

Infracrvena termografija u tehnic

Lovre Krstulović - Opara, Tonko Garma

INFRACRVENA TERMOGRAFIJA U TEHNICI

UDŽBENICI SVEUČILIŠTA U SPLITU
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM SPALATENTIS



Nakladnik
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE,
STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Urednik
prof. dr. sc. Vladan Papić

Autori
prof. dr. sc. Lovre Krstulović - Opara
izv. prof. dr. sc. Tonko Garma

Recenzenti
izv. prof. dr. sc. Bojan Milovanović
prof. dr. sc. Željana Nikolić
prof. dr. sc. Željko Domazet

Objavljivanje ovog djela odobrio je Senat Sveučilišta u Splitu, rješenjem Klasa: 029-03/23-01/17, URBROJ: 2181-202-3-01-27 od 23. studenog 2023. god.

ISBN 978-953-290-133-7



Ovo je djelo licencirano pod međunarodnom licencom CC BY-NC-ND 4.0 koja dopušta preuzimanje djela i dijeljenje s drugima, pod uvjetom da se navedu autori, te da se djelo ne smije mijenjati ili koristiti u komercijalne svrhe.

Autori i nakladnik ove knjige uložili su sve napore u njenoj pripremi sa željom da prenesu točne i mjerodavne informacije vezane s temom knjige. Autori i izdavač ni u kojem slučaju ne odgovaraju za slučajne ili posljedичne štete povezane s izvedbom ili primjenom postupaka koji se u knjizi opisuju.

Prvo izdanje objavljeno u ožujku 2024.g.

INFRACRVENA TERMOGRAFIJA U TEHNICI

prof. dr. sc. Lovre Krstulović - Opara, izv. prof. dr. sc. Tonko Garma

Split, 2024.

Predgovor

Ovaj udžbenik namijenjen je studentima i nastavnicima kao didaktičko pomagalo u nastavnom procesu te širokom spektru korisnika termokamera u industrijskom sektoru. Zahvaljujući razvoju tehnologije i povećanoj cjenovnoj dostupnosti, danas su termokamere prisutne kao standardni dijelovi mjerne i dijagnostičke opreme kod različitih tvrtki. Prisutne su u školama i fakultetima kao nastavna sredstva i laboratorijsko-istraživačka oprema.

Termokamera je sofisticiran instrument te su za interpretaciju rezultata mjerenja (termograma) neophodna specifična znanja i iskustvo. Stoga, smatramo nužnim provoditi obučavanje budućih termografista, za koje će jedan od izvora informacija biti i ovaj udžbenik. Udžbenik je nastao nakon što su autori stekli dugogodišnje praktično iskustvo kroz provođenje termografskih mjerenja na strojarским i elektrotehničkim instalacijama i opremi te bili uključeni u izradu nastavnih materijala za edukaciju ovlaštenih termografista (Level 1 i Level 2). Posljedično, uočena je i potreba za sveučilišnim materijalom iz područja termografije. Kao autori ovog udžbenika želimo istaknuti da u sklopu kolegija koje izvodimo na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, kao i na različitim usavršavanjima/tečajevima za ovlaštene stručnjake iz privrede, obrađujemo tematiku opisanu u ovom udžbeniku. Nadalje, upoznati smo s čitavim nizom drugih kolegija, na Sveučilištu i izvan istog, gdje se dijelom upotrebljava i obrađuje infracrvena termografija. Vjerujemo da je do sada postojao manjak stručne literature na hrvatskom jeziku koji će ovaj udžbenik u značajnoj mjeri smanjiti.

Sam udžbenik pisan je na način da se njime mogu u jednakoj mjeri koristiti i studenti i inženjeri praktičari. Pored početnih poglavlja u kojima je dana povijest termografije, fizikalni mehanizmi prijenosa topline, principi rada termokamere te razrađena tehnika termografije, objašnjeni su i praktični primjeri termografskih mjera u strojarstvu, elektrotehnici i graditeljstvu. Iako smo elektrotehničke i strojarске struke, godinama smo uključeni u energetske certificiranje zgrada, ne samo kroz provođenje edukacija za energetske certifikatore, nego i u praksi. Stoga je, osim područja strojarstva i elektrotehnike, odnosno energetike, u udžbeniku obuhvaćeno i područje graditeljstva. Iz potonjeg posebno izdvajamo trenutno aktualnu problematiku ispitivanja zrakopropusnosti zgrada. Nadalje, osim pasivnog prikupljanja podataka u infracrvenom spektru, obradit će se i aktivna termografija kao metoda kontrole bez razaranja. Udžbenik donosi i pregled relevantnih normi iz područja koje obrađuje.

Koristimo ovu prigodu zahvaliti se recenzentima udžbenika, prof. dr. sc. Željku Domazetu, prof. dr. sc. Željani Nikolić te izv. prof. dr. sc. Bojanu Milovanoviću koji su stručnim komentarima i sugestijama doprinijeli kvaliteti teksta.

Vjerujemo da će udžbenik biti od koristi studentima, nastavnicima kao i sadašnjim i budućim termografistima. Unaprijed zahvaljujemo svim korisnicima koji će nam ukazati na eventualne pogreške.

Autori

“Naravno”, reče lisica. “Ti si za mene samo mali dječak sličan stotinama tisuća drugih dječaka. I ti mi nisi potreban. A, ni ja tebi nisam potrebna. Ja sam za tebe samo lisica slična stotinama tisuća lisica. Ali, ako me pripitomiš, bit ćemo potrebni jedno drugom... Vidiš li, tamo dolje, polje puno žita? Ja ne jedem kruh. Za mene žito ne predstavlja ništa. Žitna polja ne podsjećaju me ni na što. A, to je žalosno! Ali, ti imaš kosu boje zlata. Bit će divno kada me pripitomiš! Žito, koje je pozlačeno, podsjećat će me na tebe. I ja ću voljeti šum vjetra u žitu...”

Tako mali princ pripitomi lisicu. A, kada se dan rastanka približi, lisica reče: “Ah, plakat ću.”
“Sama si kriva”, reče mali princ, “nisam ti želio nikakva zla, ali ti si željela da te pripitomim...”
“Naravno”, reče lisica.
“Ali ti ćeš plakati!” reče mali princ.
“Naravno”, reče lisica.
“Znači, time ništa ne dobivaš!”
“Dobivam”, reče lisica, “zbog boje žita.”

Antoine Marie Roger de Saint-Exupéry, Mali princ

Sadržaj

Predgovor	1
1. Uvod u IC termografiju	9
1.1. Povijest IC termografije	9
1.2. Spektar zračenja crnog tijela	10
1.3. Leće i detektori.....	13
2. Osnovni fizikalni pojmovi	19
2.1. Prvi i drugi zakon termodinamike.....	19
2.2. Mehanizmi prijenosa topline.....	21
2.2.1. Kondukcija (provođenje)	21
2.2.2. Konvekcija (miješanje).....	22
2.2.3. Radijacija (zračenje).....	24
3. Osnovni termografski parametri	27
3.1. Emisivnost	27
3.1.1. Crno tijelo i emisivnost.....	28
3.1.2. Prividno zračenje	32
3.2. Reflektirana prividna temperatura.....	34
3.3. Parametri koje je moguće mijenjati nakon snimanja	37
3.3.1. Paleta	39
3.3.2. Raspon i razina	42
3.3.3. Izoterma	42
3.4. Parametri koje nije moguće promijeniti nakon snimanja.....	43
3.4.1. Fokus	43
3.4.2. Kadar termograma	44
3.4.3. Udaljenost	46
3.4.4. Temperaturno područje	47
4. Karakteristike optike i detektora	49
4.1. Kut leće	49
4.2. Prostorna rezolucija	49

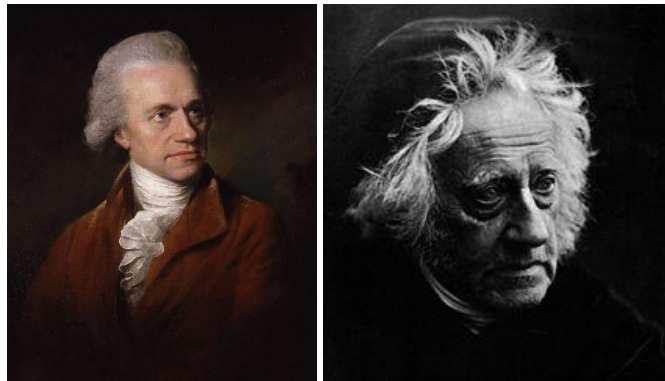
4.3. Senzitivnost	52
4.4. Pouzdanost	53
5. Utjecaj vjetra na termograme	55
6. Aktivna termografija	57
6.1. Tehnike obrade podataka kod aktivne termografije	59
7. Primjena infracrvene termografije u strojarstvu	63
7.1. Analiza konstrukcija u okviru kontrole bez razaranja (NDT)	63
7.2. Trenje	65
7.3. Razina tekućine	67
7.4. Termoelastičnost	67
7.5. Ultrazvuk kao metoda potvrde nalaza	69
7.6. Dinamičko tečenje materijala	71
7.7. Energetska postrojenja	72
8. Elektrotehnika	75
8.1. Općenito o termografskim pregledima električnih postrojenja i opreme	75
8.1.1. Informacije o ispitivanoj opremi	76
8.1.2. Pregled	76
8.1.3. Klasifikacija kvara i izvještaj	77
8.1.4. Prioriteti	78
8.1.5. Popravci	78
8.2. Tehnika termografskog snimanja električnih instalacija	78
8.2.1. Podešavanje opreme	78
8.2.2. Mjerenje temperature	79
8.2.3. Usporedna mjerenja (mjerenje razlike temperature)	81
8.2.4. Normalna radna temperatura	85
8.2.5. Klasifikacija kvarova	86
8.2.6. Kriterij za utvrđivanje mogućnosti nastajanja kvara u postrojenjima	87
8.2.7. Izrada izvještaja	89
8.2.8. Lažna zagrijavanja	91
8.3. Primjeri termografskog mjerenja	96
8.3.1. Visokonaponsko postrojenje	96
8.3.2. Srednjenaponsko postrojenje	97
8.3.3. Niskonaponsko postrojenje	97

9. Građevinarstvo.....	111
9.1. Protok topline kroz ovojnicu	111
9.2. Vlaga.....	112
9.3. Kondenzacija	121
9.4. Sastav zidova	123
9.5. Termografija pri ispitivanju zrakopropusnosti.....	130
9.5.1. Kratka povijest <i>blower door</i> testa.....	130
9.5.2. Postavljanje opreme za <i>blower door</i> test	131
9.5.3. Postupak ispitivanja.....	131
9.5.4. Primjeri mjerenja	133
10. Popratni instrumenti	138
11. Relevantne norme.....	143
11.1. Opća načela.....	143
11.1.1. Priprema za ispitivanje	143
11.1.2. Procedura ispitivanja	145
11.1.3. Kvalifikacija osoblja	146
11.1.4. Ocjenjivanje.....	146
11.1.5. Izvještaj o ispitivanju	147
11.1.6. Čuvanje zabilježki	147
11.2. Oprema	147
11.3. Nazivi i definicije.....	151

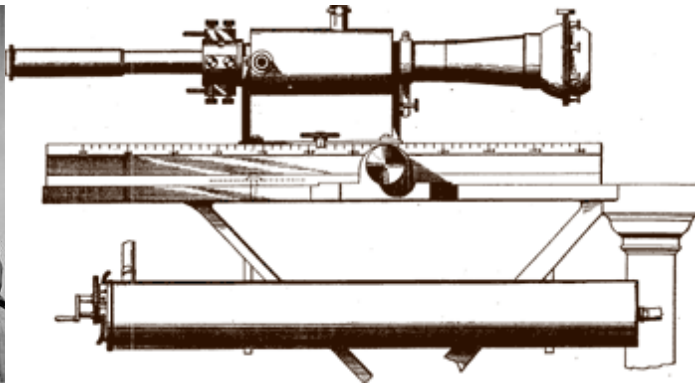
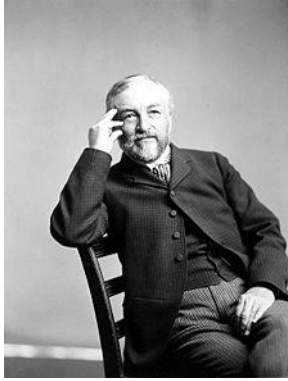
1. Uvod u IC termografiju

1.1. Povijest IC termografije

Kratki pregled povijesti IC termografije počinje s astronomom i kompozitorom Sir Williamom Herchelom (1738. – 1822.) [1.1, 1.2]. Osim što je otkrio planet Uran, proučavao je spektar loma svjetlosti te mjerenjem temperature spektra svjetlosti razlomljenog kroz prizmu došao do zaključka da ispod (lat. *infra*) crvene boje (posljednje u vidljivom spektru) postoji još nekakvo nevidljivo svjetlo koje djeluje na očitavanje termometra. Njegov sin, Sir John Frederick William Herchel (1792. – 1871.) [1.2], astronom, kemičar, matematičar i eksperimentalni fotograf, koristeći se monokristalom natrijevog klorida kao lećom uspio je napraviti prvi termografski zapis. Za to je koristio ploču namazanu uljem, koje je više hlapilo u zonama gdje je bilo više topline. Sljedećeg kojeg treba spomenuti je Samuel Pierpont Langley (1834. – 1906.) [1.4], astronom i fizičar koji je izumio Langleyev bolometar [1.5], uređaj kojeg sačinjava Wheatstoneov most, baterija i galvanometar te dvije tanke metalne trake kao osjetnici. Razvojem tehnologije, a najviše razvojem vojne tehnologije, razvijali su se uređaji koji su mogli zapisati temperaturnu sliku. Iz početka su to bili uređaji temeljeni na jednom osjetniku te setu zrcala kojima se zapisivao pojedini segment slike. Razvojem Focal Point Array FPA detektora ostvaren je velik skok u brzini i mogućnosti primjene termografije. I danas vojna tehnologija na raspolaganju već ima kamere visoke rezolucije (HD kamere), dok komercijalne kamere za civilnu upotrebu uglavnom se kreću od 320 x 240 do 640 x 480 piksela.



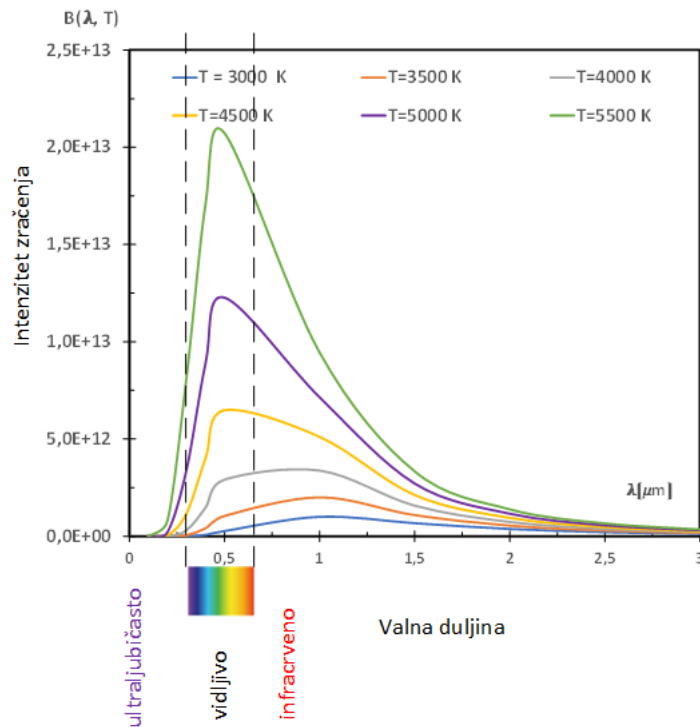
Slika 1 Sir William Herschel (otac) [1.5] i Sir Friedrich Willam Herschel (sin) [1.3]



Slika 2 Samuel Pierpoint Langley [1.4] i Langleyev bolometar [1.5]

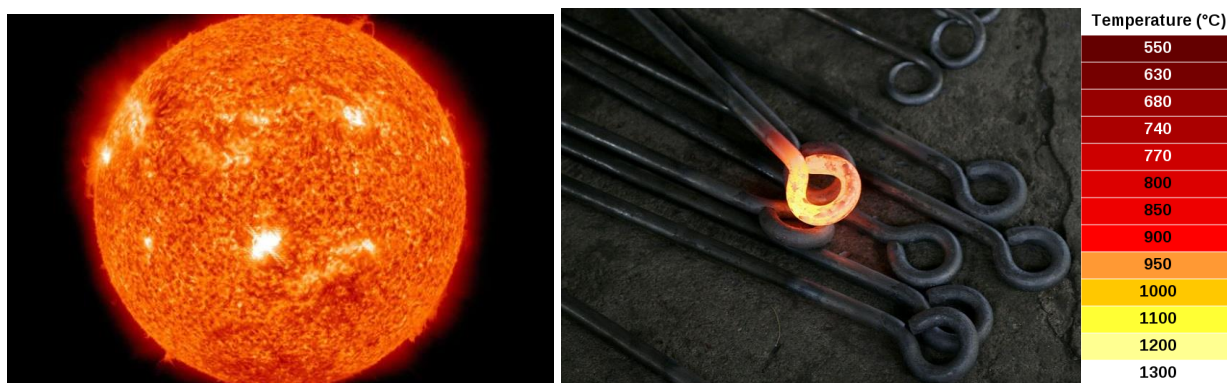
1.2. Spektar zračenja crnog tijela

U cilju opisivanja valnih duljina za koje se izrađuju termokamere potrebno je definirati Planckovu raspodjelu zračenja crnog tijela [1.7]. Samo crno tijelo bit će definirano kasnije u tekstu u kontekstu opisivanja emisivnosti tijela. Zasad, crno tijelo je tijelo koje odašilje samo zračenje uslijed vlastite topline, bez utjecaja okolnih tijela. Dijagram Planckove raspodjele zračenja pokazuje u kojim spektrima valnih duljina tijelo zagrijano na određenoj temperaturi odašilje najviše energije.



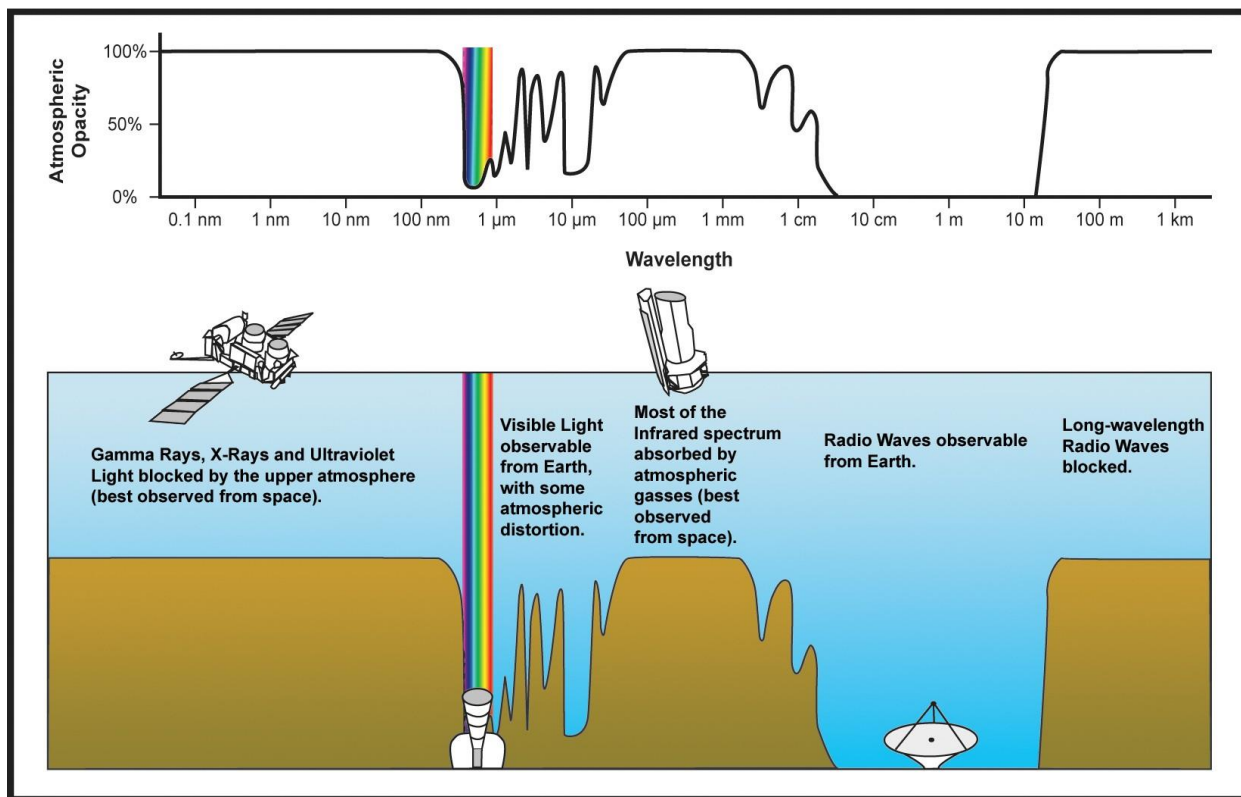
Slika 3 Planckov dijagram – intenzitet zračenja crnog tijela

U dijagramu (Slika 3), najveći prikazani iznos (zeleno linija) odnosi se na tijelo (tvar) zagrijano na 5500 K, što približno odgovara temperaturi Sunca 5780 K [1.8]. Raspodjela intenziteta ovog zračenja pokazuje da se najviše energije emitira upravo u području vidljivog spektra. Evolucijom su ljudi i većina ostalih bića razvili svoj vid upravo u spektru zračenja koji im je najviše na raspolaganju, a to je sunčevo zračenje i vidljivi spektar kao područje oko maksimuma zračenja Sunca. Što je temperatura niža, to se maksimumi krivulja pomiču u područje većih valnih duljina (desno), poput infracrvenog spektra. Promatra li se vruće glačalo, ne vidi se niti zna je li glačalo vruće ili ne. Zagrijavanjem tvari (npr. čelik, Slika 4), kod temperature od 525 °C tvar počinje (u vidljivom spektru) „svijetliti“ tamno crvenom bojom. Kako temperatura raste, boja se mijenja prema bijeloj, gdje treba imati na umu da je bijela boja mješavina svih boja vidljivog spektra. Kada je glačalo iz ove ilustracije zagrijano na 250 °C, ono također „svijetli“, no to se dešava u infracrvenom spektru, koji ljudskim očima nije vidljiv. Termokamera upravo omogućavaju vizualizaciju tog oku nevidljivog područja zračenja. Termokamera je uređaj koji elektroničkim putem, u realnom vremenu, stvara termičku sliku oku nevidljivu i prebacuje je u vidljivi spektar.



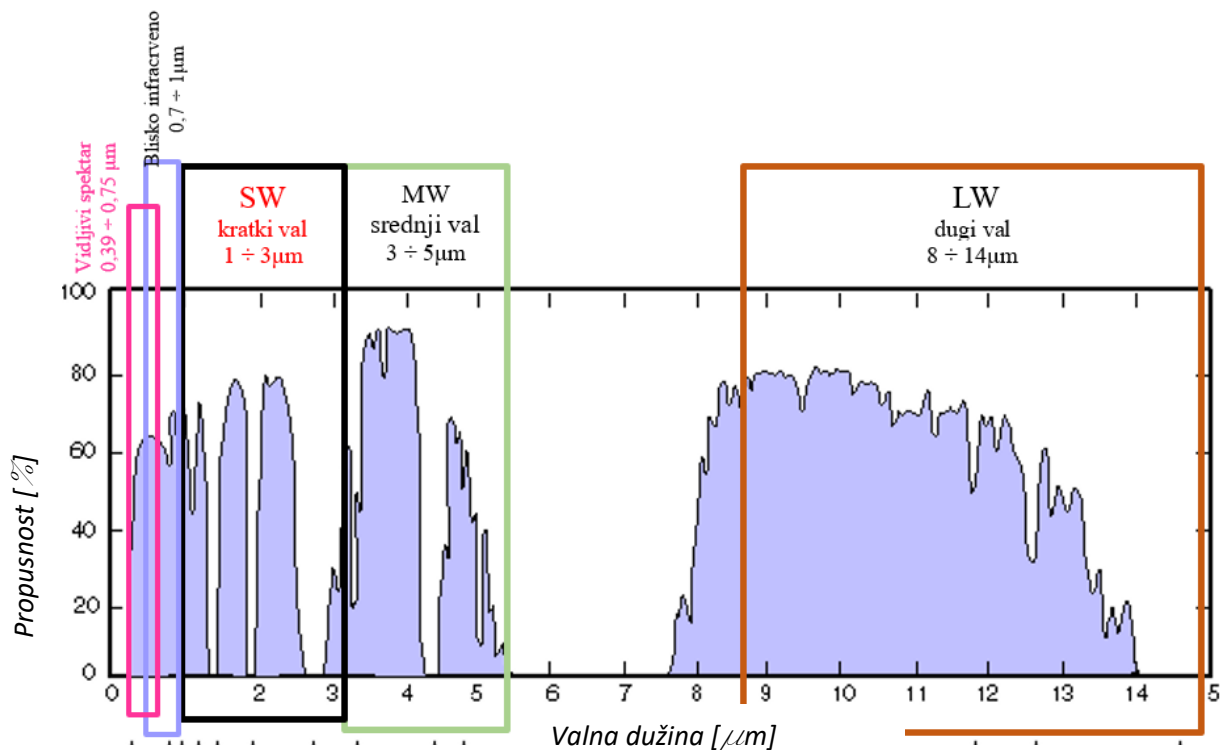
Slika 4 Sunce (5780 K) [1.9], isijavanje čelika [1.10], boje isijavanja tvari pri raznim temperaturama

Spektar valnih duljina kreće se od gama zraka (najkraća valna duljina), preko X zraka, ultraljubičastih (UV) zraka, vidljivog spektra, infracrvenog (IC) spektra, mikrovalova, radiovalova i dugovalnih radiovalova. Kako je atmosfera oko nas za neke valne duljine propusna, a neke ne (Slika 5), sa Zemlje je isključivo „vidljivo“ područje izvan atmosfere u vidljivom spektru (teleskopom se može promatrati svemir), nekim dijelovima infracrvenog područja i području radiovalova (radioteleskopi). U ostalim područjima atmosfera je neprozirna, što i omogućava život na Zemlji gdje nas štiti od nama kobnih gama i X zraka.



Slika 5 Nepropusnost atmosfere za razne valne duljine [1.11]

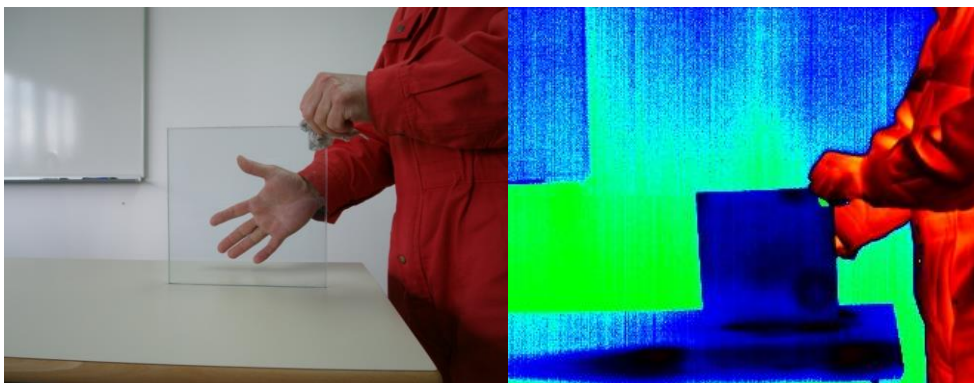
Obrne li se dijagram nepropusnosti (Slika 5), dobiva se dijagram propusnosti (Slika 6), gdje se razlikuju područja u kojima se termokamere mogu graditi kako bi se njima moglo „gledati“ kroz atmosferu. U starijoj literaturi srednji val MW nazivao se kratkim valom, no razvojem IC detektora koji su mogli registrirati u nižim valnim duljinama kratki val nazvao se srednjim valom, a ovo područje kraćih valnih duljina nazvalo se kratkim valom. Dugi val, je kao i prije, ostao dugi val. Postoji jedno usko područje između vidljivog spektra i kratkog vala koje se naziva blisko infracrveno područje (*near infrared*). Kamere koje se danas najčešće komercijalno koriste su dugovalne kamere, a rjeđe se, uglavnom u znanstvene i eksperimentalne svrhe, koriste srednjevalne kamere.



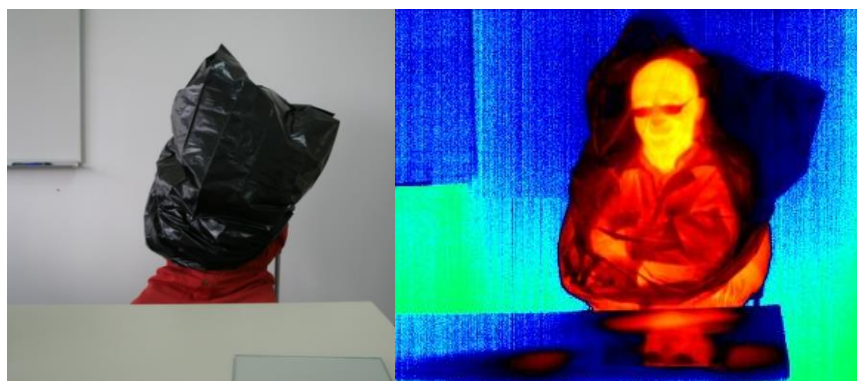
Slika 6 Propusnost atmosfere za područje vidljivog i infracrvenog spektra [1.12]

1.3. Leće i detektori

Sve što je u vidljivom spektru oka vidljivo nije nužno vidljivo i u infracrvenom spektru te obrnuto, što najbolje demonstriraju sljedeće fotografije i termogrami (Slika 7, Slika 8). Staklo je prozirno u vidljivom spektru, a neprozirno u infracrvenom, dok je crna PVC vreća neprozirna u vidljivom, a prozirna u infracrvenom spektru. Slično je i s dječjim balonima na napuhavanje. Ovo govori da se leće infracrvene kamere ne mogu raditi od silicijskog stakla, već od nekog drugog, u infracrvenom spektru propusnog materijala. Također, termokamerom ne možemo vidjeti objekte kroz prozorsko staklo.



Slika 7 Propusnost stakla u vidljivom spektru te nepropusnost stakla u IC spektru



Slika 8 Nepropusnost crne PVC vreće u vidljivom te propusnost u infracrvenom spektru

Takav materijal propustan u IR spektru je germanij (Ge), poluvodič od kojeg se rade leće. Uglavnom termokamera ima jednu leću, a kombinacija više leća (poput optičkih teleobjektiva) drastično bi smanjila količinu zračenja koja kroz leće prolaze. Leće se proizvode strojnom obradom, poliraju te na kraju metaliziraju. Slika 9 prikazuje proizvodnju leća, te oštećene nemetalizirane (mat) i metalizirane (sjajne) leće. Demontažom leće, kod termokamere se vidi nezaštićeni detektor (Slika 10).

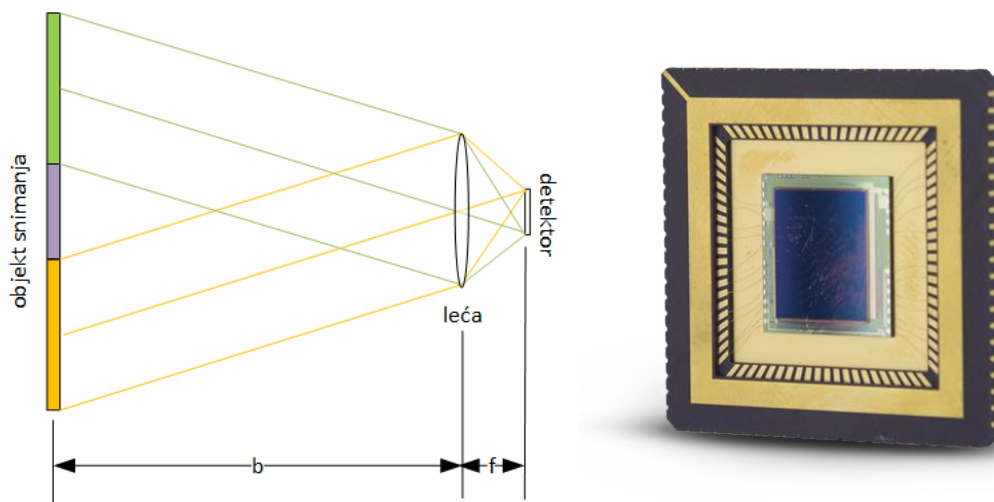


Slika 9 Tokarenje leće [1.13], nemetalizirana i metalizirane oštećene leće



Slika 10 Detektor vidljiv nakon demontaže leće

Vrste detektora ovise o valnoj duljini termokamere. Današnje termokamere imaju digitalne FPA (*Focal Point Array*) detektore [1.14], slične onima kod fotoaparata. Nekoć su kamere imale jednu diodu, poput današnjih pirometara (uređaja za jednostavno beskontaktno mjerenje temperature, uključujući i termometre za mjerenje temperature tijela preko temperature u uhu). Kako bi se dobila čitava slika raspodjela temperatura, set rotirajućih prizmi prenosio je dio po dio slike, formirajući sliku. Jedna takva povijesna kamera je AGA od Ageme (proizvedene u Švedskoj), na FSB-u u Zagrebu. Ta kamera je srednjevalna, a detektor je hlađen tekućim dušikom. Takva tehnologija danas je prošlost i kamere se baziraju na FPA (*Focal Point Array*) detektoru koji se nalazi iza leće. Leća fokusira sliku na detektor. Svaki pojedini element (piksel) tvori dio toplinske slike.



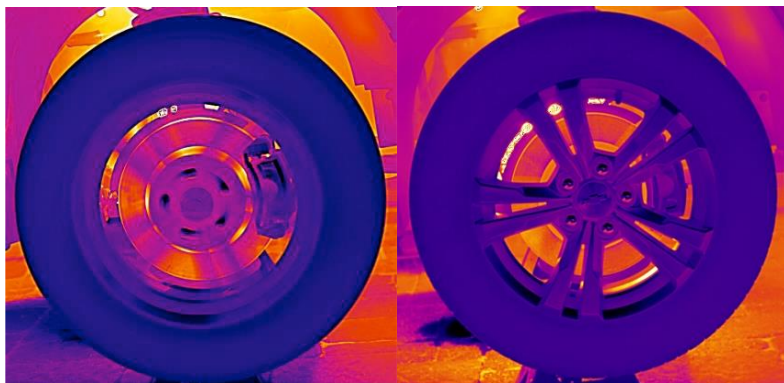
Slika 11 Projekcija toplinskog zračenja na FPA detektor i FPA detektor [1.15]

Postoje dvije grupe detektora, **toplinski detektori** i **fotonski detektori**. Toplinski detektori uglavnom su mikrobolometri koji rade na principu promjene otpora te rjeđe feroelektrični i piroelektrični koji rade na principu promjene kapaciteta. Toplinski se detektori uglavnom nalaze kod dugovalnih kamera (LW – *longwave*), a osjetljivosti su od 0,1 K (kod jeftinijih modela) do 0,05 K pa čak i 0,02 K. Frekvencija uzorkovanja (akvizicije) je oko 20 Hz i niže kod jeftinijih modela. Princip prikupljanja slike je red po red, odnosno nešto slično skeneru. Dakle, ne radi se o prikupljanju čitave slike u jednom trenutku, nego

slijedom, red po red. U cilju održavanja stabilne temperature detektora imaju ugrađeno hladilo, najčešće Peltierov hladnjak [1.1], a neki noviji modeli (Flir P serija) imaju elektro stabilizaciju. Fotonski detektori uglavnom se koriste kod srednjevalnih kamera (MW – *midwave*) [1.16]. Osjetljivosti su od 0,02 do 0,015 K. Rade na principu da toplinsko zračenje izbija fotone koje registrira uređaj, za što je nužno da se detektor ohladi na kriogenske temperature. Kod prvih se modela to postizalo putem spremnika s tekućim dušikom (radna temperatura detektora -100 °C). Suvremeni detektori imaju ugrađena hladila poput Stirlingovih motora (radna temperatura detektora -200 °C), a postoje i izvedbe s Joule-Thomsonovim hladilima. Brzina reakcije na promjene temperature im je izrazito velika, za razliku od mikrobolometara kojima treba vrijeme da bi toplinska energija uzrokovala promjenu otpora. Uz to, sliku prikupljaju poput fotoaparata, u jednom trenutku, a što je fotoaparatu vrijeme ekspozicije, to je MW termokameri vrijeme integracije. Što je objekt topliji, to je potrebno vrijeme integracije kraće pa se frekvencija prikupljanja može povećati. Brzina uzorkovanja (akvizicije) srednjevalnih kamera je od 100 Hz pa čak do 35000 kHz, pri čemu se registrira samo uski dio termograma širine nekoliko piksela. Brzina akvizicije detektora im je izrazito visoka, a ograničenje je brzina prebacivanja podataka. Sljedeća slika (Slika 12) najbolje ilustrira razliku između kvalitetne dugovalne i srednjevalne kamere. Na primjeru rotirajućeg kotača vidi se oštrina snimka, odnosno kratko vrijeme ekspozicije koje karakterizira srednjevalnu kameru. Materijal izrade detektora srednjevalnih kamera je često indijev antimonid (InSb) [1.16].





I najvažnije, detektori su osjetljivi! Izlaganjem detektora, odnosno snimanjem izrazito toplih objekata poput cigarete, zavarivanja, Sunca, refleksije Sunca o reflektirajuće površine, može se oštetiti detektor na isti način kako se može uništiti digitalni fotoaparat ako se fotografira Sunce. Ovo treba imati na umu te izbjegavati snimanja pri Suncu, zavarivanju, žaru cigarete i sl. Detektori mogu biti (u ovisnosti od hardverske izvedbe) izloženi zračenju i kad je termokamera isključena, ako objektiv nije prekriven. Hlađeni detektori nešto su otporniji, no detektori dugovalnih kamera izrazito su osjetljivi te ovo uvijek treba imati na umu!

