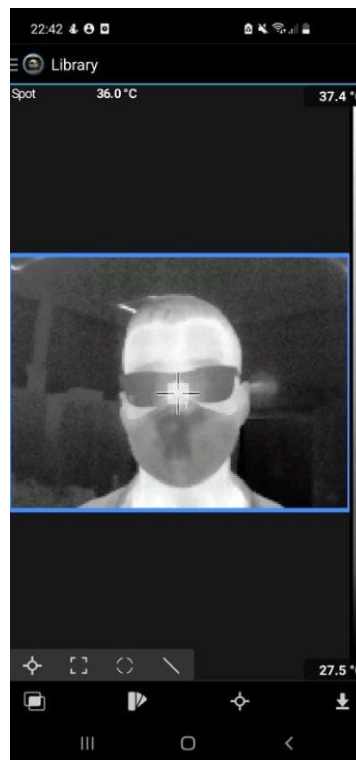
Važno je naglasiti da termografske kamere snimaju prividnu temperaturu. Razlog je tomu što kamera ne detektira samo zračenje ciljanog objekta, nego i detektira zračenja okolnih tijela. Informacija koju smo dobili o prividnoj temperaturi može se korigirati, a za to su nam bitni podaci o utjecaju okoline (npr. zračenja okolnih tijela, udaljenost objekta) i svojstva promatranog objekta (npr. emisivnost).

3.2. Programska podrška za IC termografiju

Programska podrška se može raščlaniti na dvije principijelne različite podrške. Osnovna se nalazi u samoj kameri i njen je zadatak da uz pomoć parametara koje unese korisnik i uz pomoć kalibracijskih podataka koje upisuje proizvođač, nam da vrijednosti temperatura koje su prikazane na displayu. Računalna programska podrška omogućava nam daljnju obradu i analizu termograma.

Proizvođači kamera, kao što su FLIR, FLUKE i dr., imaju u ponudi i programsku podršku.

FLIR ima aplikaciju za mobitel koja omogućava samo pregled termograma, a izgled aplikacije prikazan je na slici 3.4



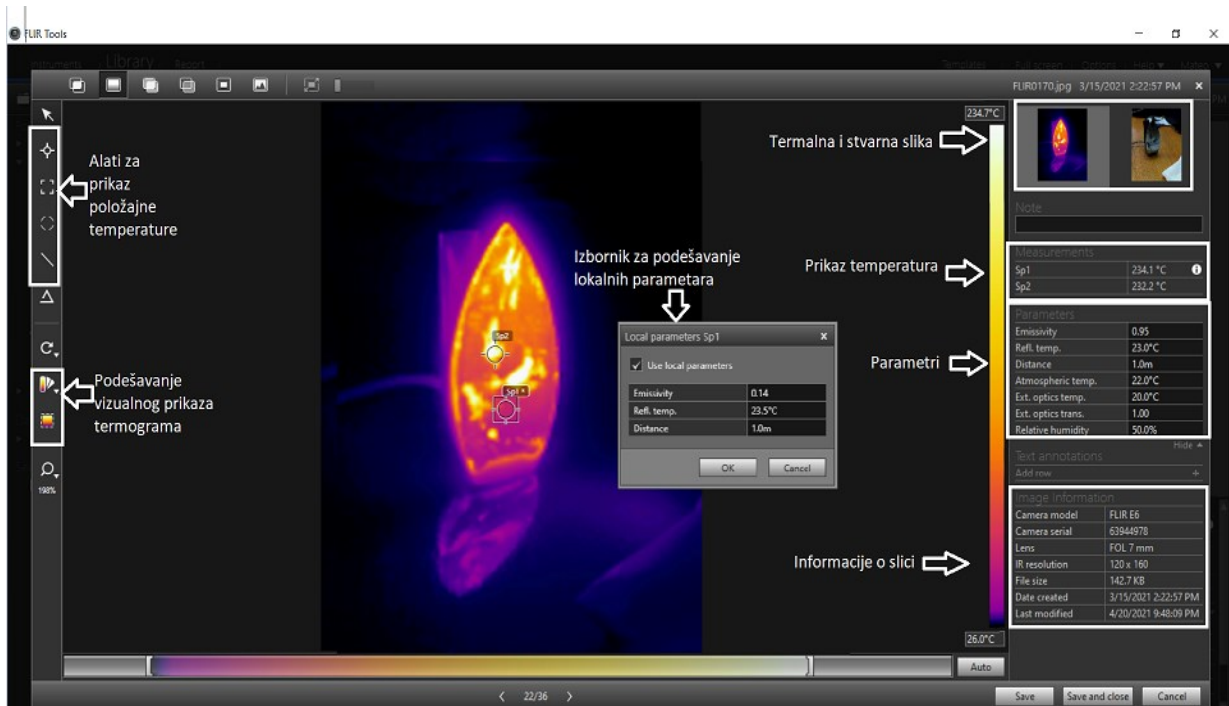
Slika 3.4 Termogram u mobilnoj aplikaciji FLIR tools

Aplikacija ne omogućava analizu termograma jer ne dopušta unos vrijednosti bitnih za njegovu ispravnu obradu. Takve su vrijednosti npr. reflektirana temperatura, emisivnosti materijala i dr.

Za obradu termograma, jedan od dostupnih programskih paketa za računalo je FLIR tools.

FLIR tools omogućava podešavanje svih bitnih vrijednosti neophodnih da prividne temperature dovedemo do što točnijih vrijednosti.

Na slici 3.5 prikazana je slika 2.8 otvorena u FLIR toolsu, uz prikaz osnovnih mogućnosti koje nam pruža taj programski paket.



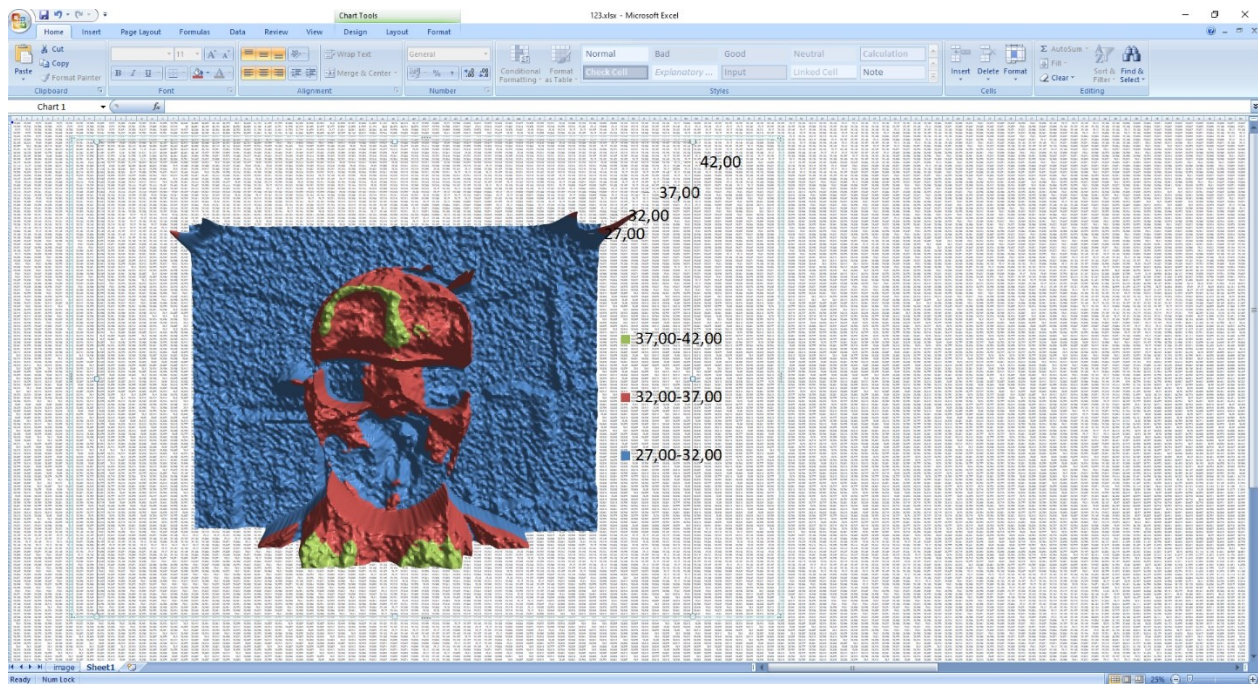
Slika 3.5 Prikaz termograma u FLIR tools programskom paketu

FLIR tools nam omogućava:

- uvid u stvarnu i termalnu sliku promatranog objekta
- povezivanje IC kamere sa programskim paketom i trenutna obrada termograma
- unos vrijednosti koje utječu na dobivene vrijednosti prividne temperature
- vizualna promjena termograma (palette boja, spajanje vizualne i termalne slike itd.)
- pregled temperatura različitih područja termograma
- izrađivanje termalnog izvještaja
- ostalo.

Programska podrška FLIR tools ima uvid u prividne temperature samo do prve decimale. Osim toga, veći je problem što vrijednosti, kao što su emisivnost i reflektirana temperatura, mogu unijeti na maksimalno dvije decimale. Ovo ograničenje može utjecati na točnost termograma, pogotovo prilikom analize površina s manjim faktorom emisije.

Podaci o termogramu se mogu vidjeti uz pomoć Microsoft Excel-a. Na slici 3.6. prikazan je termogram sa slike 2.8., prikazan u Microsoft Excel-u.



Slika 3.6 Termogram u Microsoft Excelu

Termogram otvoren u Microsoft Excel-u sadrži podatke o temperaturama svakog piksela. Excel omogućava precizniji uvid u temperature zbog toga što prikazuje temperature za tri decimalna mjesta. Temperature svih piksela moguće je prikazati pomoću 3D grafikona.

4. TERMOGRAFSKA ANALIZA ZRAČENJA METALNE KUTIJE

Ispitivanje je izvršeno na metalnoj kutiji kojoj su sve stranice obojene u sivu boju, osim jedne na kojoj smo tu boju sastrugali brusnim papirom.

Na slici 4.1 vidimo metalnu kutiju koja je korištena u ispitivanju, gdje je obojena stranica (lijevo) i brusnim papirom sastrugana stranica kutije (desno).



Slika 4.1. Metalna kutija

Termografska ispitivanja napravljena su pomoću termografske kamere FLIR E6 sa slike 4.2.

Na lijevom dijelu slike prikazan je izgled IC kamere, dok se desnom dijelu slike vidi ekran i tipke za upravljanje kamerom.



Slika 4.2 Termografska kamera FLIR E6

Neke od specifikacija IC kamere FLIR E6 prikazane su u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Specifikacije kamere FLIR E6

Dostupne palete boja	Crno-bijela, rainbow, iron
Rezolucija digitalne kamere/FOV	640 × 480/55° × 43
FOV	45° × 34°
IC rezolucija	160 × 120 piksela
Minimalna udaljenost za fokus	0,5m
Prostorna rezolucija (IFOV)	5,2 mrad
Točnost	±2°C (±3,6°F) ili ±2% za očitavanje, za ambijentalnu temperaturu 10°C do 35°C i za temperaturu objekta iznad 0°C
Temperaturni raspon	−20°C do 250°C

IC kamera FLIR E6 u sebi sadrži digitalnu kameru, IC kameru i ekran na kojem se mogu podešavati vrijednosti, palete boja itd.

Cilj je ovog eksperimenta pomoću programske podrške utvrditi utjecaj emitiranog zračenja površine na termogram te utvrditi i ostale čimbenike koji utječu na točnost dobivenih rezultata. Prije mjerenja IC kamera je postavljena na udaljenost od 1 metar od metalne kutije napunjene vrelom vodom.

Na slici 4.3 vidimo položaj i udaljenost metalne kutije s obzirom na termografsku kameru. Termografska kamera nema stativ, pa je zaglavljena u kartonsku kutiju da bi se smanjila položajna pogreška prilikom snimanja.



Slika 4.3. Mjerni postav

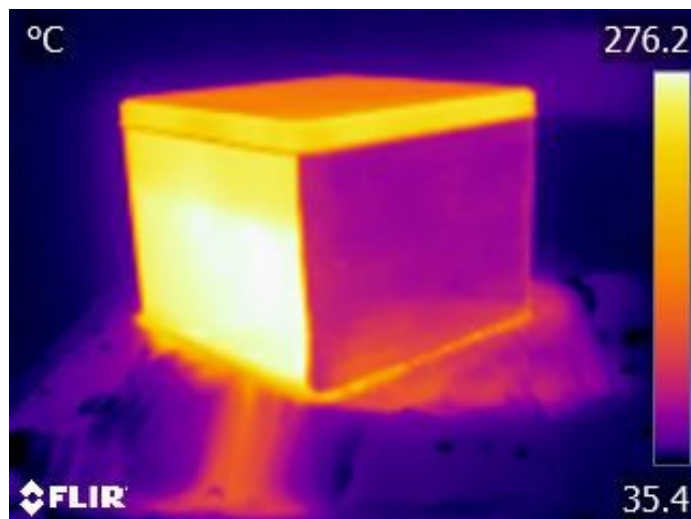
Metalna kutija napunjena je kipućom vodom koja je prethodno zagrijana u kuhalu. Kutija je rotirana od 0 do 90 stupnjeva s obzirom na položaj kamere. Svakih 10 stupnjeva snimljen je termogram metalne kutije. Snimatelj je zaklonjen iza vrata ormara radi smanjivanja utjecaja zračenja njegovog tijela na metalnu kutiju.

Treba naglasiti da je snimanje obavljeno u prostoriji gdje se nalazi radijator koji isijava toplinu i to može utjecati na točnost termograma, posebno površine sa manjom emisivnošću.

4.1 Karakteristike zračenja površina metalne kutije

Da bi vrijednosti termograma bile ispravne, potrebno je poznavati karakteristike zračenja promatranog objekta.

Na slici 4.4 nalazi se termogram metalne kutije u koju je usuta vrela voda.



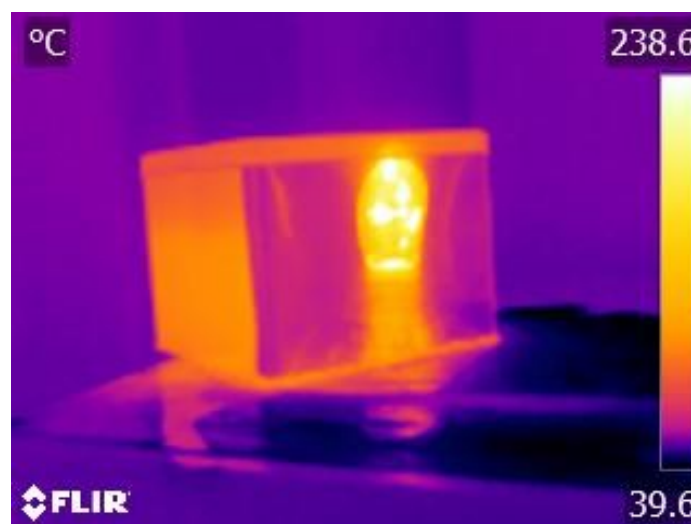
Slika 4.4 Termogram metalne kutije

Na slici 4.4, vidljivo je da termografska kamera detektira različite temperature za obojenu površinu (lijevo) i metalnu površinu (desno). Razlog je tomu što obojena površina ima veću emisivnost od metalne površine, koja očigledno ima puno manji faktor emisije.

Prema izrazu 2-8, površine koje imaju malen faktor emisivnosti, imaju veći faktor refleksije. Vrlo je bitno poznavati iznos reflektirane temperature. Ona utječe na točnost termograma.

Na slici 4.5 postavljen je izvor topline (glačalo) nasuprot metalne (neobojene) površine kutije. Ono što se uočava na metalnoj površini nije samo informacija o temperaturi površine, nego i o temperaturi okoline.

Na metalnoj površini reflektira se glačalo, voda koja je na površini stola te druga okolna zračenja.



Slika 4.5 Odras zagrijanog glačala od metalnu površinu.

4.1.1 Određivanje temperature reflektiranog zračenja

Određivanje reflektiranog zračenja napravljeno je uz pomoć aluminijske folije koja je postavljena na metalnu kutiju. Folija je snimana uz pomoć pirometra, a ne termografske kamere kako bi rezultat bio što točniji. Pirometar ima točnost od ± 1 °C, dok termografska kamera FLIR E6 ima točnost od ± 2 °C.

Na slici 4.5 vidimo aluminijsku foliju postavljenu na metalnu kutiju.



Slika 4.5 Aluminijska folija

Prilikom određivanja reflektiranog zračenja postavlja se faktor emisivnosti mjernog uređaja na $\epsilon = 1$.



Slika 4.6. Mjerenje reflektiranog zračenja uz pomoć pirometra

Radi veće točnosti rezultata, odrađena su četiri mjerenja reflektirane temperature. Rezultati se nalaze u tablici 4.2

Tablica 4.2 Reflektirane temperature

Mjerenje	Temperatura [°C]
1.	23,3
2.	23,6
3	22,7
4	23,8
Prosjeck svih mjerenja:	23,35

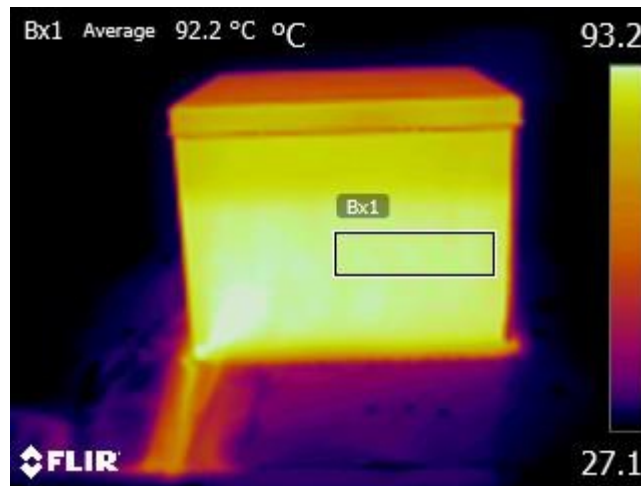
Za reflektiranu temperaturu uzet je prosjek vrijednosti izmjerenih vrijednosti i ona iznosi 23,35 °C. S obzirom da programska podrška zaokružuje vrijednosti na prvu decimalu, reflektirana temperatura iznosi 23,4 °C.

4.1.2 Određivanje faktora emisivnosti površine

Faktor emisivnosti obojene površine određen je pomoću tablice emisivnosti i iznosi $\varepsilon = 0,9$ [5], dok je faktor emisivnosti promatrane metalne površine nepoznat i potrebno ga je odrediti.

Određivanje emisivnosti metalne površine napravljeno je komparativnom metodom u programskoj podršci.

Na slici 4.7, prikazana je obojena površina metalne kutije, gdje je prikazana temperatura područja unutar pravokutnika (Bx1) pri podešenoj emisivnosti $\varepsilon = 0,9$.



Slika 4.7. Termogram obojane površine sa faktorom emisije $\varepsilon = 0.9$

Prosječna temperatura označene površine sa slike je $92,2\text{ °C}$. Pomični pravokutnik (Bx1) prikazuje približno jednake temperature na cijeloj obojanoj površini. Razlog je tomu vrlo malen utjecaj reflektiranog zračenja

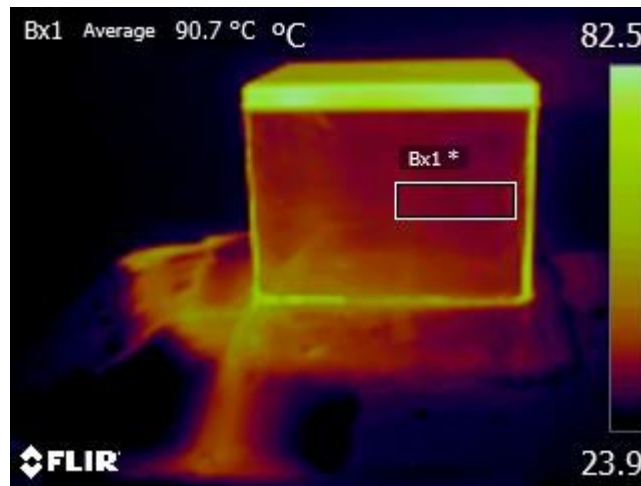
Proces je snimanja kutije sa slike 4.7. do slike 4.8. dugotrajan. Metalna se kutija rotira od kuta 0 stupnjeva (obojena stranica kutije) do kuta 90 stupnjeva (metalna stranica kutije), a svakih 10 stupnjeva snima se termogram. U metalnoj kutiji nalazi se vrela voda koja se sa vremenom hladi i mora se uzeti u obzir temperaturna razlika između termograma pri kutu od 0° i 90° .

Ta temperaturnu razliku mjeri se pomoću pirometra sa slike 4.6 i ona iznosi $\Delta t = 1,5\text{ °C}$ za termograme sa slike 4.7 i slike 4.8.

Komparativnom metodom dobivenih rezultata termograma utvrđeno je da pri reflektiranoj temperaturi $23,35\text{ °C}$ promatrana metalna površina ima faktor emisije $\varepsilon = 0,14$.

Na termogramu metalne površine dobivena je prosječna temperatura od $90,7\text{ °C}$, što je zadovoljavajući rezultat kada u obzir uzmemo smanjenje temperature Δt koji iznosi $1,5\text{ °C}$.

Zvjezdica kod Bx1* sa slike 4.8, govori nam da su unutar toga pravokutnika postavljeni lokalni parametri koji vrijede samo za to označeno područje.



Slika 4.8. Termogram metalne površine pri $\varepsilon = 0,14$

Prilikom određivanja emisivnosti metalne površine uzeta je u obzir refleksija vode te je zato promatrani pravokutnik (Bx1) pomaknut dalje od te reflektirane prividne temperature.

Proces određivanja reprezentativnih temperatura površina koje imaju malen faktor emisije može biti poprilično kompliciran. Na dobiveni prikaz rezultata znatno utječu okolna zračenja i male varijacije reflektirane temperature ili faktora emisije.

Boja sa promatrane metalne površine ručno je šmirglana, pa samim time nije savršeno ispolirana, a to isto utječe na prividnu temperaturu. Na termogramu metalne površine vidljiva je i refleksija vode koju je kutija propustila.

4.2. Ovisnost emitiranog zračenja o kutu

Ispitivanje ovisnosti emitiranog zračenja o kutu metalne kutije odrađeno je tako što metalna kutija napunjena vrelom vodom rotirana je od 0° (obojena stranica kutije) do 90° (neobojena metalna stranica kutije), gdje smo svakih 10° snimili termogram kutije.

Odrađeno je 5 snimanja pri različitim temperaturama.

Ispod svih prikazanih termograma (u nazivu slike) nalazi se kut s obzirom na obojanu površinu i kut s obzirom na metalnu površinu (u zagradi).

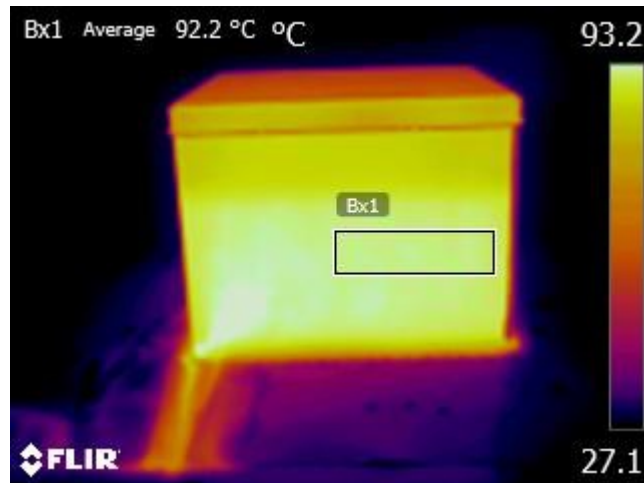
Globalni parametri svih termograma su: $\varepsilon = 0,9$, reflektirana temperatura iznosi $23,35^\circ\text{C}$ i udaljenost kamere od objekta 1m.

U prvom snimanju tablično i grafički su prikazani rezultati prividnih temperatura bez obrade u programskoj podršci, kao i rezultati nakon obrade.

4.2.1. Prvo snimanje

U prvom snimanju prikazana su sva mjerenja od kuta 0° do 90° . Prikazane su prividne temperature obojane i metalne površine.

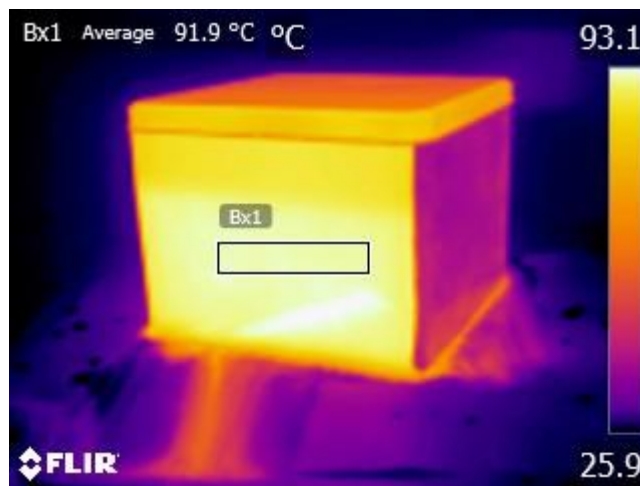
Početna temperatura metalne kutije pri kutu 0° iznosi $92,2^\circ\text{C}$.



Slika 4.9. Termogram metalne kutije pri kutu 0° (-90°)

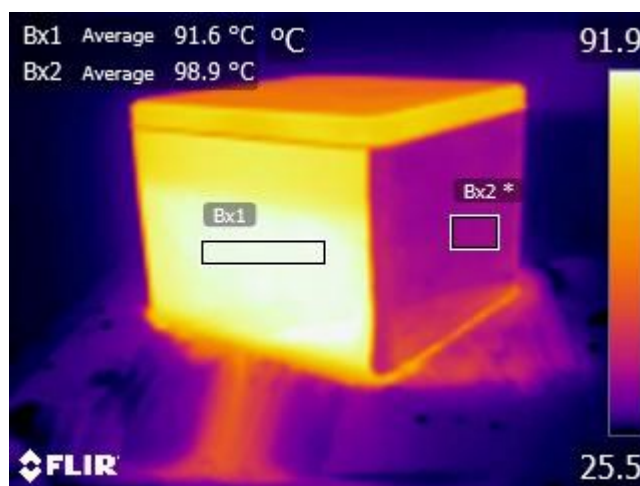


Slika 4.10. Termogram metalne kutije pri kutu 10° (-80°)

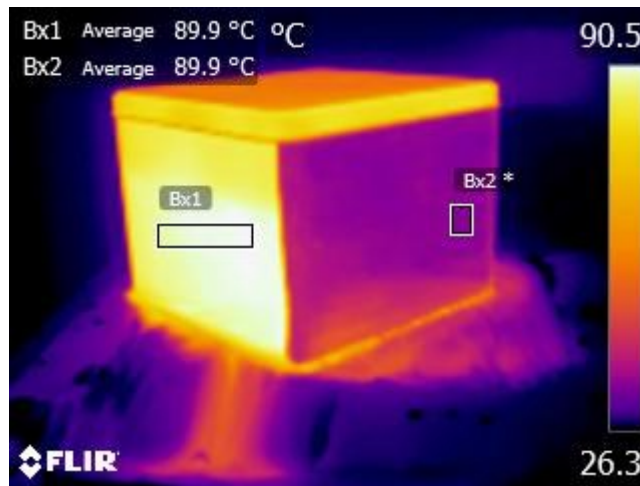


Slika 4.11. Termogram metalne kutije pri kutu 20° (-70°)

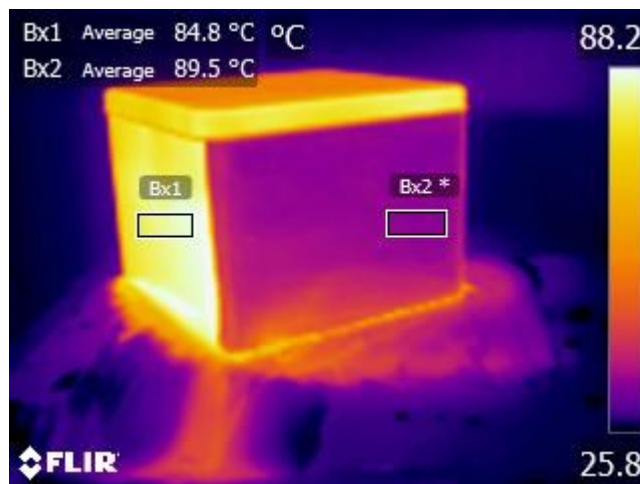
Na slikama 4.12 - 4.18 prikazane su prividne temperature metalne površine s pravokutnim područjem promatranja (Bx2, gdje su postavljeni lokalni parametri za faktor emisivnosti od $\epsilon = 0,14$).