Cijena srednjevalnih kamera u usporedbi s dugovalnim je uglavnom znatno veća. U tablici ispod (Tablica 1) je dano nekoliko primjera termokamera iz vremena početka pisanja ovog udžbenika, no tehnologija stalno ide naprijed te rezolucija (broj piksela), osjetljivost i brzina akvizicije se stalno povećavaju. Kod termokamere treba imati na umu da se ne radi o samo malo drugačijem fotoaparatu, već o mjernom instrumentu te uz visoku rezoluciju i osjetljivost potrebno je imati i kvalitetne leće kako bi termokamera, kao mjerni instrument, dala što realniji prikaz raspodjele temperatura. Kod korištenja kamere kao instrumenta za mjerenje temperature (kvalitativna termografija) naročito je bitno kompenzirati sve utjecaje okoline na mjerenje, a o čemu će biti više detalja u daljnjem tekstu. Ima raznih infracrvenih kamera za nadzor, vatrogasnu primjenu, traženje i spašavanje kod kojih kvaliteta optike nije primarna, no o ovim kamerama se ovdje ne govori pošto je primjena takvih kamera manje zahtjevna. Težište ove edukacije je ostvariti kvalitetno mjerenje i kvalitetnu evaluaciju snimljenog. Često se spominju termokamere koje se montiraju ili su u sklopu mobitela. To nisu mjerni instrumenti o kojima se ovdje govori.



Slika 12 Dugovalna 7.5 – 13 μm (lijevo) i srednjevalna InSb 2.5 – 5 μm (desno) kamera [1.17]

Tablica 1 Primjeri dugovalnih i srednjevalnih kamera, izvor www.flir.eu

Dugovalne (LW – long wave)		Srednjevalne (MW – middle wave)	
			
FLIR E60 mikrobolometarska 320 x 240 – 60 Hz osjetljivost 0,05 K	FLIR A655sc mikrobolometarska 640 x 480 – 50 Hz 640 x 120 – 200 Hz osjetljivost 0,03 K	FLIR SC 5000 InSb - hlađena 320 x 256 – 380Hz 64 x 120 – 700 Hz osjetljivost 0,02 K	FLIR SC6100 InSb - hlađena 640 x 512 – 565 Hz 64 x 4 – 35.112 kHz osjetljivost 0,02 K

Literatura

[1.1] M. Andrassy, I. Boras, S. Švaić; Osnove termografije s primjenom; Kigen, Zagreb, 2008.

[1.2] <https://www.britannica.com/biography/William-Herschel>

[1.3] <https://www.britannica.com/biography/John-Herschel>

[1.4] https://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_Langley

[1.5] S. P. Langley, The bolometer and radiant energy, reprinted from American Academy of Arts and Sciences, Vol. XLV, University Press: Jhon Wilson and Son, 1881.

[1.6] Sir William Herschell, L.Abbott, 1785. National Portrait Gallery, London.

[1.7] Hugh D. Young, Roger A. Freedman, A. Lewis Ford, University Physics (14th ed.), pp. 1256–1257, Perason, 2016.

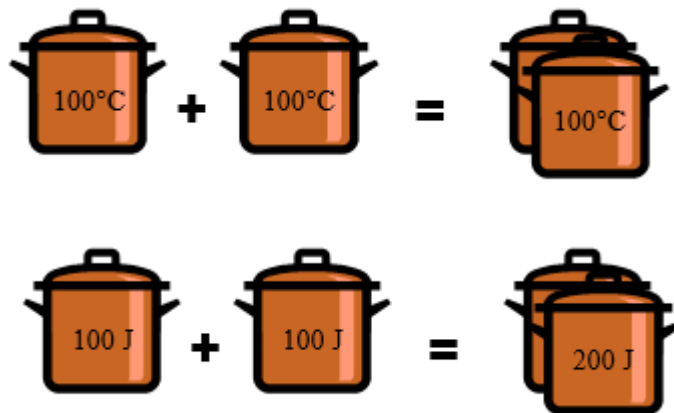
- [1.8] What are the physical characteristics of the Sun? NCAR High altitude observatory, <https://www2.hao.ucar.edu/education/about-the-sun/what-are-physical-characteristics-sun>
- [1.9] Sun, National Geographic, <https://education.nationalgeographic.org/resource/sun/>
- [1.10] Charles S. Barrett, Structure of metals, Horney Press, 2007.
- [1.11] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_electromagnetic_opacity.svg
- [1.12] https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window
- [1.13] S. C. Yang, et. al., The Characteristics on Ultra Precision Machining for Infrared Optical Materials, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 29, 3, 2012. DOI: 10.7736/KSPE.2012.29.3.253
- [1.14] Kirk J. Havens, Edward J. Sharp, Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild - A Methodology Academic Press, Elsevier Inc. 2016.
- [1.15] FLIR MWIR (InSb) Focal Point Array detector, <https://www.flir.com/products/mwir-insb-fpa/?vertical=components&segment=oem>
- [1.16] UNDERSTANDING CRYOCOOLED INFRARED SYSTEM RELIABILITY, Infrared camera OEM,Teledyne FLIR, 2021. <https://www.flir.com/discover/cores-components/understanding-cryocooled-system-reliability/>
- [1.17] Jared Whitlock, The 11 Best Thermal Imaging Cameras in 2022 [Flir vs Fluke vs 3 Others], ThermoGears, 2022. <https://thermogears.com/guide-choose-best-thermal-imaging-cameras/>

2. Osnovni fizikalni pojmovi

Vezano uz termografiju potrebno je razlikovati osnovna dva fizikalna pojma koji se stalno spominju, a to su toplina i temperatura [1.1].

Toplina je energija koju neko tijelo (tvar) određene mase ima pri određenoj temperaturi tog tijela. Jedinica je džul ili vat sekunda [$J = Ws$]. Zagrije li se tijelo na višu temperaturu, imat će više energije. Zagrije li se tijelo veće mase na istu temperaturu kao i tijelo manje mase, ovo veće mase sadržavat će više energije. Toplina opisuje koliko toplinske energije postoji pri zadanoj temperaturi i masi. Tijelo se sastoji od čestica koje titraju. Što se više energije dovede, čestice titraju brže. Količina topline u tijelu je ukupna kinetička energija čestica koje tvore tijelo.

Temperatura je mjera prosječne brzine molekula i atoma koji tvore tvari. Jedinica je [$^{\circ}C$] ili [K], gdje je odnos dobro poznati $0^{\circ}C = 273,15 K$ ili $0 K = -273,15^{\circ}C$. Način kako je Kelvin odredio apsolutnu nulu ($0 K$) je pretpostavka kod koje se temperature čestice više ne bi gibale, što je fizikalno nemoguće. Najniža registrirana temperatura je $1 K$, koja je registrirana u Bumerang nebuli, Centaurus konstelacije [2.1]. Dakle temperatura je mjera stanja, ona nije energija! Slika 13 najbolje ilustrira razliku između topline i temperature. Združe li se dva lonca zagrijana na $100^{\circ}C$, temperatura će im i dalje biti $100^{\circ}C$. Združe li se dva lonca u kojima ima $100 J$ topline, ukupna toplina bit će im $200 J$.



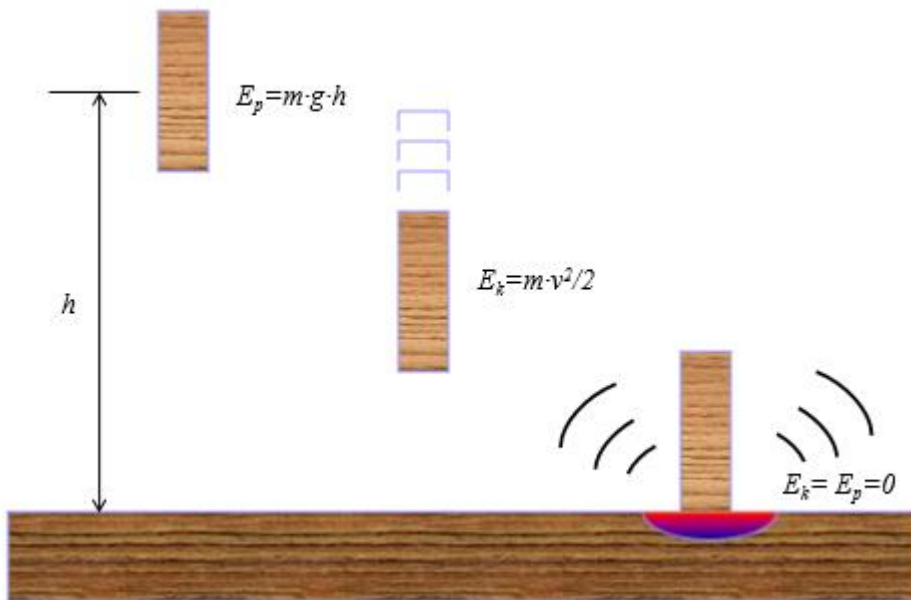
Slika 13 Razlika između temperature i topline

2.1. Prvi i drugi zakon termodinamike

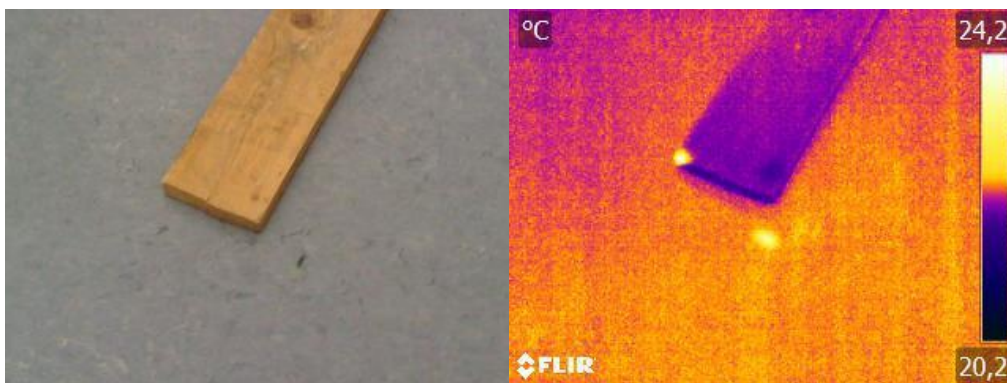
Prvi zakon termodinamike kaže da je zbroj ukupnih sadržaja energije u zatvorenom sustavu konstantan te se piše kao

$$\Delta U = Q - W, \quad (2.1.)$$

gdje je ΔU promjena početne energije, Q toplina dovedena sustavu, a W dobiveni rad. Ovo demonstrira sljedeći primjer koji se lako može vizualizirati ako se termokamerom snima ispuštanje neke mase na pod (npr. drveni blok ili daska na pod). Podigne li se masa na određenu visinu od poda, ona će imati potencijalnu energiju u iznosu od $E_p = mgh$ (masa, gravitacijska akceleracija, visina). Pri slobodnom padu potencijalna energija pretvorit će se u kinetičku energiju iznosa $E_k = mv^2/2$ (masa i kvadrat brzine podijeljen s dva). Kad se masa zaustavi na podu, i potencijalna i kinetička energija bit će joj nula, $E_p = E_k = 0$. Pitanje je gdje je nestala energija. Odgovor je u buci koja se čula pri udaru i u toplini koja se lako može registrirati termokamerom.



Slika 14 Gdje je nestala energija?



Slika 15 Toplina na drvenoj dasci i podu nakon udara daske o pod.

Drugi zakon termodinamike kaže da će toplina spontano prelaziti s mjesta veće temperature (energije) na mjesto niže temperature, sve do izjednačavanja temperatura. Toplina će spontano teći s toplijeg na hladnije tijelo, pri čemu se ona prenosi s jednog mjesta na drugo. Temperatura određuje smjer gibanja topline. Slika 16 ilustrira drugi zakon termodinamike. Toplina će s toplijeg lonca prelaziti prema hladnijem

pri čemu će prijenos topline prestati kad se temperature u oba lonca izjednače. Ako su oba lonca izolirana od okoline, ukupna količina toplinske energije bit će ista. Čak ako je topliji lonac znatno manji od hladnijeg, te pritom topliji ima manje džula od hladnijeg, toplina će i dalje prelaziti s toplijeg k hladnijem pri čemu će topliji lonac gubiti džule, a hladniji ih dobivati. Ukupna suma će, ako su lonci izolirani od okoline, biti konstantna.



Slika 16 Smjer prijelaza topline

2.2. Mehanizmi prijenosa topline

U ovom će poglavlju biti opisani osnovni mehanizmi prijenosa topline do kojeg dolazi radi drugog zakona termodinamike. Zakoni opisuju način prijenosa topline u krutinama, fluidima (tekućinama i plinovima) te vakuumu.

2.2.1. Kondukcija (provođenje)

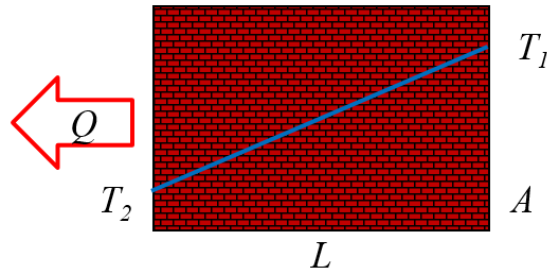
Provođenje ili kondukcija je mehanizam prijenosa topline kroz kruta tijela. Zakon koji opisuje prijenos toplinske energije je Fourierov zakon vođenja topline:

$$Q = A \cdot k \frac{T_1 - T_2}{L} t \quad [J], \quad (2.2.)$$

gdje su T_1 i T_2 temperature, k [W/mK] je toplinska provodljivost, L [m] je dužina, a t [s] vrijeme. Primjer zgrada zimi (Slika 18), temperatura u prostoru zgrade T_1 i izvan zgrade T_2 . Debljina zida je L , a koeficijent provođenja k . Kroz površnu zida A u vremenu t izgubit će se toplina u iznosu od Q [J=Ws]. Koeficijent provođenja topline obično se, npr. u građevinarstvu, označava kao λ , dok se u termografiji koristi k , pošto se s λ označava valna duljina. Neke tipične vrijednosti toplinske provodljivosti navedene su u sljedećoj tablici (Tablica 2). Slika 17 prikazuje toplinsku raspodjelu aluminijskog profila na koji je naslonjeno glačalo. Kada bi se proces zagrijavanja promatrao kao termografski film, tada bi se vidjelo premještanje boja (izotermi) koje prikazuju određenu temperaturu.



Slika 17 Kondukcija (provođenje)



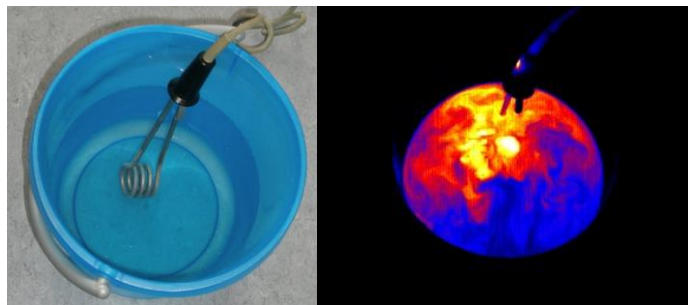
Slika 18 Fourierov zakon vođenja

Tablica 2 Toplinska provodljivost [1.1]

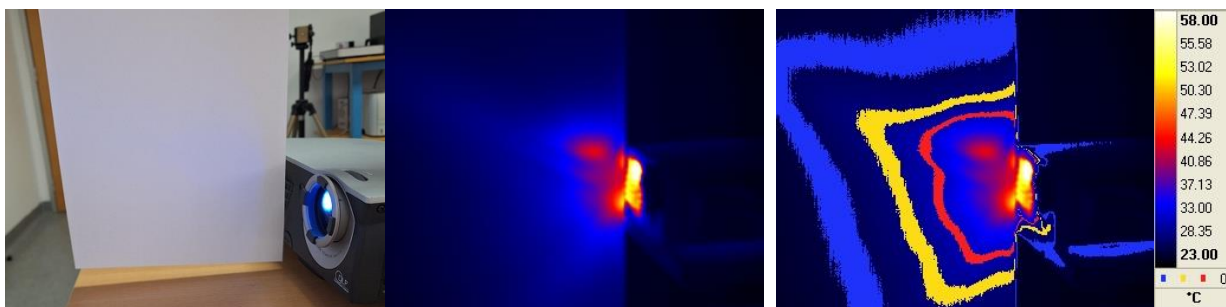
Toplinska provodljivost $k=\lambda$ [W/mK]	
bakar	385
čelik	50,2
beton	2
mineralna vuna	0,046
staklo	0,8
voda	0,6
mirni zrak	0,025

2.2.2. Konvekcija (miješanje)

Miješanje (komešanje) ili konvekcija je mehanizam prijenosa topline u fluidima (tekućine i plinovi). Razlikuje se **prirodna konvekcija** i **prisilna** kod koje postoji prisilno strujanje. Prirodna funkcionira na principu uzgona, gdje dovođenjem energije (topline) čestice fluida titraju, odguruju susjedne čestice od sebe, povećavaju svoj volumen i samim time postaju specifično lakše te kao takve „isplivaju“ iz gušćeg okoliša. Na slici (Slika 19) prikazana je prirodna konvekcija vode. Grijač za vodu nalazi se u kanti, infracrveni snimak prikazuje samo temperaturu površine vode, s obzirom na to da je voda u infracrvenom spektru neprozirna te se ne vidi u dubinu. Toplije čestice vode isplivaju na površinu, gdje se u dodiru sa zrakom hlade te tako rashlađene i specifično teže tonu u dubinu. Isti ovaj mehanizam pokreće strujanje zraka i mora na planetu. Slika (Slika 20) prikazuje prisilnu konvekciju. Ventilator prisilno nastružava zrak preko hladila projektora. Zrak je proziran u infracrvenom spektru kamere te prisilnu konvekciju zraka nije moguće direktno snimiti, no namještanjem lista papira ispred izlaza puhala projektora zagrijava se papir te toplinski trag dočarava profil strujanja vrućeg zraka.



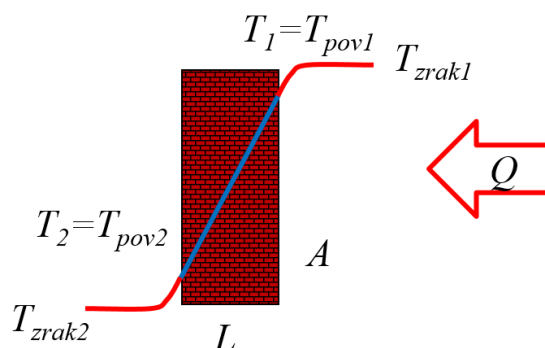
Slika 19 Prirodna konvekcija



Slika 20 Prisilna konvekcija

Prirodnu konvekciju opisuje Newtonov zakon hlađenja, gdje se primjer toplije površine i hladnijeg zraka može zapisati kao (Slika 21):

$$Q = A \cdot h(T_{pov} - T_{zrak}) \quad [J], \quad (2.3.)$$



Slika 21 Primjer zida uključuje mehanizam kondukcije i konvekcije

gdje je h [W/m²K] plošni koeficijent prijelaza toplote strujanjem. Neke tipične vrijednosti prikazane su tablicom (Tablica 3). Usporedi li se Newtonov zakon hlađenja s Fourierovim vođenja, vidi se da se radi o istom zakonu samo što su kod jednog koeficijenti konstantni (toplinska provodljivost podijeljena s dužinom), a kod drugog se plošni koeficijent prijelaza toplote mijenja s obzirom na brzinu strujanja zraka.

Tablica 3 Plošni koeficijent prijelaza topline strujanjem [1.1]

Plošni koeficijent prijelaza topline strujanjem, h [W/m ² K]	
mirni zrak	3,5 – 35
lagano puhanje	25 – 70
jako puhanje	60 – 300
mirna voda	580 – 2300
lagano miješanje vode	2300 – 4700
kipuća voda u cijevima	4700 – 7000
kipuća voda na ravnoj metalnoj površini	3500 – 5800
kondenzacija pare	10000 – 12000

2.2.3. Radijacija (zračenje)

Radijacija je način prenošenja topline kroz vakuum, odnosno kroz prozirne medije i tijela. Ono što termokamera registrira jest radijacija. Za radijaciju nije potrebno postojanje medija da bi se toplina prenosila. Slika 22 ilustrira prijenos topline zračenjem gdje je glačalo postavljeno blizu zida te se odmicanjem glačala vidi da je ostao trag iako glačalo nije bilo u kontaktu. Prijenos topline Sunca najbolji je primjer prijenosa topline radijacijom.

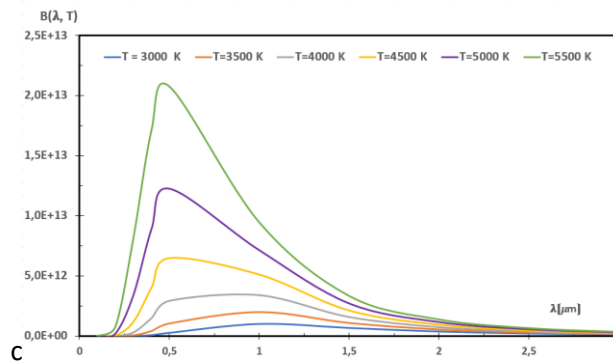


Slika 22 Prijenos topline zračenjem (radijacijom)

Radijaciju opisuje Planckov zakon [1.1], gdje su radi preglednosti crvenom bojom napisane promjenljive varijable, a ostalo su konstante. Planckov zakon opisuje odnos valne duljine λ i zračenja tijela zagrijanog na temperaturu T [K]:

$$R(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^4}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (2.4.)$$

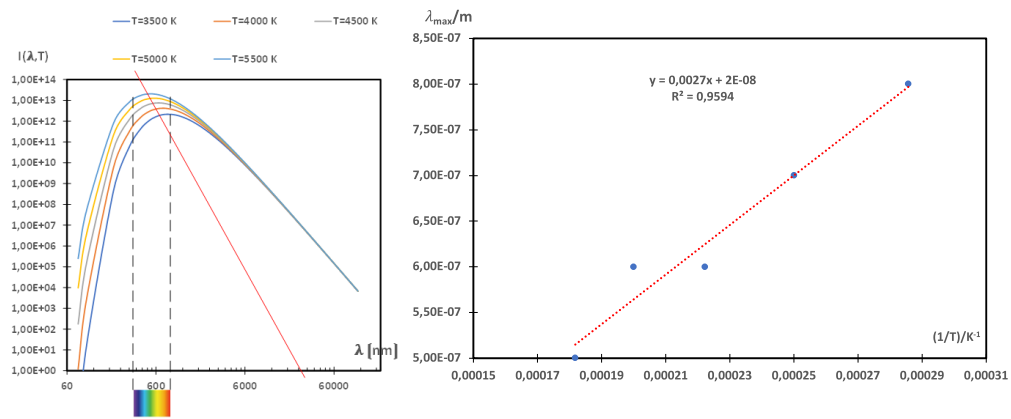
gdje su konstante c brzina svjetlosti, h Planckova konstanta i k Boltzmanova konstanta. U jednadžbi su crvenim slovima označene veličine koje nisu konstante. Ova jednadžba, kao i dijagram (Slika 23), prikazuje zračenje crnog tijela. O tome što je crno tijelo bit će više riječi uskoro, zasad to je tijelo koje idealno zračenjem emitira toplinu bez utjecaja okoline. Krivulje na dijagramu predstavljaju zračenje pojedinih tijela zagrijanih na temperaturu (5800, 5000... 3000 K) u odnosu na pojedine valne duljine.



Slika 23 Planckova raspodjela zračenja crnog tijela

Kako sve ove krivulje imaju svoj maksimum za određenu valnu duljinu, ako se isti ovaj dijagram nacrtu u logaritamskom mjerilu, dobit će se krivulje čiji maksimumi leže na pravcu čiji nagib (u logaritamskom prostoru) opisuje jednadžbu pravca, odnosno Wienov zakon (Slika 24) koji definira valnu duljinu kod koje je zračenje najveće [1.1]:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad (2.5.)$$

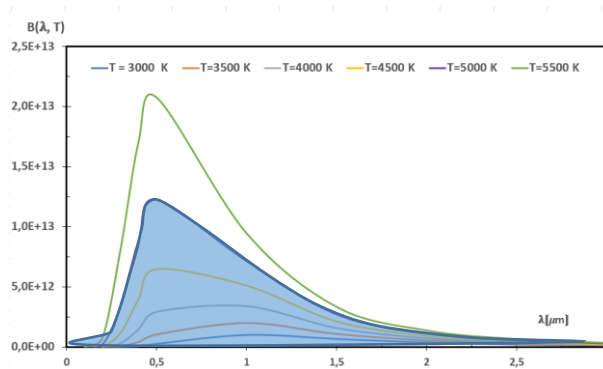


Slika 24 Wienov zakon te pravac koji povezuje maksimume intenziteta zračenja

Površina ispod pojedinih krivulja Planckove raspodjele (Slika 23) je intenzitet zračenja crnog tijela (*bb – black body*) zagrijanog na temperaturu T [K]:

$$I_{bb} = \sigma T^4 \quad [\text{W}/\text{m}^2], \quad (2.6.)$$

gdje je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W}/\text{m}^2\text{K}^4]$ Stefan Boltzmanova konstanta, a sam se zakon naziva Stefan-Boltzmanov zakon [1.1]. Na dijagramu (Slika 25) je ilustriran intenzitet zračenja (plava površina) za tijelo zagrijano na 5000 K.



Slika 25 Intenzitet zračenja crnog tijela je površina ispod krivulje u Planckovoj raspodijeli

Planckov zakon predstavlja raspodjelu zračenja, Wienov zakon definira maksimume, a Stefan-Boltzmannov zakon (integral) predstavlja ukupno zračenje pri određenoj temperaturi. Intenzitet zračenja I [W/m^2] je snaga zračenja po površini. Kad razmišljamo o dostupnosti energije Sunca za razne fotonaponske i solarne kolektore, govorimo o intenzitetu zračenja Sunca.

Literatura

[2.1] David Crookes, What is the coldest place in the universe?, Space.com, 2021.

<https://www.space.com/coldest-place-in-the-universe>

3. Osnovni termografski parametri

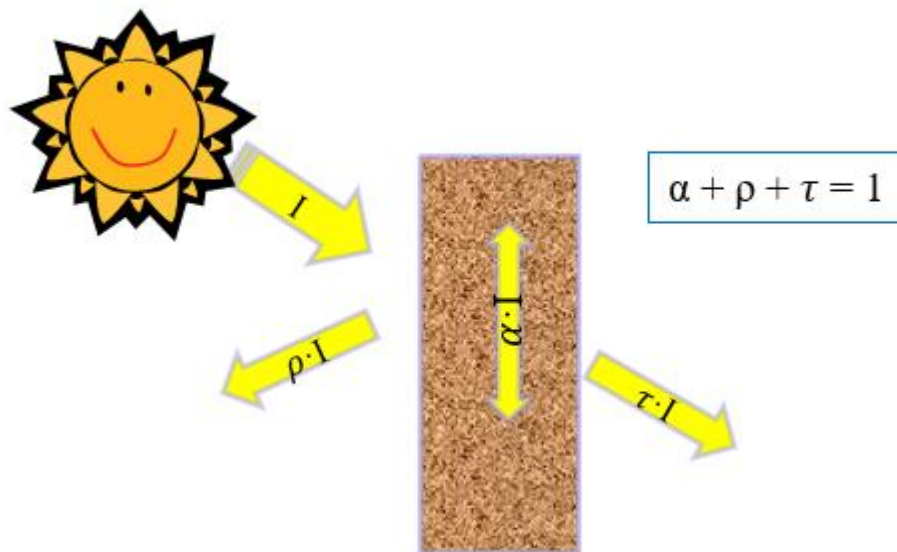
3.1. Emisivnost

Što se dalje dešava s toplinom koja zračenjem dolazi na tijelo? Intenzitet zračenja I [W/m^2] koji padne na tijelo dijelom se apsorbira, dijelom prođe kroz tijelo (transmitira), a dijelom se reflektira (Slika 26). U praksi se kod termografije najčešće javlja situacija da transmisije nema, no o njoj ipak treba voditi računa. U elektroenergetici gdje postoje mnogi izvori u okolini objekta snimanja, s obzirom na tipične materijale, transmitivnost je zanemariva.

Koeficijenti apsorpcije α , refleksije ρ i transmisije τ definiraju koliki udio intenziteta zračenja se apsorbira, reflektira i transmitira te je njihov zbroj jednak jedan.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.1.)$$

Primjer iz svakodnevice ilustriran je slikom (Slika 27), gdje dio energije Sunca zagrijava staklenu fasadu, dio prolazi kroz staklo i zagrijava unutrašnjost zgrade, a dio se reflektira i zagrijava ljude koji u hladu šetaju ulicom.



Slika 26 Apsorpcija, refleksija i transmisija zračenja intenziteta I [W/m^2]



Slika 27 Refleksija od staklene fasade dijela ulice koji je u hladu

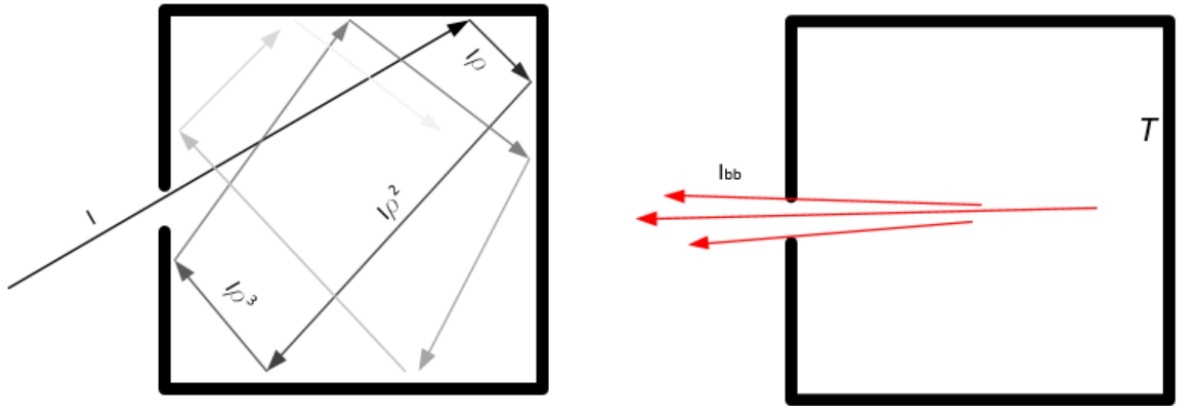
Kirchhoffov zakon toplinske radijacije definira da je sposobnost tijela da apsorbira energiju jednaka sposobnosti da emitira vlastitu energiju kao zračenje. Koeficijent koji opisuje emisivnost je koeficijent emisivnosti ε koji je jednak koeficijentu apsorpcije te se prethodna jednadžba može zapisati kao

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3.2.)$$

Koeficijent emisivnosti jedan je od najutjecajnijih termografskih parametara kojeg pri snimanju i evaluaciji termograma stalno treba biti svjestan.

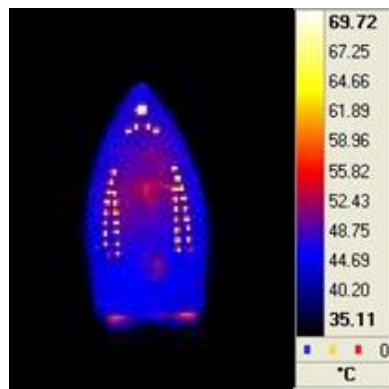
3.1.1. Crno tijelo i emisivnost

Već je u tekstu bilo spomenuto crno tijelo, odnosno intenzitet zračenja crnog tijela. Crno tijelo je takav geometrijski konkavni oblik u kojem se svako upadno zračenje, nakon višestrukih refleksija, toliko smanji da na kraju reflektirani dio ne iziđe iz crnog tijela. Apsorpcija je potpuna, odnosno emisivnost crnog tijela je 1, a takvo tijelo nema refleksije. „Gleda“ li se u to tijelo, „vidjet“ će se samo emisija toplinske energije tog tijela. Radijacija tog tijela je potpuna i na nju ne djeluje okolina.



Slika 28 Ilustracija potpune apsorpcije upadnog zračenja i potpune emisije zračenja crnog tijela

Za slučaj da se snima površina s velikom reflektivnošću (mala emisivnost), na površini će se reflektirati okolina, a stvarno toplinsko zračenje tog tijela emitirat će se u izrazitom malom iznosu. To proizlazi iz jednadžbe da su emisivnost, reflektivnost i transmisivnost upravo jedan, pa ako je reflektivnost velika, emisivnost je mala. Ako se takva površina oboji (prekrije) slojem visoke emisivnosti, ili se evaluira dio koji svojom geometrijom podsjeća na crno tijelo, moći će se evaluirati stvarna temperatura tog tijela. Rupe, uski zazor, a naročito rupe s navojem su takvi oblici koji omogućavaju očitavanje temperature, odnosno vrlo visoku emisivnost jer svojom geometrijom predstavljaju crno tijelo. Za slučaj snimanja površine visoke reflektivnosti, unošenjem ispravnog parametra emisivnosti te točnim odabirom pozadinske temperature ovo se kompenzira, no kod vrlo malih emisivnosti (velika reflektivnost) utjecaj okoline je jednostavno prevelik te su mjerenja često upitna. Slika 29 ilustrira situaciju kad velika reflektivnost (mala emisivnost) površine glačala reflektira okolinu te ne pokazuje pravu temperaturu, dok rupe za paru zbog svoje geometrije dobro prikazuju realnu temperaturu glačala. U ovom se primjeru radilo o glačalu s površinom od nehrđajućeg čelika.



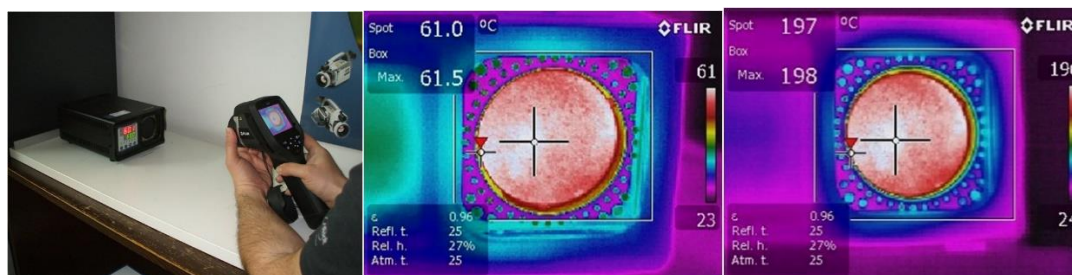
Slika 29 Refleksija površine glačala te realno očitavanje temperature u rupama (crnim tijelima)

Kod proizvodnje i baždarenja kamera koriste se crna tijela. To su naprave koje geometrijom i emisivnošću površine u tijelu (rupi), kad se u njih usmjeri kamera, pokazuju temperaturu na koju su zagrijane bez utjecaja okoline. Kod baždarenja termokamere, termokamera se na neko vrijeme ostavi ispred crnog tijela kako bi se stabilizirala temperatura senzora i leće te se zabilježi da taj digitalni iznos, koji očitava

termokamera, odgovara temperaturi crnog tijela. Iz niza očitavanja pred crnim tijelima na raznim temperaturama dobiva se krivulja odnosa digitalnog signala detektora i temperature koju taj signal predstavlja. Termokamere je potrebno, u intervalima koje propisuju norme [3.1], [3.2], kontrolirati. Kod kupnje novog objektiva potrebno je također kameru poslati na baždarenje jer svaki objektiv ima svoju krivulju koja opisuje odnos digitalnog signala i temperature.



Slika 30 Crna tijela [3.3], [3.4]



Slika 31 Postupak baždarenja termokamera na crnim tijelima (autor Krešimir Petrović, Kostelgrad d.o.o.)

Sljedeći primjer ilustrira utjecaj emisivnosti. U šalici je topla voda i površina šalice, kad se šalica uzme u ruke, svugdje je jednako topla. Na termogramu izgleda da je šalica različitih temperatura. Razlog tome je što termokamera registrira zračenje površine na koje djeluje emisivnost površine. Izolirajuća traka ima emisivnost 0,95, porculan nešto manju s obzirom na to da izgleda hladniji (0,83 u ovom primjeru), a zlatni dekorativni sloj vrlo malu te reflektira okolinu. U ovom je primjeru najniži faktor emisivnosti koji se mogao u softveru namjestiti bio 0,1 (CEDIP Altair softver), što je i dalje bilo preveliko budući da očitana temperatura na zlatu nije ni približna temperaturi ostalih površina. Zrnati sloj oko lika na šalici, koji izgleda najtopliji, ima emisivnost veću od 0,95. Emisivnost ovisi i o materijalu površine i o mikrogeometriji površine. Zrnati i glatki dio porculana imaju isti materijal površine, no mikrogeometrija je različita. Zrnati se dio ponaša više kao crno tijelo, te mu je emisivnost veća. Hrapavije površine istog materijala imat će veću emisivnost od glatkih površina istog materijala. Tablica 4 daje neke primjere emisivnosti, no brojke treba uzimati s rezervom s obzirom na to da hrapavost, a i korozija, ima znatan utjecaj na iznose. Kad se vrše mjerenja, potrebno je na kasnije opisani način točno odrediti emisivnost. Ljudska koža ima izrazito visoku emisivnost te se u grupi ljudi lako i pouzdano mogu izdvojiti oni s povišenom temperaturom. U doba COVID-19 krize, koja je još trajala u doba pisanja ovog udžbenika, često su se za provjeru koristile termokamere. Ova metoda očitavanja temperature je pouzdana i ne zahtijeva posebnu obuku termografista s obzirom na to da se radi o emisivnosti 0,98 pa je 2% refleksije okoline zanemarivo.