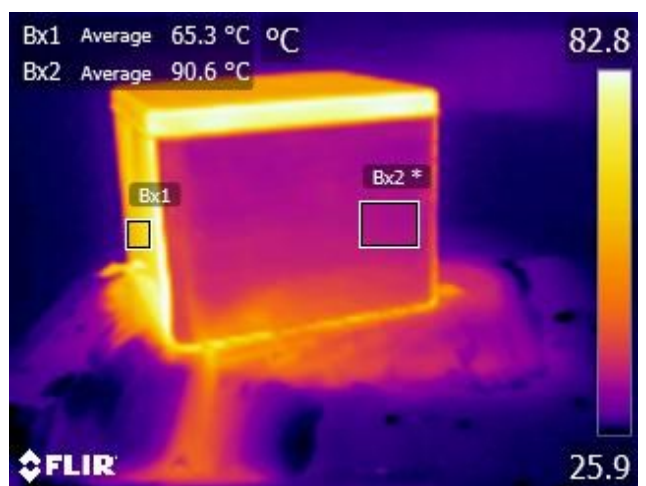
Slika 4.12. Termogram metalne kutije pri kutu 30° (-60°)



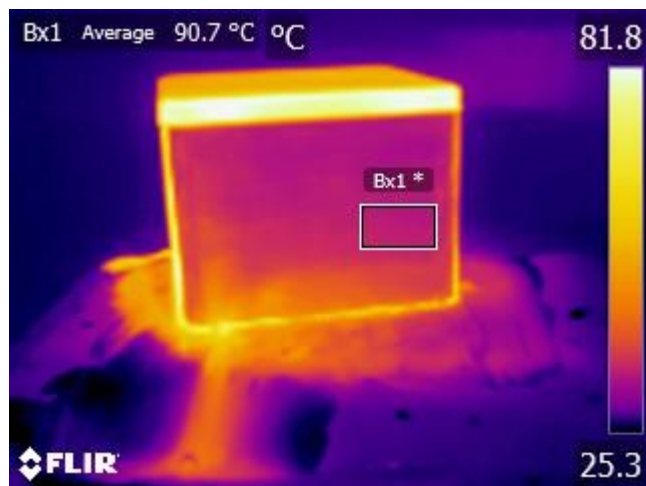
Slika 4.13. Termogram metalne kutije pri kutu 40° (-50°)



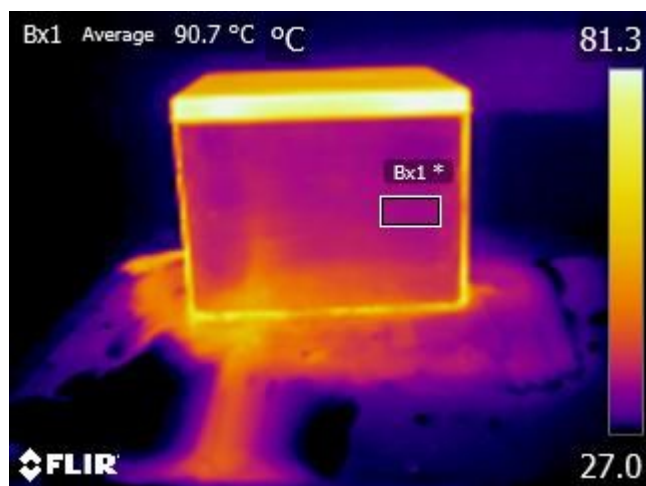
Slika 4.14. Termogram metalne kutije pri kutu 50° (-40°)



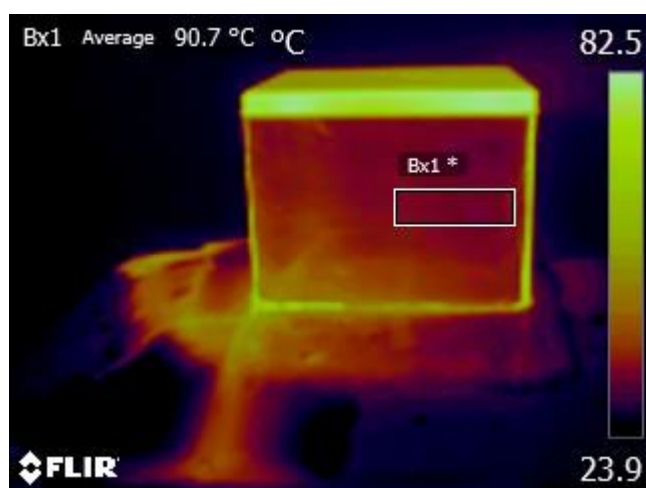
Slika 4.15. Termogram metalne kutije pri kutu 60° (-30°)



Slika 4.16. Termogram metalne kutije pri kutu 70° (-20°)



Slika 4.17. Termogram metalne kutije pri kutu 80° (-10°)



Slika 4.18. Termogram metalne kutije pri kutu 90° (0°)

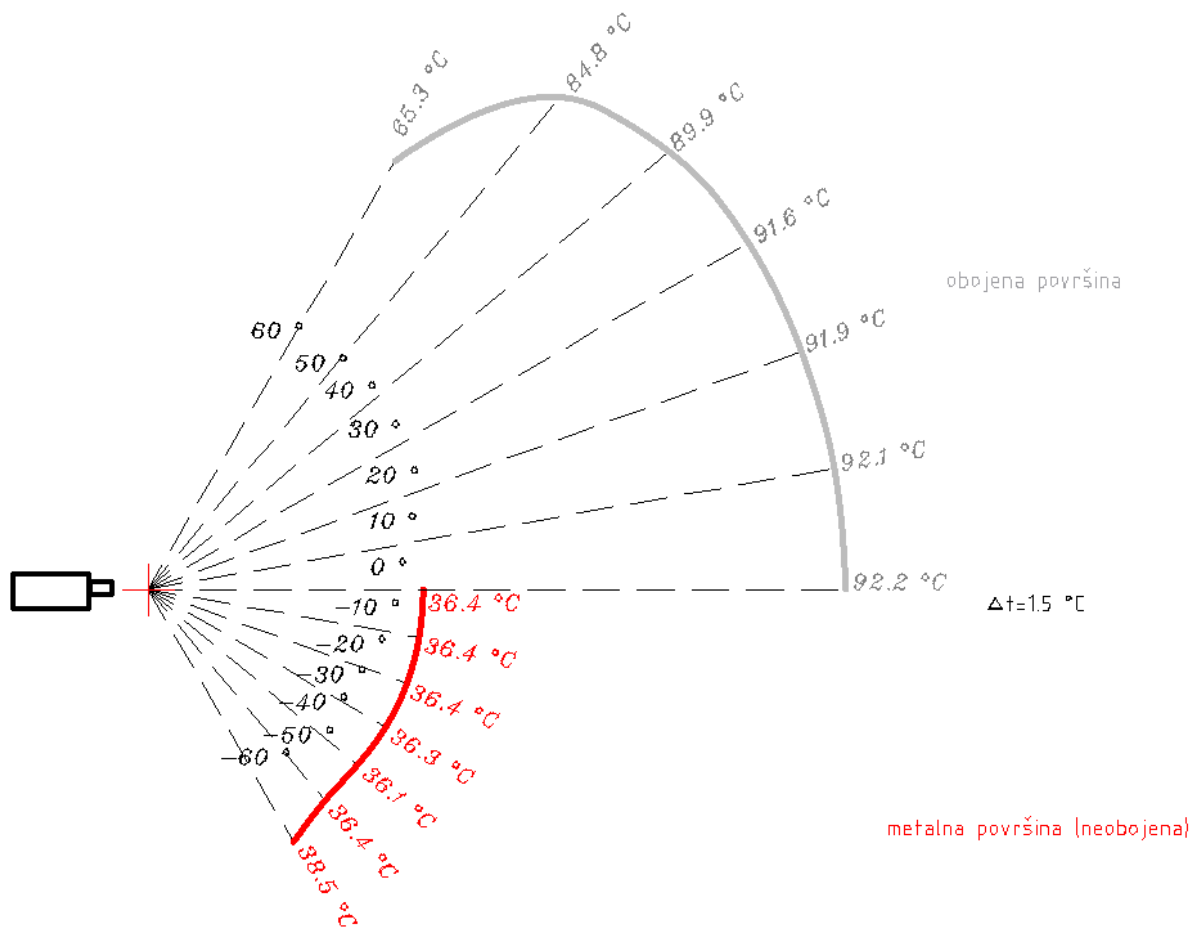
Svi prethodni termogrami obrađeni su u programskoj podršci. Kako bi rezultati izgledali za isto snimanje prije korekcije u programskoj podršci, prikazano je u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Ovisnosti prividnih temperatura o kutu promatranja (bez obrade)

Rezultati prije korekcije u programskoj podršci					
Obojena površina	Kut	Temperatura	Metalna površina	Kut	Temperatura
	0°	92,2 °C		0°	36,4 °C
	10°	92,1 °C		-10°	36,4 °C
	20°	91,9 °C		-20°	36,4 °C
	30°	91,6 °C		-30°	36,3 °C
	40°	89,9 °C		-40°	36,1 °C
	50°	84,8 °C		-50°	36,4 °C
	60°	65,3 °C		-60°	38,5 °C

U tablici navedene prividne temperature metalne površine daleko su od točnih vrijednosti jer je referentna vrijednost pri kutu 0° iznosa 92,2 °C umanjeno za Δt koji iznosi 1,5 °C.

Na slici 4.19 prikazana je karakteristika ovisnosti emisivnosti o kutu bez obrade faktora emisivnosti metalne površine u programskoj podršci.



Slika 4.19. Ovisnost emisivnosti površina o kutu (bez obrade)

Osim što su prividne temperature metalne površine daleko od ispravnih vrijednosti, smanjen je i utjecaj reflektiranog zračenja zbog velikog faktora emisivnosti od 0,9.

Zbog navedenih pogreški, potrebna je obrada u programskoj podršci.

Rezultati nakon prividnih temperatura metalne površine nakon obrade programskoj podršci prikazani su u tablici 4.4.

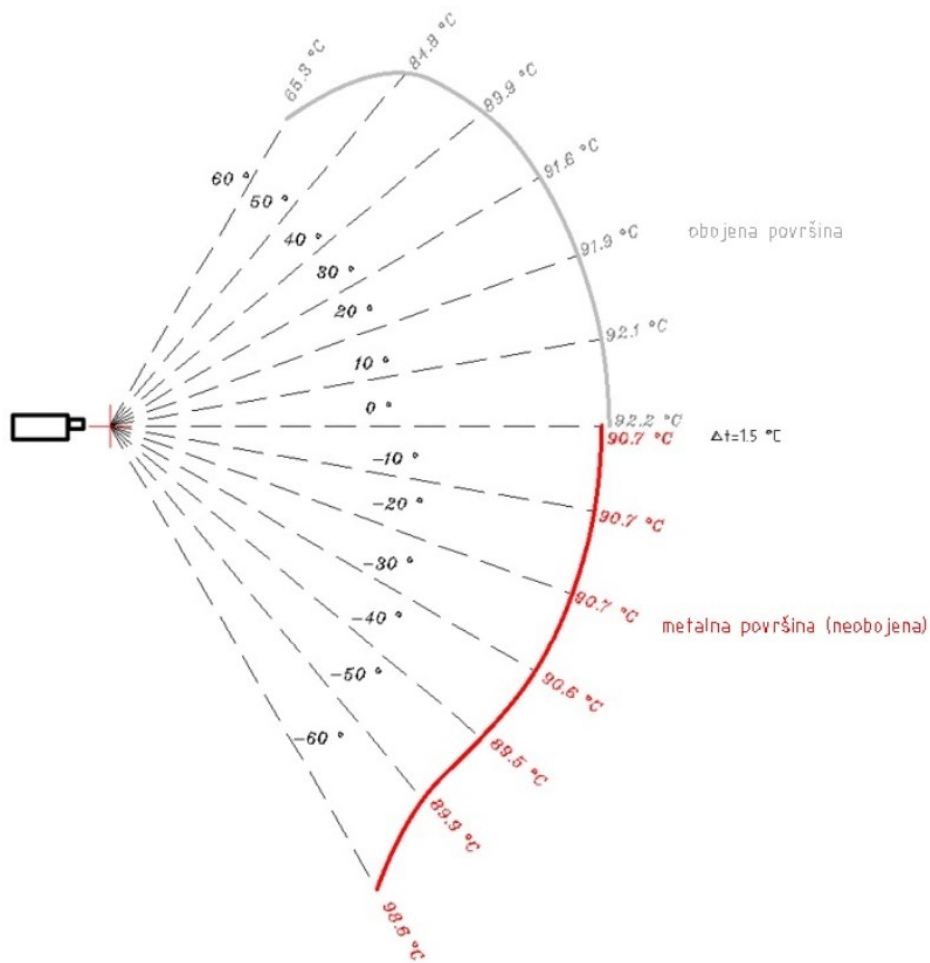
Tablica 4.4. Ovisnosti prividnih temperatura o kutu promatranja

Obojena površina	Kut	Temperatura	Metalna površina	Kut	Temperatura
	0°	92,2 °C		0°	90,7 °C
	10°	92,1 °C		-10°	90,7 °C
	20°	91,9 °C		-20°	90,7 °C
	30°	91,6 °C		-30°	90,6 °C
	40°	89,9 °C		-40°	89,5 °C
	50°	84,8 °C		-50°	89,9 °C
	60°	65,3 °C		-60°	98,6 °C

Dobiveni rezultati temperatura za metalnu površinu nisu vjerodostojni za različite kutove. Razlog tome je što, zbog svoje niske emisivnosti, metalna površina reflektira puno okolnog zračenja.

Prostorija u kojoj je obavljeno ispitivanje ima u okolini različite utjecaje infracrvenog zračenja: zračenja osoba u prostoriji, veliki izvor toplinskog zračenja (radijator), žarulje itd. Sva ta zračenja okoline znatno utječu na termogram površina sa malenom emisivnošću.

Na slici 4.20. grafički su prikazani rezultati iz tablice 4.4.



Slika 4.20. Ovisnost emisivnosti površina o kutu

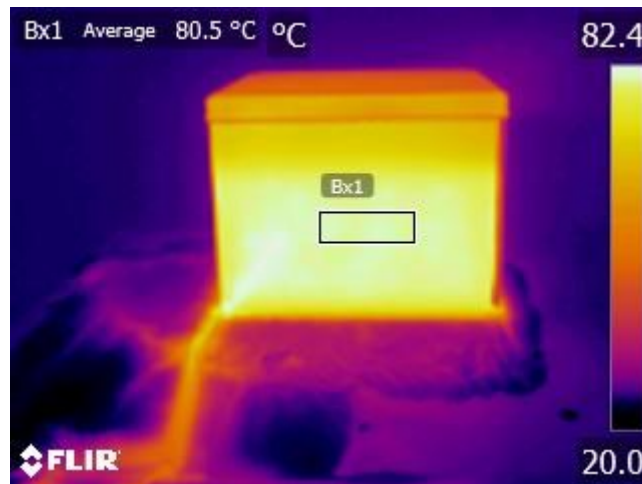
Vidljivo je da prividne temperature obojane površine opadaju pri većim kutovima promatranja. Nakon kuta od 50°, prividna temperatura znatno opada.

Obojena površina ima visoku emisivnost i relevantnija je za ovo ispitivanje od metalne površine. Okolno reflektirano zračenje ne utječe mnogo na prividne temperature obojene površine, dok na metalnu površinu znatno utječe. Usporedbom karakteristika sa slika 4.19 i 4.20. dolazimo do zaključka da je obrada termograma u programskoj podršci ključna i neizbježna. U suprotnom rezultati nisu ni približno točni. Siva krivulja na obje karakteristike sa slika 4.19 i 4.20 je jednaka zbog dobrog podešavanja faktora emisije prilikom termografskog snimanja.

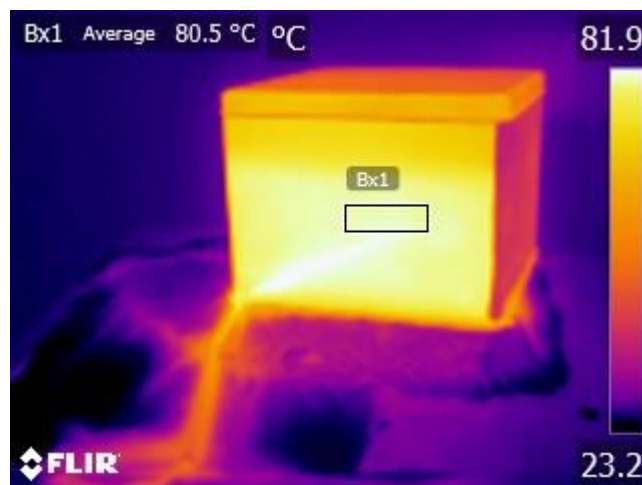
Termografska kamera kojom je snimano istraživanje nema mogućnost postavljanja više različitih faktora emisivnosti. Stoga, bez korištenja programske podrške ne bi bilo moguće dobiti točne rezultate.

4.2.2. Drugo snimanje

Nakon što se temperatura vode u metalnoj kutiji ohladila za više od 10 °C, ponovno je obavljeno snimanje. U ovom snimanju u programskoj podršci promatrano je 10° više nego u prvom snimanju.

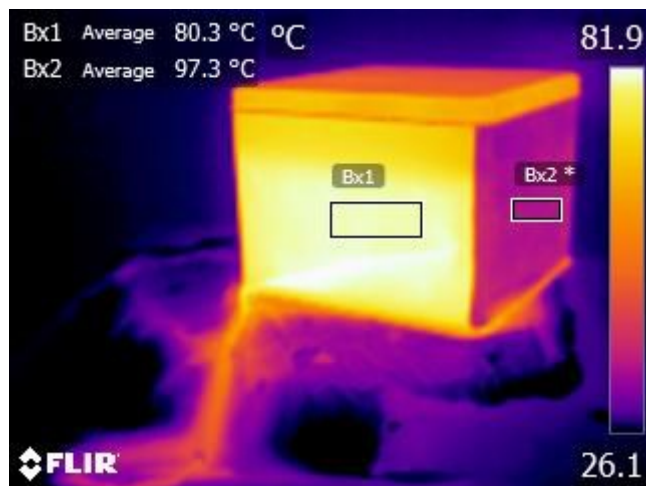


Slika 4.21. Termogram metalne kutije pri kutu 0° (-90°)

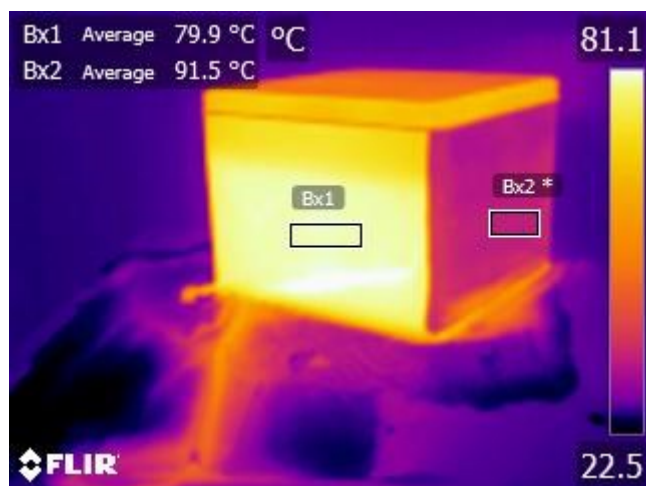


Slika 4.22. Termogram metalne kutije pri kutu 10° (-80°)

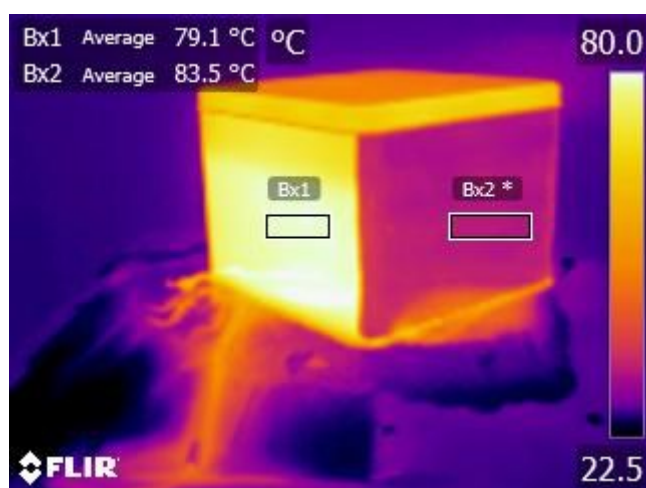
Od slike 4.23 do slike 4.28 promatrano je područje za metalnu površinu pravokutnik Bx2*, odnosno Bx1 od slike 4.29. U tim pravokutnicima vrijede lokalni parametri, gdje je faktor emisivnosti $\varepsilon = 0,14$.



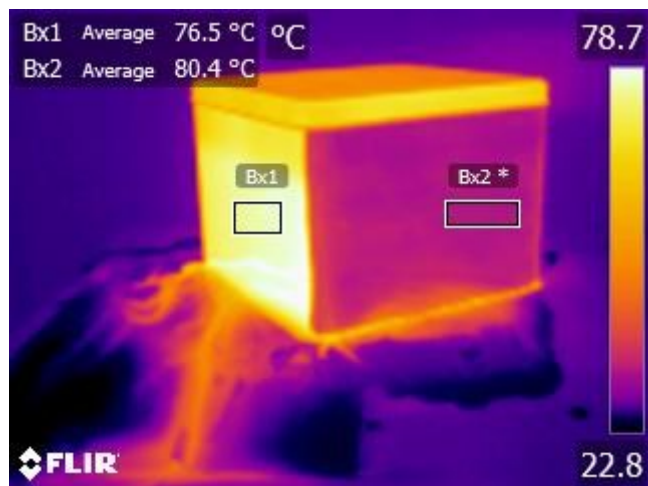
Slika 4.23. Termogram metalne kutije pri kutu 20° (-70°)



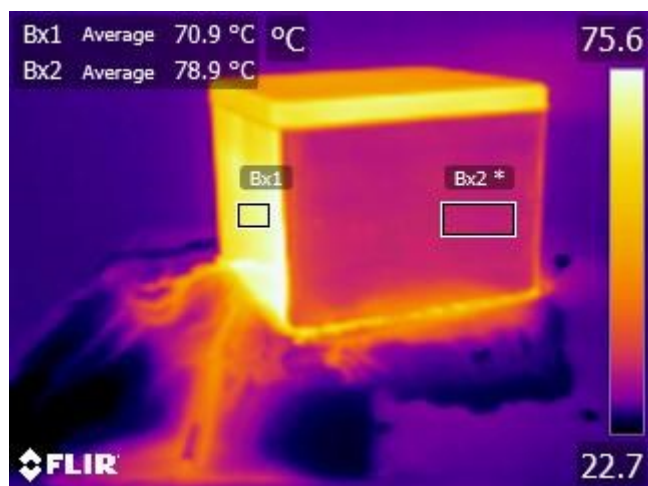
Slika 4.24. Termogram metalne kutije pri kutu 30° (-60°)



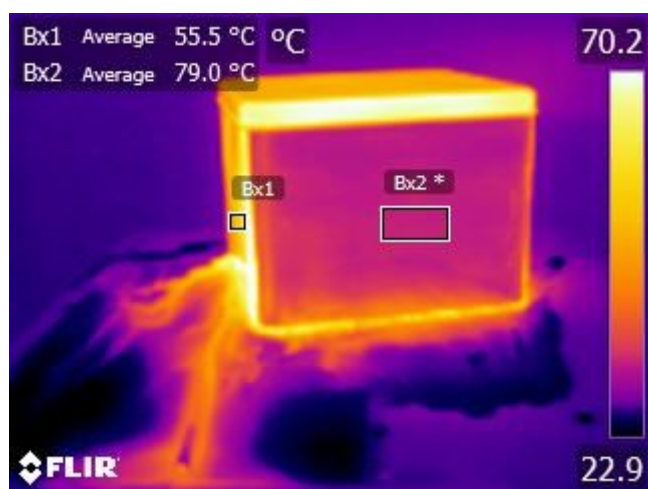
Slika 4.25. Termogram metalne kutije pri kutu 40° (-50°)



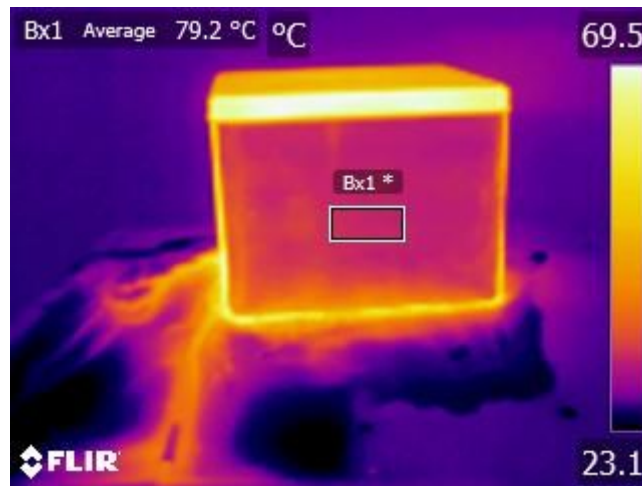
Slika 4.26. Termogram metalne kutije pri kutu 50° (-40°)



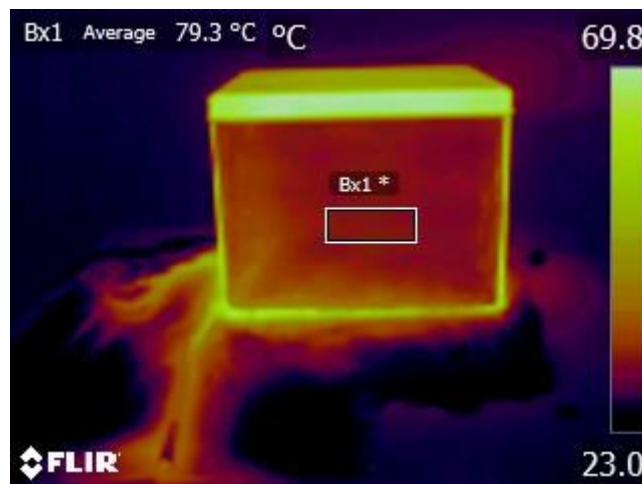
Slika 4.27. Termogram metalne kutije pri kutu 60° (-30°)



Slika 4.28. Termogram metalne kutije pri kutu 70° (-20°)



Slika 4.29. Termogram metalne kutije pri kutu 80° (-10°)



Slika 4.30. Termogram metalne kutije pri kutu 90° (0°)

Na termogramima se uočavaju refleksije vode na stolu i druge refleksije okoline na metalnoj površini. Prilikom postavljanja pravokutnika Bx2*, odnosno Bx1*, izbjegavane su očigledne refleksije na metalnoj površini radi smanjivanja pogreške prividne temperature.

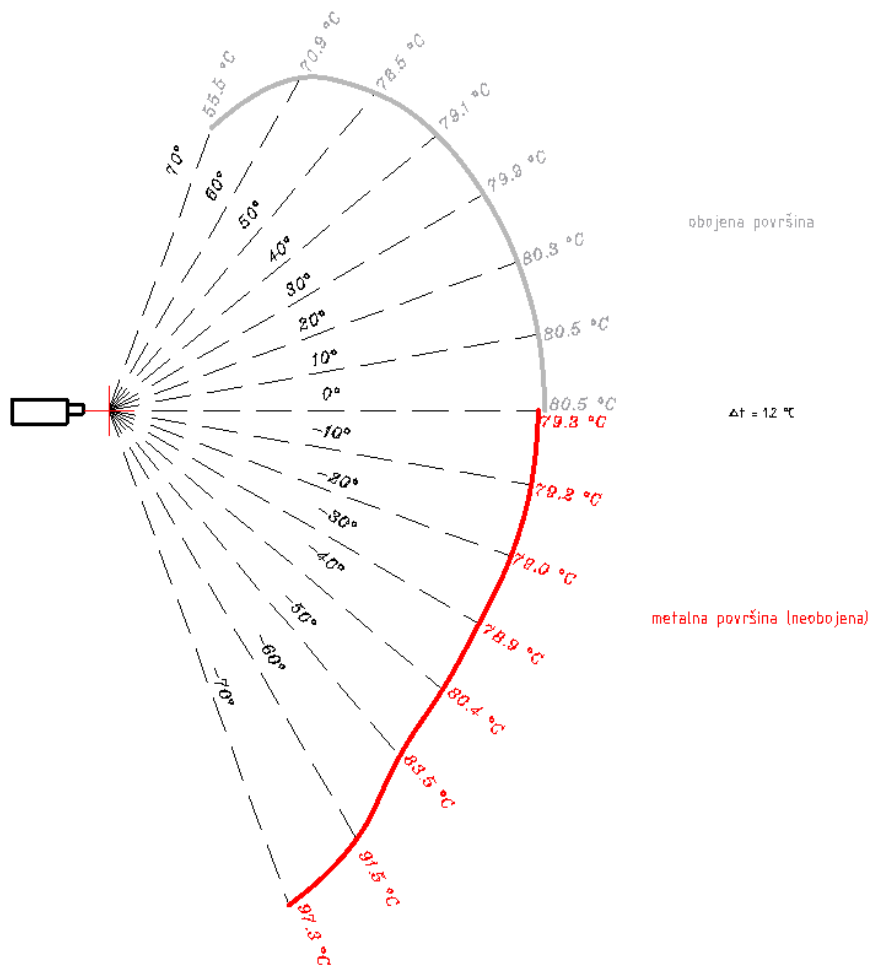
U tablici 4.5 prikazane su temperature ovisno o kutovima za obojenu površinu i za metalnu površinu.

Tablica 4.5. Ovisnosti prividnih temperatura o kutu promatranja

Obojena površina	Kut	Temperatura	Metalna površina	Kut	Temperatura
	0°	80,5		0°	79,3
	10°	80,5		-10°	79,2
	20°	80,3		-20°	79,0
	30°	79,9		-30°	78,9
	40°	79,1		-40°	80,4
	50°	76,5		-50°	83,5
	60°	70,9		-60°	91,5
	70°	55,5		-70°	97,3

Za obojenu površinu vidljivo je da s povećanjem kuta dolazi do smanjenja prividnih temperatura. Za metalnu površinu sa većim udaljavanjem od kuta 0 stupnjeva, dolazi do povećavanja prividnih temperatura.

Rezultati iz tablice 4.5 prikazani su karakteristikom sa slike 4.31.



Slika 4.31. Ovisnost emisivnosti površina o kutu

Promatranjem sive krivulje sa slike vidljivo je da se očitana prividna temperatura smanjuje s povećanjem kuta. Od kuta od 40° svaki pomak od 10° prema većim kutovima značajno utječe na dobiveni rezultat prividnih temperatura, što se vidi za kut od 70° na kojem je dobivena prividna temperatura od 55,5 °C, što je -25°C (- 31,1%) s obzirom na referentnu temperaturu pri kutu 0°.