Slika 32 Utjecaj emisivnosti na očitavanje temperature šalice zagrijane toplom vodom

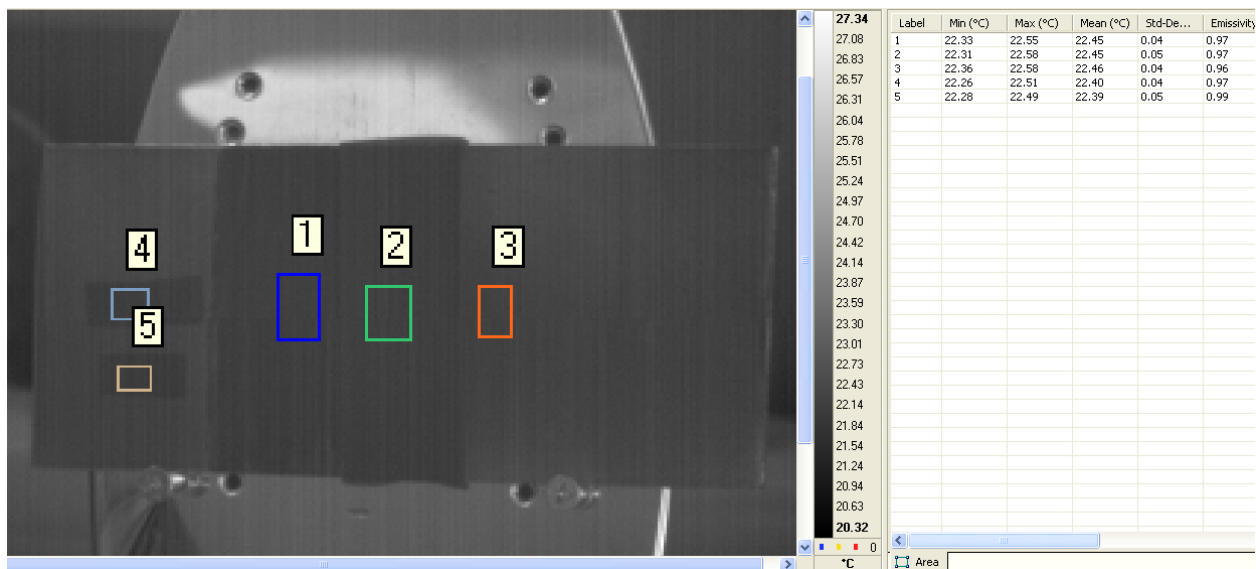
Tablica 4 Primjeri emisivnosti u dugovalnom području i pri sobnoj temperaturi[1.1].

Vrsta materijala	Koeficijent emisivnosti ϵ
ljudska koža	0,98
PE izolir-traka	0,95
cigla	0,93
porculan	0,92
žbuka	0,9
beton	0,9 – 0,97
drvo	0,8 – 0,9
Al – anodiziran	0,6 – 0,97
Al poliran	0,04-0,06
zlato	0,018 – 0,022

Emisivnost se utvrđuje na način da se unesu termografski parametri poput temperature zraka (okoline), udaljenosti od površine, relativne vlažnosti zraka te kao najvažniji parametar – pozadinska reflektirana temperatura (reflektirana temperatura okoline). O određivanju pozadinske temperature bit će riječi uskoro. Udaljenost je bitna zbog utjecaja vlage koja se nalazi u zraku između kamere i objekta mjerenja. Voda, odnosno čestice vode u vlazi su neprozirne u infracrvenom spektru te emitiraju svoju toplinu koja ovisi o temperaturi zraka, zbog čega se i ta temperatura unosi u parametre snimka. Kad je objekt daleko, ovaj je utjecaj znatno veći jer je više vlage koja djeluje na očitane temperature.

Slika 33 prikazuje način utvrđivanja emisivnosti raznih premaza. Ako je moguće, potrebno je površinu postaviti na zagrijanu podlogu ili je zagrijati. Pritom je naročito važno da je površina jednoliko zagrijana. Na površinu se zalijepi ili oboji sloj poznate emisivnosti. U praksi je to najčešće izolirajuća traka s emisivnosti 0,95. Preporuka je da se koristi PVC izolirajuća traka s obzirom na to da nema transmisije, dok kod polietilenske izolirajuće trake, a naročito kad se radi o srednjevalnoj kameri, postoji određena transmisija (prozirnost) same trake. G. L. Orlove [3.5] kao referencu navodi vinilnu izolirajuću traku čija je emisivnost 0,94 za dugovalne termo kamere. Može se koristiti i boja, no pritom treba nabaviti specijalnu boju visoke emisivnosti, npr. [3.6]. Pritom treba koristiti sprej (kompresor) za boju s obzirom na to da kist ostavlja tragove koji ne daju ravnomjernu emisivnost. Sloj boje treba ostvariti potpuno prekrivanje površine, a opet biti dovoljno tanak kako ne bi djelovao izolirajuće. Razni lakovi nemaju dovoljnu

emisivnost te je izolirajuća traka bolje rješenje. Postupak je da se u parametre kamere postavi emisivnost poznate površine, očita temperatura poznate površine te u točki (području) nepoznate emisivnosti, a čim bliže mjestu očitavanja poznate emisivnosti. U točki očitavanja površine nepoznate emisivnosti namješta se emisivnost sve dok se temperature ne poklope. Na primjeru (Slika 33) je korišten softver koji omogućava namještanje emisivnosti raznih iznosa u više točaka (područja). Većina softvera to ne omogućava te je potrebno pomicati tu jednu raspoloživu točku (područje) očitavanja. Razlog zašto se površina zagrije je taj što se time postiže veći temperaturni odmak od okoline te se temperatura okoline može bolje razlikovati, a njen utjecaj boje očitati. Ako su i površina i okolina na istoj temperaturi, neće biti ni razlike u očitanjima pa je emisivnost nemoguće očitati. Često je u praksi (npr. snimanje fasade) razlika u temperaturi mala pa je površinu usporedbe potrebno zagrijati, npr. naslanjanjem dlana i zagrijavanjem područja koje se evaluira.



Slika 33 Utvrđivanje emisivnosti raznih premaza i materijala

Važno je naglasiti da kamera registrira PRIVIDNO ZRAČENJE TIJELA, a ne stvarno zračenje tijela! Ovo stalno pri snimanju treba imati na umu i to je ono čemu ovaj udžbenik najviše služi.

Normom [3.1] se propisuje određivanje emisivnosti usporedbom površine s uzorcima poznate emisivnosti tipa 1 ili tipa 2. Referentni uzorak tipa 1 je se od uzorka tipa 2 razlikuje u tome što su anomalije rađene obradom (slijepe rupe, kanali), za razliku od tipa 2 gdje su to prirodne anomalije.

3.1.2. Prividno zračenje

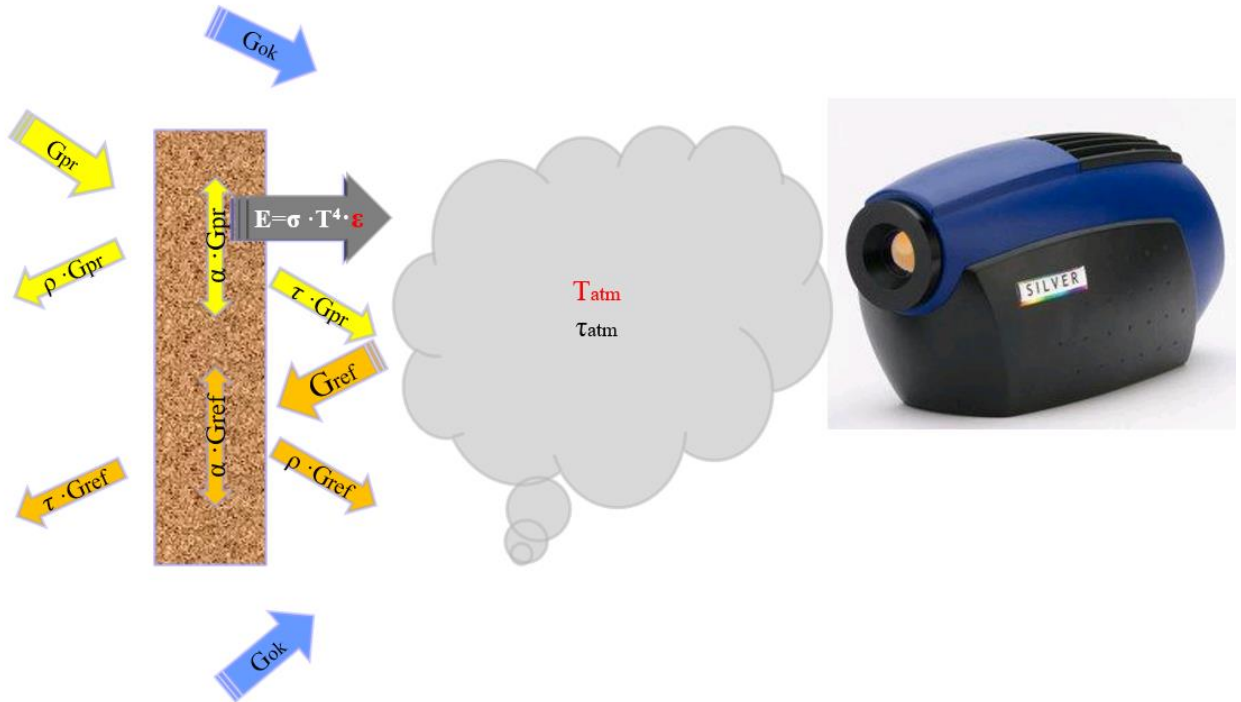
Kad se termokamerom snima površina, idealno bi bilo da je ona crno tijelo te obučeni termografisti ne bi bili ni potrebni (Slika 34). No ta površina ima svoju emisivnost te pokazuje nižu temperaturu od stvarne. Nadalje, postoji možda neko zračenje iza objekta koje, zbog transmisivnosti objekta, prolazi kroz objekt. Postoji pozadinsko zračenje koje se uslijed refleksivnosti površine reflektira u objektiv kamere, što određuje koeficijent refleksije. Možda postoji i neko bočno zračenje koje detektor direktno ne „vidi“, a ipak upada u termokameru uslijed refleksije o tijelo objektiva. Sličan efekt je kad se fotografira prema Suncu, gdje nije nužno da Sunce direktno upada u objektiv, a da se utjecaj primijeti. To je i razlog zašto se

površina tijela objektiva, neposredno uz leću, izrađuje kao niz stepenastih površina koje zaustavljaju bočno upadno zračenje. Između termokamere i površine određena je udaljenost, a zrak između ima svoju vlažnost pa čestice vlage, poput magle, pokazuju svoju temperaturu, koja je temperatura zraka. Čim je udaljenost veća, utjecaj je veći.



Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$
 E_c – vlastita emisija crnog tijela

Slika 34 Idealno – zračenje crnog tijela



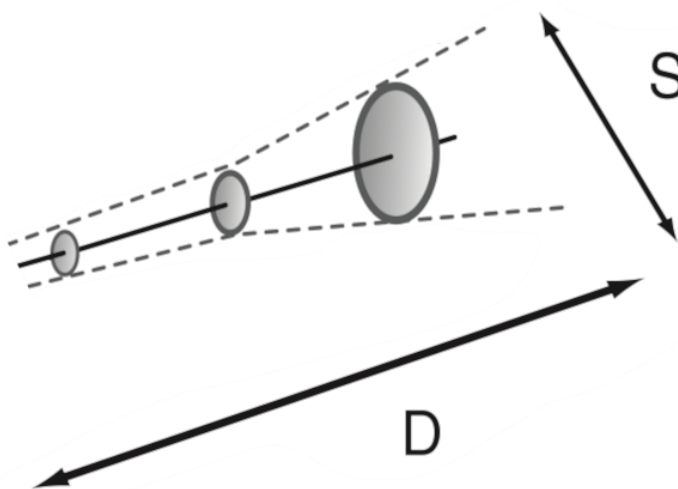
Slika 35 Realno prividno zračenje koje registrira termokamera

Uzmu li se svi ovi utjecaji te ako se ne unesu točni termografski parametri (emisivnost, udaljenost, relativna vlažnost, temperatura zraka, reflektirana pozadinska temperatura), pogreške očitavanja

temperature bit će znatne. Kamere imaju visoku razlučivost (npr. 0,02 °C ili 0,05 °C), no preciznost ovisi o termografistu. Termokamerom se može preciznije očitati temperatura površine negoli je to slučaj s kontaktnim termometrom koji u trenutku kontakta mijenja temperaturu površine mjerenja. Preciznost očitavanja termograma drastično ovisi o svim navedenim parametrima (Slika 35), gdje emisivnost prednjači. Postupak preciznog određivanja svih navedenih utjecajnih parametara detaljno je opisan u [3.5]. Često se za mjerenja koriste pirometri čiji je detektor poput jednog piksela termokamere. Koriste ih termografski neobučeni ljudi koji nisu svjesni svih ovih utjecaja, a još pritom često misle da je laserska točka područje očitavanja temperature ili čak metoda očitavanja, a ne samo usmjerivač koji pokazuje približnu orijentaciju pirometra. Uz to, površina očitavanja je od par centimetara do možda metra kvadratnog, ovisno o udaljenosti od površine zbog kuta leće pirometra. Što je udaljenost (D) veća, veća je i površina očitavanja (S), a time i mjerenje netočnije.



a)



b)

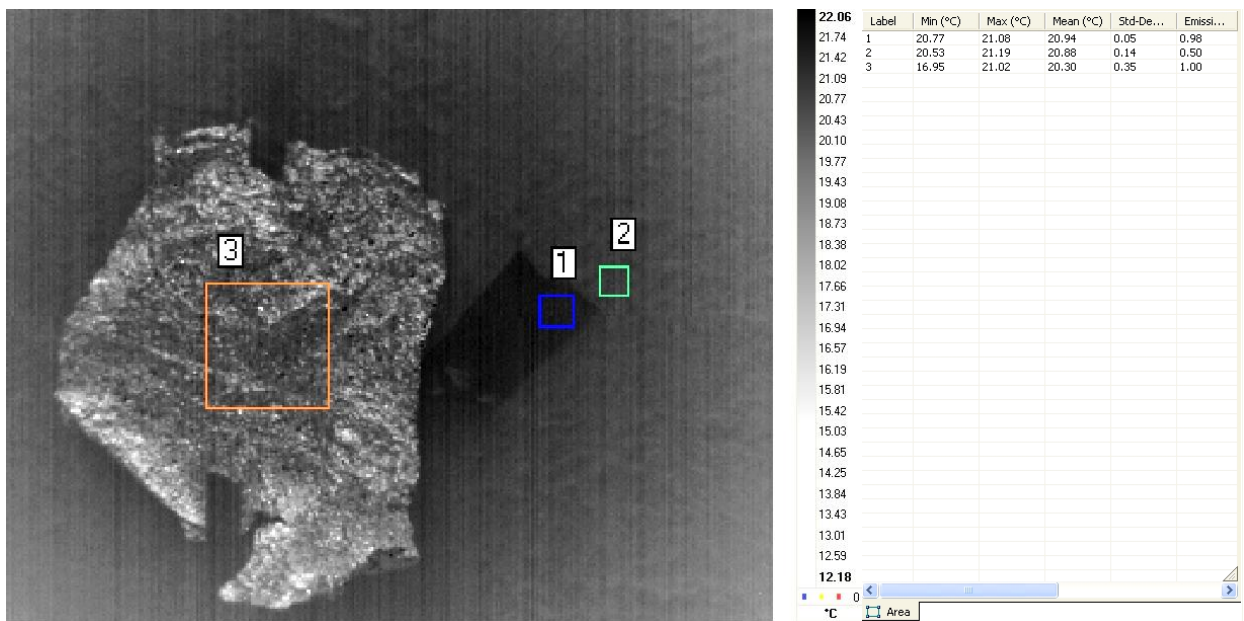
Slika 36 Pirometar a) i objašnjenje odnosa udaljenosti (D) i površine očitavanja koju pirometar mjeri (S).

Termografija može biti **kvalitativna** i **kvantitativna**. Kako je kasnije detaljnije opisano, cilj kvalitativne termografije uočiti anomalije ili neke specifične pojave, dok je kod kvantitativne svrha točno određivanje temperaturne raspodjele (iznosa temperatura) na termogramu. Detaljniji opis sadržan je u poglavlju 11.1.2.

3.2. Reflektirana prividna temperatura

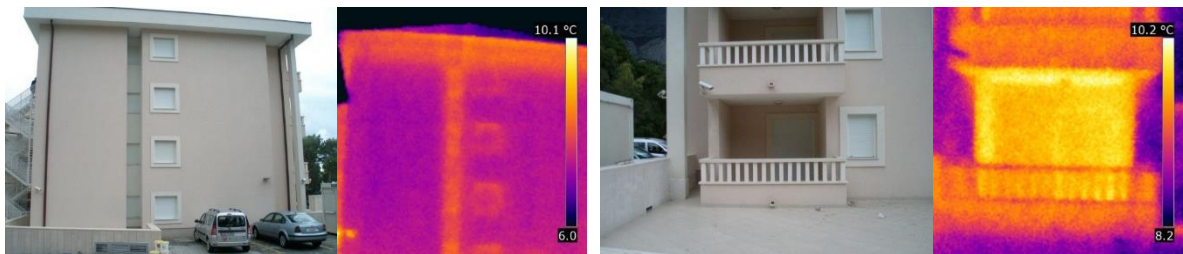
Reflektirana prividna temperatura [3.5] usko je povezana s emisivnošću odnosno reflektivnošću te utjecaju koji će okolina imati na objekt mjerenja, pri čemu i prisustvo samog termografista znatno utječe na objekt mjerenja. Reflektirana prividna temperatura (*Reflected apparent temperature*) naziva se još i pozadinska temperatura (*background temperature*, *Ambijent temperature*, *Reflected apparent temperature*). Oznake koje se koriste su T_{refl} , T_{back} , T_{ambj} . Neki autori pri određivanju ove temperature predlažu da se kamera usmjeri obrnuto od objekta mjerenja te slika zamuti (fokus pomakne). Problem ovog pristupa je što u okolini često postoje objekti koji će znatno utjecati na očitano temperaturu. Metoda

koja se preporučuje je uz pomoć zgužvane aluminijske folije koja se postavi na površinu mjerenja. Nikako u ruku termografista, već na površinu mjerenja! Pritom se emisivnost postavi na 1, a udaljenost na 0 m. Snima se pod kutom (15-ak stupnjeva od normale) kako bi se izbjegle refleksije termografista. Zgužvana folija omogućava usrednjavanje dobivenih vrijednosti. Isto radi usrednjavanja prividne reflektirane temperature, pri očitavanju se preporučuje metoda kontrolnog polja i očitavanje srednje vrijednosti (Slika 37), a ne očitavanje jedne točke (spot). Na slici 37, polje 1 se nalazi iznad PVC izolirajuće trake, polje 2 iznad fasadnog zida, a polje 3 je iznad zgužvane aluminijske folije. Koji puta na terenu pri snimanju se reflektirana temperatura može očitati s pocinčanih limenih površina, aluminijskih površina i sličnih metalnih uglačanih nekorodiranih površina, no metoda s folijom je najpouzdanija. Kod snimanja na otvorenom znatan je utjecaj neba čija je temperatura redovito ispod nule, gdje kod vedrog neba temperature mogu biti i oko -40 °C te kao takve značajno utječu na izmjerene vrijednosti.



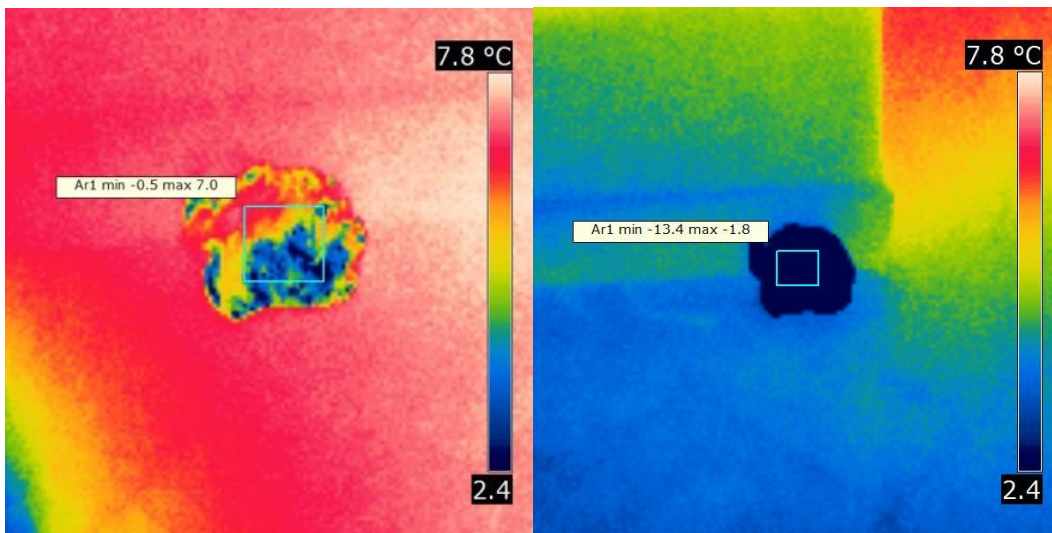
Slika 37 Očitavanje pozadinske temperature (uz očitavanje emisivnosti površine)

Pogrešna očitavanja temperature često su uzrokovana upravo utjecajem pozadinske temperature. Na primjeru (Slika 38) se vidi zgrada (snimana zimi) koja ima udubljeni dio pročelja (lijevo) i lođu (desno) za koje izgleda kao da nedostaje izolacije te postoje veći gubici na zgradi. Izolacija je svugdje jednake debljine, a razlog ovom prividu temperature je taj što udubljeni dijelovi reflektiraju zidove koji su na znatnoj višoj temperaturi od dijelova koji reflektiraju nebo koje je na znatno nižim temperaturama.

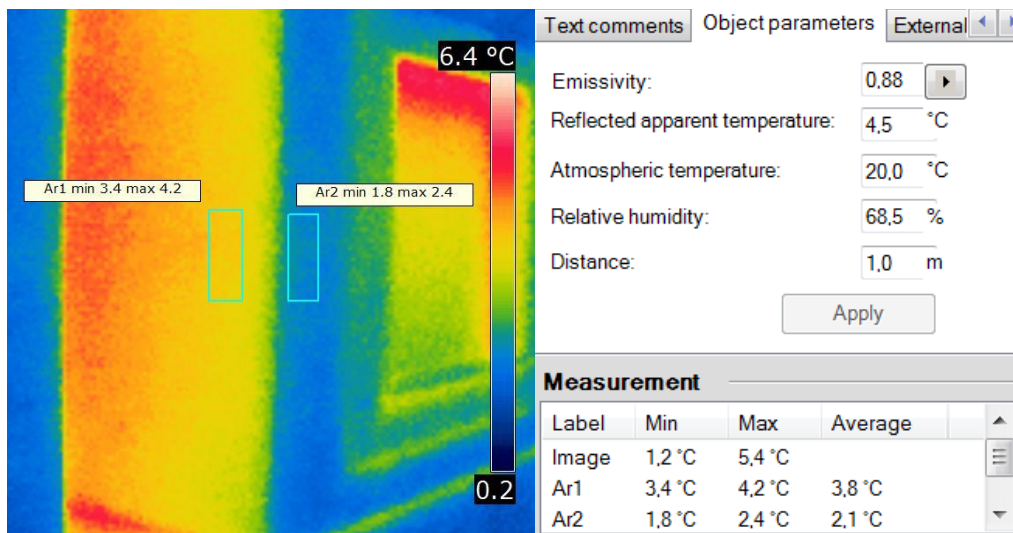


Slika 38 Utjecaj prividne reflektirane temperature na termogram

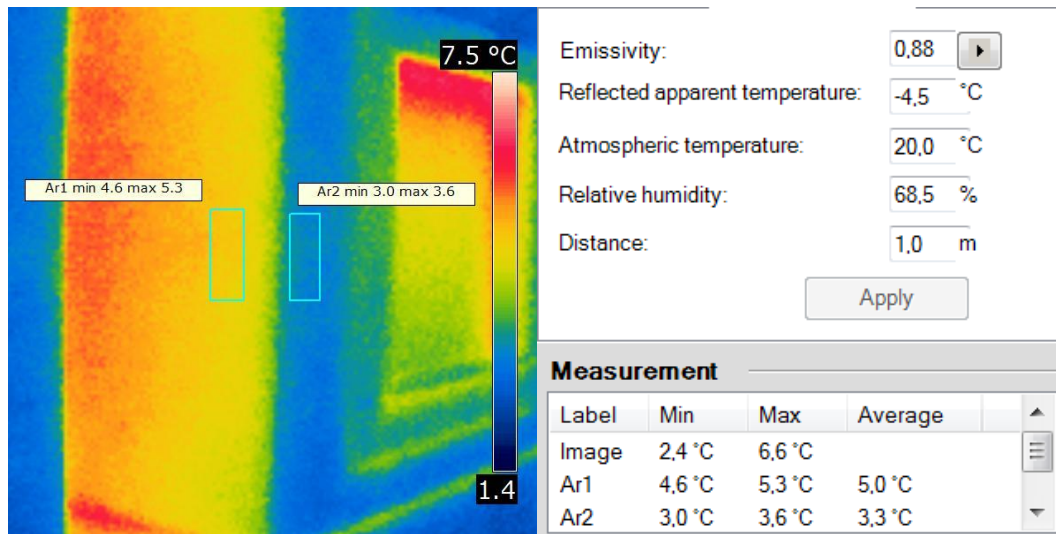
Kad se izvršilo određivanje reflektirane prividne temperature u udubljenju pročelja (Slika 39, lijevo), utvrđeno je $T_{refl1} = +4,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Očitanjem reflektirane prividne temperature na ravnom dijelu pročelja koji je više izložen hladnom nebu (Slika 39, desno), utvrđeno je $T_{refl2} = -4,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Kad se za reflektiranu prividnu temperaturu postavi T_{refl1} , mjerodavno je očitavanje u udubljenju, gdje srednja vrijednost područja Ar1 iznosi $3,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 40). Kad se za reflektiranu prividnu temperaturu postavi T_{refl2} , mjerodavno je očitavanje na ravnom dijelu pročelja Ar2, čija srednja vrijednost iznosi $3,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Slika 41). Kad se ovo ne bi uzimalo u obzir, temeljem samog termograma očitavale bi se znatno veće razlike u temperaturama.



Slika 39 Očitavanje reflektirane prividne temperature u udubljenju (lijevo) i na ravnom dijelu pročelja (desno)



Slika 40 Reflektirana prividna temperatura postavljena prema očitanju iz udubljenja



Slika 41 Reflektirana prividna temperatura postavljena prema očitavanju s ravnog dijela pročelja

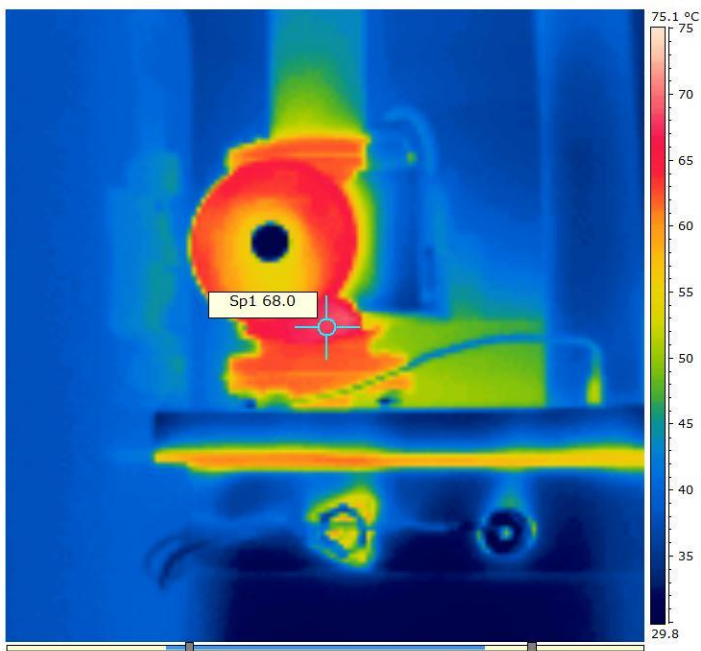
3.3. Parametri koje je moguće mijenjati nakon snimanja

Za većinu komercijalnih kamera zapis snimka termograma je JPEG, koji se kao slika može vidjeti u bilo kojem programu za prikaz slike, no taj JPEG u sebi sadrži još čitav niz podataka koji se mogu naknadno obrađivati i modificirati. Ovi podaci vidljivi su samo u softveru koji se dostavlja s IC kamerom te bez softvera proizvođača nije moguće imati uvid u pune podatke ili ih mijenjati. Do sada su bili obrađeni parametri koje je moguće podesiti i korigirati nakon snimanja. Tako se snimljenom termogramu može mijenjati paleta boja, raspon prikazanih temperatura, dodavati i mijenjati mjesta te načini očitavanja temperatura (minimum, maksimum, srednja). Može se mijenjati emisivnost, reflektirana prividna temperatura, udaljenost objekta i relativna vlažnost zraka te još neki elementi poput temperature optike i transmisivnosti optike.

Parameters	
Emissivity	0,95
Refl. temp.	27,0°C
Distance	20,0m
Atmospheric temp.	23,0°C
Ext. optics temp.	20,0°C
Ext. optics trans.	1,00
Relative humidity	22,0%

Slika 42 Termografski parametri koji se mogu mijenjati nakon snimanja (emisivnost, reflektirana temperatura, udaljenost, temperatura zraka, temperatura leće, transmisivnost leće, relativna vlažnost)

Termogrami na slikama (Slika 43, Slika 44 i Slika 45) su nastali iz jednog te istog termograma gdje je varirana emisivnost i reflektirana prividna temperatura te su očitavanja u točki, kao i rasponi temperatura na termogramu, različiti.



IR_0034.jpg
Size: 59 KB
Created: 5.11.2012. 15:43:09
Camera: FLIR_i7
Lens: FOL7

Image Description

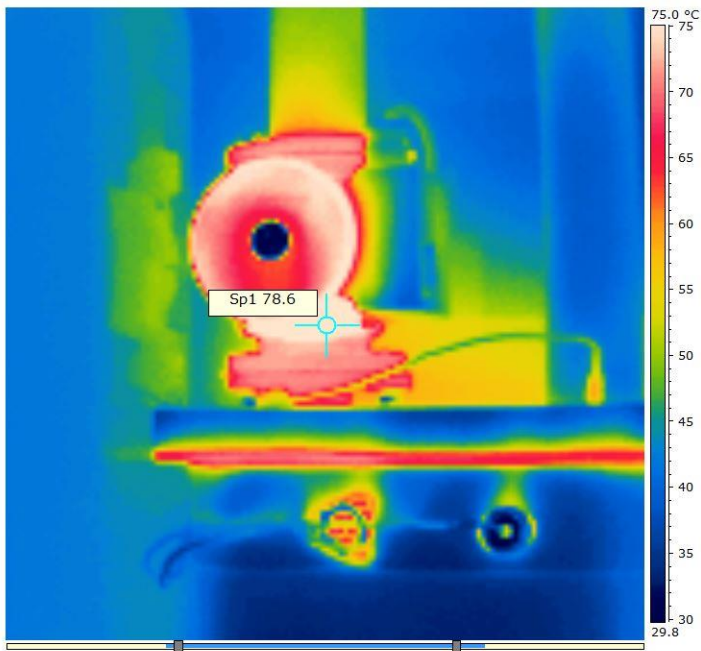
Text comments | Object parameters | External

Emissivity: 0,90
Reflected apparent temperature: 23,0 °C
Atmospheric temperature: 20,0 °C
Relative humidity: 50,0 %
Distance: 1,0 m
Apply

Measurement

Label	Min	Max	Average
Image	26,4 °C	69,0 °C	
Sp1	68,0 °C		

Slika 43 Emisivnost 0,9 i reflektirana prividna temperatura 23 °C



IR_0034a.jpg
Size: 62 KB
Created: 5.11.2012. 15:43:09
Camera: FLIR_i7
Lens: FOL7

Image Description

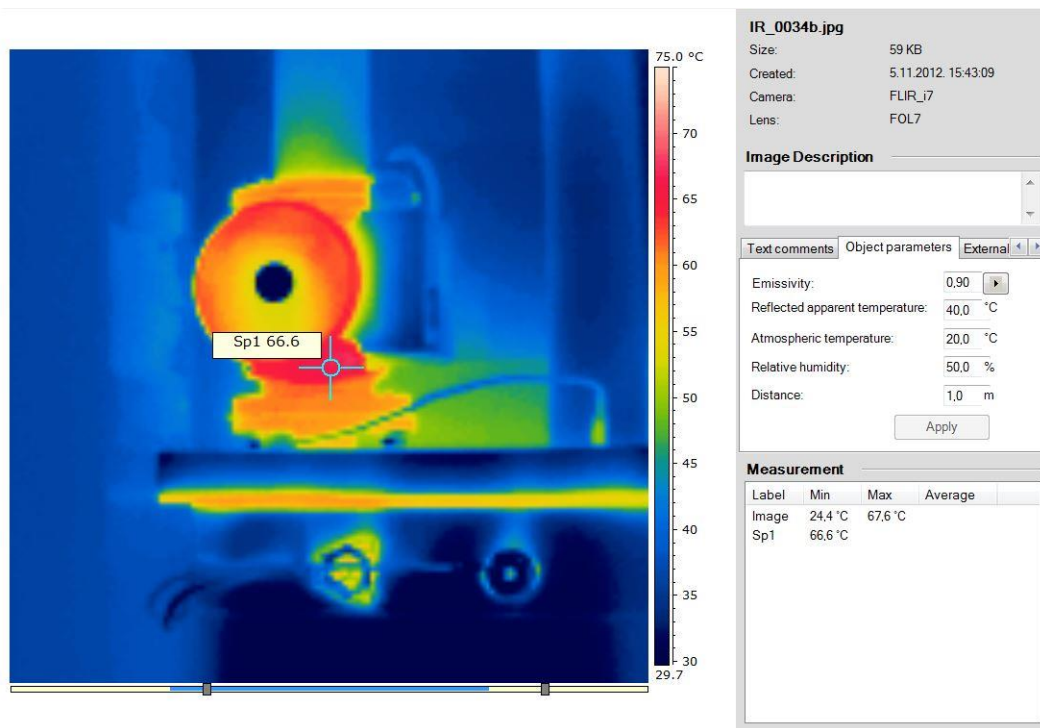
Text comments | Object parameters | External

Emissivity: 0,70
Reflected apparent temperature: 23,0 °C
Atmospheric temperature: 20,0 °C
Relative humidity: 50,0 %
Distance: 1,0 m
Apply

Measurement

Label	Min	Max	Average
Image	27,4 °C	79,8 °C	
Sp1	78,6 °C		

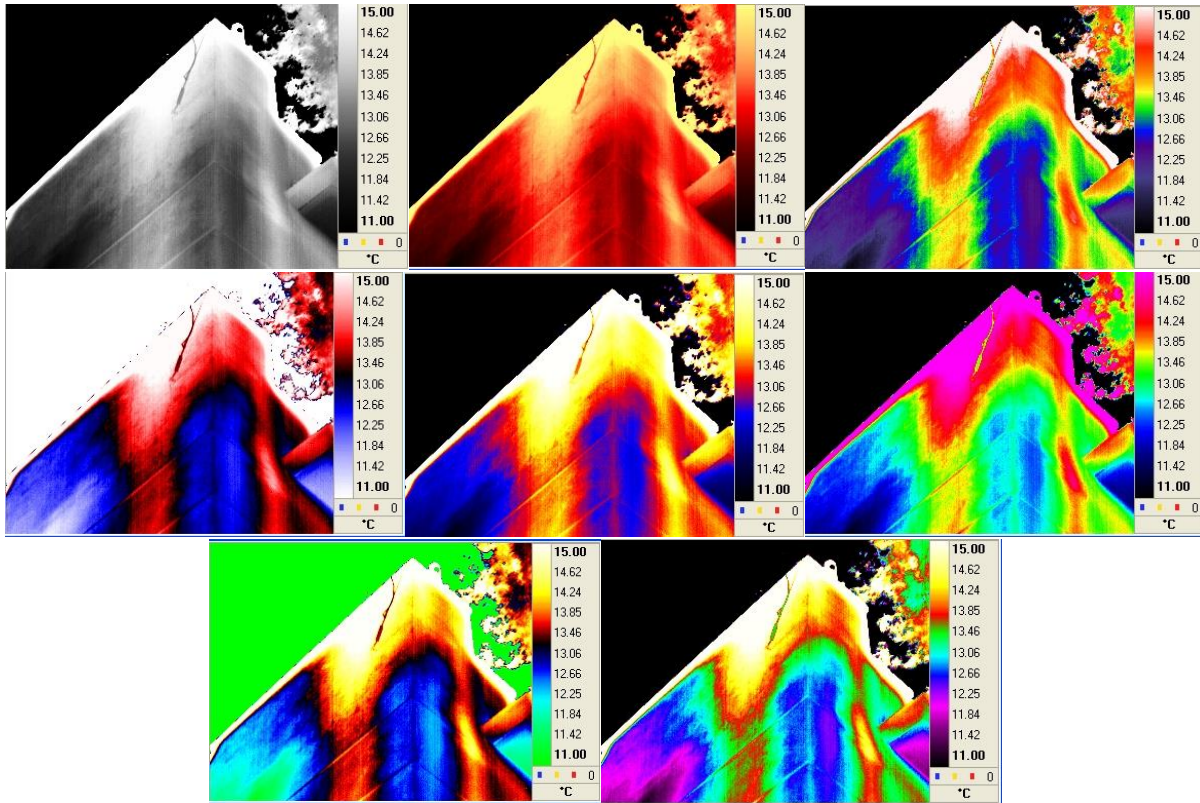
Slika 44 Emisivnost 0,7 i reflektirana prividna temperatura 23 °C



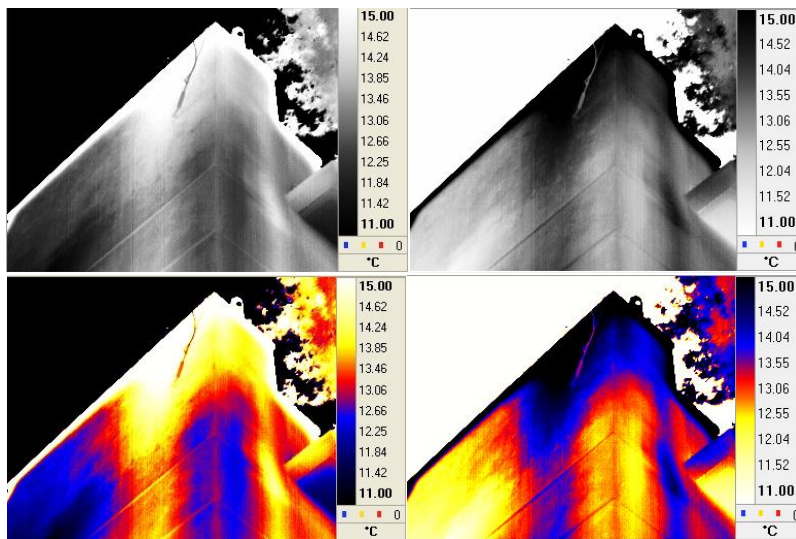
Slika 45 Emisivnost 0,9 i reflektirana prividna temperatura 40 °C

3.3.1. Paleta

Termogram je izvorno iznos digitalnog signala (*digital Level DL*), koji temeljem kalibracijskih podataka postaje temperaturna slika gdje svaki piksel predstavlja jedan digitalni termometar. Crno-bijeli prikaz je nešto najbliže izvornom zapisu. Termokamere i softveri za obradu termograma imaju na raspolaganju čitav niz paleta. Slika 46 prikazuje čitav niz paleta jednog te istog termograma. Slika 47 prikazuje izvrtanje redosljeda boja jednog te istog termograma i pokazuje nužnost da obavezno uz termogram postoji i paleta (skala) temperatura.