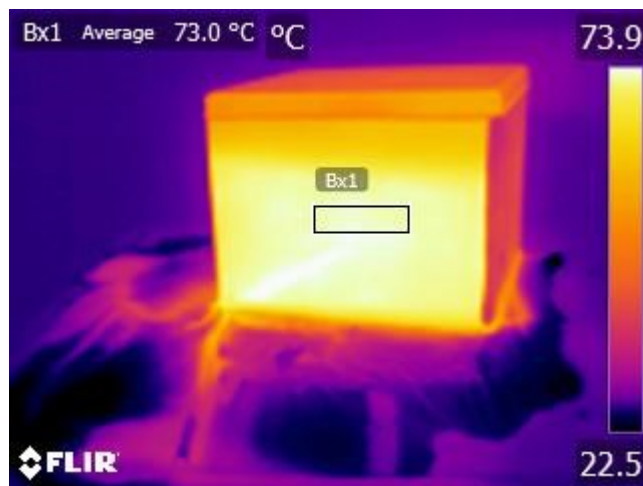
Promatranjem crvene krivulje, vidljivo je da za prvih par pomaka kutije nema značajnih promjena prividnih temperatura te se temperatura do kuta -30° neznatno smanjuje. Nakon kuta od -30° dolazi do povećanja prividnih temperatura. Prividna temperatura pri kutu od -70° iznosi čak 97,3 °C, usporedno s referentnom temperaturom pri kutu 0° razlika je +18 °C.

4.2.3. Treće snimanje

U trećem snimanju referentna vrijednost temperature pri kutu 0° iznosi 73°C. Promatrana je promjena prividne temperature ovisno o kutu promatranja.

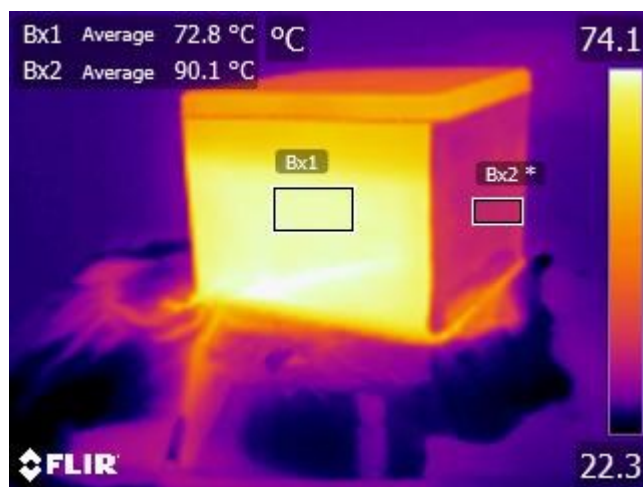


Slika 4.32. Termogram metalne kutije pri kutu 0° (-90°)

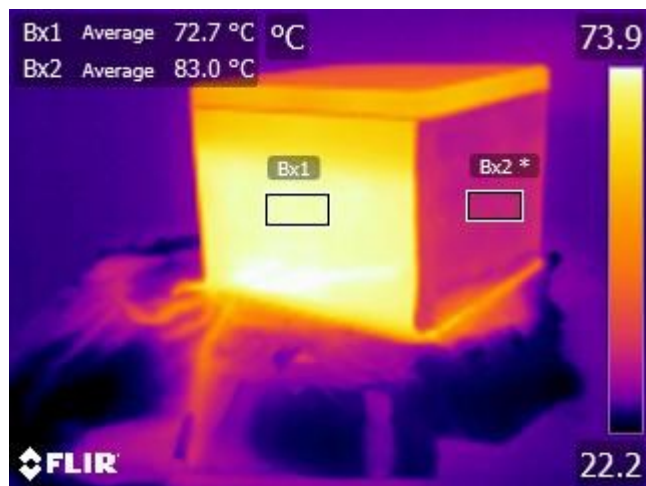


Slika 4.33. Termogram metalne kutije pri kutu 10° (-80°)

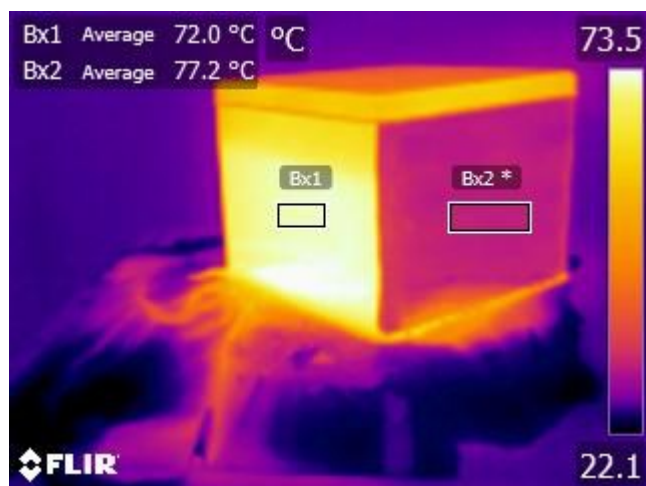
Od slike 4.34., područje promatranja za metalnu površinu je Bx2* za kojeg su postavljeni lokalni parametri za faktor emisije $\epsilon = 0,14$.



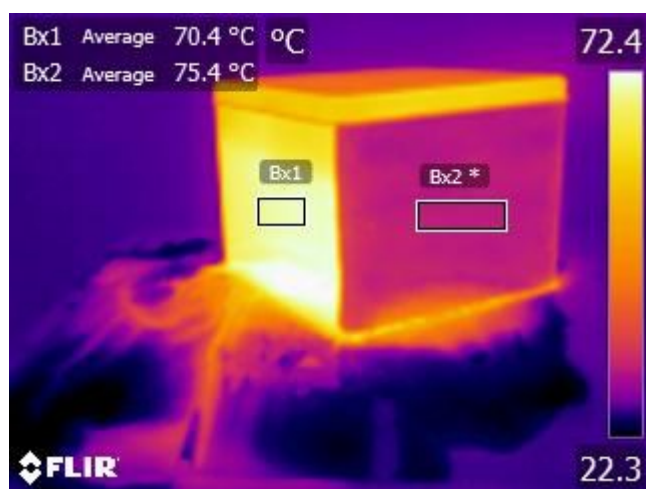
Slika 4.34. Termogram metalne kutije pri kutu 20° (-70°)



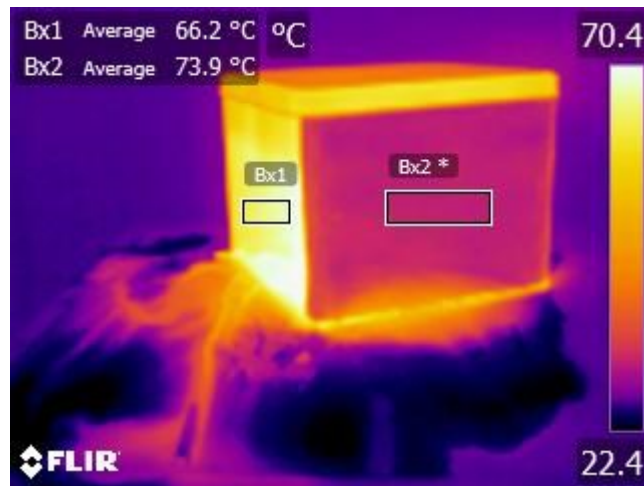
Slika 4.35. Termogram metalne kutije pri kutu 30° (-60°)



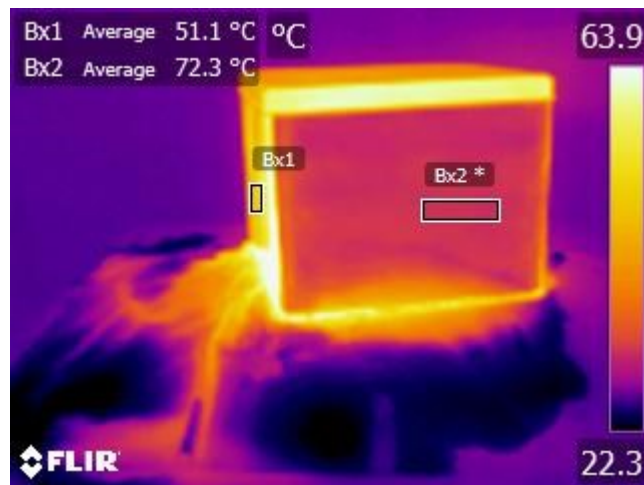
Slika 4.36. Termogram metalne kutije pri kutu 40° (-50°)



Slika 4.37. Termogram metalne kutije pri kutu 50° (-40°)

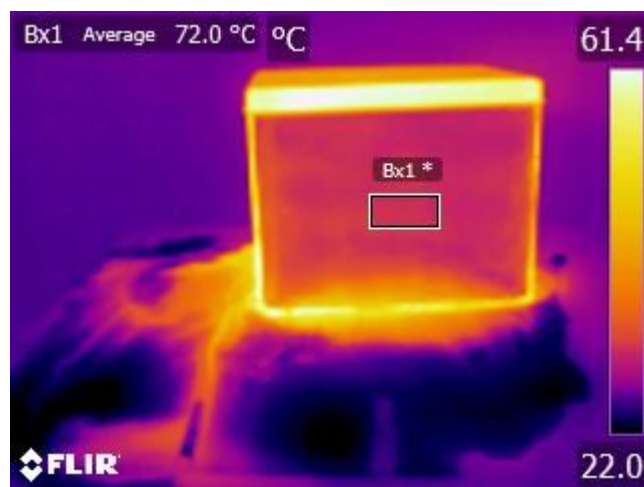


Slika 4.38. Termogram metalne kutije pri kutu 60° (-30°)

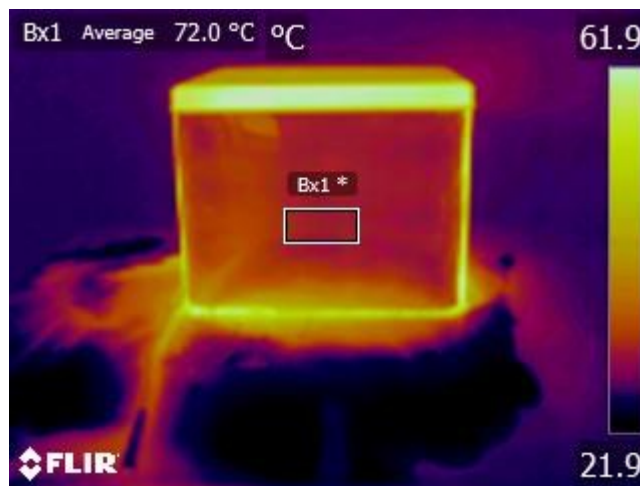


Slika 4.39. Termogram metalne kutije pri kutu 70° (-20°)

S obzirom na to da nakon kuta 70° obojena površina metalne kutije nije vidljiva, Bx2* s prethodnih termograma postaje Bx1*.



Slika 4.40. Termogram metalne kutije pri kutu 80° (-10°)



Slika 4.41. Termogram metalne kutije pri kutu 90° (0°)

Rezultati prethodnih termograma prikazani su u tablici 4.6

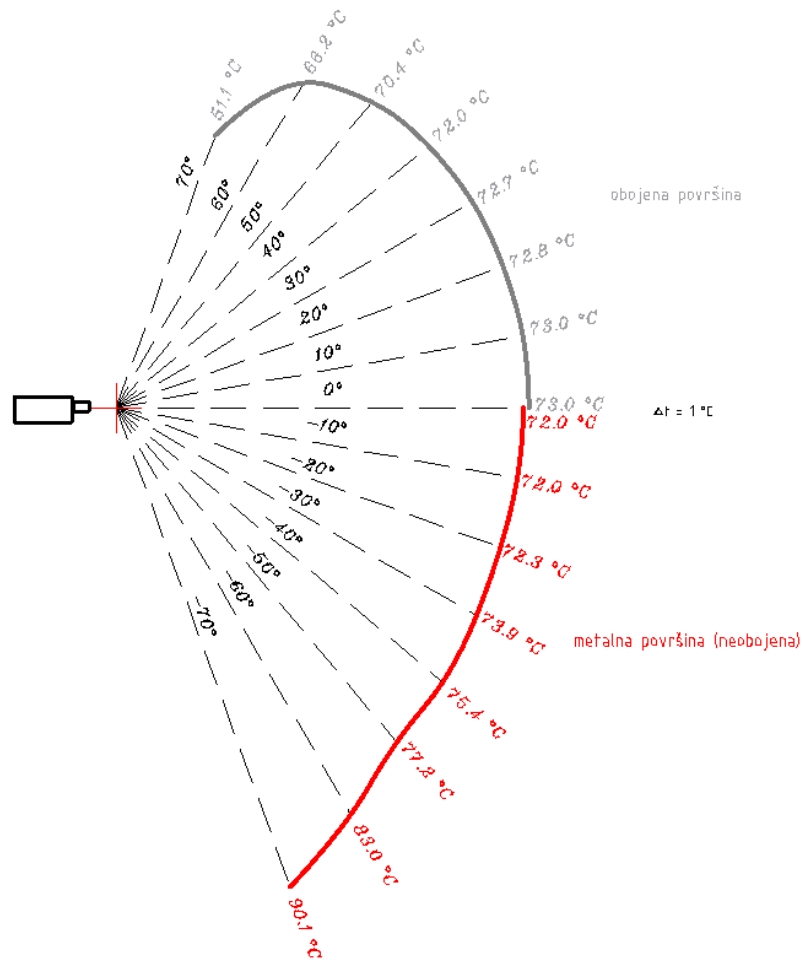
Tablica 4.6. Ovisnosti prividnih temperatura o kutu promatranja za treće snimanje

	Kut	Temperatura		Kut	Temperatura
	Obojena površina	0°		73,0 °C	Metalna površina
10°		73,0 °C	-10°	72,0 °C	
20°		72,8 °C	-20°	72,3 °C	
30°		72,7 °C	-30°	73,9 °C	
40°		72,0 °C	-40°	75,4 °C	
50°		70,4 °C	-50°	77,2 °C	
60°		66,2 °C	-60°	83,0 °C	
70°		51,1 °C	-70°	90,1 °C	

Za obojenu površinu do kuta 40°, promjena prividne temperature s obzirom na početni kut 0° manja je od 1,5%, što je zanemarivo s obzirom na Δt koji je u ovom snimanju iznosa 1 °C. Nakon kuta 40°, svakim pomakom kutije za 10° sve veće je odstupanje s obzirom na referentnu vrijednost.

Promatrajući prikaz vrijednosti za metalnu površinu, primjetna su značajnija odstupanja. Od kuta od -30°, svakim pomakom kutije, dolazi do većeg odstupanja od referentne vrijednosti te pri kutu od -70° ono iznosi +18,1 °C (+20,1%).

Rezultati iz tablice 4.6 grafički su prikazani slikom 4.42.



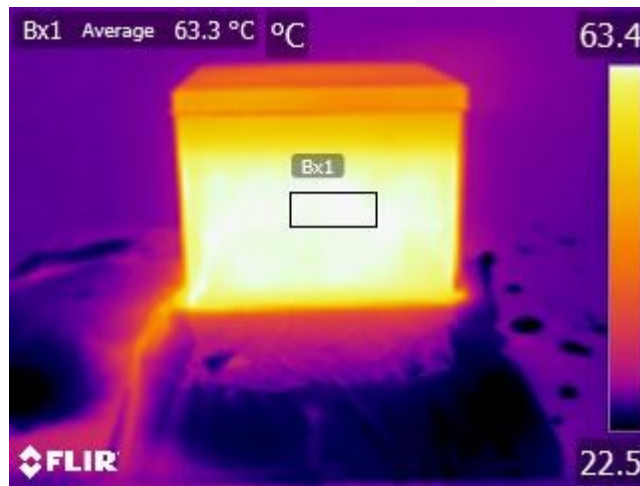
Slika 4.42. Ovisnost emisivnosti površina o kutu

Možemo primijetiti kako su krivulje gotovo jednakog oblika kao u prethodnom snimanju.

4.2.4. Četvrto snimanje

U četvrtom snimanju, referentni je iznos temperature 63,3°C pri kutu od 0°.

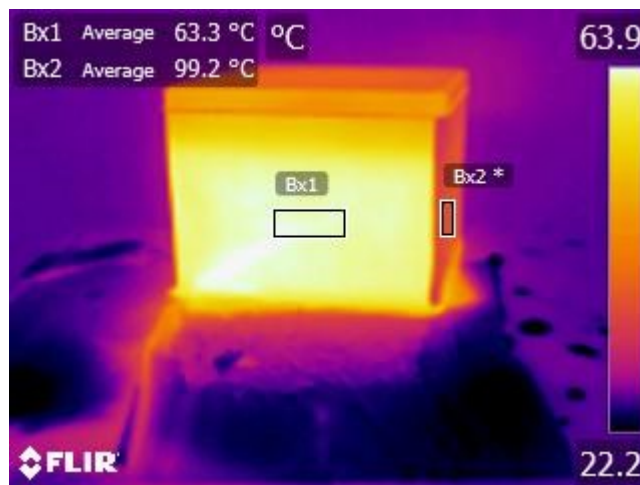
Rotacijom kutije zapažamo promjenu prividne temperature za obojanu i metalnu površinu.



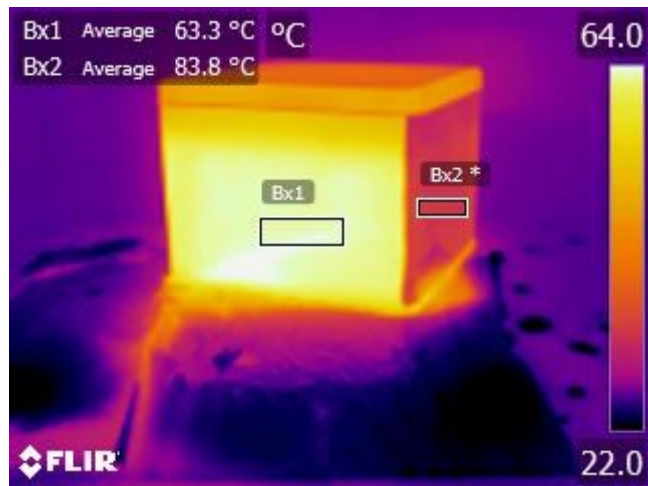
Slika 4.43. Termogram metalne kutije pri kutu 0° (-90°)

U četvrtom snimanju, zbog položaja metalne kutije, promatrano je 10° više nego u prethodnom snimanju.

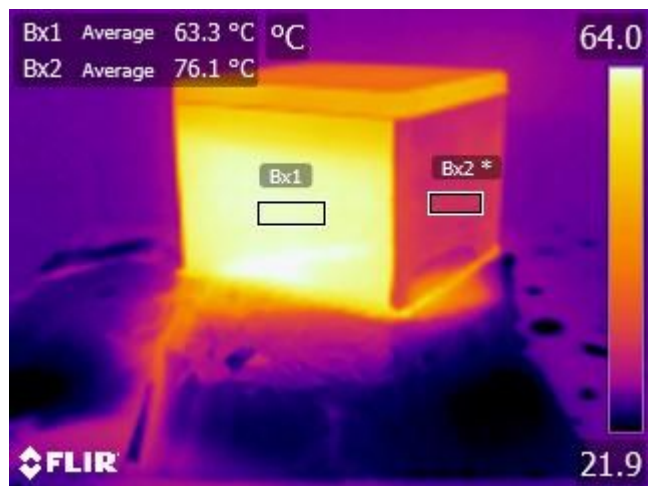
Od slike 4.44, područje promatranja za metalnu površinu je Bx2*, za kojeg su postavljeni lokalni parametri za faktor emisije $\varepsilon = 0,14$.



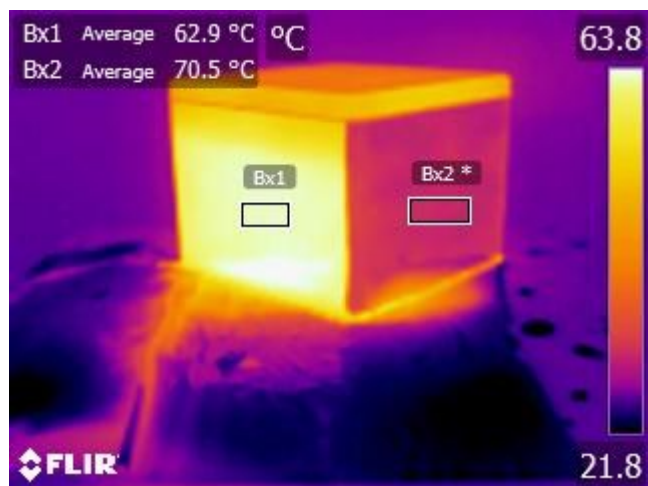
Slika 4.44. Termogram metalne kutije pri kutu 10° (-80°)



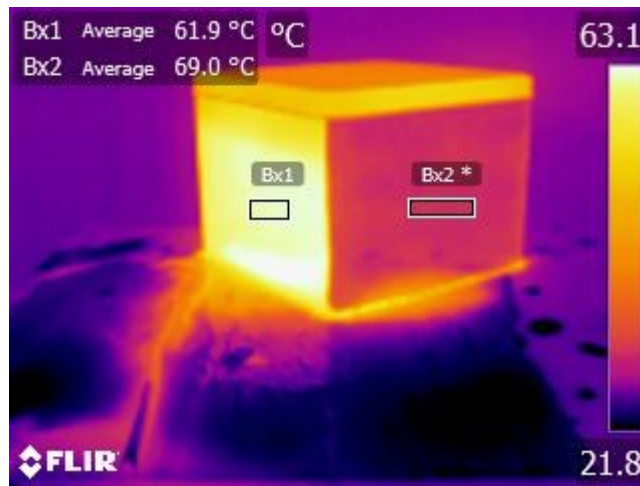
Slika 4.45. Termogram metalne kutije pri kutu 20° (-70°)



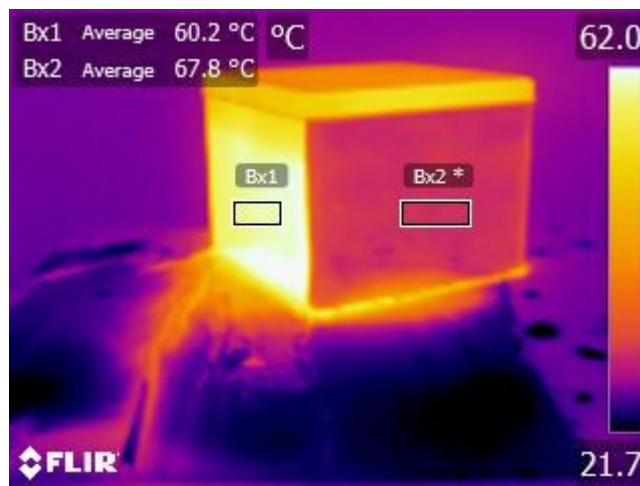
Slika 4.46. Termogram metalne kutije pri kutu 30° (-60°)



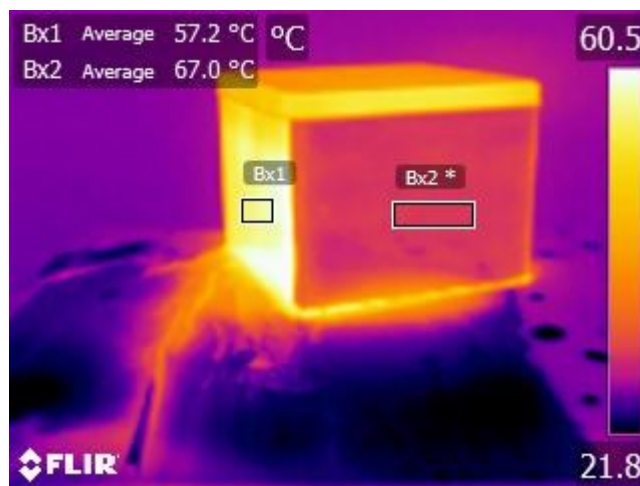
Slika 4.47. Termogram metalne kutije pri kutu 40° (-50°)



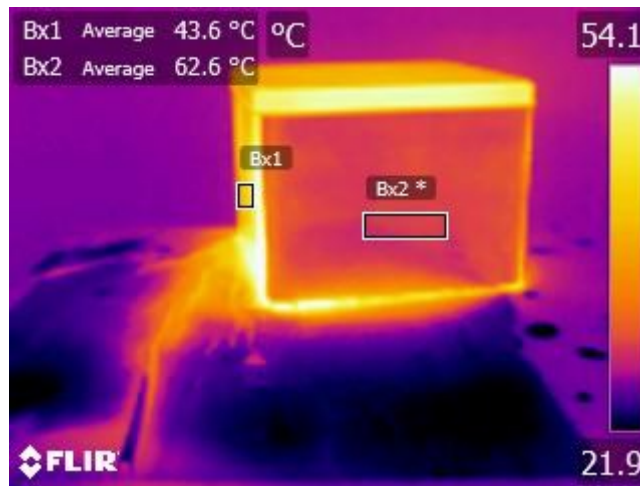
Slika 4.48. Termogram metalne kutije pri kutu 50° (-40°)



Slika 4.49. Termogram metalne kutije pri kutu 60° (-30°)

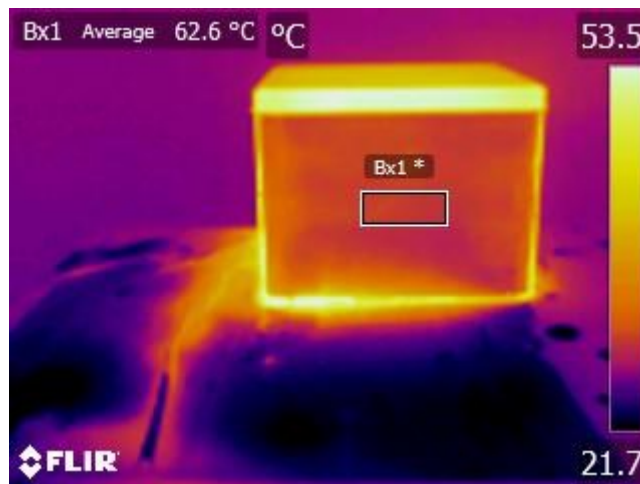


Slika 4.50. Termogram metalne kutije pri kutu 70° (-20°)



Slika 4.51 Termogram metalne kutije pri kutu 80° (-10°)

S obzirom na to da nakon kuta 80° obojena površina metalne kutije nije vidljiva, Bx2* sa prethodnih termograma postaje Bx1*.



Slika 4.52. Termogram metalne kutije pri kutu 90° (0°)

U tablici 4.7, prikazane su dobivene prividne temperature.

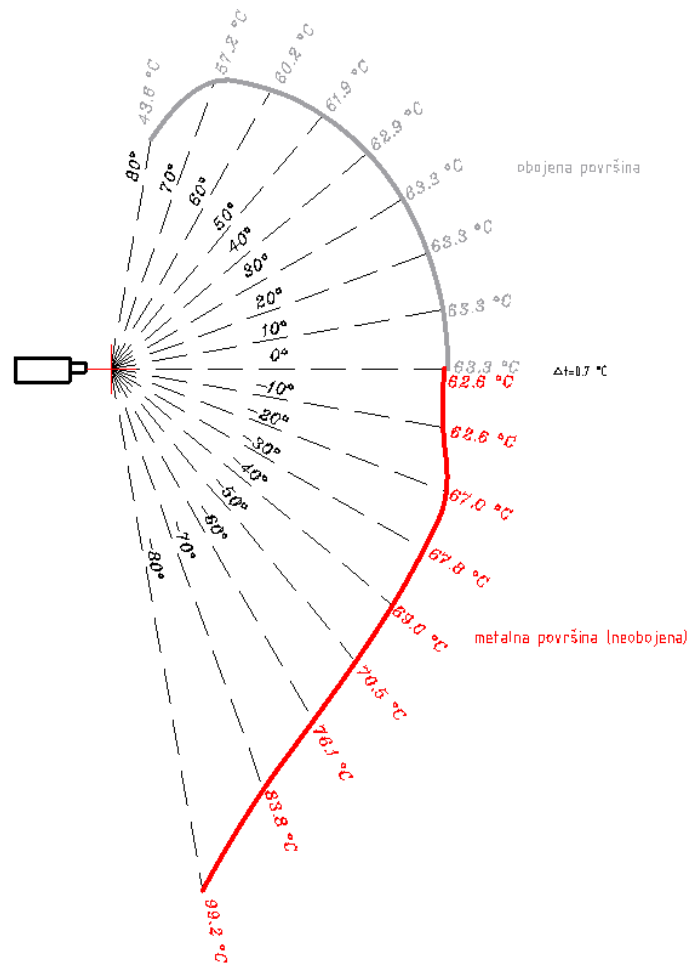
Tablica 4.5. Ovisnosti prividnih temperatura o kutu promatranja

Obojena površina	Kut	Temperatura	Metalna površina	Kut	Temperatura
	0°	63,3 °C		0°	62,6 °C
	10°	63,3 °C		-10°	62,6 °C
	20°	63,3 °C		-20°	67,0 °C
	30°	63,3 °C		-30°	67,8 °C
	40°	62,9 °C		-40°	69,0 °C
	50°	61,9 °C		-50°	70,5 °C
	60°	60,2 °C		-60°	76,1 °C
	70°	57,2 °C		-70°	83,8 °C
	80°	43,6 °C		-80°	99,2 °C

Za obojenu površinu do kuta 40° nema značajnih promjena. Pad je prividne temperature manji od 1%, a nakon kuta od 40°, svakim pomakom za 10°, dolazi do značajnog pada prividne temperature. Na 80° ona iznosi 43,6 °C, što je -19,7 °C (-31,12%) s obzirom na referentnu temperaturu.

Značajnija odstupanja vrijednosti za metalnu površinu pojavljuju se već od kuta -20 stupnjeva. Svakim pomakom kutije dolazi do većeg odstupanja od referentne vrijednosti, a ono pri kutu od -80 stupnjeva iznosi +36,6 °C (+36,9 %).

Promjene su prividnih temperatura pri četvrtom snimanju (tablica 4.7) grafički prikazane slikom 4.53.