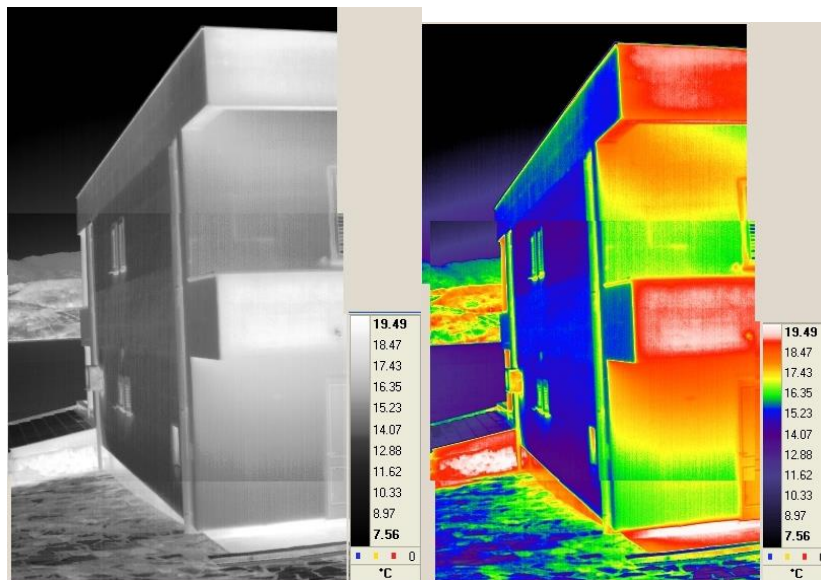
Slika 46 Različite palete istog termograma



Slika 47 Prevrtnje redoslijeda boja jednog te istog termograma

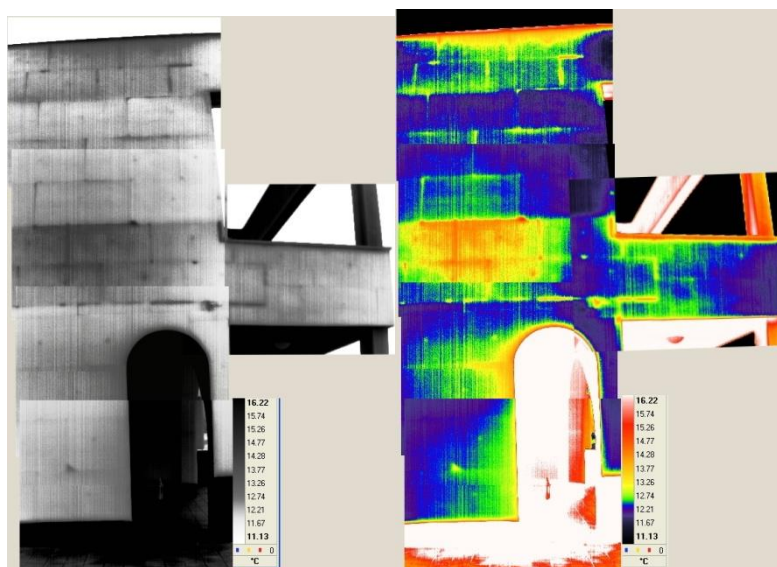
Redovito je potrebno putem više paleta analizirati termograme. Često kod velikih razlika u temperaturama palete s manje boja bolje opisuju stanje, dok kod malih razlika u temperaturama palete s više boja bolje opisuju detalje termograma. Slika 48 prikazuje istu zgradu i isti termogram, gdje crno-bijeli termogram (dvije boje, crna i bijela te njihova gradacija) naglašava da je toplinska izolacija različitih izolacijskih

svojtava, dok paleta s više boja naglašava lokacije prodora vlage (osam boja, bijela, crvena, narančasta, žuta, zelena, plava, ljubičasta i crna te njihove gradacije).



Slika 48 Primjena različite palete kod istog termograma

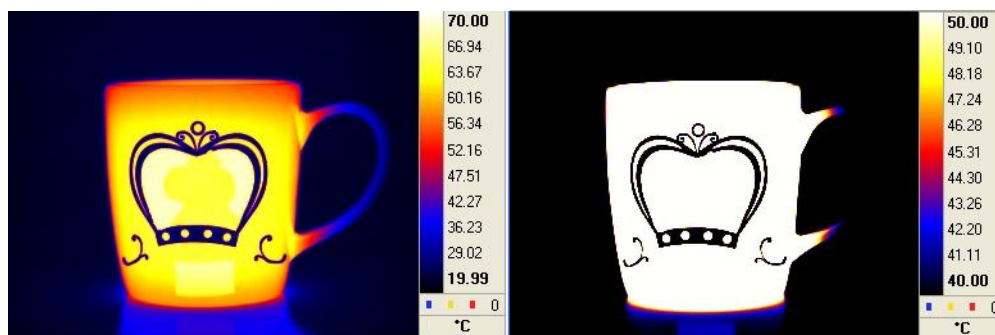
Slika 49 prikazuje isti termogram gdje crno-bijela paleta naglašava razmike među pločama toplinske izolacije i tiple kojima je izolacija pričvršćena. Paleta s više boja naglašava smjer prodora i slijevanja vlage ispod toplinske izolacije.



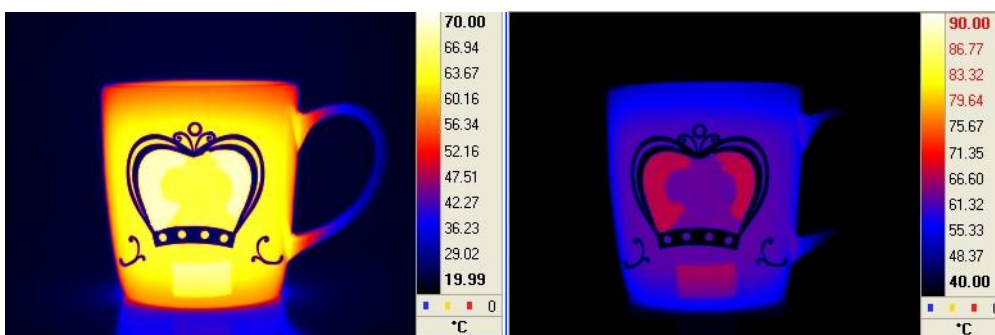
Slika 49 Primjena različite palete kod istog termograma

3.3.2. Raspon i razina

Kod analize termograma promjenom raspona i razine omogućava se bolje uočavanje detalja i žarišta. Raspon (*span*) je područje temperatura između najniže i najviše temperature palete. Slika 50 prikazuje sužavanje raspona gdje se naglašavaju detalji razlike temperatura na dršci šalice. Slika 51 prikazuje promjenu razine, gdje niže razine bolje predočavaju razlike u hladnijim dijelovima šalice (ručka), dok više razlike u dijelovima poput zrnate pozadine oko lika i izolirajuće trake.



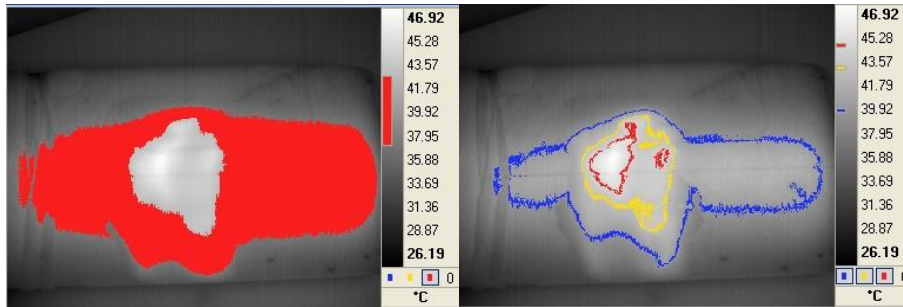
Slika 50 Promjena raspona, lijevo širi, desno uži



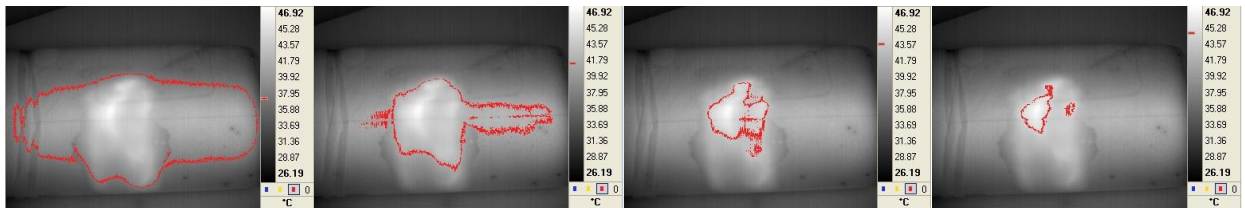
Slika 51 Razina od nižih (lijevo) k višim (desno) temperaturama

3.3.3. Izoterma

Izoterma je alat dostupan u većini termografskih softvera gdje se istom bojom prikazuje odabrani raspon prividnih temperatura objekta. Širinu ovog raspona moguće je mijenjati, a variranjem razine lakše se odredi gdje je toplinski izvor, a gdje ponor. Na primjer, kod evaluacije vlaženja lakše se otkriva izvor.



Slika 52 Raspon (širina) izoterme i termogram s tri izoterme



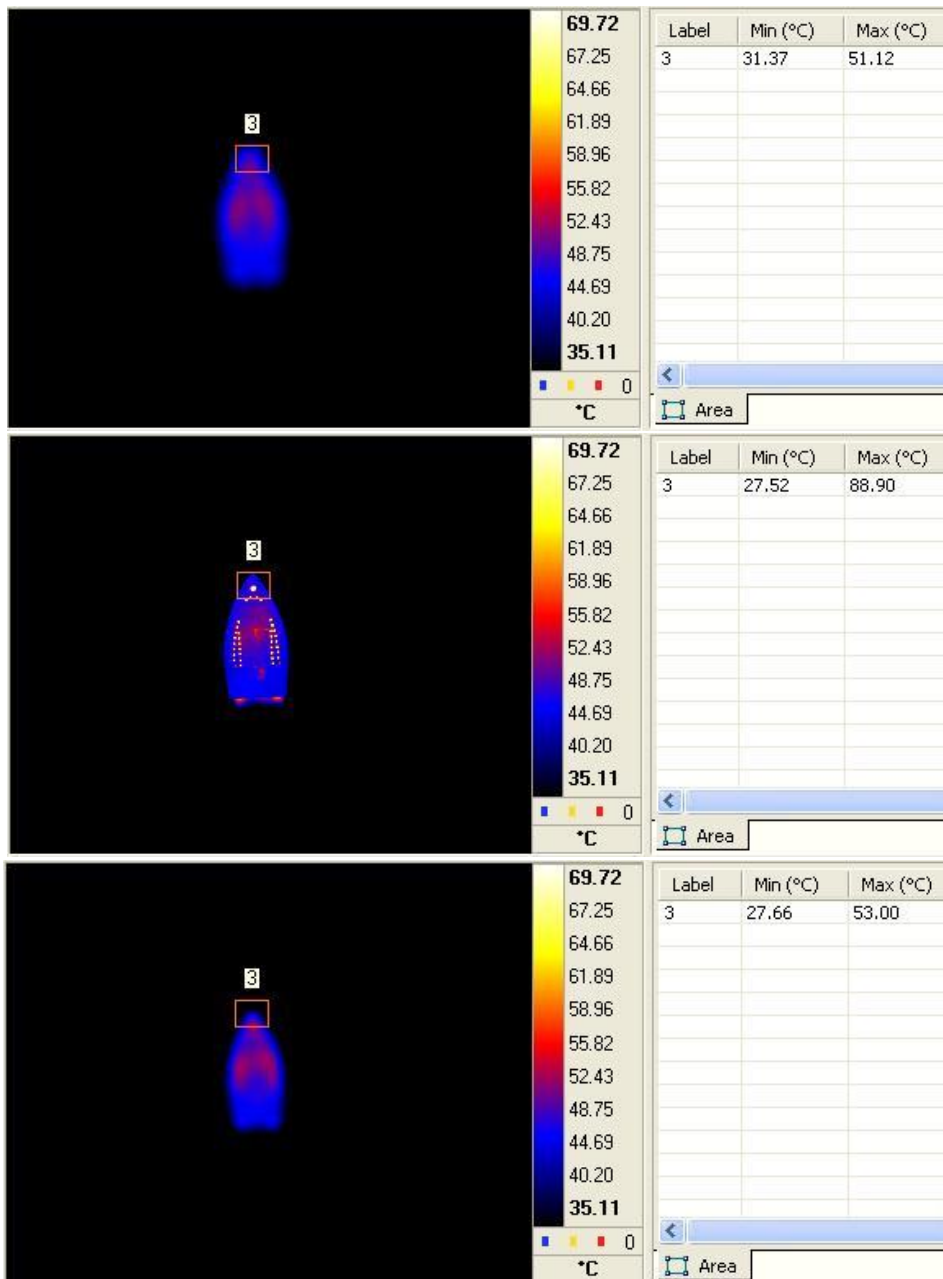
Slika 53 Variranje razine s ciljem određivanja žarišta

3.4. Parametri koje nije moguće promijeniti nakon snimanja

Postoje parametri koji se ne mogu ni mijenjati ni modificirati, te se jednom snimljen termogram ne može korigirati za ove parametre. Često ih se naziva FORD (Focus, Object, Range, Distance), što znači fokus objektiva, kadar koji se snima (objekt), odabrani temperaturni raspon i udaljenost od objekta. Ako se neki od ovih parametra pogriješi, nema druge nego ponovo snimiti termogram.

3.4.1. Fokus

Ako fokus objektiva nije namješten, termogram ne samo da će biti mutan nego će i očitavanja temperatura biti uvijek niža od realnih kad je fokus namješten. Razlog ovom je što se energija raspodijeli na više piksela pa je njihovo očitavanje niže negoli kad je energija fokusirana na manji broj piksela. Efekt je sličan kao kad se povećalom Sunce fokusira na papir pa kad je papir u fokusu, dolazi do zapaljenja, a kad nije, neće doći do zapaljenja. Slika 54 pokazuje termograme glačala, gdje je srednji termogram u fokusu, a za ostale su žarišne duljine ili previše kratke ili previše duge. Očitavanje temperature termograma u fokusu pokazuje najvišu temperaturu. Loše snimljeni termogram izvan fokusa ne može se popraviti naknadnom obradom. Neke jeftinije termokamere nemaju mogućnost fokusiranja pa je samim time preciznost očitavanja temperature manja.



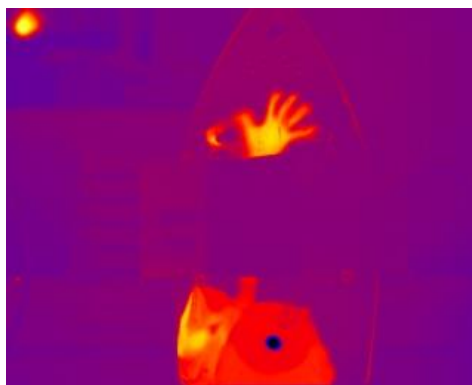
Slika 54 Glačalo izvan i u fokusu

3.4.2. Kadar termograma

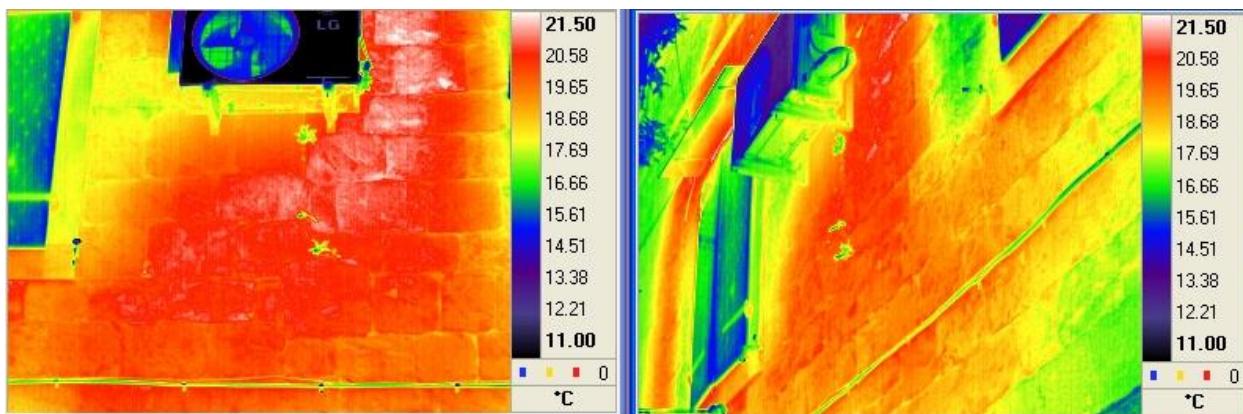
Kadar termograma, odnosno u engleskoj skraćenici FORD, objekt (*object*), predstavlja situaciju kad kadar koji se snima nije dobro namješten i ne prikazuje sve što bi trebalo prikazati.

Sami kut snimanja utječe na kvalitetu interpretacije temperature. Prilikom snimanja treba izbjegavati kut kamere okomito na površinu jer refleksija tad uključuje refleksiju kamere i termografista. Ovo je naročito

naglašeno kod površina niže emisivnosti, veće reflektivnosti. Slika 55 prikazuje refleksiju termografista na glačalu, a kako se radi o hlađenoj srednjevalnoj kameri (detektor se hladi na $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$), vidljiva je i refleksija hlađenog FPA detektora (tamna točka na termogramu, Slika 55). Treba izbjegavati ovu poziciju snimanja okomito ispred objekta. Orijentacijski prihvatljiv kut snimanja je odmak 15° od okomice. Kod većeg odmaka od okomice pravilo je da nemetalima opada prividna temperatura (Slika 56 i Slika 57), dok metalima (objektima manje emisivnosti) raste. Slika 57 prikazuje dimovodnu cijev od neobojenog nehrđajućeg čelika gdje na rubovima dimovodne cijevi prividna temperatura raste. Na istom ovom termogramu vide se tanje obojane cijevi kod kojih je ovaj efekt obrnut. Na termogramu (Slika 58) vidljiv je i detalj gdje je izolacijska traka (emisivnost 0,95) korištena kako bi se očitala temperatura cijevi pošto reflektirajući neobojeni materijal ima prevelik utjecaj hladnije okoline.



Slika 55 Refleksija kamere i termografista na površini glačala



Slika 56 Utjecaj kuta snimanja kod nemetala



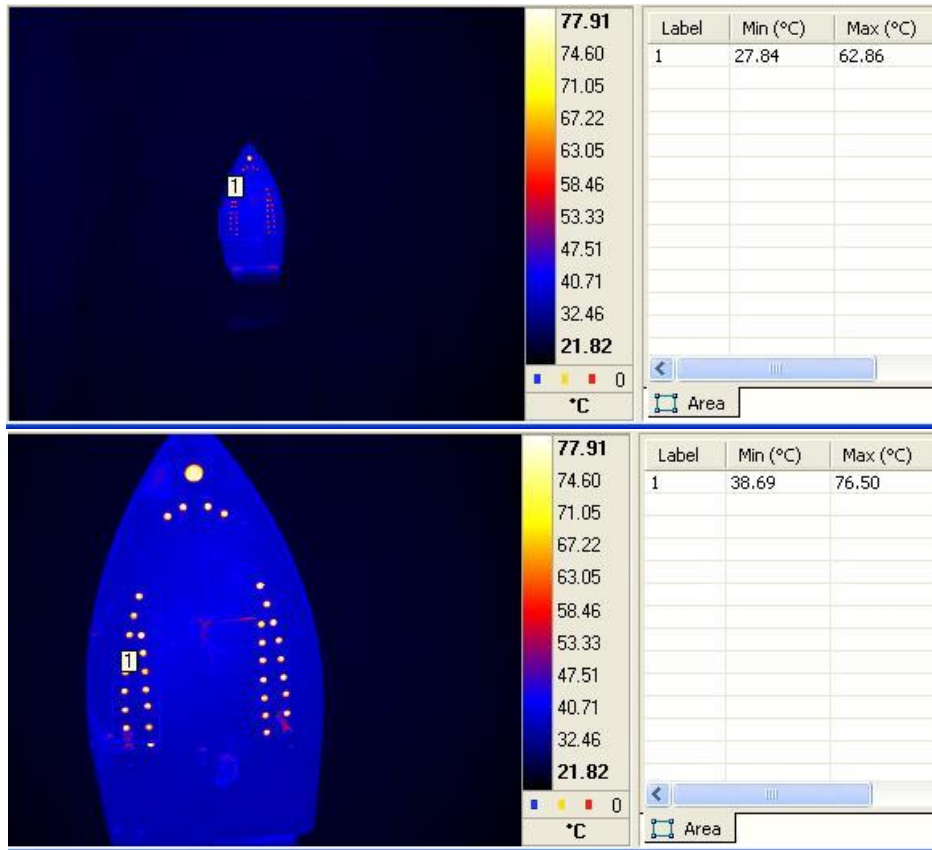
Slika 57 Utjecaj kuta snimanja kod metala



Slika 58 Utjecaj kuta kod metalnih površina

3.4.3. Udaljenost

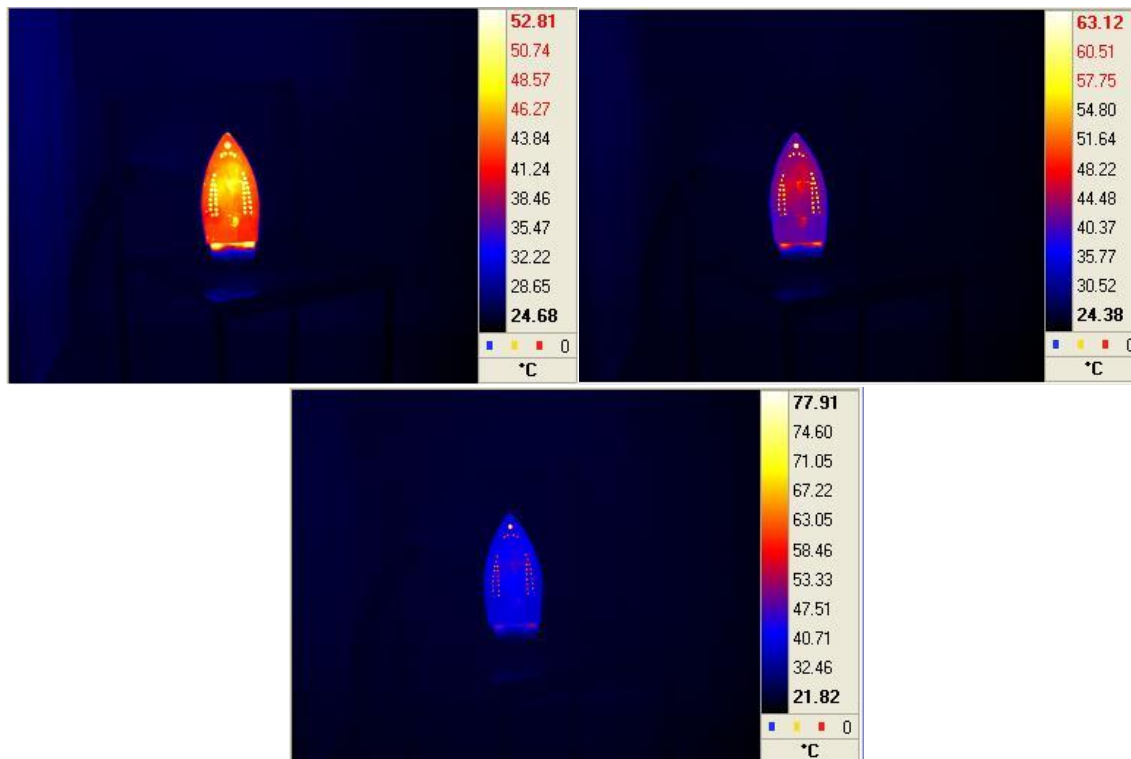
Ako je objekt koji se snima predaleko, manji izvori topline bit će fokusirani na površinu koja je manja od piksela te će piksel očitavati i dio okoline drugačije temperature te osrednjiti vrijednost. O ovome će biti nešto kasnije govora. Odabir kuta leće ima utjecaja na evaluaciju kadra koji se snima pri objektima na različitim udaljenostima od objektiva (detaljnije u tekstu koji slijedi). Slika 59 prikazuje očitavanje temperature na rupi u glačalu, gdje je kod veće udaljenosti očitavanje temperature manje.



Slika 59 Utjecaj udaljenosti na mjerenje

3.4.4. Temperaturno područje

Termokamera je baždarena za određeno temperaturno područje. Ako temperatura tijela bude izvan temperaturnog područja, termokamera će signalizirati da je objekt topliji ili hladniji od temperaturnog područja te su očitavanja izvan temperaturnog područja pogrešna. Kamere su kalibrirane za nekoliko temperaturnih područja. Npr. dva područja, od -40 °C do 250 °C te od 0 °C do 600 °C . Ako je odabrano prvo kalibrirano područje, a snima se objekt na 300 °C , očitavanja će biti pogrešna. Uvijek treba težiti temperaturnom području što bližem stvarnoj temperaturi objekta. Uzme li se područje s prevelikim temperaturnim rasponom, preciznost očitavanja bit će manja. Slika 60 prikazuje tri uzastopna snimanja termograma. Na sljedećem primjeru bit će prikazano što znači odabrati pogrešno područje. U ovom primjeru korištena je hladna termokamera kod koje nema samo par područja na raspolaganju, već je moguće kontinuirano odabirati područje kalibracije. Prvi termogram pokazao je maksimalnu temperaturu glačala od $52,81\text{ °C}$, gdje crvene brojke upozoravaju na prekoračenje područja za koji je kamera kalibrirana. Postavi li se da je područje do 55 °C , na drugom termogramu se očitava najveća temperatura od $63,12\text{ °C}$, a crvene brojke upozoravaju da ni taj raspon nije dovoljan i da je izvan kalibriranog područja. Postavljanjem temperaturnog područja do 80 °C očitava se maksimalna temperatura glačala od $77,91\text{ °C}$, što je točno očitana najveća temperatura kadra. Temperaturni je raspon razlika temperatura koja je vidljiva na skali. Bitno je da je promatrani raspon temperatura unutar područja za koje je kamera kalibrirana! Kod većine dugovalnih termokamera koje se u praksi susreću obično su na raspolaganju dva do tri područja kalibriranih temperatura.



Slika 60 Termogrami izvan i unutar temperaturnog područja

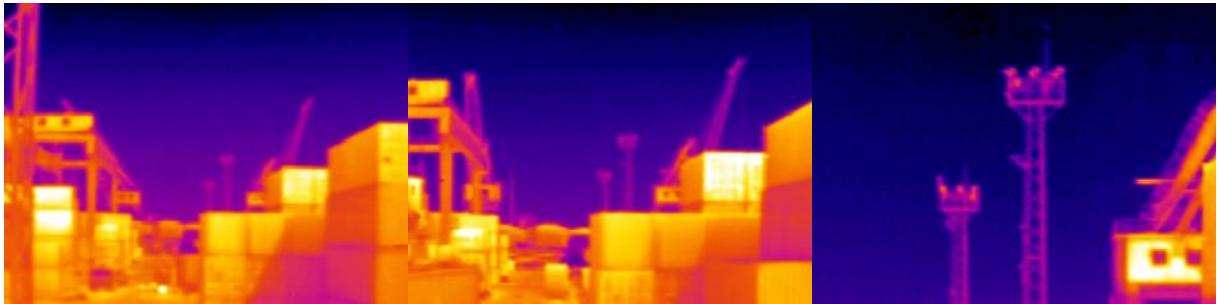
Literatura

- [3.1] EN 16714-1:2016: Nerazorno ispitivanje – Termografsko ispitivanje – 1. dio: Opća načela
- [3.2] EN 16714-2:2016 Nerazorno ispitivanje – Termografsko ispitivanje – 2. dio: Oprema
- [3.3] Kalibrator für IR- Thermometer, Quality Engineering, 2009. <https://quality-engineering.industrie.de/allgemein/kalibrator-fuer-ir-thermometer/>
- [3.4] Infračervená kalibrace, Majer, <https://www.pyrometrcz.cz/produkty/technologicky-prehled/nase-technologie/infracervena-kalibrace/>
- [3.5] Gary L. Orlove, Practical thermal measurement techniques. Proceedings of the SPIE, Vol. 371, pp. 72–81, 1982.
- [3.6] Eric Tang-Kwor, Simone Mattei, Emissivity measurements for Nextel Velvet Coating 811-21 between -36 °C and 82 °C, High Temperatures - High Pressures, vol. 33/, 551-556, 2001.

4. Karakteristike optike i detektora

4.1. Kut leće

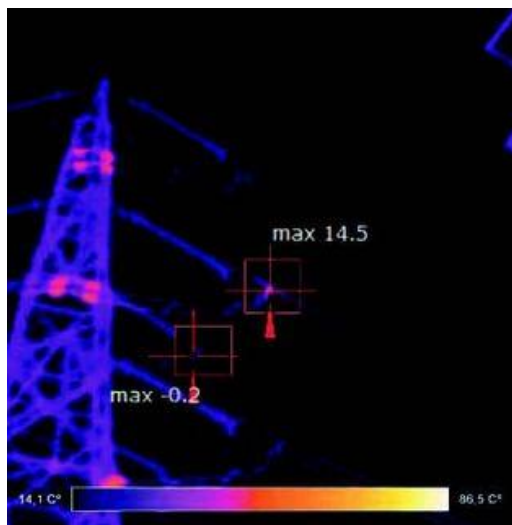
Kut leće određuje koliku će širinu objekta kadar zadržati. Leće šireg kuta omogućavaju smještanje većeg dijela objekta u isti kadar, ali za posljedicu imaju distorziju slike (krivljenje ravnih linija uz rub slike). Uža leća zahtijeva spajanje termograma kako bi se vidjelo isto što i sa širokokutnom. Neki termografski softveri, koji puta uz doplatu, imaju mogućnost spajanja termograma, no mogućnosti su često ograničene na termograme s jasnim kontrastom, dok kod malih temperaturnih razlika može biti problema. Kod udaljenijih objekata potrebno je ili koristiti uskokutnu leću ili prići bliže kako bi u oba slučaja bitni detalji bili vidljivi, odnosno prekrivali više od jednog piksela. Često je dilema treba li kupiti više leća ili skuplju termokameru. Uglavnom je bolje kupiti skuplju kameru veće rezolucije i osjetljivosti detektora nego jeftiniju s više leća pošto kupnja dodatne leće uključuje potrebu za dodatnim baždarenjem termokamere, što košta.



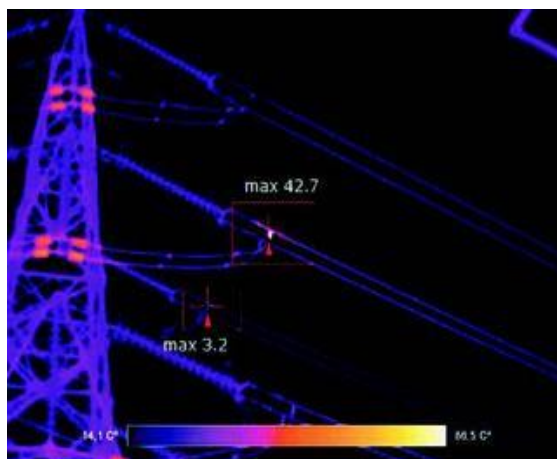
Slika 61 Različiti kutovi leće (38°, 20°, 9°)

4.2. Prostorna rezolucija

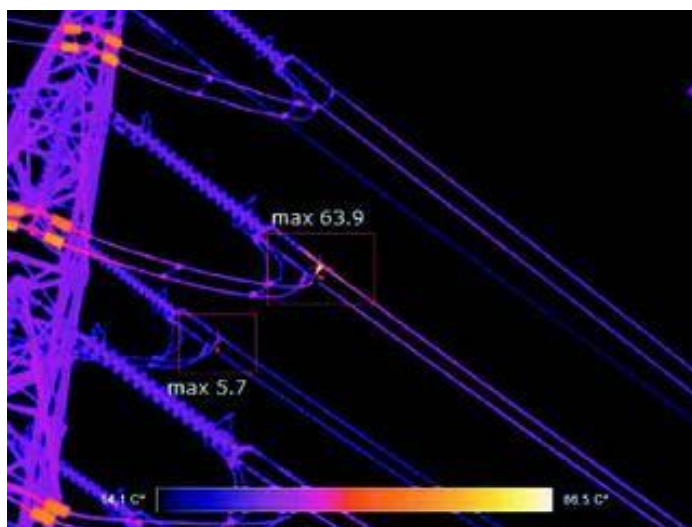
Rezolucija kamere je broj piksela detektora. Što je broj piksela veći, redovito su i detektori osjetljiviji, a cijene termokamera veće. Na nizu slika ispod prikazan je isti objekt sniman s kamerama različite rezolucije te kako rezolucija utječe na termogram.



Slika 62 Rezolucija 120 x 120 piksela (autor Krešimir Petrović, Kostelgrad d.o.o.)

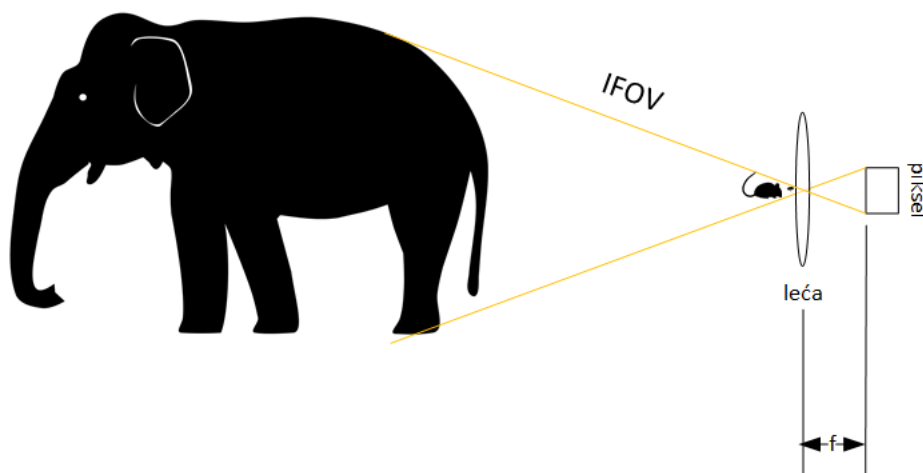


Slika 63 Rezolucija 320 x 240 piksela (autor Krešimir Petrović, Kostelgrad d.o.o.)



Slika 64 Rezolucija 640 x 480 piksela (autor Krešimir Petrović, Kostelgrad d.o.o.)

Prostorna rezolucija naziva se u termografiji IFOV – *Instantaneous field of view*. IFOV [4.1] predstavlja idealnu projekciju jednog piksela, vani kroz leću. Za manje udaljenosti od leće bit će to mala površina, a za veće, velika (ilustracija buhe, miša i slona, Slika 65).



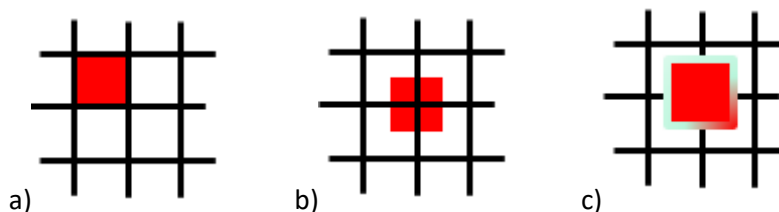
Slika 65 Ilustracija idealne projekcije jednog piksela kroz leću prema vani

Npr. za leću kuta 24° i 320 piksela detektora po horizontali, potrebno je podijeliti 320 s 24° te se dobije kut od $0,075^\circ$. Pretvaranjem stupnjeva u radijane dobije se $0,0013$ rad, odnosno 1,3 miliradijana. IFOV je za ovaj primjer $\text{IFOV} = 1,3$ mrad. Kut od 1,3 miliradijana može se interpretirati kao linija širine 1,3 mm na udaljenosti 1 m od leće.

$$24^\circ \text{ leća na } 320 \text{ piksela} \rightarrow 0,075^\circ \rightarrow 0,0013 \text{ rad} \rightarrow 1,3 \text{ mrad} \rightarrow 1,3 \text{ mm na } 1 \text{ m udaljenosti}$$

$$\text{IFOV} = 1,3 \text{ mrad} \tag{2.3}$$

IFOV bi bila idealna četvrtasta površina zagrijana na neku temperaturu koja padne točno na jedan piksel (Slika 66 a)). Taj bi piksel očitao temperaturu idealne površine pri idealnoj optici. Kako se ova površina može projicirati između više piksela (Slika 66 b)), jedan piksel registrirao bi dijelom temperaturu te površine, a dijelom temperaturu pozadine, te za rezultat dao neku usrednjenu vrijednost zračenja. Dakle, ne bi točno očitao temperaturu te zamišljene idealne površine veličine jednog piksela. Kako optika nije idealna, sama ova idealna površina bit će i nešto zamućena (Slika 66 c)).