Slika 4.53. Ovisnost emisivnosti površina o kutu

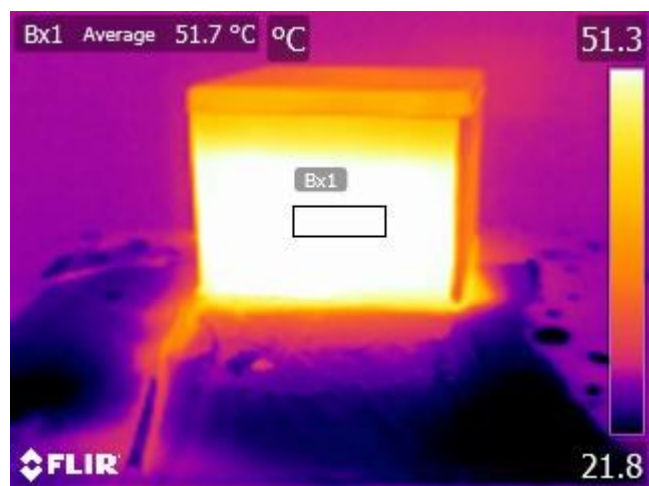
Siva krivulja sličnog je oblika kao u prethodnim snimanjima te se prividne temperature smanjuju s povećanjem kuta. Crvena krivulja pokazuje slično ponašanje kao u prethodnim snimanjima te dolazi do povećanja prividnih temperatura udaljavanjem od kuta od 0 stupnjeva.

4.2.5. Peto snimanje

U petom je snimanju referentni iznos temperature 51,7°C pri kutu od 0 stupnjeva. Rotacijom kutije zapažamo promjenu prividne temperature za obojenu i metalnu površinu.

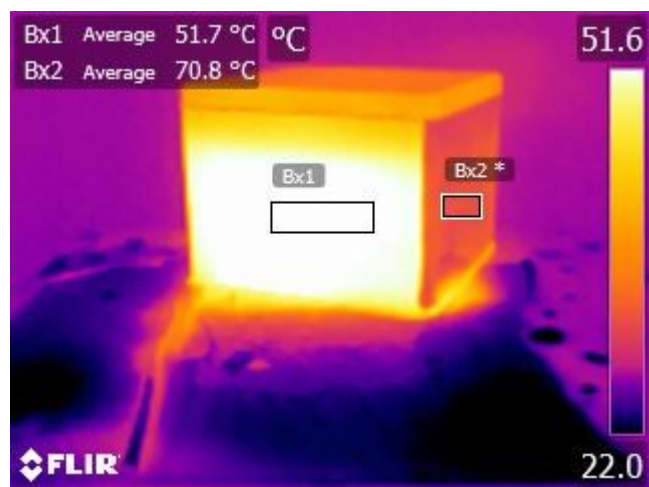


Slika 4.54. Termogram metalne kutije pri kutu 0° (-90°)

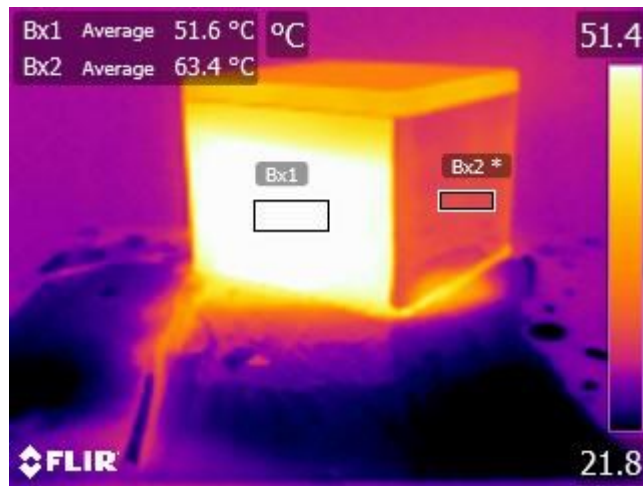


Slika 4.55. Termogram metalne kutije pri kutu 10° (-80°)

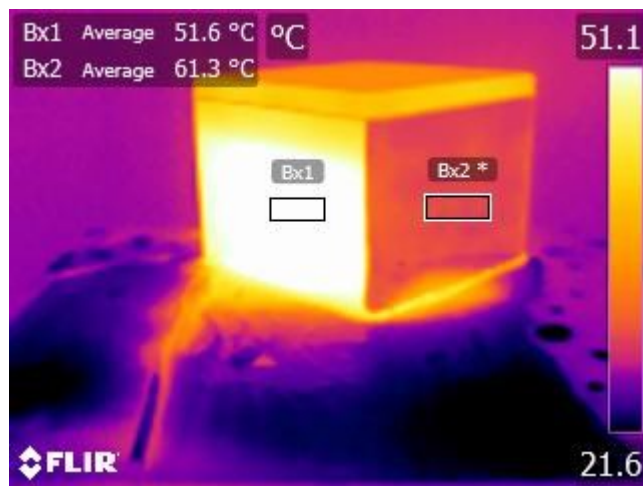
Od slike 4.56, područje promatranja za metalnu površinu je Bx2*, za kojeg su postavljeni lokalni parametri za faktor emisije $\epsilon = 0,14$.



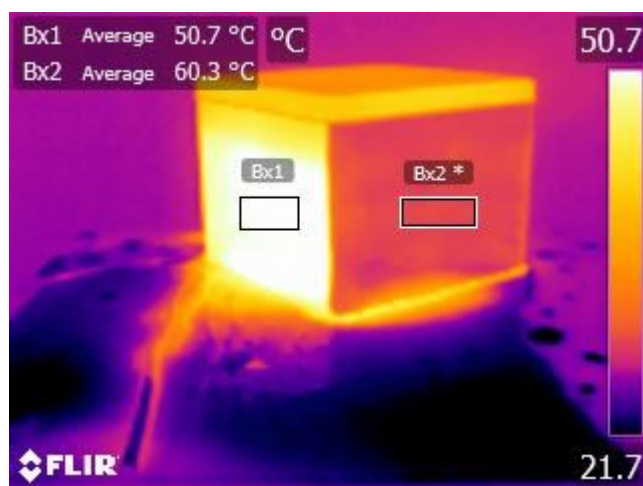
Slika 4.56. Termogram metalne kutije pri kutu 20° (-70°)



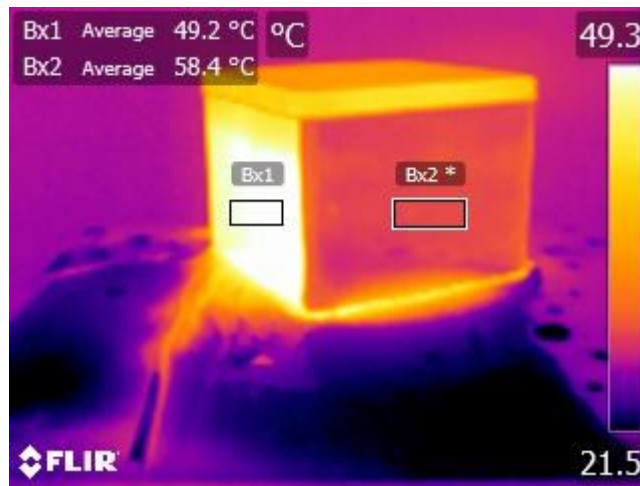
Slika 4.57. Termogram metalne kutije pri kutu 30° (-60°)



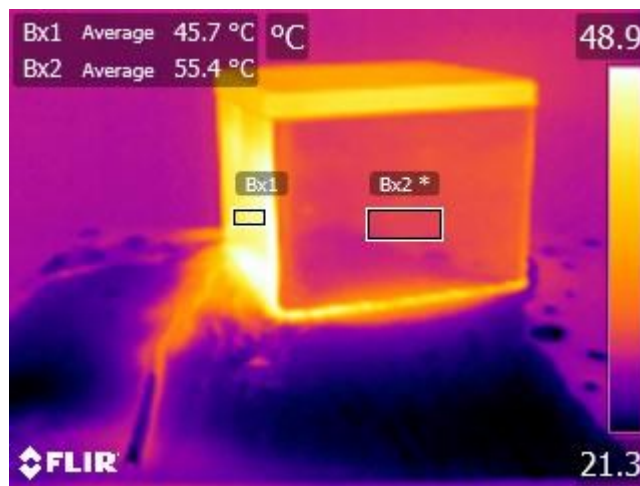
Slika 4.58. Termogram metalne kutije pri kutu 40° (-50°)



Slika 4.59. Termogram metalne kutije pri kutu 50° (-40°)

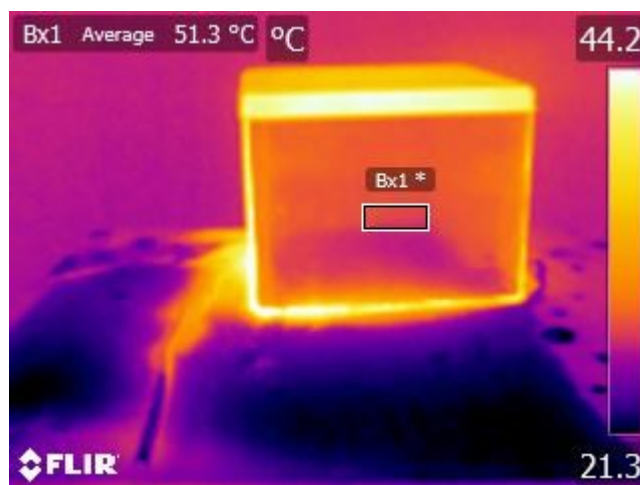


Slika 4.60. Termogram metalne kutije pri kutu 60° (-30°)

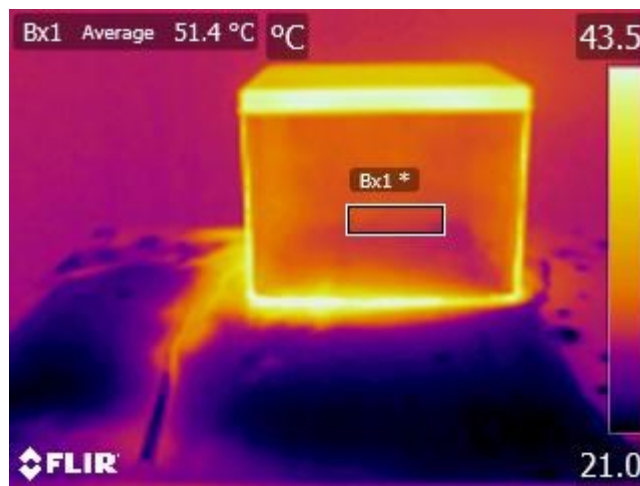


Slika 4.61. Termogram metalne kutije pri kutu 70° (-20°)

S obzirom na to da nakon kuta 70° obojena površina metalne kutije nije vidljiva, Bx2* sa prethodnih termograma postaje Bx1*.



Slika 4.62. Termogram metalne kutije pri kutu 80° (-10°)



Slika 4.63. Termogram metalne kutije pri kutu 90° (0°)

Rezultati prethodnih termograma za peto snimanje, prikazani su u tablici 4.8.

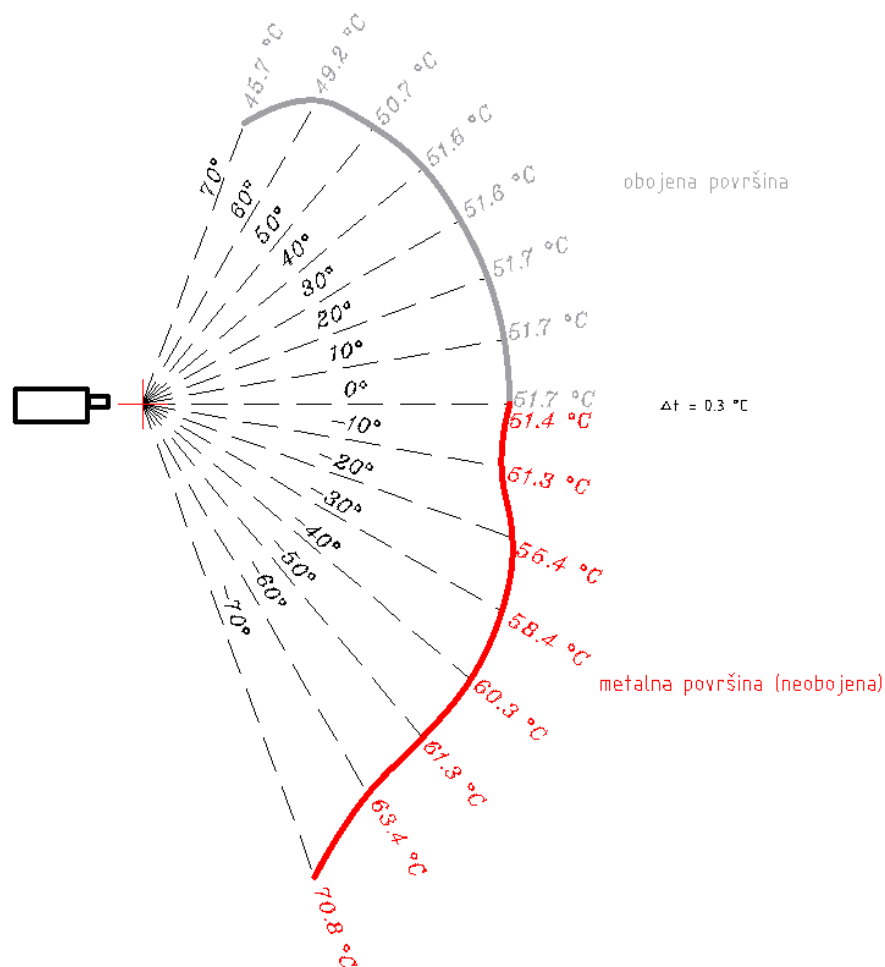
Tablica 4.8. Ovisnosti prividnih temperatura o kutu promatranja

	Kut	Temperatura		Kut	Temperatura
	Obojena površina	0°		51,7 °C	Metalna površina
10°		51,7 °C	-10°	51,3 °C	
20°		51,7 °C	-20°	55,4 °C	
30°		51,6 °C	-30°	58,4 °C	
40°		51,6 °C	-40°	60,3 °C	
50°		50,7 °C	-50°	61,3 °C	
60°		49,2 °C	-60°	63,4 °C	
70°		45,7 °C	-70°	70,8 °C	

Za obojenu površinu do kuta 30 stupnjeva, prividna je temperatura gotovo jednaka. Počevši od kuta od 40 stupnjeva, prividna temperatura sve značajnije opada pri svakom pomaku za 10 stupnjeva. Pri 70 stupnjeva ta promjena iznosi -6 °C (-11,6%).

Značajnije promjene prividne temperature metalne površine primjetne su već od -20 stupnjeva te pri kutu od dolazi do značajnije promjene prividne temperature te pri kutu od -70° promjena iznosi +19,4°C (+27,4%).

Na slici 4.64 vidimo prikaz rezultata iz tablice 4.8.