Slika 66 Projiciranje površine oblika piksela na detektor (a – idealno na piksel, b – među pikselima, c – postoji zamućenje)

MFOV – *measured field of view* [4.1] predstavlja realni kut, s obzirom na to da je IFOV idealna veličina. Teorijski, trebalo bi da je pravokutna površina s prethodne ilustracije (Slika 66) veličine barem 2 x 2 piksela (dvostruka), kako bi u potpunosti svojom projekcijom prekrila piksel. Zbog ograničenja optike (Slika 66 c)) realno je potrebno da je površina veličine 3 x 3 (kod boljih leća) do 5 x 5 (kod lošijih leća) piksela kako bi jedan piksel u potpunosti bio prekriven projekcijom površine te ispravno očitao temperaturu. Za prethodni primjer leće od 24° i rezolucije 320 piksela po horizontali, gdje je IFOV = 1,3 mrad, MFOV bi bio trostruki do peterostruki, odnosno MFOV = 3 x IFOV = 3,9 mrad do MFOV = 5 x IFOV = 6,5 mrad.

$$\text{IFOV } 1,3 \text{ mrad} \rightarrow \text{MFOV } 3 \times 1,3 = 3,9 \text{ mrad} \quad (2.4.)$$

SSR – *spot size ratio* izvodi se iz MFOV-a. Npr. MFOV od 3,5 mrad predstavlja činjenicu da se optikom kvalitetno „vidi“ objekt veličine 3,5 mm na 1 m udaljenosti, odnosno 3,5 mm na 1000 mm udaljenosti. Podijeli li se odnos 3,5 mm : 1000 mm s iznosom 3,5 dobit će se približan odnos 1 : 286. Recipročno od ovog je SSR 286 : 1, a može se interpretirati na način da se optikom kvalitetno „vidi“ objekt od 1 m na 286 m udaljenosti, odnosno 1 cm na 286 cm udaljenosti, odnosno 1 mm na 286 mm itd.

$$\text{MFOV } 3,5 \text{ mrad} \rightarrow 3,5 \text{ mm na } 1 \text{ m} \rightarrow 3,5 \text{ mm} : 1000 \text{ mm} \rightarrow 286 : 1 \quad (2.5.)$$

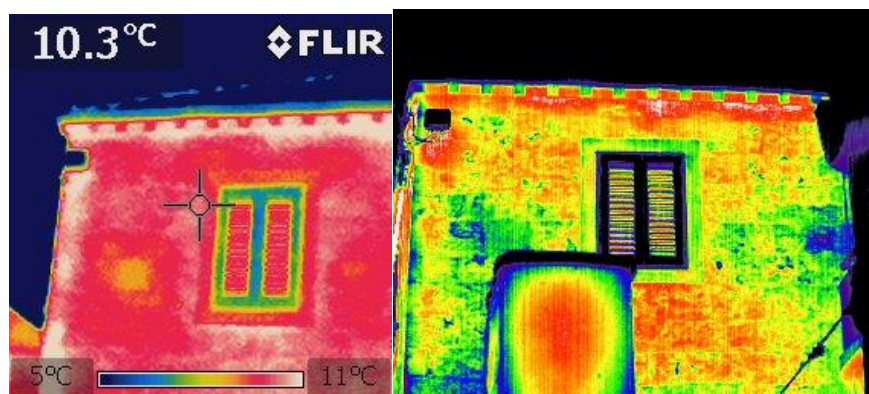
$$\text{SSR } 286 : 1 \rightarrow \text{dobro se "vidi" } 1 \text{ m objekt na } 286 \text{ m udaljenosti ili } 1 \text{ cm na } 286 \text{ cm ili...} \quad (2.6)$$

Preporuka kod odabira termokamere je birati onu sa što većim SSR-om i što kraćom udaljenosti fokusiranja. Optika takve kamere je onda kvalitetna optika.

4.3. Senzitivnost

Senzitivnost ili toplinska rezolucija, odnosno NETD – *noise equivalent temperature difference* [4.1] jest temperatura koju termokamera može razlučiti. Npr. 0,1 °C (ili 0,1 K) kod manje kvalitetnih odnosno 0,02 °C (ili 0,02 K) kod kvalitetnijih kamera. Vrlo je bitno da proizvođač termokamere navede pri kojoj je temperaturi izmjeren NETD, npr. pri 30 °C. Često manje pouzdani proizvođači kamera mjere NETD pri višim temperaturama, npr. 50 °C. Poput fotoaparata kad ima dovoljno svjetla, svaki će fotoaparat napraviti dobar snimak, dok kod malog osvjetljenja samo će kvalitetniji moći napraviti dobru snimku. Isto je i kod termokamera, pri višim temperaturama svaka kamera ostvaruje dobar snimak, no kod nižih temperatura zamijeti se razlika.

Na termogramima ispod (Slika 67) prikazan je utjecaj temperaturne osjetljivosti termokamere. Kako temperaturna osjetljivost ovisi o vrsti detektora, koji za sobom povlači i rezoluciju, sljedeći su primjeri ilustrativni jer pikselaze termokamera u primjeru nisu iste. Iz termograma se može zaključiti da veća osjetljivost znači manje šuma na termogramu.



Slika 67 Kadar iste zgrade snimljen termokamerom osjetljivosti 0,1 °C i rezolucije 140 x 140 te kadar termokamere osjetljivosti 0,02 °C i rezolucije 320 x 254 piksela

4.4. Pouzdanost

Pouzdanost mjerenja, engl. *accuracy*, predstavlja odstupanje izmjerene od stvarne temperature, npr. $\pm 2\%$, ili $\pm 1\text{ °C}$. Obratiti pažnju da se ovaj pojam ne miješa s preciznošću, koja predstavlja ponovljivost uzastopnih mjerenja istog objekta.

Literatura

[4.1] HRN EN 16714-2: 2016 Nerazorno ispitivanje – Termografsko ispitivanje – 2. dio: Oprema

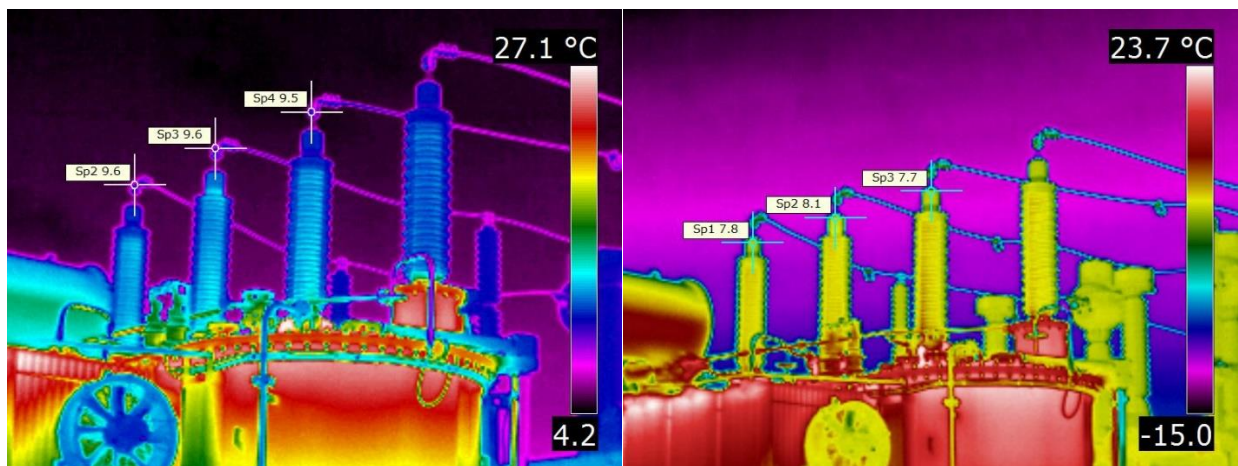
5. Utjecaj vjetra na termograme

Vjetar djeluje na objekte tako da ih rashlađuje. Kako bi se kompenzirao utjecaj vjetra, potrebno je izmjerenu temperaturu pomnožiti (uvećati) s korekcijskim faktorom. Ovaj faktor za brzinu vjetra od 1 m/s (2 čvora) računa kao da nema utjecaja vjetra. Dakle, sve do jednog čvora je bez utjecaja vjetra. Za brzinu od 8 m/s (16 čvorova) potrebno je povećati temperaturu za 2,54 puta. Ovo su iskustveni podaci i ne mogu se uzeti kao točne mjere s obzirom na to da geometrija objekta i zapreke u blizini bitno utječu na hlađenje objekta.

Tablica 5 Korekcijski faktor utjecaja vjetra [5.1]

brzina vjetra [m/s]	brzina vjetra [čvorova]	korekcijski faktor
1	2	1
2	4	1,36
3	6	1,64
4	8	1,86
5	10	2,06
6	12	2,23
7	14	2,40
8	16	2,54

Za brzine preko 8 m/s ne preporučuje se vršiti mjerenja. Slično kao vjetar, kiša i snijeg utječu na smanjenje temperature objekta, no za to ne postoje korekcijski faktori. Snimanja se uvjetno mogu vršiti po manjoj kiši ili snijegu, no valja imati na umu i činjenicu da je voda termografski neprozirna te prikazuje svoju temperaturu, a ne temperaturu objekta ispred kojeg se nalazi pahulja ili kapljica. Termogrami na slici 68 prikazuju energetski transformator 30/110 kV/kV, snage 20 MVA pri opterećenju oko 90%. Snimak je rađen pri približnom istom opterećenju i različitim brzinama vjetra (1 m/s lijevo i 4,5 m/s desno).



Slika 68 30/110 kV/kV transformator kod približno istog opterećenja i brzine vjetra od 1m/s (lijevo) i 4,5 m/s (desno)

Literatura

[5.1] Flir, User's manual Flir T series, Publ. No 1558792, 2010.

6. Aktivna termografija

Do sada je u tekstu bila opisana pasivna termografija gdje se termokamerom promatra temperaturna raspodjela topline tijela te se temeljem te raspodjele izvode neki zaključci. Aktivna termografija sadržana je u normi HRN EN 17119:2018. Ova metoda temelji se na izvoru topline koji pobuđuje toplinski tok kroz materijal, čime se omogućava bilježenje anomalija. Ovom se metodom u materijalima poput kompozita, metala te prevlaka detektiraju:

- diskontinuiteti u materijalu (šupljine, pukotine, uključci, delaminacija)
- utvrđuje debljina slojeva, odnosno dijelova
- utvrđuju i uspoređuju toplinska svojstva.

Aktivna termografija primjenjuje se u kontroli bez razaranja pri industrijskoj proizvodnji i održavanju. Kao izvor toplinskog toka mogu biti:

- svjetlo, infracrveno svjetlo i mikrovalovi
- elektromagnetska indukcija i električna struja
- prijenos mehaničkih valova (npr. ultrazvukom ili raznim aktuatorima)
- konvekcijom ili strujanjem (strujanjem, npr. hladni ili topli zrak)
- kondukcijom ili provođenjem (metoda „hot blanket“ – vrućeg prekrivača)

Ova uzbuda može biti:

- lokalna uzbuda – npr. točka zagrijana laserom ili linija zagrijana laserom čime se detektiraju anomalije usmjerene u svim smjerovima s obzirom na površinu
- dvodimenzionalna uzbuda – površina, pri čemu se koriste halogene lampe (kompoziti), xenonski blicevi (metal) ili set sapnica sa zrakom.
- uzbuda čitavog volumena – ultrazvuk ili mikrovalovi.



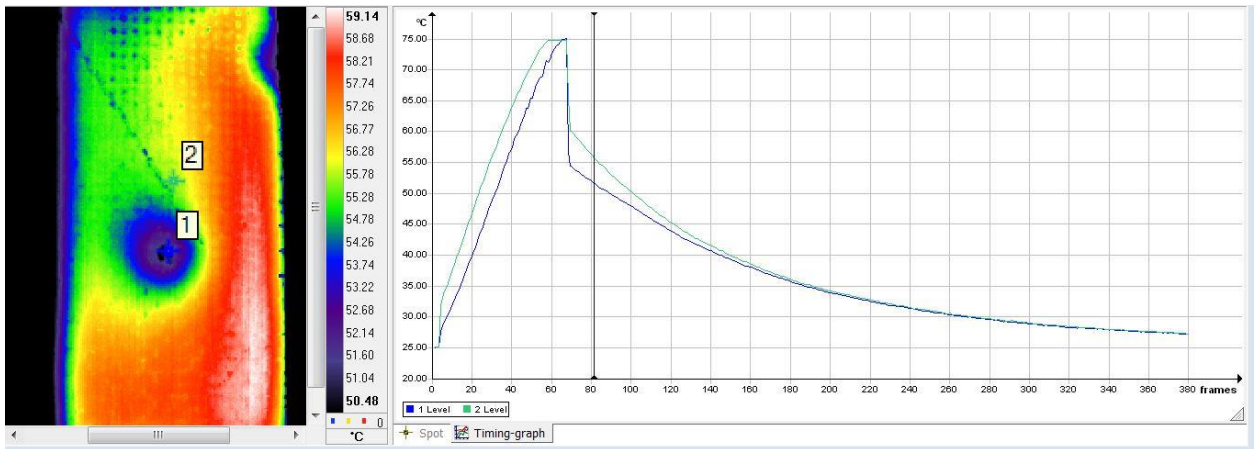
Slika 69 Halogene lampe kao izvor kod kompozita



Slika 70 Xenonska bljeskalica kao izvor

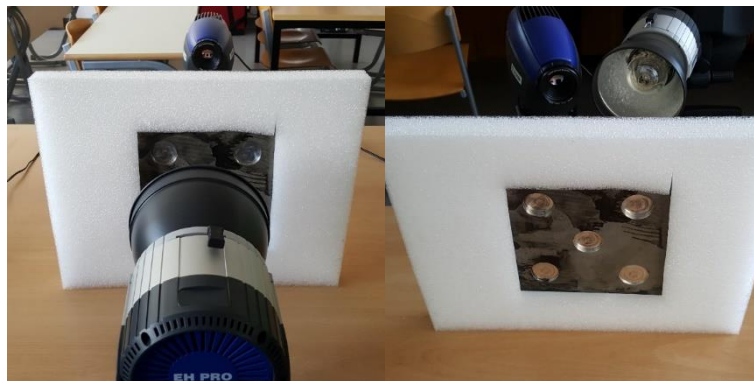
Vrste uzbuda s obzirom na vrijeme djelovanja mogu biti:

- pulsna termografija – zagrijavanje kratkim impulsom, npr. kod kompozita izvor (halogena lampa) se uključi na 2 min, te ugasi i snima proces hlađenja. Ovo se može smatrati Diracovim impulsom te ga se kao takvog kasnije može razlagati brzom Fourierovom transformacijom ili samo promatrati prve termograme hlađenja kad su kontrasti najizraženiji. Kod metala se mogu koristiti jake xsenonske bljeskalice.
- step termografija – slična pulsnoj, samo što se izvor uzastopce pali i gasi. Kasnije se signal analizira u frekvencijskog domeni (brza Fourierova transformacija) ili vremenskoj domeni.
- Lock-in termografija – izvor se periodički modulira, a izvor može biti sinusni ili četvrtasti. Npr. sinusno paljenje i gašenje reflektora, pri čemu je potrebno frekvenciju paljenja i gašenja mijenjati. Snima se nekoliko perioda, a jedan period (puna sinusoida) treba imati barem četiri termograma. Promjena frekvencija ovisi o dubini na kojoj se lociraju anomalije, a ovisi i o termalnoj difuzivnosti (bit će kasnije opisana). Snimci se dalje obrađuje u frekvencijskoj domeni (brza Furierova transformacija).



Slika 71 Primjer impulsnog zagrijavanja i procesa hlađenja

S obzirom na poziciju postavljanja izvora, razlikuje se refleksijska konfiguracija (kamera i izvor s iste strane objekta) i transmisijska konfiguracija (izvor s druge strane objekta). Refleksijska konfiguracija ima za posljedicu česte probleme s refleksijom topline od samog izvora, što ovisi o reflektivnosti (emisivnosti same površine). Transmisijska konfiguracija nema problema sa refleksijama, no i dalje je potrebno voditi računa o eventualnoj transmitivnosti materijala, što bi utjecalo na mjerenja., Transmisijsku konfiguraciju često je nemoguće provesti iz razloga što se ne može postaviti izvor s druge strane objekta.



Slika 72 Transmisijska (lijevo) i refleksijska (desno) konfiguracija

6.1. Tehnike obrade podataka kod aktivne termografije

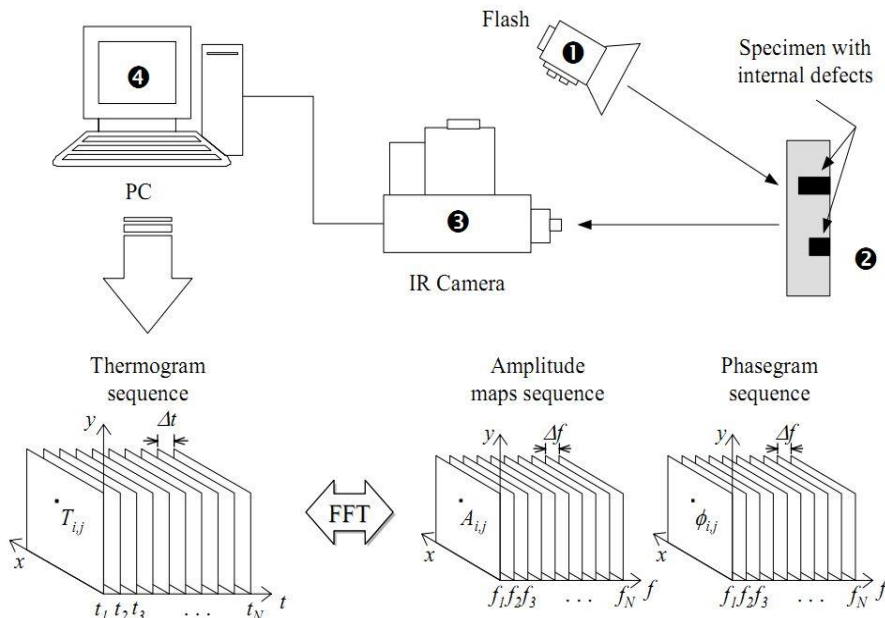
Podaci kamere mogu biti jedan snimak, slijed termograma, odnosno temperaturna promjena u vremenu na razini svakog piksela. Ovi se podaci matematički obrađuju s ciljem postizanja boljeg kontrasta zbog mogućnosti detekcije anomalija.

Obrada podataka u vremenskoj domeni svodi se na praćenje promjena u vremenu. Najčešće se promatra temperaturni kontrast kao razlika temperatura svakog pojedinog piksela za referentno i kontrolirano područje, odnosno za svaki (i,j) piksel u vremenu t je relativni temperaturni kontrast

$$C(i, j, t) = \frac{\Delta T_d(i, j, t)}{\Delta T_s(t)} = \frac{T_d(i, j, t) - T_d(i, j, t=0)}{T_s(t) - T_s(t=0)}, \quad (6.1.)$$

gdje T_s predstavlja temperaturu (ili zračenje) referentnog područja, a T_d temperaturu (zračenje) kontroliranog područja. Pod zračenjem se podrazumijeva izvorni podatak prije negoli je pretvoren u temperaturni zapis temeljem kalibracijskih podataka kamere. Analizom ovih podataka u odnosu na izvorni zapis, odnosno promatranjem kontrasta omogućava se smanjenje utjecaja okoline, tj. eliminacija dijelova termograma koji se ne mijenjaju s obzirom na referentno područje. Dalje se može promatrati logaritam razlike referentnog područja i promatranog $\log(\Delta T)$ s obzirom na logaritam vremena $\log(t)$. Relativni temperaturni kontrast, maksimalni temperaturni kontrast i odnos logaritama ovise o različitim toplinskim svojstvima materijala, eventualnim diskontinuitetima (indikacijama) i vrsti izvora.

Obrada podataka u frekvencijskoj domeni podatke iz vremenske domene prebacuje u amplitudno frekvencijsku domenu, odnosno za svaki piksel, kao funkciju svoje pozicije i vremena $f(i, j, t)$, brzom Furierovom transformacijom FFT pretvara u amplitudne i fazne grafe [6.1], [6.2], [6.3], [6.4]. Dakle, termogrami se u vremenu prikazuju kao funkcije amplitudnih i faznih razlika s obzirom na frekvenciju. Iz vremenske domene prelazi se u frekvencijsku domenu. U principu FFT neki signal razlaže u određeni broj sinusoida koji sumirani daju signal sličan izvornom te se potom vrši analiza amplituda i faznih pomaka za svaki piksel. Postoje i druge transformacije, poput valićnih [6.5], [6.3], gdje se vrijeme kao varijabla ne gubi, no najčešće se koristi FFT transformacija radi njene robusnosti.



Slika 73 Princip FFT, [6.1]

Bilo da se radi o Lock-in termografiji (sinusoidna uzbuda i sinusoidni odgovor), bilo o pulsnoj termografiji, uvijek vrši se analiza frekvencijskog spektra. Za neku frekvenciju f_n se za svaki piksel FFT transformacija definira kao

$$F_n(f_n) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k) e^{2\pi k f_n / N} = Re(F_n) + Im(F_n), \quad (6.2.)$$

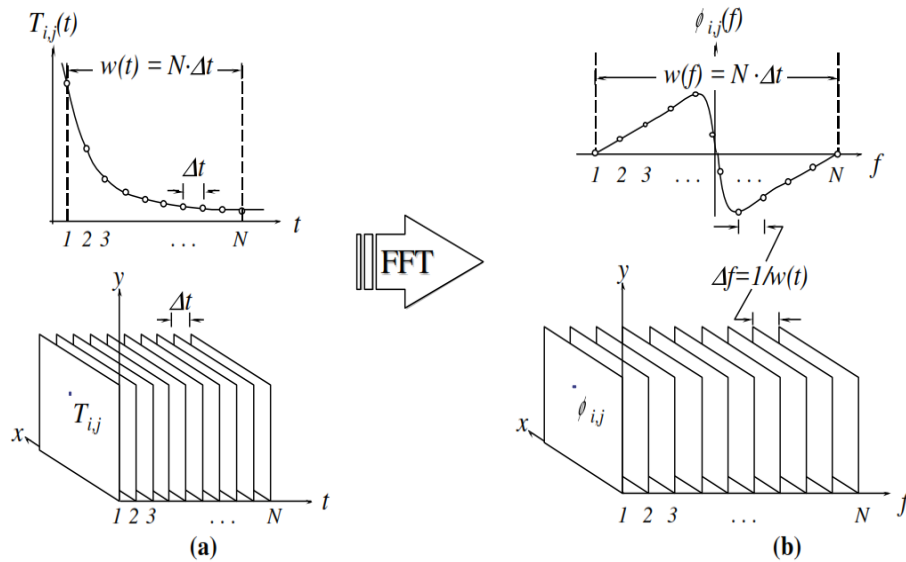
$$A_n(F_n) = \sqrt{\text{Re}(F_n)^2 + \text{Im}(F_n)^2}, \quad (6.3.)$$

$$\Phi(F_n) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(F_n)}{\text{Re}(F_n)} \right), \quad (6.4.)$$

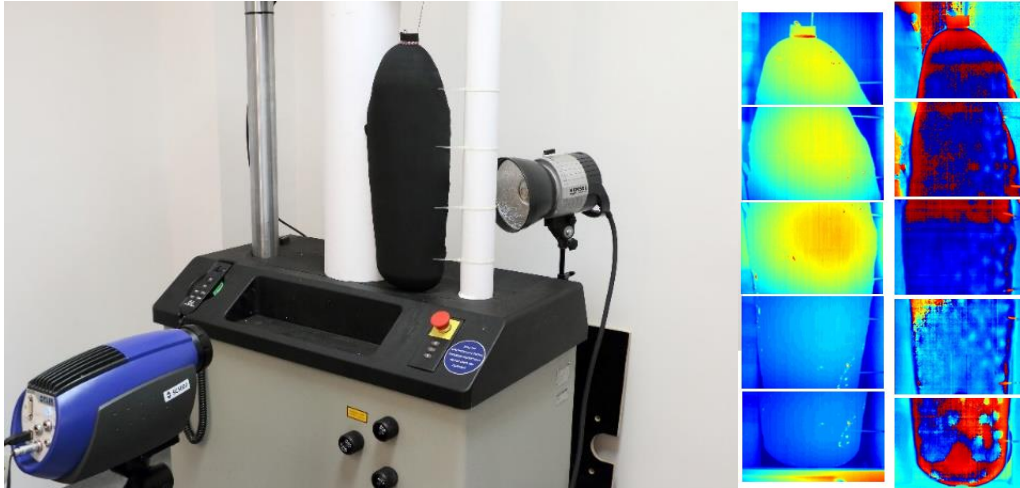
gdje je k indeks termograma u sekvenciji, N ukupni broj termograma sekvenci, n inkrement frekvencije. Frekvencije su za Lock-in termografiju obično oko frekvencije same uzbude i prema većim frekvencijama, dok su kod pulsne termografije. Amplitudegrami (amplituda kao funkcije frekvencije f_n) daju maksimalnu razliku između temperature (ili zračenja) za frekvenciju f_n te otkrivaju indikacije slično analizi temperaturnog kontrasta u vremenskoj domeni. Fazegrami opisuju vremensko kašnjenje s obzirom na frekvenciju f_n . Fazegrami otkrivaju puno više, a najveći kontrast fazograma dobije se za polovinu $N/2$ ukupnog broja N analiziranih termograma. Ta frekvencija definira se kao

$$f_n = \frac{n}{N\Delta t}; \quad n = 1, \dots, N/2,$$

gdje je Δt vremenska rezolucija, a n frekvencijski inkrement



Slika 74 FFT transformacija iz vremenske u faznu domenu [6.1]



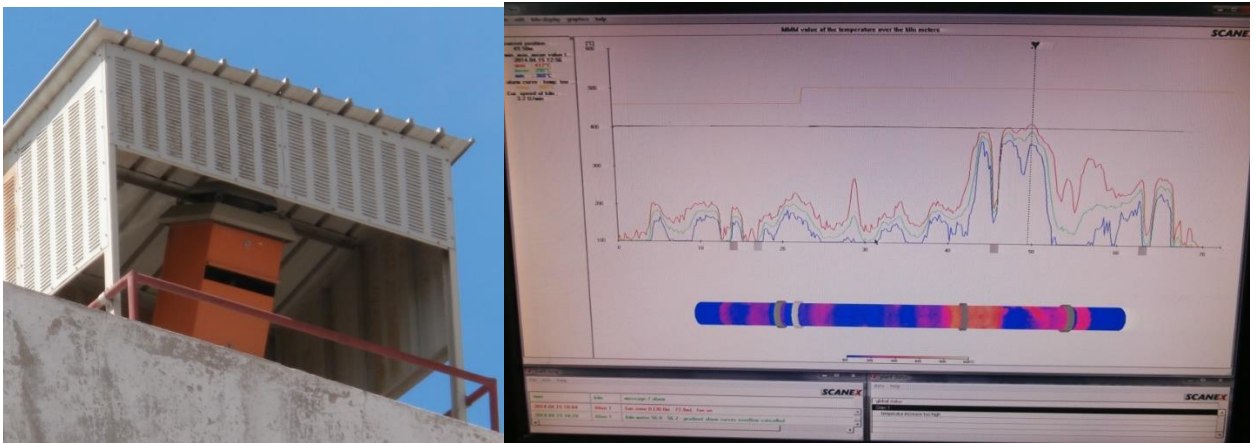
Slika 75 Transmisijska termografija korodirane ronilačke boce, termogram (lijevo) i fazegram (desno)

Literatura

- [6.1] Clemente Ibarra Castanedo, Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: Depth retrieval with the phase, Ph.D. thesis, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, 2005
- [6.2] Bojan Milovanović, Karakterizacija oštećenja armiranog betona primjenom metode infracrvene termografije, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2013.
- [6.3] Endri Garafulić, Detekcija i procjena oštećenja kompozitnih struktura primjenom aktivne metode infracrvene termografije, doktorski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje, Split, 2013.
- [6.4] Petra Bagavac, Primjena infracrvene termografije na karakterizaciju geometrijskih, fizikalnih i mehaničkih svojstava materijala, doktorski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje, Split, 2021.
- [6.5] X. Maldague, Y. Largoutit, J. Couturier, A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments, Elsevier, 1998.

7. Primjena infracrvene termografije u strojarstvu

Kako je široko područje strojarstva, tako je i široka primjena infracrvene termografije. Od strojogradnje, preko praćenja industrijskih postrojenja, pogona, motora, evaluacije trenja pa sve do evaluacije konstrukcija u kontroli bez razaranja. Izuzme li se ovo posljednje (kontrola bez razaranja), obično se radi o procesima gdje ima dovoljno topline na raspolaganju te zahtjevi na termografsku opremu nisu previše visoki. Dovoljne su termokamere srednje osjetljivosti kako bi se dobili kvalitetni rezultati. Logika je ista kao i kod fotografiranja gdje je i pametni telefon dovoljan za dobru fotografiju ako je dovoljno svjetla na raspolaganju.



Slika 76 Nadzor stanja šamotne izolacije cijevi rotacijske peći klinkera u Cemexu (Kaštela)

7.1. Analiza konstrukcija u okviru kontrole bez razaranja (NDT)

Naglim porastom korištenja kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji (Boeing 787 Dreamliner, Airbusova crna flota), gdje vodeću ulogu danas preuzimaju ugljikovi kompoziti, pojavila se potreba za razvojem pouzdanih metoda kontrole bez razaranja (KBR ili NDT). Kako su kompoziti temeljeni na polimernim matricama i vlaknima (staklo, ugljik, kevlar...) problematični kod primjena uobičajenih metoda KBR-a, termografija se javila kao prihvatljiv odgovor na rastuću potrebu kontrole polimernih kompozitnih materijala. Primjerice, ugljikov kompozit je za X zrake skoro „proziran“. Ultrazvuk, iako primjenjiv, zahtijeva korištenje ultrazvučnih sondi niske frekvencije čiji je odziv dosta težak za tumačenje indikacija. Pri kontroli je vrlo teško razlikovati vlakno od indikacije. Međuslojevi poput Koromata onemogućuju analizu ultrazvukom, vlaga u materijalu plovila utječe na jačinu uočljivosti indikacije, a tehnologija proizvodnje poput vakuum tehnologije bitno mijenja karakteristike odziva.

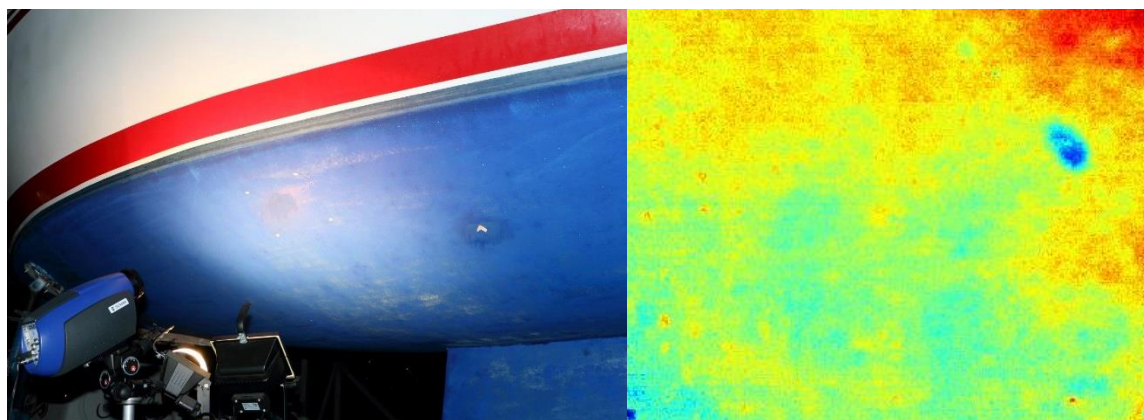
Termografija u kontroli bez razaranja pokazala se kao pouzdana i ponovljiva metoda. Iz početka, tranzijentna termografija gdje su se s druge strane površine postavljali grijači (npr. *hot blanket* metoda) davala je prve rezultate, no utjecaj izloženosti grijaču djelovao je na ponovljivost očitavanja.

Danas je u primjeni uglavnom aktivna termografija kod koje se kao izvor najčešće koriste halogeni reflektori, popraćeni kasnijim filtriranjem i obradom signala. Razni su pristupi u primjeni, poput jednog pulsa, dvostrukog pulsa, no najviše se koristi sinusoidalna svjetlosna pobuda (paljenje i gašenje reflektora definiranom učestalošću) popraćena obradom signala poput brze Fourierove transformacije, što je opisano u poglavlju 6.1. *Tehnike obrade podataka kod aktivne termografije.*

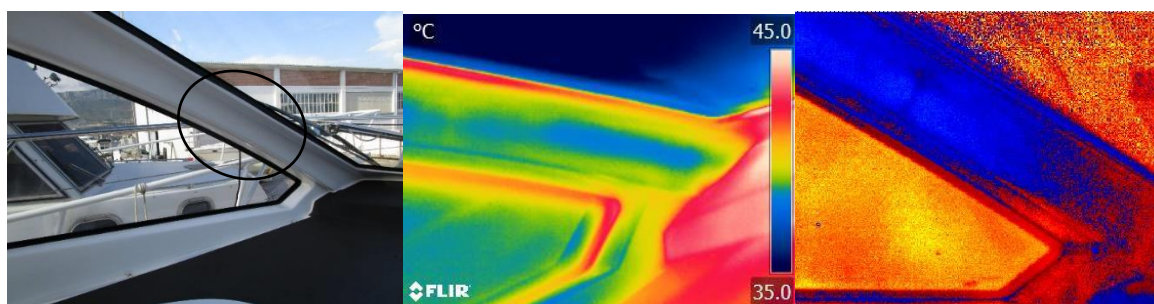
Jednostavne metode poput pulsne termografije mogu locirati indikacije. Kratkim zagrijavanjem kompozita (npr. 2 minute grijanja halogenim reflektorom od 1 kW) dobit će se temperaturni kontrast koji će ukazati na indikaciju (Slika 71 Primjer impulsnog zagrijavanja i procesa hlađenja), no takvim pristupom ne može se utvrditi točna dubina i dimenzija. Provođenjem FFT-a (brze Fourierove transformacije) te analizom fazograma znatno se poboljšava uspješnost metode.



Slika 77 Fazegram delaminacija uslijed osmoze na trupu plovila

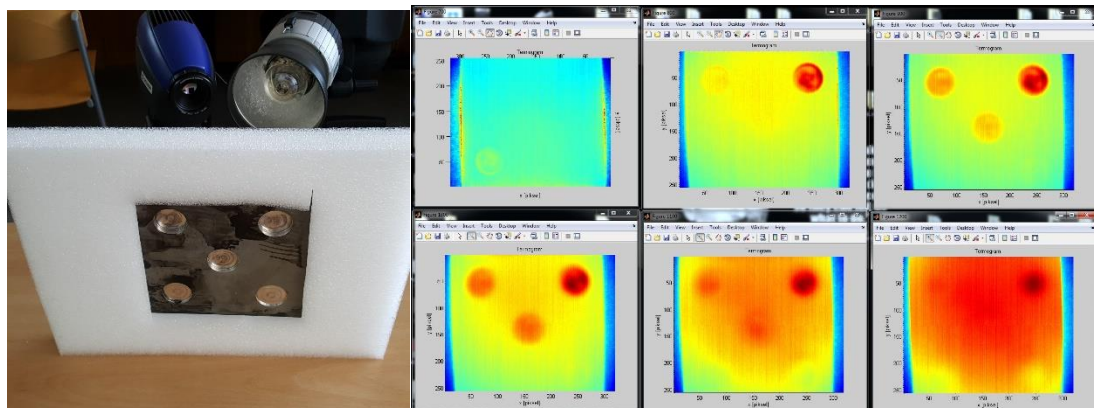


Slika 78 Fazegram osmotskih oštećenja kod trupa brodice (plavo)

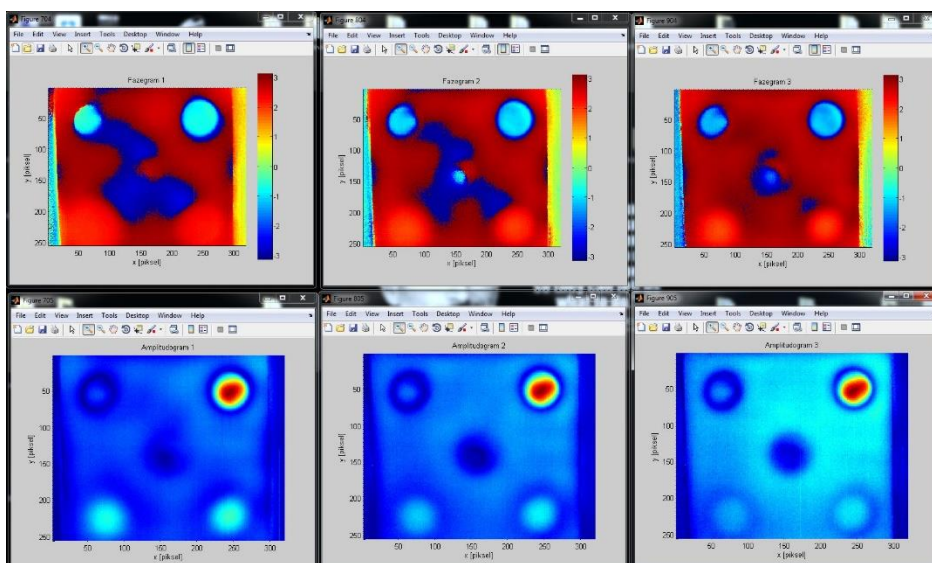


Slika 79 Nedostatak smole u nosaču vjetrobrana brodice, termogram (sredina) i fazegram (desno)

Komercijalne metode i sustavi kontrole bez razaranja uglavnom se ograničavaju na kompozite. Kod metala je također primjenljiva aktivna termografija, no kako se radi o materijalima znatno veće toplinske vodljivosti, brzina dovođenja energije toplinskog toka treba biti znatno brža pa se koriste xenonske bljeskalice. Uglavnom se radi o izvorima koji emitiraju 6 kJ u 1/440 s [6.4], skupim sustavima koji su primjenljivi na kompozitima, međutim zbog prebrzog dovođenja velike količine energije, koja se radi manje provodljivosti sporije odvodi, lako dolazi do oštećenja kompozita te se ovakvi izvori na kompozitima ne preporučuju.