Slika 4.64. Ovisnost emisivnosti površina o kutu

Izgled se sive krivulje (obojene površine) nije značajno promijenio od istog grafičkog prikaza za prethodna mjerenja. Prividne se temperature metalne površine povećavaju sa udaljavanjem od kuta od 0 stupnjeva.

4.3. Analiza rezultata

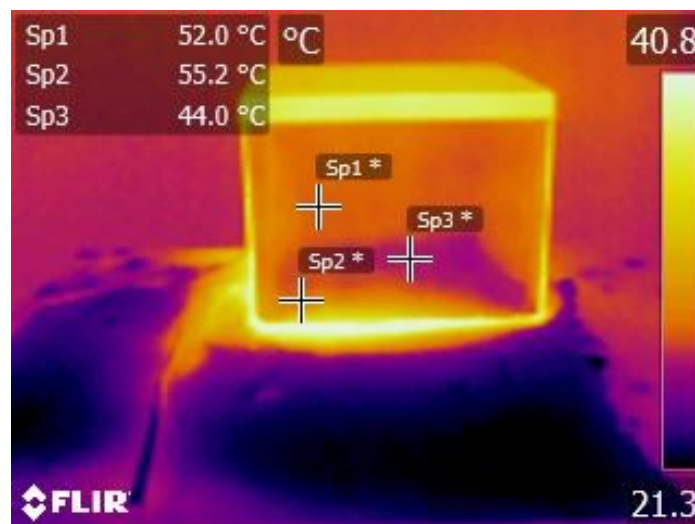
Analizom rezultata karakteristika ovisnosti emisivnosti površina o kutu, primjetno je da se za sva snimanja siva krivulja (krivulja obojene površine) jednako ponaša, odnosno dobivene se prividne temperature smanjuju ovisno koliko stupnjeva smo udaljeni od kuta 0°.

Do kuta 30 ili 40° smanjivanje prividnih temperatura za obojenu površinu nije značajno, dok daljnjim pomicanjem kutije prema većim kutovima, dobivena su puno veća odstupanja od referentne vrijednosti.

Crvena krivulja (krivulja metalne površine) ne ponaša se predvidljivo kao siva krivulja, a razlog tomu je njen malen faktor emisivnosti koji iznosi $\epsilon = 0,14$.

Prilikom programskog obrađivanja termograma metalne površine, zbog malog faktora emisivnosti, teško je odrediti temperaturu koja je približno jednaka referentnoj vrijednosti jer površina je visoko reflektivna. Zbog toga, veliki utjecaj na prividnu temperaturu ima položaj na kojem je postavljeno pravokutno područje promatranja (Bx1* ili Bx2*).

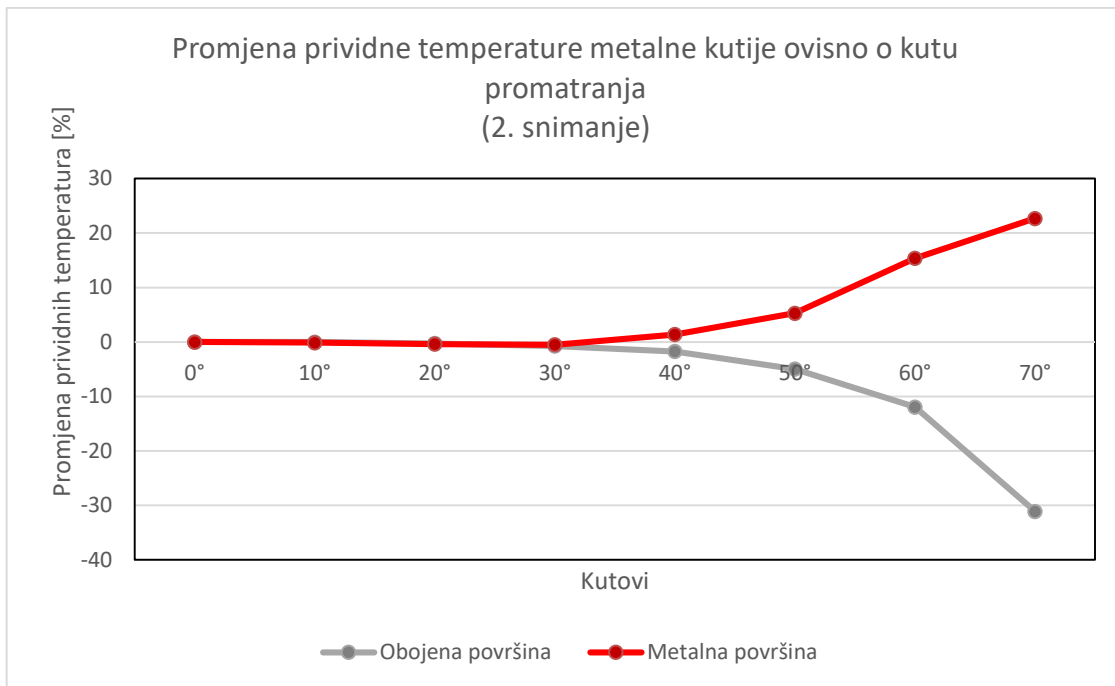
Koliko je važan promatrani položaj na površini, prikazano je na slici 4.63.



Slika 4.65. Problem površine sa malim faktorom emisivnosti

Na slici vidimo da svaka točka (spot) pokazuje različite vrijednosti prividnih temperatura. Kod Sp3* nalazi se refleksija ohlađene vode sa stola, Sp2* detektira refleksiju tople vode koju kutija propušta, dok je Sp1* najbliži točnom rezultatu temperature.

Na grafu sa slike 4.66. prikazana je postotna promjena prividnih temperatura metalne kutije ovisno o kutu promatranja.

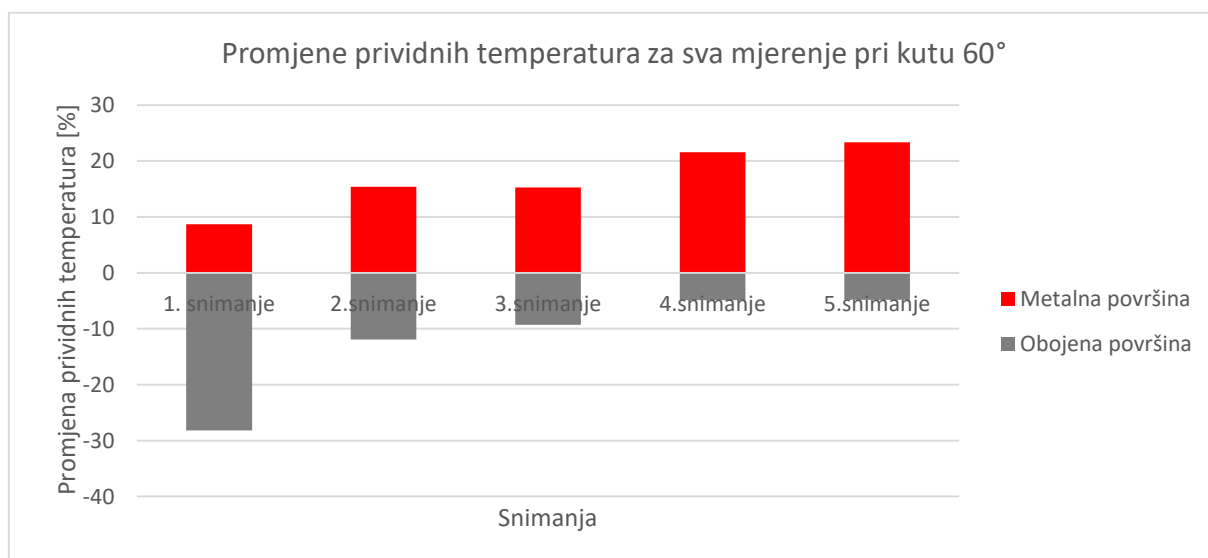


Slika 4.66. Promjena prividne temperature o kutu

Prilikom odmicanja metalne kutije od kuta 0° (ako promatramo od metalne površine), vidljivo je da se prividne temperature povećavaju, odnosno smanjuju kod obojane površine.

Grafom sa slike 4.67, prikazana je promjena prividnih temperatura pri istom kutu za svih 5 snimanja.

Slika 4.67. Promjena prividnih temperatura pri kutu 60°



Na grafu je vidljivo da za obojano površinu vrijedi to da što je veća temperatura, veće je i odstupanje od referentne vrijednosti pri većim kutovima. Dok za metalnu površinu vrijedi da

što je manja temperatura metalne kutije, veći je utjecaj reflektiranog zračenja na prividnu temperaturu.

Ispitivanje dokazuje da ako želimo imati reprezentativni prikaz temperatura, potrebno je objekt promatrati pri kutu koji nije previše udaljen od kuta 0° .

Promatranjem rezultata za metalnu površinu mogu se zaključiti da je emisivnost promatrane metalne površine prividna. Programska podrška dopušta unos faktora emisije samo do dvije decimale, što je znatno ograničenje za određivanje temperatura površina s malim faktorom emisije.

5. ZAKLJUČAK

Računalna programska podrška je neizostavan dio termografskog sustava i omogućava nam ispravnu obradu i analizu termograma.

U ovom radu, osim važnosti programske podrške za dobivanje ispravnih rezultata, dokazana je i važnost poznavanja karakteristika zračenja tijela te okoline u kojoj je snimanje obavljeno.

Prilikom analize termograma uočen je utjecaj reflektiranog zračenja na određivanje emisivnosti, a veliki utjecaj uočen je kod metalne (nebojene) površine, koja je visoko reflektivna i očitavanje temperature teže je nego kod obojene površine koja ima visok faktor emisije. Razlog tomu je što površine s manjim faktorom emisije reflektiraju temperature okolnih izvora toplinskog zračenja, što nam daje pogrešni uvid u temperaturu promatrane površine.

Promatranjem rezultata za obojenu površinu za svih pet mjerenja, uočeno je smanjenje prividne temperature pri udaljavanju od kuta 0 stupnjeva. Prvih par pomaka metalne kutije za 10 stupnjeva ne pokazuju značajne promjene, dok nakon kuta od 40 stupnjeva svakim pomakom kutije uočeno je sve veće odstupanje od referentne vrijednosti. S obzirom da reflektirano zračenje nema velikog utjecaja na obojenu površinu, ona je relevantnija za određivanja ovisnosti emisivnosti o kutu.

Promatranjem metalne površine sa odaljavanjem od kuta 0 stupnjeva dolazi do suprotnog efekta nego kod obojane površine, odnosno, dolazi do povećanja prividnih temperatura, a razlog je u tome što prilikom rotacije kutije dolazi do promjene reflektiranog zračenja.

U prostoriji u kojoj je obavljeno snimanje prisutno je više izvora infracrvenog zračenja, što je prilikom rotacije kutije posebno utjecalo na prividne temperature metalne površine. Da bi se smanjila greška zbog okolnih zračenja, preporučuje se određivanje reflektiranog zračenja od kuta iz kojeg se promatra objekt. Zbog promjene emisivnosti o kutu, preporučuje se promatranje objekta približno kutu od 0 stupnjeva.

Programska podrška neizostavan je alat za ispravnu obradu termograma, ali ograničenja na samo dva decimalna mjesta za faktor emisije, odnosno jedno decimalno mjesto za reflektiranu temperaturu mogu činiti značajnu razliku prilikom određivanja temperatura materijala koji su loši emiteri.

6. LITERATURA

[1] Michael Vollmer, Klaus-Peter Möllmann, *Infrared Thermal Imaging, Fundamentals, Research and Applications*, Second Edition, 2018.

[2] Jose Ignacio Priego Quesada, *Application of Infrared Thermography in Sports Science, Biological and Medical Physics*, Biomedical Engineering, 2017.

[3] Slika elektromagnetskog spektra,

URL: <https://selfstudy365.com/qa/draw-a-diagram-of-electromagnetic-radiation-spectrum-sh-n19548> [pristupljeno 25.5.2021]

[4] Krivulja zračenja crnog tijela,

URL: <https://cnx.org/contents/uNNozUZi@1.329:OjoA1o37@2/Blackbody-Radiation> [pristupljeno 25.5.2021]

[5] Tablica emisivnosti,

URL: <https://ennologic.com/wp-content/uploads/2018/07/Ultimate-Emissivity-Table.pdf> [pristupljeno 25.5.2021]

[6] Bojan Milovanović, *Infracrvena termografija*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski Fakultet, prezentacija u sklopu radionice REA sjever, 2018.

URL: https://www.researchgate.net/publication/323119920_Infracrvena_termografija [pristupljeno 25.5.2021]

Sažetak

U ovom radu napravljeno je ispitivanje pomoću IC termografske kamere i računalne programske podrške za IC termografiju. U ispitivanju je promatrani objekt metalna kutija čije su dvije površine različito tretirane, odnosno jedna je površina obojena, dok druga površina je neobojena. Promatranjem tih dvaju površina uočene su velike razlike u dobivenim prividnim temperaturama, zbog različitih faktora emisije dvaju površina. Pomoću aluminijske folije izvršeno je određivanje reflektirane temperature potrebne za određivanje faktora emisije. Određivanje faktora emisije napravljeno je komparativnom metodom dvaju površina uz unos svih potrebnih podataka u programsku podršku. Nakon određivanja faktora emisije, na uzorku od pet snimanja pri različitim temperaturama izvršeno je ispitivanje utjecaja kuta promatranja na emisivnost površina. Rezultati ispitivanja su komentirani, grafički prikazani i analizirani te su doneseni zaključci za ispravniju obradu termograma.

Ključne riječi:

Emisivnost, infracrveno zračenje, infracrvene kamere, reflektirano zračenje, termografija.

Abstract

In this paper, an examination was performed using an IR thermographic camera and computer software for IR thermography. In the examination, the observed object was a metal box whose two surfaces were treated differently. One surface was painted, while the other surface was unpainted. By observing these two surfaces, large differences in the obtained apparent temperatures were observed, due to different emission factors of the two surfaces. The reflected temperature required to determine the emission factor was determined using aluminum foil. The determination of the emission factor was made by the comparative method of two surfaces with the input of all necessary data into the software. After determining the emission factor, on a sample of five recordings at different temperatures, the influence of the observation angle on the emissivity of the surfaces was examined. The test results were commented, graphically presented and analyzed, and conclusions were drawn for more correct thermogram processing.

Key words:

Emissivity, infrared radiation, infrared cameras, reflected radiation, thermography.

Životopis

Mateo Gavran rođen je 1996. godine u Slavanskom Brodu. Nakon završene Osnovne škole “Viktor Car Emin“ u Donjim Andrijevcima, upisuje Tehničku školu u Slavanskom Brodu, smjer računalni tehničar u strojarstvu koju završava 2014.godine. Nakon završetka srednje škole, upisuje preddiplomski stručni studij elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, gdje 2017. godine stječe zvanje stručnog prvostupnika (baccalaureus) elektrotehnike. Nakon završetka preddiplomskog studija, upisuje razlikovnu godinu, koju završava 2018.godine. Nakon razlikovne godine, upisuje diplomski studij elektroenergetike, smjer industrijska elektroenergetika. U slobodno se vrijeme rekreativno bavi fitnessom.

Mateo Gavran