Slika 80 Refleksijska termografija aluminijeve ploče s provrtima ravnog dna izvedenim s raznim dubinama i izvorni termogrami

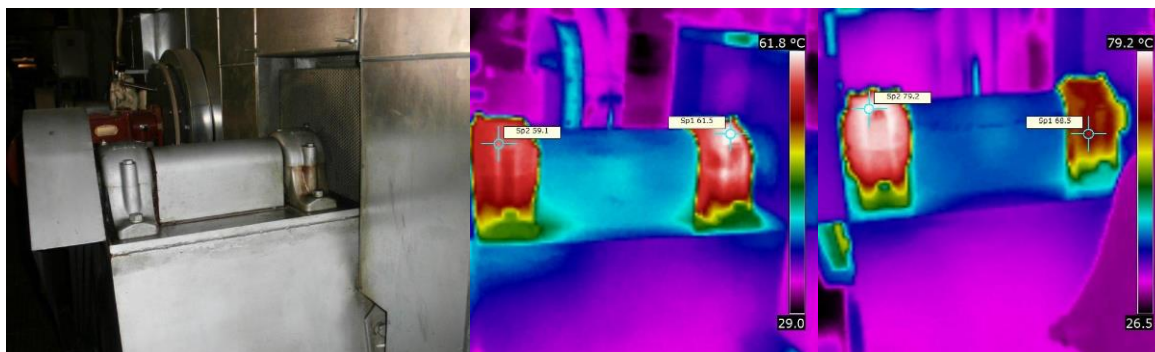


Slika 81 Fazegrami (gornji red) i amplitudegrami (donji red) nakon provedene FFT

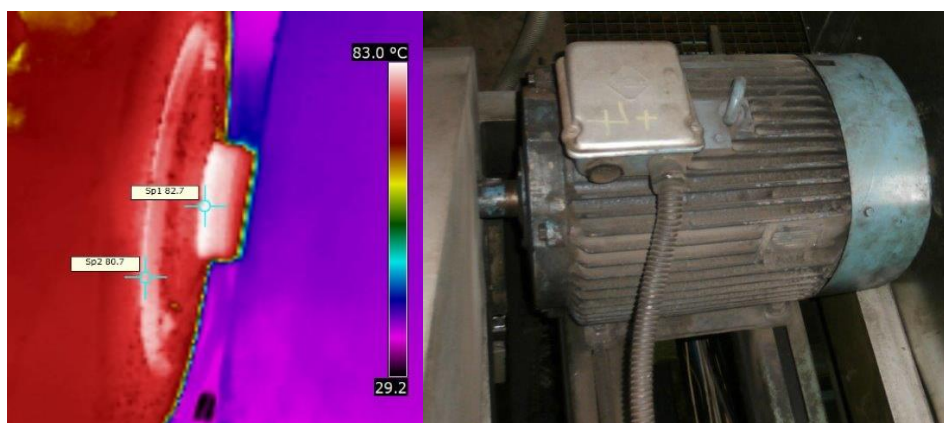
7.2. Trenje

Poput primjene u dijagnostici, održavanju i praćenju u elektrotehnici, termografija ima široku primjenu u dijagnostici, praćenju i održavanju strojeva i postrojenja. Povišena temperatura valjnih i kliznih ležaja

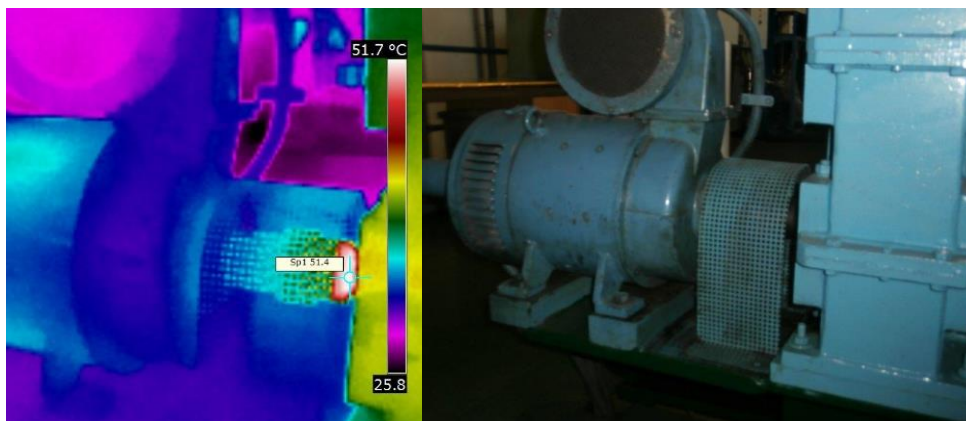
omogućava da se na vrijeme spriječi zastoј ili havarija. Iskustvo govori da sve preko 80 °C ukazuje na moguć kvar ležaja. Valjni ležajevi često sadrže brončane blazinice s površinskim kontaktnim slojem iz bijele kovine koja se kod 110 °C tali pa je hitno potrebno reagirati i zamijeniti ležaj. Zastoј u dovođenju ulja za podmazivanje izaziva rast temperature te ubrzo i zaribavanje kliznog ležaja. Termografija omogućava kontrolu i sprječavanje ovakvih problema bez zaustavljanja stroja ili pogona i bez utjecaja na proizvodni proces ako se o tome radi. Sljedeći termogrami snimani su kamerom 140 x 140 piksela i osjetljivosti 0,1 °C, što nisu neke performanse, a priloženi termogrami pokazuju kako je i takva kamera dovoljna u strojarstvu kad postoji dovoljna razina temperature.



Slika 82 Pregrijani klizni ležajevi proizvodne linije u punom pogonu



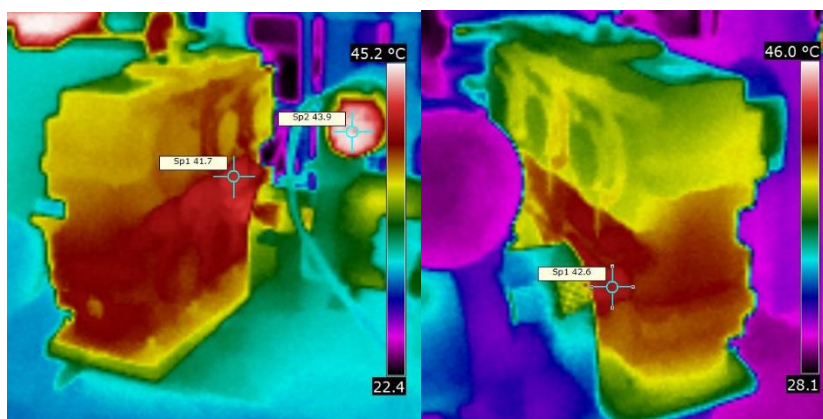
Slika 83 Pregrijani valjni ležaj elektromotora proizvodne linije u pogonu



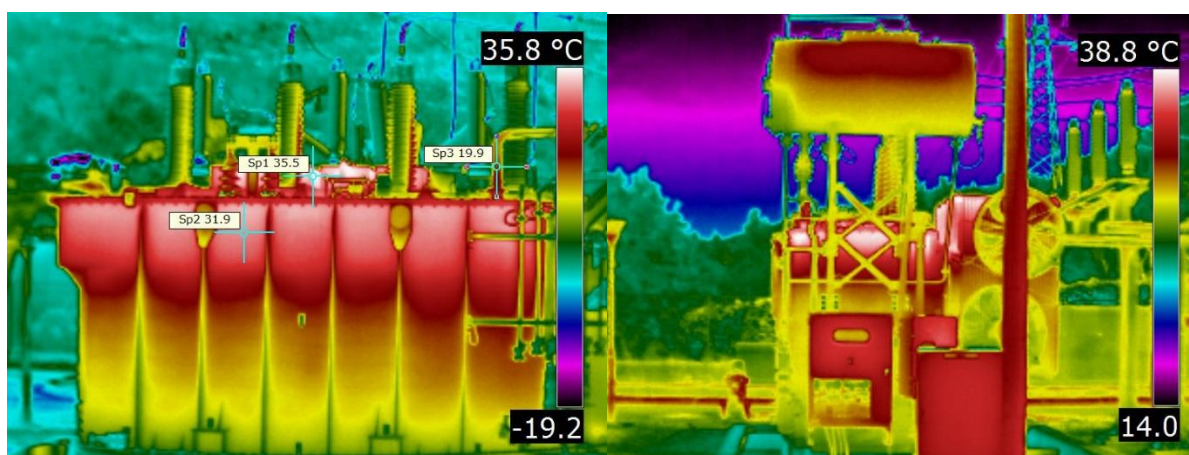
Slika 84 Pregrijani valjni ležaj reduktora

7.3. Razina tekućine

Čim postoji razlika temperature u tekućini u spremniku i okolini, postaje vidljiva razina tekućine ili rastresite tvari u spremniku. Primjeri su spremnici goriva, spremnici ukapljenih plinova, spremnici i silosi rastresitih tvari i sl. Kod velikih spremnika i silosa tijekom dana dolazi do razlike u temperaturi sadržaja spremnika (silosa) i okoline te je lako uočiti razinu sadržaja. Primjer reduktora u pogonu (Slika 85) zorno prikazuje mogućnosti termografije kod uređaja pri čemu se ne zaustavlja rad pogona.



Slika 85 Razina ulja u reduktoru proizvodne linije u pogonu



Slika 86 Razina ulja u transformatoru/konzervatoru ulja

7.4. Termoelastičnost

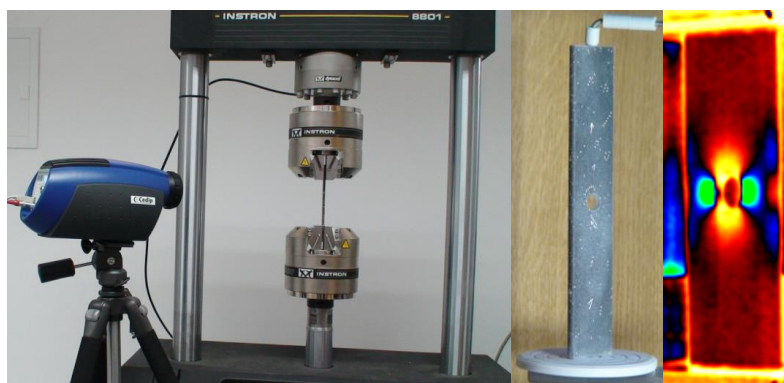
Termoelastičnost ili termoelastična analiza naprezanja omogućuje odrediti raspodjelu naprezanja ciklički opterećenog dijela konstrukcije u elastičnom području opterećenja. Princip se temelji na činjenici da se

prilikom sabijanja tvari (krutina, tekućina, plin) povećava temperatura tvari, a razvlačenjem (ekspanzijom) pada temperatura. Gdje je veće sabijanje i razvlačenje, veća je razlika u temperaturama između ova dva stanja. Na mjestima gdje postoji povećano naprezanje (koncentracija naprezanja), sabijanje/razvlačenje ciklički opterećenog tijela je intenzivnije pa su intenzivniji i temperaturni bljeskovi.

Osnovna jednadžba termoelastičnosti za kvaziadijabatsko stanje glasi:

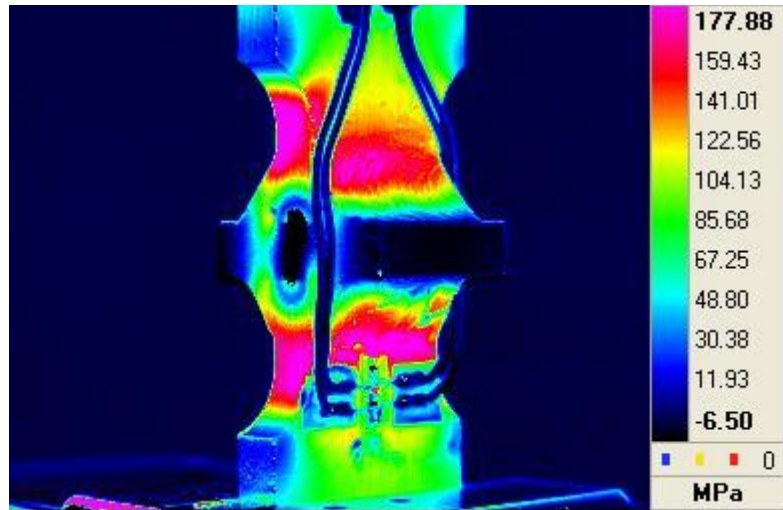
$$\Delta T = \frac{-\alpha T}{\rho C_p} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (7.1.)$$

gdje je ΔT promjena temperature koju termokamera registrira. Izrazi ispred zagrade su konstantni tijekom snimanja (α koeficijent temperaturnog širenja, T temperatura okoline objekta, ρ gustoća, C_p specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku). Zbroj naprezanja u zagradi predstavlja zbroj dva glavna naprezanja. Treće glavno naprezanje je nula s obzirom na to da se promatra površina predmeta gdje nema naprezanja okomito na površinu. Da bi jednadžba vrijedila, potrebno je adijabatsko stanje što znači da nema dovođenja i odvođenja energije, a što ovdje kod cikličkog opterećenja i provođenja topline nije slučaj. Međutim, kad se radi o brzim promjenama (frekvencija oko 10 Hz), smatra se da se radi o kvaziadijabatskom stanju te se jednadžba može koristiti u određivanju zbroja glavnih naprezanja, odnosno temeljem ovih naprezanja same koncentracije naprezanja.



Slika 87 Temperaturna raspodjela ciklički opterećene trake s rupom

Frekvencije od oko 10 Hz te kasnija obrada snimke termograma zahtijeva srednjevalnu hlađenu termokameru. Kako bi se dobila kvalitetna snimka iz koje je moguće jednadžbom termoelastičnosti dobiti raspodjelu i očitavanje naprezanja, potrebna je i dodatna hardverska komponenta, tzv. Lock-in. Ova komponenta omogućava praćenje sinusoidalnog opterećenja te uz pomoć FFT-a određivanje raspodjele. Uvjet je da u periodu jedne sinusoide opterećenja postoji barem četiri snimke pri čemu se frekvencija akvizicije treba razlikovati od frekvencije opterećenja i njihovih multiplikatora (bilo da se multiplicira akvizicija bilo frekvencija opterećenja).



Slika 88 Raspodjela naprezanja oko ciklički opterećenog uzorka s krutim zavarima upotrebom Lock-in hardverske komponente i nakon obrade signala

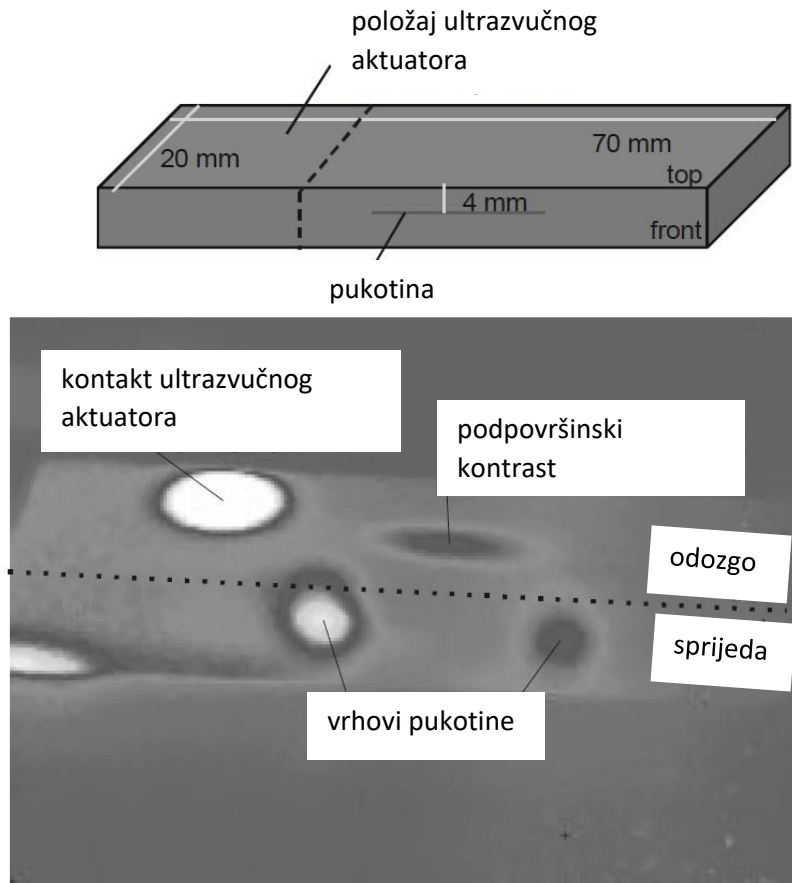
7.5. Ultrazvuk kao metoda potvrde nalaza

Kao što je već prethodno opisano, kako bi se u materijalu pobudila razlika u toplinskom toku te detektirale indikacije, nužna je energija. Slično je i s ultrazvukom koji se koristi kao izvor energije, odnosno lokalnog cikličkog opterećenja koje temeljem principa termoelastičnosti u vidu temperaturne razlike prikazuje indikacije u materijalu.

Ova se metoda naziva sonotermografija ili vibrotermografija. Omogućava primjenu na metalima i nemetalima te detekciju otvorenih i zatvorenih pukotina bez obzira na smjer. Najčešće se primjenjuje kod provjere točkastih zavara, lijepljenih spojeva te zavara.

Na slici (Slika 89) prikazan je primjer oštećenja keramičkog uzorka koji je pobuđen frekvencijom od 20,8 kHz u trajanju od 0,8 s. Slika prikazuje temperaturnu raspodjelu snimljenu 4 s nakon djelovanja ultrazvuka.

Karakteristično za ovu metodu jest da dolazi do zagrijavanja samo pukotina pa je detekcija jednostavna, ali i lokalna jer se efekt javlja u polju djelovanja ultrazvuka.



Slika 89 Sonotermografija na uzorku keramike [7.1]

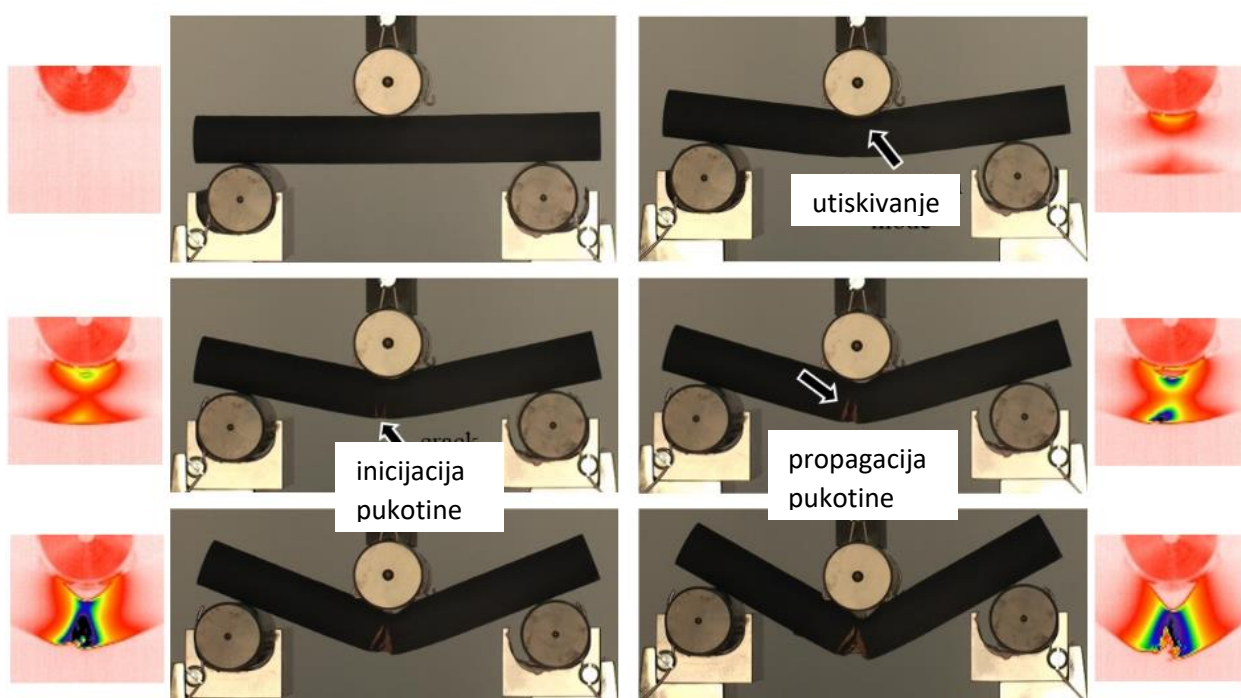


Slika 90 Eksperimentalni postav s ultrazvučnim aktuatorima [7.2]

7.6. Dinamičko tečenje materijala

Optereti li se materijal preko granice tečenja, dolazi do generiranja topline. Razlike u toplinskim bljeskovima kod termoelastične analize naprezanja su veličine reda desetine stupnja. Iznosi kod plastičnog deformiranja, loma ili tečenja materijala su nekoliko desetaka stupnjeva. Tragovi ovakvog zagrijavanja dugo se zadržavaju na predmetu. Pusti li se drvena letva da slobodno padne na pod, zamijetit će se topli trag na mjestu udara koji se zadržava neko vrijeme nakon udara. Kod termoelastičnosti toplinski efekt nestaje odmah po rasterećenju materijala i nema zaostale topline.

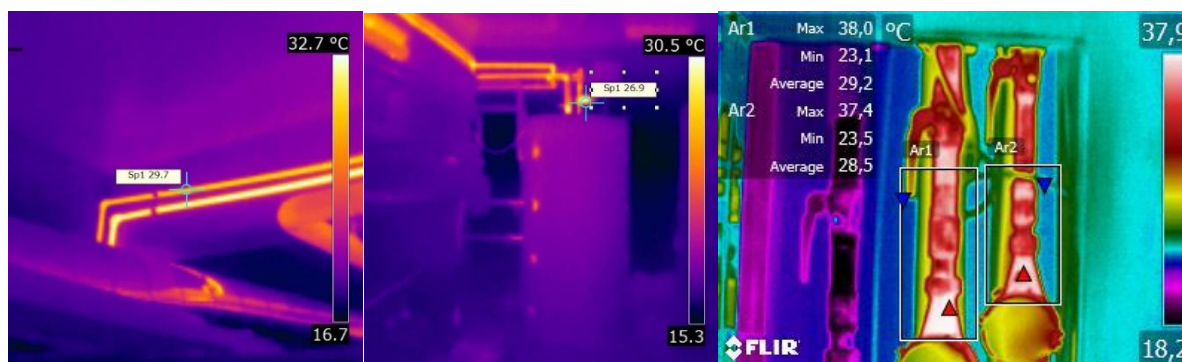
Na mjestima gdje dolazi do plastične deformacije ili loma materijala dolazi i do znatnog povećanja temperature. Kod kvazistatičkih opterećenja, pogotovo kad se radi o metalima, brzo se odvodi generirana toplina te je efekt smanjen radi odvođenja topline u susjedni materijal. Kod bržih opterećenja efekt je znatno veći i lakši za kasniju analizu. Koristi se pri ispitivanju delaminacija i udarnih opterećenja kod kompozita. Širenje plastifikacije pri opterećivanju metala daje bitne informacije o mehanizmu kolapsa konstrukcije ili pak o svojstvima apsorpcije energije materijala poput metalnih pjena.



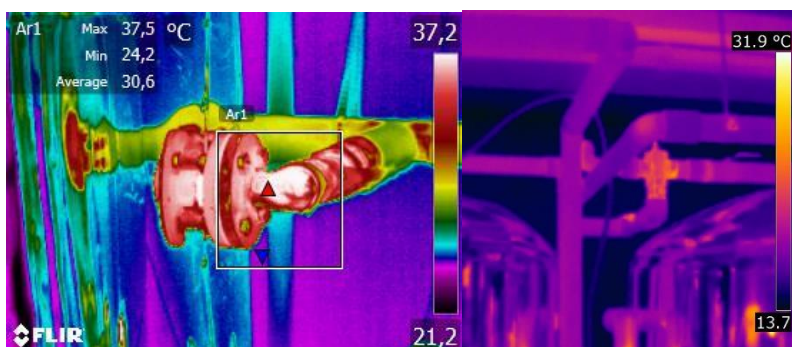
Slika 91 Raspodjela temperature prilikom plastičnog tečenja materijala kod opterećenja na savijanje [7.3]

7.7. Energetska postrojenja

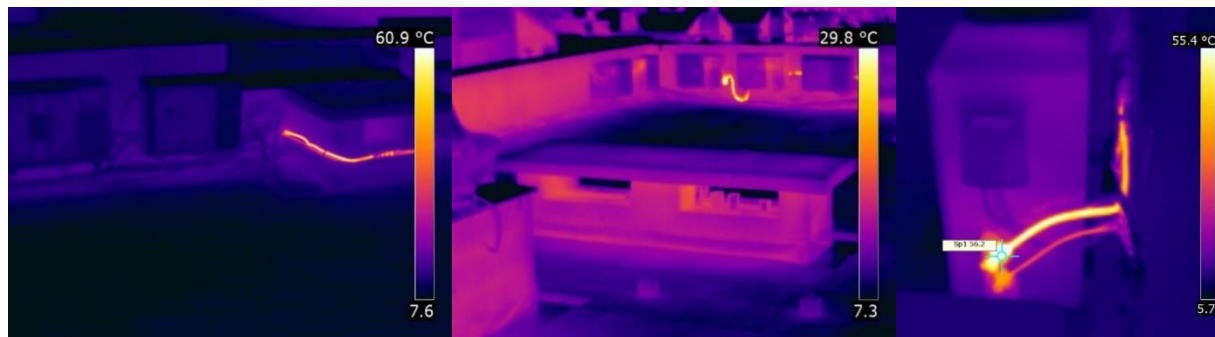
Velik je broj primjera korištenja termografije u energetske postrojenjima. Primarno se tu radi o procjeni izoliranosti kotlova, spremnika i energetskih vodova. Pri kontroli sustava za grijanje, hlađenje, ventilaciju i klimatizaciju kod energetskih pregleda zgrada, termografija je nezaobilazna metoda i izvor niza preporuka za povećanje energetske učinkovitosti temeljem lociranja nedovoljno izoliranih elemenata sustava. Proračun razlike u gubicima jednostavan je, mjere za dodavanje izolacije jeftine, a povrat investicije brz. Ovdje su navedeni samo neki primjeri procjene energetskih svojstava sustava grijanja, hlađenja, ventilacije i klimatizacije u zgradama.



Slika 92 Pomanjkanje ili potpuni izostanak izolacije cijevi za pripremu tople vode



Slika 93 Nedostatak izolacije na spojnim elementima i ventilima



Slika 94 Degradacija izolacije originalnih cijevi dizalica topline

Literatura

- [7.1] G. Walle, M. Abuhamad, E. Toma, and U. Netzelmann, Defect indications in sono-thermography in relation to defect location and structure, QUIRT, 2004, (<http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2004.033>)
- [7.2] <https://www.edevis.com/de/produkte/laborpruefsysteme/utvis/>)
- [7.3] M. Vesenjāk, K. Hokamoto, R. Tsunoda, T. Nishi, L. Krstulović-Opara, Z. Ren, Mechanical and microstructural analysis of unidirectional porous (unipore) copper, Materials & Design, 90, 867-880, 2016.

8. Elektrotehnika

8.1. Općenito o termografskim pregledima električnih postrojenja i opreme

Termografska se ispitivanja provode preventivno s ciljem ranog otkrivanja uzroka opasnog zagrijavanja. Na taj način moguće je pravodobno intervenirati i spriječiti velike prekide pogona, velika oštećenja, havarije, a s tim u vezi i velike novčane troškove. U elektrotehnici, ispitivanje električne opreme najčešće ukazuje na probleme uzrokovane odnosima struje i otpora. Općenito, "topla mjesta" se u električnim strujnim krugovima pojavljuju kao posljedica nedovoljno pritegnutih, oksidiranih ili korodiranih spojeva, ali i uslijed nepravilnog rada samog elementa elektroenergetskog postrojenja. Ovakva mjesta zagrijavanja mogu dovesti do neželjenih prekida pogona, velikih oštećenja u postrojenju te havarija koje su praćene velikim novčanim troškovima. Razvojem tehnologije došlo se do mjerne metode, tzv. termografije, pomoću koje je moguće otkriti i spriječiti kvarove izazvane povišenim temperaturama. Ova mjerna metoda izvedena je iz vojne tehnologije razvojem opreme za lokaciju izvora zračenja topline bez neposrednog kontakta s objektom. Razvoj tehnologije iskoristio je fizikalno svojstvo materijala da je svako tijelo toplije od apsolutne nule izvor elektromagnetskog (infracrvenog) zračenja. Zračenje je posljedica vibracija uzrokovanih kaotičnim termičkim gibanjem molekula u tijelu materije. Po klasičnoj termodinamičkoj teoriji, na temperaturi apsolutne nule (0 K) nema vibracija pa shodno tome nema ni zračenja. Cilj termografskog skeniranja elektromagnetskog (infracrvenog) zračenja je ispitivanje raspodjele temperature na vanjskim vidljivim površinama električne opreme i dijelova postrojenja.

U današnje vrijeme termografija je uobičajena metoda pregleda različitih vrsta električnih instalacija. Štoviše, termografija se u civilne svrhe najprije počela koristiti upravo u elektrotehnici te je i danas najčešće područje u kojem se koristi upravo pregled električnih instalacija.

U kombinaciji s mjerenjem vibracija, termografija je u posljednjih nekoliko desetljeća postala glavna metoda u dijagnostici kvarova i u preventivnom održavanju. Osnovna prednost termografije leži u činjenici da nisu potrebni nikakvi posebni režimi rada postrojenja, štoviše traže se standardni radni parametri promatranog postrojenja, što znači da nije potrebno prekidati rad. Osnovna područja elektroenergetike u kojima se koristi termografija su:

- a) proizvodnja električne energije
- b) prijenos električne energije
- c) distribucija, odnosno industrijska uporaba električne energije.

Navedeno razgraničenje na kategorije a) do c) posljedica je činjenice da se za termografsko mjerenje koriste različiti radni uvjeti. Primjerice, termografija u elektranama (kategorija a) radi se u vrijeme povećane proizvodnje. Periodi povećane proizvodnje variraju ovisno o zemljama i klimatskim zonama, kao i o vrsti postrojenja (hidroelektrana, termoelektrana, vjetroelektrana itd.).

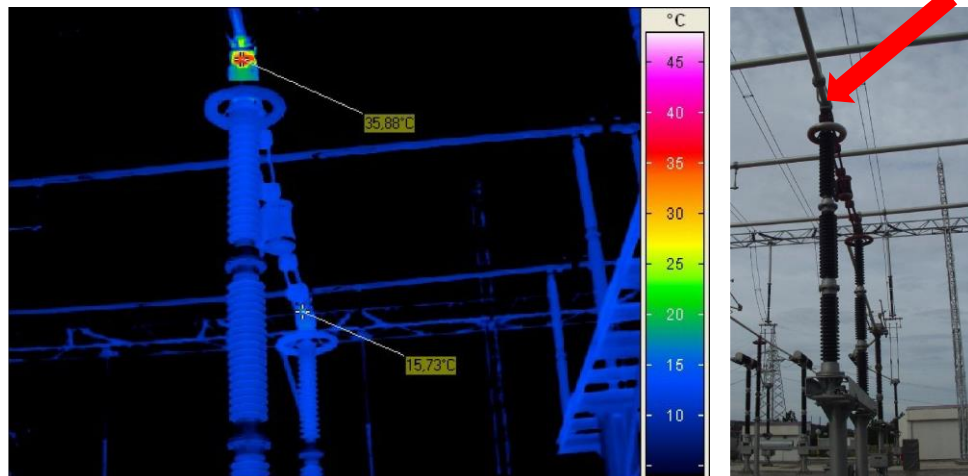
8.1.1. Informacije o ispitivanoj opremi

Prije nego pristupi procesu mjerenja, termografist bi trebao znati temperaturno ponašanje opreme/instalacije koju ispituje. Ako se ograničimo na elektrotehniku, većina se kvarova vezuje uz problem povećanog otpora kontakta (korozija, nečistoća, labavi spojevi) ili povećane struje (npr. kratki spoj). Mehanizam zagrijavanja uslijed bilo koje od ovih dviju mogućnosti je poznat. Korisno je imati na umu da zagrijavanje otpornika u grijaćim elementima ili zagrijavanje na spojevima kondenzatorskih baterija nije posljedica kvara, već je to normalno pogonsko stanje. S druge strane, zagrijavanje na priključcima elektromotora na mrežu ukazuje na kvar, primjerice zbog povećanog otpora kontakta pojedinog faznog voda pri istoj nazivnoj struji. Također, zagrijavanje se osim na lošim može javiti i na zdravim spojevima ako zdravi element preuzima cijeli teret, umjesto da dio ide na element u kvaru. Drugim riječima, u slučaju električne opreme, element u kvaru može biti i topliji i hladniji od ispravnog elementa. Ovo jasno ukazuje na nužnost pripreme, odnosno upoznavanja s postrojenjem prije mjerenja.

Međutim, generalno govoreći, toplo/vruće mjesto ukazuje na kvar, a poznavanje iznosa struje i temperature elementa može pomoći pri određivanju razine potencijalne opasnosti kao i hitnosti intervencije u smislu uočenog kvara. Da bi se donijela ispravna odluka, potrebno je poznavati maksimalnu dozvoljenu temperaturu materijala od kojeg je analizirani uređaj napravljen, kao i princip njegova rada, odnosno je li zagrijavanje normalno ili nije u kontekstu redovnog rada postrojenja. Primjerice, izolacijski sustav bilo kojeg kabela povećanjem temperature postaje lošiji, stoga je i rizik od požara koji inače uvijek postoji kod električnih instalacija još veći. U slučaju prekidača, previsoka temperatura može uzrokovati topljenje spojeva koji se posljedično mogu zavariti i time onemogućiti normalni rad prekidača. Drugim riječima, što termografist više zna o opremi koju ispituje, njegovi zaključci bit će utemeljeniji. Realno, termografist ne može poznavati sve detalje postrojenja pa je poželjno da prilikom mjerenja bude prisutna osoba zadužena za opremu/postrojenje.

8.1.2. Pregled

Prije samog mjerenja valja uzeti u obzir dodatnu opremu (osim same termografske kamere) potrebnu za pregled nekog postrojenja. Vrlo često je potrebno poznavati iznos struje pa je nužno imati neku vrstu ampermetra. Ako se prilikom snimanja vanjskog dijela postrojenja želi uzeti u obzir utjecaj vjetra, potrebno je imati anemometar. Snimanjem analiziranog objekta pomoću termografske kamere lako se uočavaju mjesta povećane temperature (vruće točke, engleski hot spots), vidi sliku (Slika 95).



Slika 95 Primjer termografskog snimanja visokonaponskog 400 kV okretnog rastavljača (lijevo) i digitalna fotografija (desno). Uočite povećanu prividnu temperaturu na okretom rastavljaču (crvena strelica na fotografiji) na mjestu spoja sabirnice s rastavljačem. Autor Ive Stilinović, dipl. ing., HEP ODS

Jednom kad se vruća točka jasno identificira i kad smo sigurni da ona nije posljedica refleksije (npr. Sunce ili neki topliji objekt u blizini ispitivanog objekta mogu uzrokovati refleksiju), kvar se može na odgovarajući način analizirati tako da se uzme u obzir emisivnost, namjena komponente, stvarni radni uvjeti i mjerena temperatura. Vrlo često se uz infracrveni snimak (termogram) prilaže i fotografija elementa kako bi služba održavanja lakše uklonila kvar.

Pogledajmo primjer na slici (Slika 95). Sniman je 400 kV rastavljač. Lijevi dio rastavljača (označen strelicom na fotografiji) jasno pokazuje 20-ak °C veću temperaturu od desnog dijela na mjestu spoja zračnog užeta na rastavljač. Kroz oba izolatora prolazi ista struja te u ovom slučaju očito nije riječ o različitom zagrijavanju kao posljedici različitih struja. Znajući iznos struje rastavljača i uspoređujući je s nazivnom strujom, zagrijavanje se može računski korigirati te zaključiti kolika je hitnost kvara, o čemu ćemo govoriti kasnije. Uzrok zagrijavanja vjerojatno nije prašina jer je postrojenje vanjsko i kiša ga ispire, već se radi o labavom ili korodiranom spoju.

8.1.3. Klasifikacija kvara i izvještaj

Pisanje izvještaja dio je termografskog ispitivanja koji uzima najviše vremena. Jednodnevni pregled može zahtijevati više dana pisanja izvještaja kako bi se nađeni kvarovi odgovarajuće klasificirali. Klasifikacija kvarova ne uzima u obzir samo trenutno stanje kvara mjereno u trenutnim pogonskim uvjetima, već kvar normalizira u odnosu na najnepovoljniji slučaj, odnosno daje zagrijavanje koje bi se dobilo u uvjetima npr. nazivne proizvodnje elektrane, iako je proizvodnja u trenutku mjerenja bila npr. 69 %. Primjerice, zagrijavanje generatorskih četkica od 15 °C u odnosu na zdravu četkicu u istim uvjetima rada svakako je ozbiljan problem. Međutim, nije svejedno je li spomenuto zagrijavanje izmjereno kod punog tereta (proizvodnja 100 %) ili kod polovičnog tereta (proizvodnja 50 %). U potonjem slučaju zagrijavanje će biti još veće porastom proizvodnje, stoga se u izvještaj prilaže izračun zagrijavanja za nazivni teret kako bi se kvar na odgovarajući način klasificirao.

8.1.4. Prioriteti

Osoblje održavanja odlučuje o prioritetu kvara temeljem klasifikacije koju izdaje termografist. Iako je termografija sve češće korištena metoda u preventivnom održavanju, nije jedina niti može uzeti u obzir detalje funkcioniranja postrojenja. Potrebno je uzeti u obzir druge metode, primjerice ultrazvučni pregled, mjerenje vibracija, ispitivanje otpora kontakta, ispitivanje otpora izolacije itd. Određivanje prioriteta u pravilu nije posao termografista, već službe održavanja.

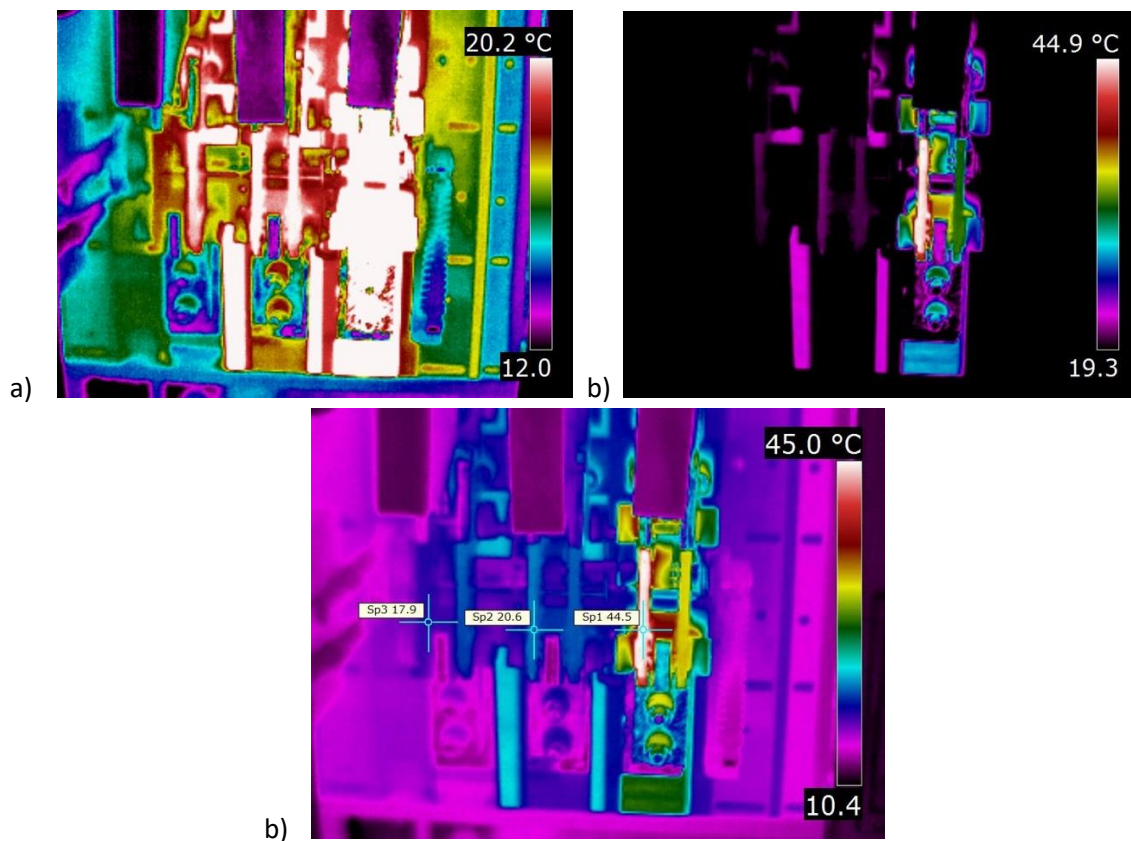
8.1.5. Popravci

Prilikom izvođenja popravaka treba uzeti u obzir dva međusobno oprečna kriterija; ukloniti kvar što prije ili ne remetiti, ili remetiti minimalno, normalan rad postrojenja. Popravak kvara je najvažniji zadatak preventivnog održavanja. Prednost termografije je što omogućava mjerenje bez prekidanja normalnog rada pogona te odgovarajućom klasifikacijom kvara daje mogućnost planiranja u održavanju s ciljem smanjenja vremena isključenja. Primjerice, u slučaju situacije kad rezervni dijelovi nisu odmah dostupni, termografija omogućava praćenje stanja kvara, odnosno neremećenje rada pogona ako to nije optimalno rješenje. Uštede koje se na ovaj način postižu su često višestruko veće od cijene samog termografskog pregleda. Ipak, najčešći ishod klasifikacije kvara je trenutni popravak ili popravak što je prije moguće. Služba održavanja u tom slučaju treba biti upoznata s načinom na koji infracrvena termografija ukazuje na kvar. Ako se kvar manifestira kroz povećanu temperaturu, na tom se mjestu može očekivati korozija pa osoblje treba biti opremljeno za uklanjanje takvih kvarova. Također, zagrijavanje izravno, ili neizravno putem korozije, može dovesti do labavih spojeva. Iako se labavi spojevi mogu doimati kao nevažne situacije, njihovo uklanjanje je vrlo važno u kontekstu ispravnog funkcioniranja opreme.

8.2. Tehnika termografskog snimanja električnih instalacija

8.2.1. Podešavanje opreme

Podešavanje termokamere može se objasniti pomoću primjera, Slika 96. U sva tri slučaja prikazano je povećano zagrijavanje srednjeg i desnog pola rastavljača u niskonaponskoj razvodnoj ploči. Na slici (Slika 96a) gornja granica temperaturne skale postavljena je previše nisko te detalji na desnom (najtoplijem) polu uopće nisu vidljivi. S termograma je nemoguće odrediti koji dio pola je sporan. Na slici (Slika 96b) podešavanje je bolje, ali detalji desnog pola još uvijek nisu sasvim vidljivi, odnosno gornja granica temperaturne skale još je uvijek previsoka. Nadalje, s obzirom na to da je lijevi pol, koji koristimo kao referentno mjesto, stopljen s pozadinom, donja granica temperaturne skale također je previsoko postavljena. Konačno, Slika 96c) je primjer dobrog podešavanja, odnosno i donja i gornja granica temperaturne skale dobro su postavljene. Jasno se vide detalji najtoplijeg (desnog) pola rastavljača, tj. vidi se da je izvor zagrijavanja zapravo kontakt noža i njegovog ležišta. Desni bi pol trebalo izvaditi te očistiti kontakte i ležišta noževa. Sa same slike je teško odrediti je li i spoj srednjeg pola neispravan.



Slika 96 Primjer podešavanja temperaturne skale na termokameri. Termogrami a) i b) su primjer lošeg podešavanja, a c) je primjer dobrog podešavanja.

Za relevantan zaključak trebalo bi imati i podatak o struji svakog pola. Ako su sva tri pola protjecana približno istom strujom, desni je pol sigurno u kvaru, a moguće i srednji. Međutim, moguće je i da kroz lijevi osigurač ne teče struja, ili je njegova struja značajno manja od struje kroz srednji i desni osigurač. U tom je slučaju srednji osigurač uredan.

Ovaj primjer zorno pokazuje važnost dviju stvari:

- 1) ispravnog podešavanja temperaturne skale na termokameri
- 2) korištenja strujnih kliješta ili neke druge metode mjerenja struje.

Napomena: Mjerenjem struja rastavljača dobivaju se sljedeći podaci: $I_1 = I_2 = I_3 = 957$ A. Iz ovog podatka zaključujemo da je desni pol rastavljača (faza L3) potrebno očistiti. Srednji pol (faza L2) se zagrijava indirektno od desnog pola, ali budući da se rastavljač otvara za potrebe čišćenja, optimalno rješenje u kontekstu sigurnosti postrojenja je očistiti sva tri pola.

8.2.2. Mjerenje temperature

Kao što je već rečeno u uvodnom dijelu, pri mjerenju termokamerom često se koristi pojam prividna temperatura. Točna temperatura ovisi o brojnim parametrima, primjerice temperaturi i relativnoj vlažnosti okoline, reflektiranoj temperaturi, emisivnosti površine koju snimamo itd. Prilikom

termografskog snimanja električnih instalacija i opreme može nas zanimati temperatura objekta, ali i razlika temperature objekta u odnosu na referentni objekt. U ovom potpoglavlju opisat ćemo mjerenje temperature objekta s ciljem utvrđivanja kvara. Kriterij kojim se rukovodimo je iznos temperature mjesta koje predstavlja potencijalni kvar.

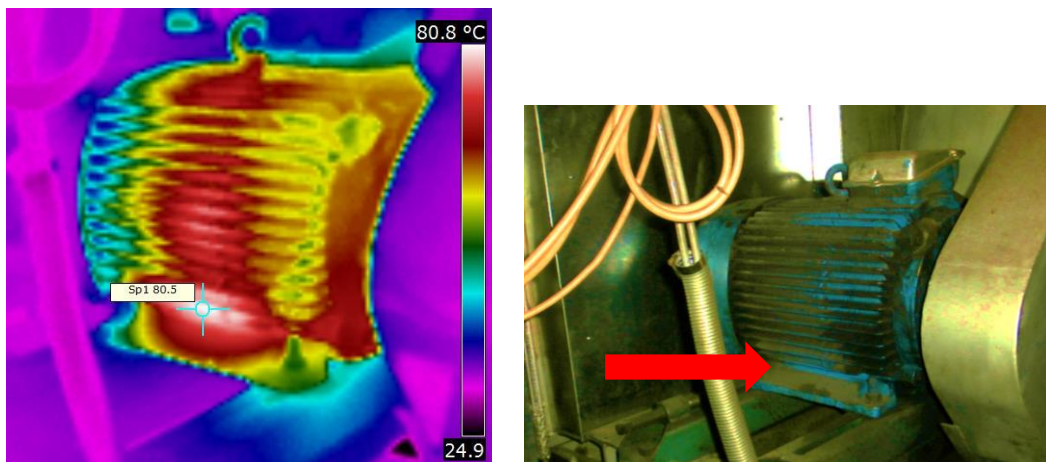


Slika 97 Automatsko prepoznavanje mjesta najviše prividne temperature (termogram prikazuje snimak kondenzatorskih baterija za kompenzaciju jalove snage, mjereno u TS 10/0.4 kV/kV Omial)

Opći termografski kriterij je da su temperature iznad 80 °C, osim u slučaju grijača i sličnih specijalnih trošila, neprihvatljive. Za svako pojedino trošilo postoje određene iskustvene granične vrijednosti, ili preporuke proizvođača koje mogu poslužiti kao usporedna vrijednost.

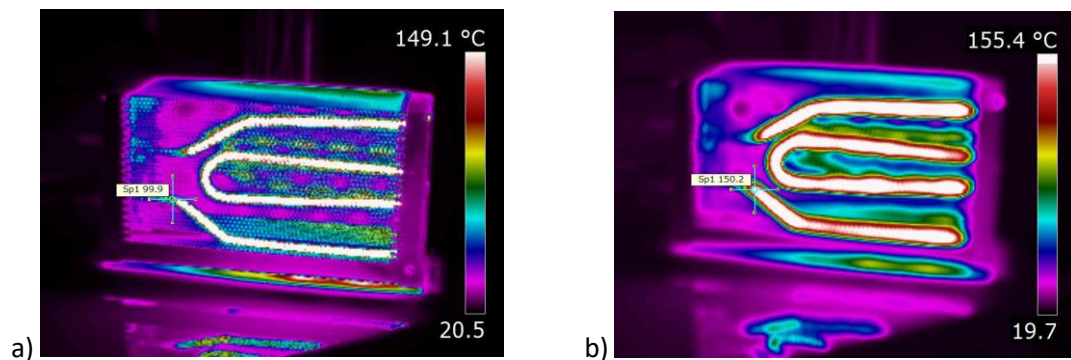
Suvremene kamere često imaju mogućnost automatske detekcije mjesta najveće prividne temperature. Primjer ovakve snimke pokazan je na slici (Slika 97).

Jedan od parametara koje smo spominjali u uvodu je i toplinska transmisivnost objekta. S obzirom na to da su objekti u elektrotehnici u pravilu u toplinskom smislu neprozirni (transmisivnost je 0), nije nemoguće da termokamera ne prikazuje stvarno mjesto zagrijavanja, već neko njemu susjedno mjesto koje je neposredno zagrijano od strane stvarnog mjesta kvara. Primjer ove situacije prikazan je na slici (Slika 98).



Slika 98 Primjer termograma (trofazni asinkroni elektromotor) na kojem je mjesto najviše prividne temperature skriveno

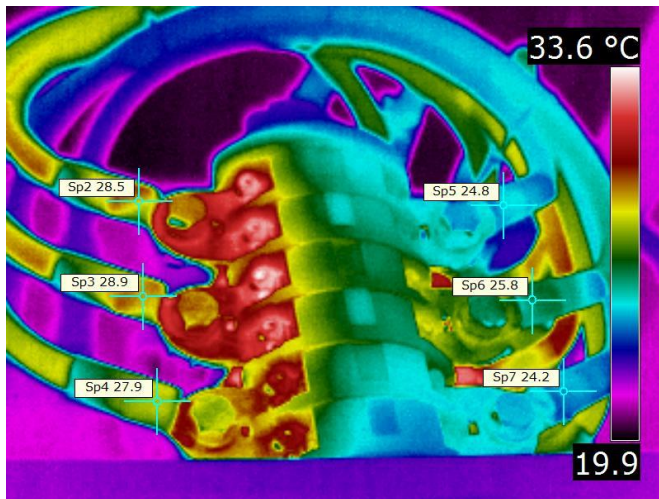
Termogram na slici (Slika 98) sugerira da je mjesto najveće prividne temperature (približno 80,5 °C) kućište trofaznog asinkronog elektromotora. U stvarnosti, kućište se vođenjem topline zagrijava neizravno, a stvarni kvar je na statorskim namotajima motora koji se ne vide. Kućište donekle toplinski izolira statorske namotaje, što znači da na termogramu ne vidimo kvar na samom kućištu, nego zagrijavanje kao posljedicu topline koju proizvodi kvar na statorskim namotajima. Budući da kućište djelomično maskira stvaran izvor topline, točna temperatura na mjestu kvara je sigurno veća od spomenutih 80,5 °C. Osim činjenice da mjereni objekt može sam u većoj ili manjoj mjeri maskirati stvarno mjesto kvara, kao što prikazuje Slika 98, postoje i situacije u kojima loš fokus može zavarati. Na slici ispod prikazan je primjer dobro (Slika 99a) i loše (Slika 99b) fokusirane grijalice što za posljedicu ima razliku prividne temperature od približno 50 °C. Nepotrebno je naglašavati da razlika temperature od 50 °C može lako navesti na pogrešan zaključak, posebice neiskusno osoblje.



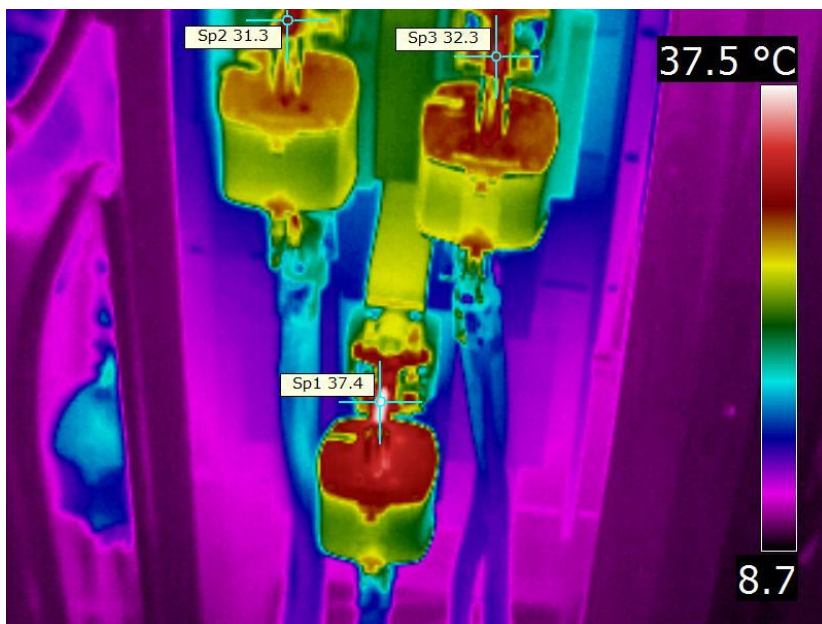
Slika 99 Primjer razlike mjerenja zbog fokusa. Slika a) je ispravno fokusirana i prividna temperatura je 99,9 °C, a slika b) je loše fokusirana i prividna temperatura je 150,2 °C, na istom mjestu

8.2.3. Usporedna mjerenja (mjerenje razlike temperature)

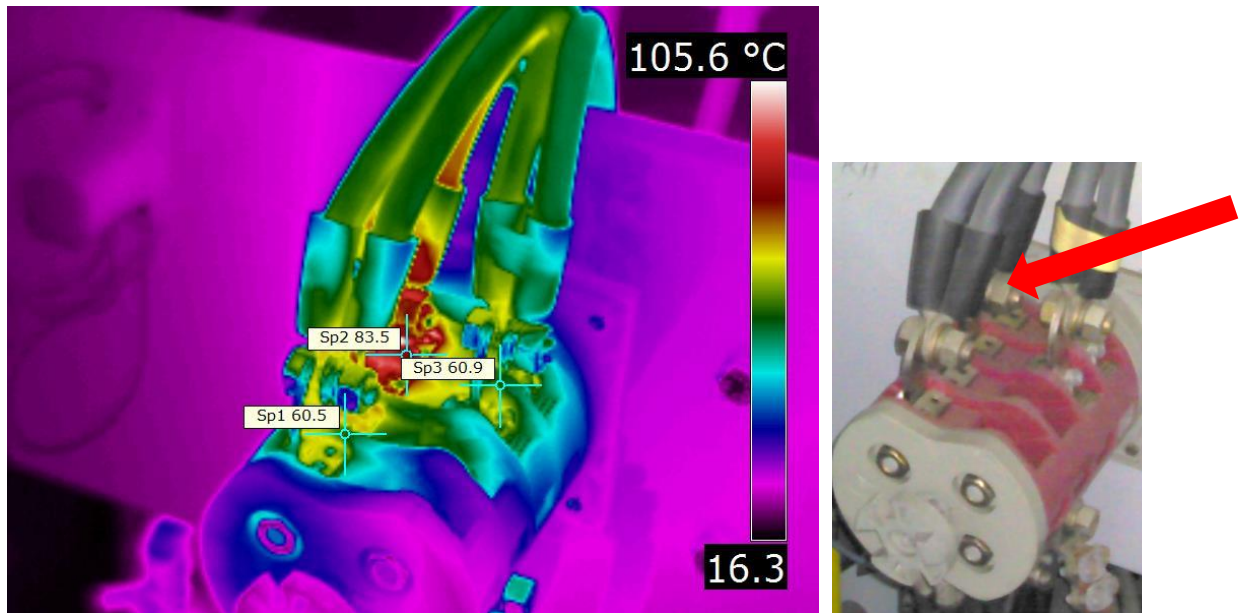
Prilikom ispitivanja elektrotehničkih instalacija vrlo često susrećemo trofazni sustav, posebice prilikom mjerenja na elektroenergetskim postrojenjima, gdje je trofazni sustav redovita pojava. Iznimke su specijalna postrojenja poput električne željeznice (monofazni sustav) ili elektrokemijske industrije (istosmjerna struja). Istosmjerni prijenos električne energije (High Voltage Direct Current – HVDC) u Hrvatskoj se ne koristi. S obzirom na to da u praksi često mjerimo trofazne instalacije, zgodno je umjesto mjerenja temperature nekog elementa (opisano u prethodnom potpoglavlju) koristiti usporednu metodu. Ova se metoda svodi na to da se uspoređuju temperature u sve tri faze i mjeri razlika. Ako imamo trofazni osigurač, trofazni prekidač, trofazni spoj na motor/generator itd., vrlo često su struje u fazama identične. Ako i nisu, odgovarajućom opremom može se provjeriti eventualna razlika u strujama. U slučaju da su struje zaista iste ili približno iste, faza s povećanom temperaturom sigurno je u kvaru.



Slika 100 Termografski snimak trofaznog niskonaponskog prekidača. Sve tri faze pokazuju približno iste prividne temperature – stanje je uredno



Slika 101 Termografski snimak trofaznih niskonaponskih nožastih osigurača. Sve tri faze protjecane su istom strujom od 85 A. Uočimo da nož nožastog osigurača u fazi 2 (označen strelicom na digitalnoj slici) ima više od 5 °C veću temperaturu od preostale dvije faze.



Slika 102 Termografski snimak trofaznog niskonaponskog prekidača. Sve tri faze protjecane su istom strujom od 120 A. Uočimo da faza 2 (označena strelicom na digitalnoj slici) pokazuje više od 22 °C veću temperaturu od preostale dvije faze. Faza 2 nije uredna.

Analizirajmo slike (Slika 100 do Slika 102). Pritom ćemo uspoređivati temperature mjesta na kojem imamo potencijalni kvar i referentnog mjesta, odnosno zdrave faze i faze u kvaru.

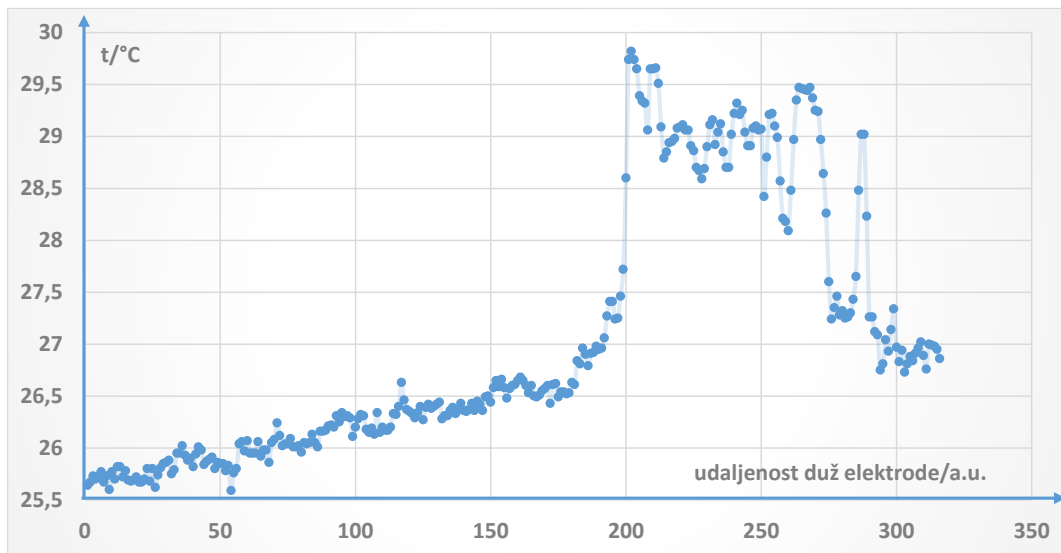
Slika 100 prikazuje niskonaponski trofazni prekidač. Strujnim kliještima izmjerena je struja koja iznosi 120 A i jednaka je u sve tri faze. Usporedbom prividnih temperatura na mjestima spoja kabela i prekidača, a ta su mjesta iskustveno najkritičnija, uočavamo minimalne razlike u temperaturama. Ove su razlike posljedica malih varijacija u strujama pojedinih fazi, što znači da je opće stanje prekidača uredno.

Slika 101 prikazuje nožaste niskonaponske osigurače. Strujnim kliještima izmjerena je struja koja iznosi 85 A i jednaka je u sve tri faze. Usporedbom prividnih temperatura na mjestima spoja noža nožastog osigurača i odgovarajućeg ležišta, a ta su mjesta iskustveno najkritičnija, uočavamo da je temperatura srednje faze (faza 2, označeno strelicom na digitalnoj slici) približno 5 °C veća od referentne temperature. Opće stanje prekidača nije uredno, a ozbiljnost kvara i hitnost intervencije komentirat ćemo naknadno.

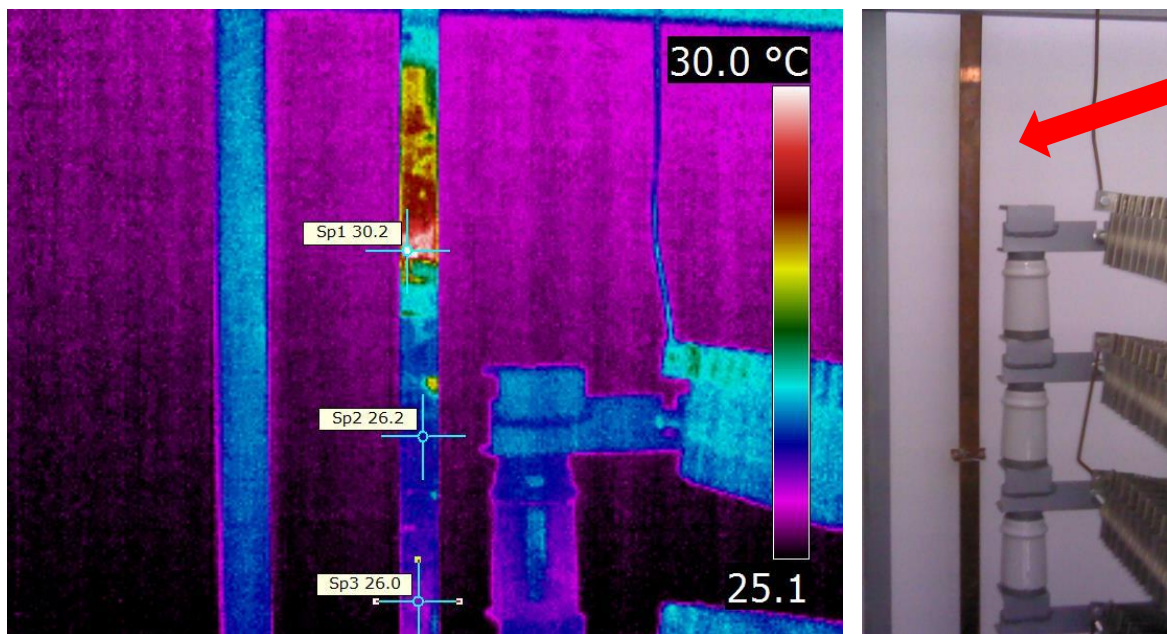
Slika 102 prikazuje niskonaponski trofazni prekidač. Strujnim kliještima izmjerena je struja koja iznosi 105 A i jednaka je u sve tri faze. Usporedbom prividnih temperatura na mjestima spoja kabela i prekidača, a ta su mjesta iskustveno najkritičnija, uočavamo da je temperatura srednje faze (faza 2, označeno strelicom na digitalnoj slici) približno 22 °C veća od referentne temperature (faze 1 i 3). Opće stanje prekidača nije uredno, a ozbiljnost kvara i hitnost intervencije komentirat ćemo naknadno.

Osim metode mjerenja razlike u temperaturama pojedinih fazi, ima smisla mjeriti i razliku temperatura duž iste faze, primjerice ako je riječ o monofaznom sustavu, ili ako se radi o uzemljivačkoj traci. Slika 103 prikazuje takvo mjerenje provedeno na bakrenoj traci kojom je zvjezdište primara 12/110 kV/kV transformatora spojeno na maloomski otpornik. U tom je slučaju zgodno na x-os nanijeti udaljenost od

definiranog ishodišta, a na y-os temperaturu. Graf prikazan na slici (Slika 103) dobije se iz termograma na slici 104.



Slika 103 Temperatura mjerena duž uzemljivačke trake kojom je zvjezdište primara 12/110 kV/kV transformatora spojeno na malooski otpornik.



Slika 104 Termogram i digitalna slika temeljem koje je dobiven prethodni graf

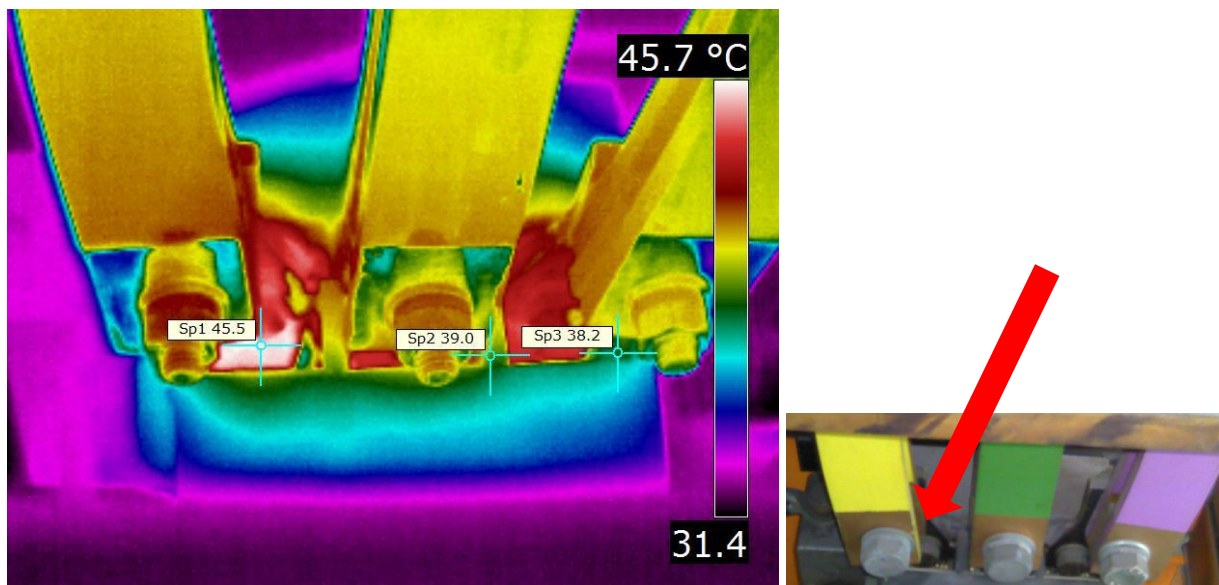
8.2.4. Normalna radna temperatura

Termografsko mjerenje daje temperaturu objekta. Bez obzira radimo li usporedna mjerenja, ili analiziramo apsolutnu temperaturu nekog objekta, za relevantnu procjenu stanja (kvar da ili ne) nužno je poznavati radnu temperaturu objekta pod uobičajenim okolnostima, odnosno normalnu radnu temperaturu. Pritom treba uzeti u obzir i okruženje u kojem se analizirani element nalazi. Primjerice, ista sabirnica, protjecana istom strujom, ne mora pokazivati istu temperaturu ljeti i zimi. Spomenuto dolazi do izražaja još i više ako je objekt u vanjskoj izvedbi i smješten je na otvorenom.

U svrhu lakše analize problema definirat ćemo dva pojma:

1. radna temperatura: apsolutna temperatura elementa. Ovisi o strujnom opterećenju i temperaturi okoline, a uvijek je veća od temperature okoline.
2. nadtemperatura: temperaturna razlika između ispravnog elementa i elementa u kvaru.

Nadtemperatura je posebno bitna kod metode uspoređivanja. Primjerice, ako faze 1 i 2 pokazuju 20 °C, a faza 3 na ekvivalentnom mjestu pri istoj struji pokazuje 30 °C, govorimo o nadtemperaturi (temperaturnoj razlici) od 10 °C. Pritom je važno još jednom naglasiti da se uspoređuju ekvivalentna mjesta u različitim fazama; primjerice, ako se ispituje prekidač, uspoređuju se temperature tri ulazna spoja, ili tri izlazna spoja, nikako ne istovremeno i uzlazi i izlazi. Primjer nadtemperature prikazan je na slici (Slika 105).

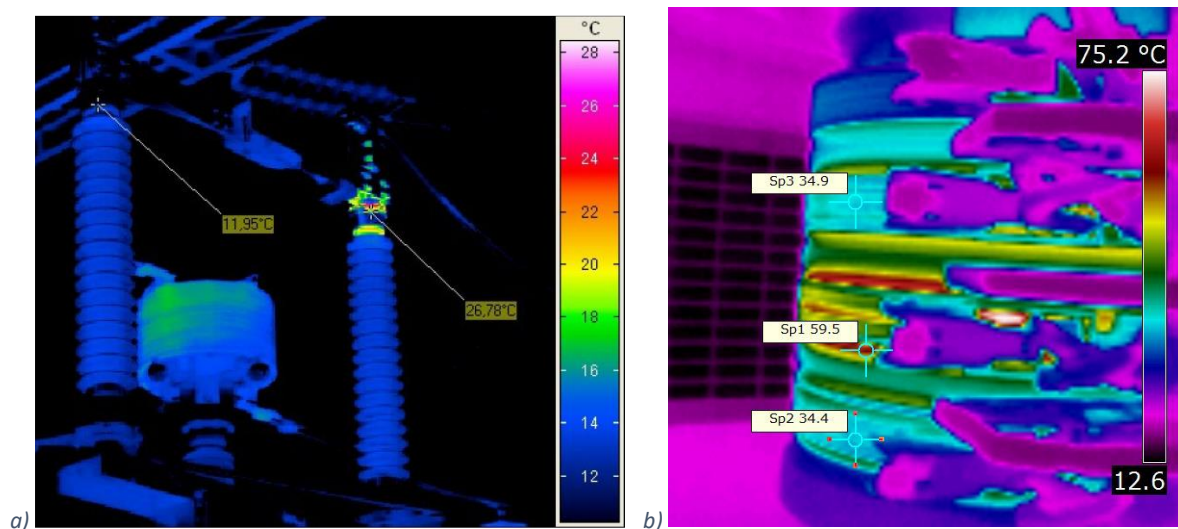


Slika 105 Nadtemperatura mjerena na NN prekidaču

Na slici (Slika 105) možemo uočiti primjer nadtemperature. Faze 2 i 3 (srednja i desna) imaju temperature 28 °C do 29 °C, dok faza 1 (lijeva) pokazuje 45,5 °C. Postavlja se pitanje što je u ovom slučaju referentna temperatura. Ako dvije faze pokazuju nižu temperaturu od treće i ako su temperature te dvije faze približno iste, njihova temperatura uzima se kao referentna. U primjeru na slici (Slika 106) referentna

temperatura je približno 38,6 °C. Situacija u kojoj su dvije faze toplije od treće najčešće znači nesimetriju u strujama pa u tom slučaju usporedba nema smisla.

Nekakva normalna situacija je da sve tri faze imaju istu ili približno istu temperaturu koja je najčešće od 1 do 2 °C iznad temperature okoline. U slučaju unutarnjeg postrojenja zagrijavanja u odnosu na temperaturu okoline mogu biti značajno veća, Slika 106.



Slika 106 Primjeri nadtemperature (zagrijavanja) na a) izlaznom rastavljaču 110 kV dalekovoda (vanjsko postrojenje) i b) kliznim kolotovima NN motora (unutarnje postrojenje)

8.2.5. Klasifikacija kvarova

Jednom kad je uočeno sumnjivo mjesto treba preporučiti odgovarajuće mjere. Da bismo mogli donijeti odgovarajuću preporuku (intervencija da ili ne; ako da, hitno ili prilikom redovnog servisa), treba uzeti u obzir sljedeće:

1. opterećenje (struja) tijekom mjerenja
2. je li opterećenje konstantno ili se mijenja
3. lokaciju kvara na instalaciji
4. ponašanje tereta (hoće li u budućnosti biti veći, manji ili isti?)
5. je li nadtemperatura (zagrijavanje) izmjerena na stvarnom mjestu kvara ili na nekom susjednom koje se grije zbog vođenja topline (npr. usporediti slike, Slika 97 i Slika 98)

Ponovimo, za termografsko ispitivanje električnih instalacija i opreme razvijena je posebna metoda koja se bazira na termičkom uspoređenju, tzv. mjerenje uz "referencu", a odnosi se na uspoređivanje identičnih mjesta u raznim dijelovima postrojenja. Za svako uočeno "toplo" mjesto izmjerena temperatura uspoređuje se s temperaturom tzv. "referentnog" mjesta. Odabrano referentno mjesto mora biti protjecano jednakom strujom kao i promatrano "toplo" mjesto, ali se mora nalaziti izvan njegovog termičkog utjecaja. U slučaju da se ne može poslužiti referentnim mjestom iz iste faze moguće je koristiti isto referentno mjesto susjednih (po mogućnosti identično mjesto) dijelova postrojenja, uz uvjete

simetričnog opterećenja u sve tri faze. Za vrijeme ispitivanja poželjno je da je postrojenje opterećeno s barem 40 % nazivnog opterećenja kako bi se mjesta povišenog zagrijavanja mogla što lakše locirati, a izmjerene temperature što točnije preračunati na nazivne vrijednosti.

8.2.6. Kriterij za utvrđivanje mogućnosti nastajanja kvara u postrojenjima

Kao kriterij za utvrđivanje stanja dijela postrojenja na kojem je uočeno zagrijavanje, odnosno stupanj hitnosti intervencije, uzima se temperaturna razlika između uočenog toplog i referentnog mjesta ΔT . Osim ove temperaturne razlike, za procjenu stupnja hitnosti treba uzeti u obzir i pogonsko opterećenje u trenutku ispitivanja kao i naponski nivo opreme koja se kontrolira. Na temelju iskustva i korištenjem podataka dobivenih prijašnjim pregledima, stanje električne opreme na kojoj je uočeno povišenje temperature može se procijeniti temeljem sljedećih kriterija:

Tablica 6 Kriteriji hitnosti uočenog kvara [8.1]

Povišenje temperature ΔT [°C]	Stanje mjenog objekta	Preporučene mjere
$0 \leq \Delta T \leq 5$	0	Ponoviti mjerenja za 6 – 12 mjeseci
$5 \leq \Delta T \leq 10$	1	Pratiti stanje uočenog objekta i ponoviti mjerenja što prije
$10 \leq \Delta T \leq 35$	2	Izvršiti potrebne korekcije od prvog zaustavljanja rada
$\Delta T \geq 35$	3	Hitno intervenirati i držati pod posebnom kontrolom

Za određivanje pregrijavanja s trenutnog na nazivno opterećenje koristi se izraz:

$$\Delta T_N = \left(\frac{I_N}{I} \right)^2 \Delta T \quad (8.1.)$$

ΔT_N – temperaturno prekoračenje pri nazivnom opterećenju

ΔT – temperaturno prekoračenje pri trenutnom opterećenju

I_N – struja pri nazivnom opterećenju

I – struja pri trenutnom opterećenju.

Pri opterećenjima manjim od 50 % prethodni izraz ne daje zadovoljavajuće rezultate te se koristi empirijski izraz:

$$\Delta T_N = 4 \times \Delta T \quad (8.2.)$$

Primjer proračunavanja pregrijavanja s trenutnog na nazivno opterećenje (primjerice, neka se radi o 60 %-tnom trenutnom teretu i temperaturnoj razlici referentnog mjesta i mjesta zagrijavanja od 8 °C):

$$\Delta T = 8 \text{ °C}; \quad (8.3.)$$

$$\Delta T_N = \left(\frac{I_N}{I}\right)^2 \Delta T = \left(\frac{100}{60}\right)^2 \times 8 \cong 22 \text{ °C}, \quad (8.4.)$$

što odgovara intervenciji iz 2. kategorije, te bi bilo potrebno intervenirati kod prvog zaustavljanja pogona.

S obzirom na materijalnu vrijednost ukupnog postrojenja i ugrađene opreme, cijena termografskog pregleda je minorna u odnosu na dobivene rezultate:

- ✓ Ispitivanje se obavlja za vrijeme uobičajenog pogona.
- ✓ Neispravnost opreme precizno se locira u ranoj fazi.
- ✓ Izbjegnuta su nepotrebna servisiranja.
- ✓ Skraćuje se vrijeme remonta.
- ✓ Unapređuje se održavanje te ekonomizira vođenje zaliha.
- ✓ Pravilnim određivanjem rokova kontrole smanjuje se broj većih kvarova.

8.2.7. Izrada izvještaja

Izvještaji se često rade uz pomoć različitih softverskih paketa koji dolaze u komplete sa samom termokamerom. Profesionalni izvještaji u pravilu imaju dva dijela.

Prvi, opći dio koji sadrži činjenice vezane za pregled, kao što su:

- podaci o naručitelju
- mjesto mjerenja
- datum pregleda
- datum izrade izvještaja
- podaci i potpis termografista
- sadržaj izvještaja.

Drugi, mjerni dio sadrži rezultate termografskog mjerenja, kao što su:

- podaci o mjerenom objektu
 - ❖ što se mjeri (oznaka, ime, broj itd.)
 - ❖ fotografija
- termogram, pri čemu treba uzeti u obzir
 - ❖ optički fokus
 - ❖ temperaturno prilagođavanje problema (*level* i *span*)
 - ❖ kompozicija (odgovarajuća udaljenost i kut snimanja)
- komentare
 - ❖ je li uočena anomalija
 - ❖ postoji li refleksija
 - ❖ kolika je uočena temperatura ili nadtemperatura (zagrijavanje)?

Primjer termografskog izvještaja (opći dio lijevo, mjerni dio desno, zaključak dolje):

(verzija X.X – konačna verzija)

0. OPĆI PODACI

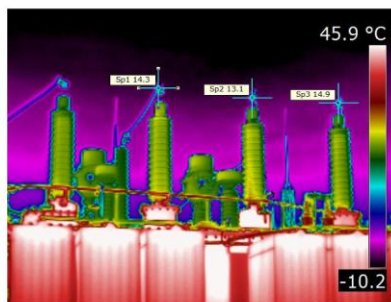
Naručilac mjerenja	
Izvršitelj mjerenja	
Svrha mjerenja	
Predmet ispitivanja	
Mjerna mjesta	
Datum i vrijeme mjerenja	
Klimatski uvjeti	
Mjerni uređaji	
Mjerenje obavili	
Odobrio	
Prisutni prilikom ispitivanja:	
Priložena dokumentacija:	

PEČAT

IME I PREZIME, struka

LOGO	Nalaz termografskih mjerenja u ...	DATUM
------	------------------------------------	-------

30/110 kV/kV transformator (VN strana) - I



Trenutno opterećenje [% I _n]	Prekoračenje radne temperature Δt [°C]	Stanje objekta	Preporučene mjere
90	0	0-3	-

Radna temperatura transformatora je u dozvoljenim granicama, a opće stanje uredno. Temperature nesimetrije između potpornih izolatora fazi su zanemarive. Napomena: raspored fazi s lijeva na desno je L1 – L2 – L3.

Nema potrebe za intervencijama.

LOGO	Nalaz termografskih mjerenja	DATUM
------	------------------------------	-------

4. ZAKLJUČAK:

Analizom izmjerenih termograma, zaključuje se da nisu uočene nikakve anomalije, kako na SN i VN dijelu objekta, tako i na NN dijelu, odnosno razvodu kućne potrošnje. Utvrđuje se da je ukupno stanje

UREDNO

te do idućeg redovitog termografskog pregleda nisu potrebne nikakve hitne interventne radnje.

Sukladno uočenom tijekom termografskog mjerenja preporuča se:

- Budući da je kućište otpornika izvedeno kao metalna kutija te termovizijski pregled ne pruža potpuni uvid, provesti ispitivanje malooskopskog otpornika primarnom injekcijom [AC U-I metoda (impedancija i paraziti inductivitet), DC U-I metoda (otpor), fazni pomak]
- Budući da su akumulatorske baterije pomoćnog DC razvoda uglavnom neaktivne, provesti funkcionalnu provjeru baterija na način da se provede mjerenje unutarnjeg otpora baterija (ocjena preostalog životnog vijeka), napona baterija (ocjena napunjenosti) te kapacitivna proba (ocjena autonomije baterijskog sustava)

MJERENJA OBAVILI:

IME I PREZIME, struka
ovlašteni termografist ITC No. xxxx

IME I PREZIME, struka
ovlašteni ispitivač električnih instalacija

Zaključak potvrđuje:
IME I PREZIME, struka.
(ovlašteni termografist ITC No. xxxxx)

Direktor:
IME I PREZIME, struka

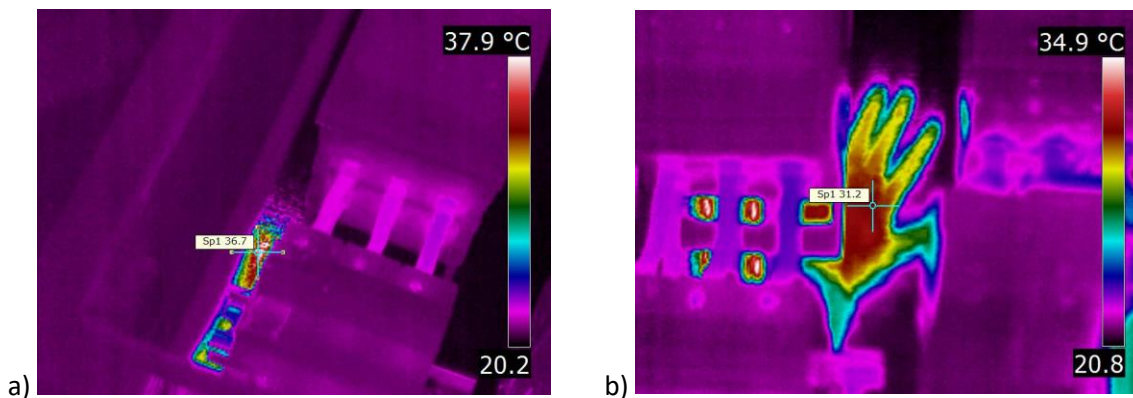
LOGO	Nalaz termografskih mjerenja	DATUM
------	------------------------------	-------

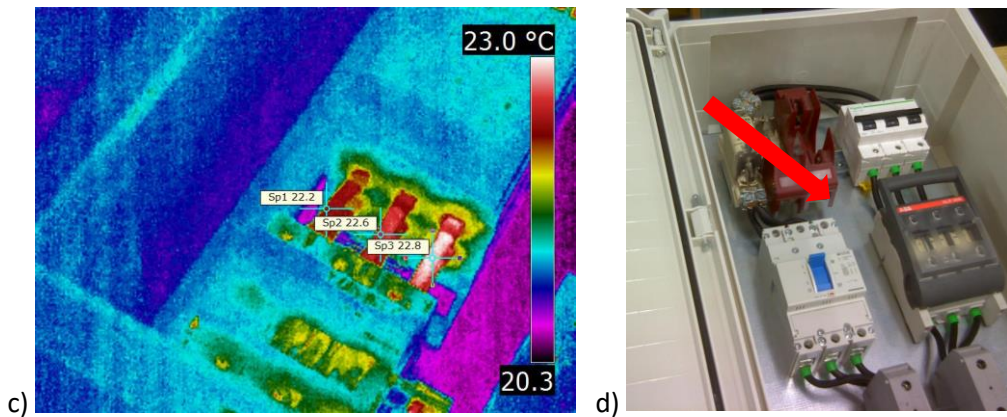
8.2.8. Lažna zagrijavanja

U ovom potpoglavlju osvrnut ćemo se na različite uzroke lažnih zagrijavanja, odnosno zagrijavanja koja nisu posljedica stvarnog kvara.

Refleksije

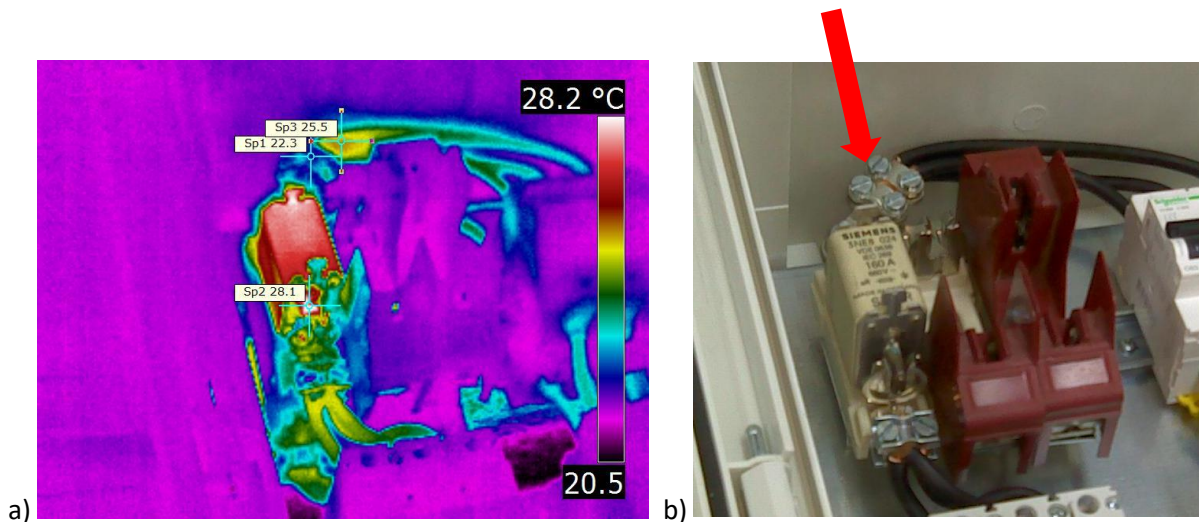
Termokamera registrira toplinu koja s mjerenog objekta dolazi u leću, bez obzira je li izvor te topline sam mjereni objekt ili drugi objekti oko njega. Električna oprema često se može ponašati kao ogledalo koje reflektira povišene temperature iz okoline. To posebno dolazi do izražaja u slučaju sjajnih metalnih površina, primjerice temeljnih ploča u razdjelnim ormarima, bakrenih sabirnica, metalnih spojeva i slično. S druge strane, izolacija kabela ima izrazito nisku refleksiju i u tom smislu ne predstavlja problem. Postoji više načina da termografist ukloni sumnju na potencijalnu refleksiju. Jedan način je pomicanje. Stvarni kvar bit će vidljiv iz više uglova, možda ne jednako dobro, ali će svakako biti vidljiv. Refleksija će nestati, ili se pomicati na nova mjesta. Nadalje, stvarni kvar u pravilu pokazuje stupnjeviti porast temperature od hladnog do vrućeg mjesta, što je logična posljedica zagrijavanja. Refleksija će imati oštar prijelaz. Vrijedi napomenuti da termografsko mjerenje temperature objekata koji se ponašaju kao ogledalo nije moguće. Takvi materijali uvijek će pokazivati temperaturu okoline, a ne svoju stvarnu temperaturu. Primjer prethodnih razmatranja naveden je na slici (Slika 107).





Slika 107 Primjer lažnih zagrijavanja kao posljedica refleksije: a) i b) termografski snimak troleznog NN rastavljača na kojem se vidi refleksija tijela termografista na temeljnoj ploči ormara i c) izostanak tog istog lažnog zagrijavanja kad se termografist pomakne i promijeni kut snimanja

Primjer na slici (Slika 107) jasno ilustrira situaciju gdje se zbog refleksije može pogrešno zaključiti da je snimani element (trolezni NN rastavljač) u kvaru. Na slikama Slika 107a) i Slika 107b) vidi se područje povećane prividne temperature. Ovo područje nije posljedica kvara, već refleksije tijela termografista o temeljnu ploču razdjelnog ormara (Slika 107d), što se posebno dobro vidi na slici b) na kojoj je uočljiva ruka termografista. Razlog ove refleksije, kao što je već rečeno, leži u činjenici da je sjajni metal reflektor u IC spektru, odnosno ponaša se kao ogledalo u vidljivom dijelu spektra.

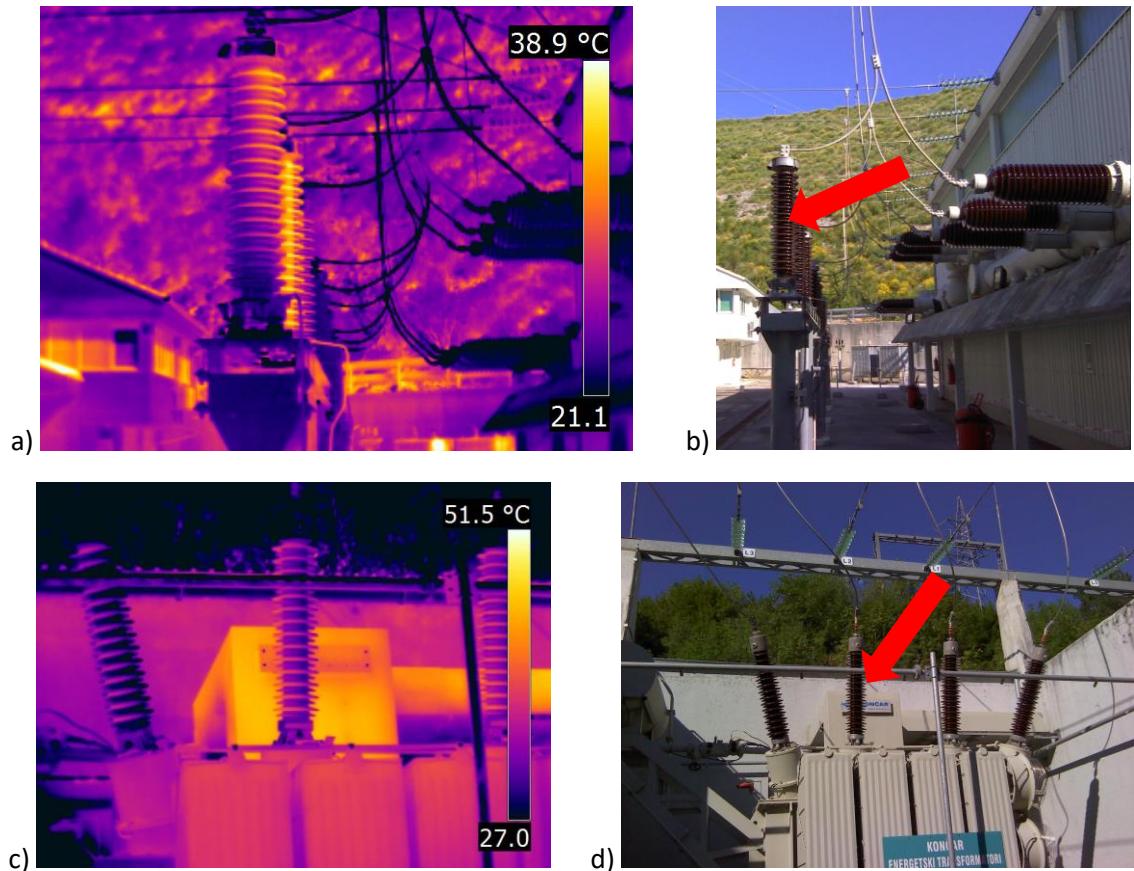


Slika 108 Ilustracija mjerenja temperature sjajnog objekta (termogram NN kabelaške vijčane stopice koja je označena na slici b))

Primjer da je termografsko snimanje objekata koji se ponašaju kao ogledalo zapravo nemoguće jasno se vidi na prethodnoj slici. Slika 108 prikazuje trolezne NN nožaste osigurače (uključen je samo jedan osigurač) za koje je kabel na gornjem izvodu učvršćen pomoću vijčane stopice. Svi su spojevi čvrsto zategnuti prije snimanja, a u trenutku snimanja struja je 60 A. Budući da su svi spojevi čvrsto zategnuti i da nema kvara, temperatura bi svugdje trebala biti ista. Međutim, kao što se vidi na slici b), vijčana stopica je sjajni metal koji zbog toga ne prikazuje svoju temperaturu, nego temperaturu svoje okoline. Na termogramu je zbog toga njezina prividna temperatura oko 3 °C niža od temperature kabelaške izolacije, kojoj, kako smo već rekli, možemo vjerovati.

Zagrijavanje od Sunca

Za razliku od refleksije koja nije stvarno zagrijavanje, zagrijavanje od Sunca jest stvarno, ali nije posljedica kvara pa se ubraja u skupinu uzroka lažnog zagrijavanja. Vanjski dijelovi postrojenja, što se posebice odnosi na VN postrojenja, izloženi su djelovanju Sunca. Ako termografist ne obrati pažnju na tu činjenicu, može se dogoditi da pogrešno interpretira termogram i zaključi da se radi o kvaru. Primjer ovakvih mjerenja dan je na slici (Slika 109), mjerenja su rađena u HE Peruća.



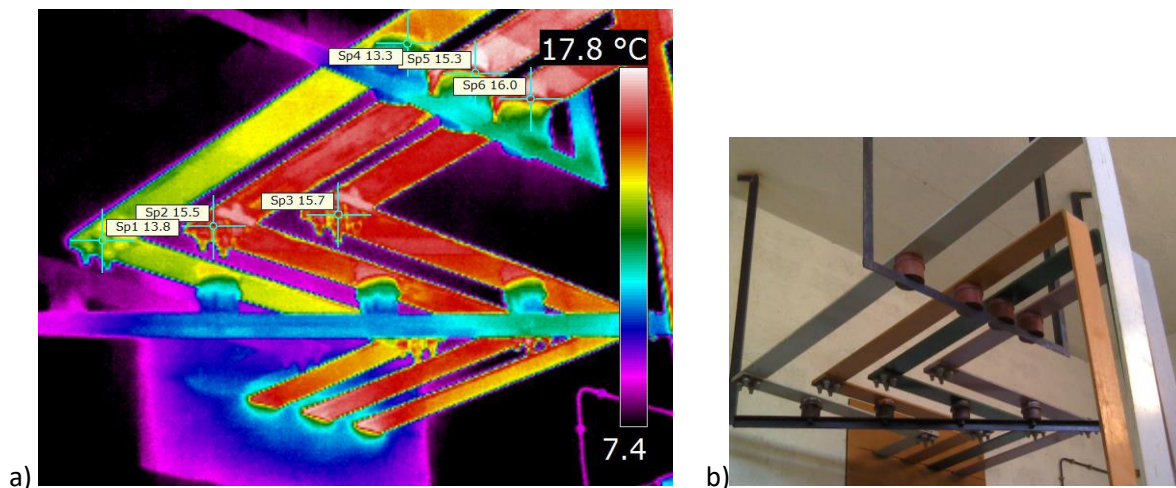
Slika 109 Primjer zagrijavanja koje je posljedica Sunca, ne stvarnog kvara (zagrijavanje izolatora 110 kV odvodnika prenapona, slika a), označeno na fotografiji b), a zagrijavanje 110 kV blok transformatora slika c, označeno je na fotografiji na slici d))

Zagrijavanje zbog vrtložnih struja

Ako se magnetski materijal nađe u blizini većeg magnetskog polja, primjerice uzrokovanog strujom koja teče kroz elektroenergetski vodič, u tom će se materijalu zbog vremenski promjenjivog magnetskog toka inducirati struje. Ako taj materijal ima mali električni otpor, primjerice metalna šipka, u njemu će se javiti velike struje iako nije izravno galvaniski spojen ni na kakav strujni krug. Uslijed tih struja može doći i do zagrijavanja, što treba uzeti u obzir prilikom termografskog snimanja.

Nesimetrija u trofaznom sustavu

Ovaj problem već je spomenut kad se govorilo o nužnosti mjerenja struje prilikom termografskog pregleda. Ako su tri faze trofaznog sustava neravnomjerno opterećene kao posljedica različitih struja, na trolinim elementima, npr. sabirnicama ili prekidačima, javit će se različite temperature. Treba naglasiti da ove temperaturne razlike nisu posljedica kvara, nego isključivo posljedica nesimetrije. Naravno, izrazita nesimetrija nije poželjna u smislu ravnomjernog opterećivanja elemenata u sustavu, ali ne predstavlja kvar. Primjer temperaturne razlike koja je posljedica nesimetrije u opterećenju dan je na sljedećoj slici.



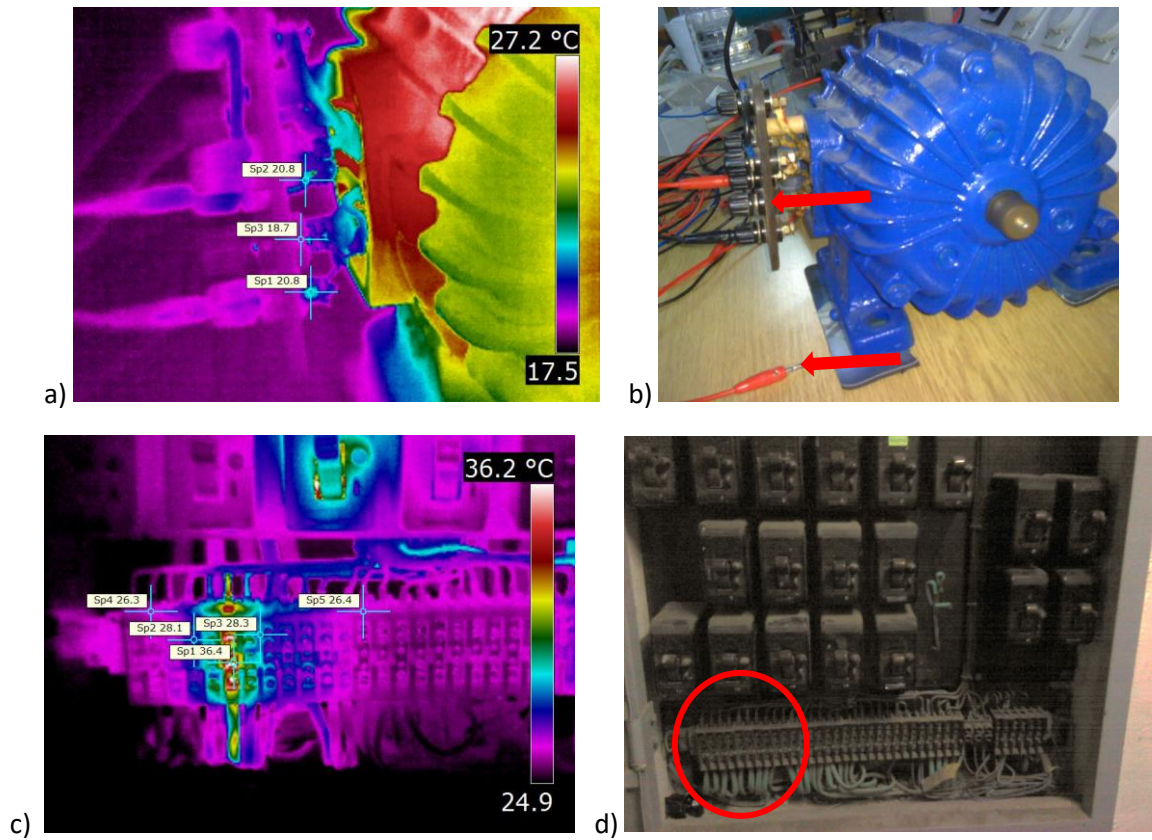
Slika 110 Primjer zagrijavanja koje je posljedica nesimetrije u opterećenju ($I_1 = 150 \text{ A}$, $I_2 = 150 \text{ A}$, $I_3 = 120 \text{ A}$), a ne kvara. Slika prikazuje NN sabirnice na sekundaru 10/0.4 kV/kV transformatora, termogram a) i fotografija b)

Temperaturne razlike na slici (Slika 110), kao što je već rečeno, posljedica su nesimetrije u strujama koje teku kroz NN sabirnice na sekundaru 10/0.4 kV/kV transformatora, i to $I_1 = 150 \text{ A}$, $I_2 = 150 \text{ A}$, $I_3 = 120 \text{ A}$. Iznos struja može se izmjeriti strujnim kliještima, ili očitati s ugrađenih ampermetara, ako postoje u postrojenju. U visokonaponskim i srednjenaponskim postrojenjima redovito postoje strujni mjerni transformatori pa je podatak o struji u pravilu poznat, a za niskonaponska postrojenja se mjerenje struje, uz poznavanje osnova električnih mjerenja, može provesti pomoću strujnih kliješta.

Ostali uzroci lažnog zagrijavanja

U ovom potpoglavlju ćemo samo kratko navesti ostale moguće uzroke lažnog zagrijavanja, ne ulazeći u detalje. U slučaju da imamo više kabela u neposrednoj blizini, oslobođena toplina iz jednog može zagrijati drugog. Primjerice, kabel kroz koji uopće ne prolazi struja može biti topao. Naravno, ovo ne treba promatrati kao kvar. Moguće je i da se zagrijavanje javi kao posljedica kvara u drugoj fazi. Primjerice, imamo trofazni motor koji ima prekid u jednoj fazi. Ako se prekid dogodio nakon što je motor pokrenut, vrtnja će se nastaviti, ali će struja u preostale dvije faze biti veća. Ako je motor opterećen nazivnim teretom, struje će poprimiti iznose veće od nazivnih pa će se javiti i zagrijavanje u zdravim fazama. Mjerenjem strujnim kliještima, ili nekom drugom metodom, može se utvrditi je li faza u prekidu. Primjer zagrijavanja koje je posljedica kvara u drugom dijelu sustava, kao i zagrijavanja koje je posljedica grijanja

susjednog elementa, dan je na slici 111. Slika 111 a) prikazuje termogram trofaznog asinkronog motora kojem je faza 3 u prekidu (označeno na slici b). Slika 111 c) prikazuje termogram zagrijavanja kabela kroz koji uopće ne prolazi struja, što je posljedica grijanja od susjednog kabela.

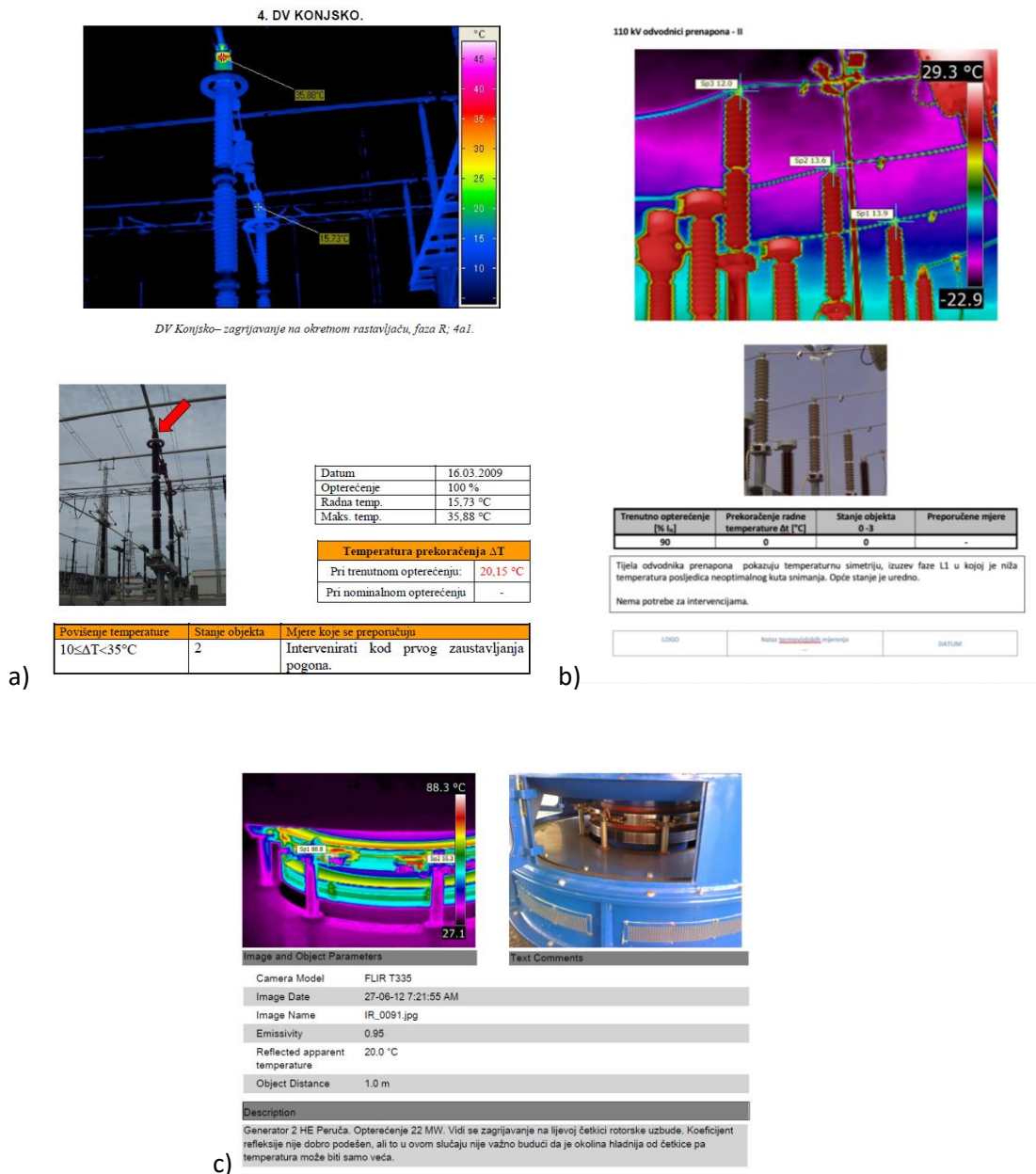


Slika 111 Primjeri lažnog zagrijavanja: a) termogram trofaznog asinkronog elektromotora kojem je treća faza isključena (na fotografiji b) je označen isključeni vodič i odgovarajući priključak). C) je termogram NN rednih stezaljki od kojih je samo jedna protjecana strujom, a njoj susjedne stezaljke se griju neizravno, iako kroz njih ne prolazi struja (zaokruženo na slici d)

8.3. Primjeri termografskog mjerenja

8.3.1. Visokonaponsko postrojenje

U nastavku teksta dan je primjer mjerenja na VN postrojenjima, i to: 400 kV DV RHE Velebit – TS Konjsko (mjereno u RHE Velebit, uočen kvar koji treba popraviti kod prvog zaustavljanja pogona), 110 kV odvodnici prenapona za 30/110 kV/kV transformator u TS VE Velika glava (nema kvara) te generator II u HE Peruća (potrebno zamijeniti četkice kod prvog zaustavljanja pogona).

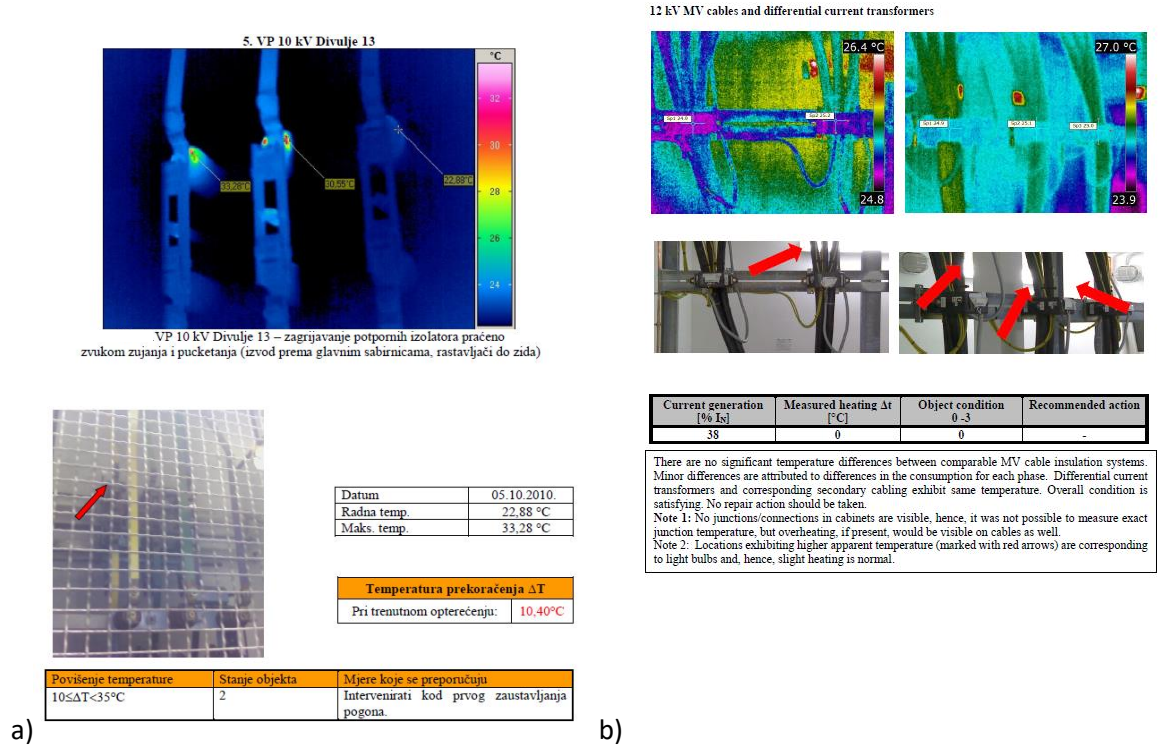


Slika 112 Primjer termografskog mjerenja na VN postrojenju (a) 400 kV DV, autor Ive Stilinović, dipl. ing., HEP ODS, b) 110 kV odvodnik prenapona i c) generator HE)

8.3.2. Srednjenaponsko postrojenje

Dan je primjer mjerenja na dva SN postrojenja. Na slici 113 a) je termogram u TS 35/10 kV/kV Divulje, VP 10 kV Divulje 13. Vidi se zagrijavanje na potpornom izolatoru rastavljača, za kojeg je potrebno izvršiti intervenciju kod prvog gašenja pogona.

Na slici 113 b) je termogram 12 kV SN kabela u TS VE Jelinak 12/110 kV/kV, gdje nema nikakve sumnjive situacije.



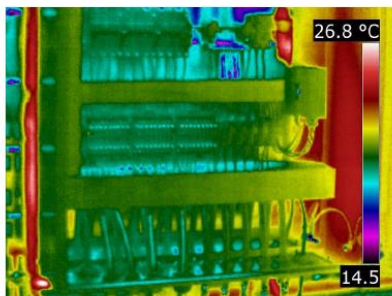
Slika 113 Primjer termografskog mjerenja na SN postrojenju (a) 10 kV potporni izolator, autor Ive Stilinović, dipl. ing., HEP ODS i b) 12 kV kabel

8.3.3. Niskonaponsko postrojenje

Dan je primjer mjerenja na više različitih NN postrojenja. Na slici 114 a) je termogram u TS 30/110 kV/kV Velika glava, ormarić naponskih grana energetskog transformatora. Nije uočeno nikakvo zagrijavanje koje bi ukazivalo na potencijalni kvar.

Na slici 114 b) je termogram razdjelnog ormarića u tvornici Omial Novi. Rastalni osigurači nazivne struje 25 A smješteni su ispod sklopova energetske elektronike. Struja u trenutku mjerenja $I = 9.7$ A. Prvi i četvrti osigurač s desne strane previše se pregrijevaju za efektivnu vrijednost struje koja teče kroz njih. Potrebno je provjeriti stanje spoja, očistiti i zategnuti kod prvog zaustavljanja rada, po potrebi promijeniti osigurač.

Ormarić naponskih grana 30/110 kV/V transformatora



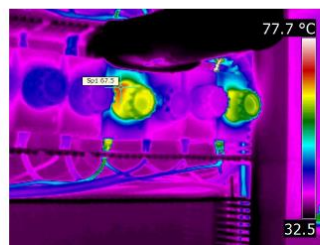
Trenutno opterećenje [% I _n]	Prekoračenje radne temperature Δt [°C]	Stanje objekta 0-3	Preporučene mjere
90	0	0	-

U ormariću naponskih grana nema temperaturnih anomalija koje bi ukazivale na loš spoj ili nečistoće.

Opće stanje je uredno, nema potrebe za intervencijama.

a)

Ormar Z16-I



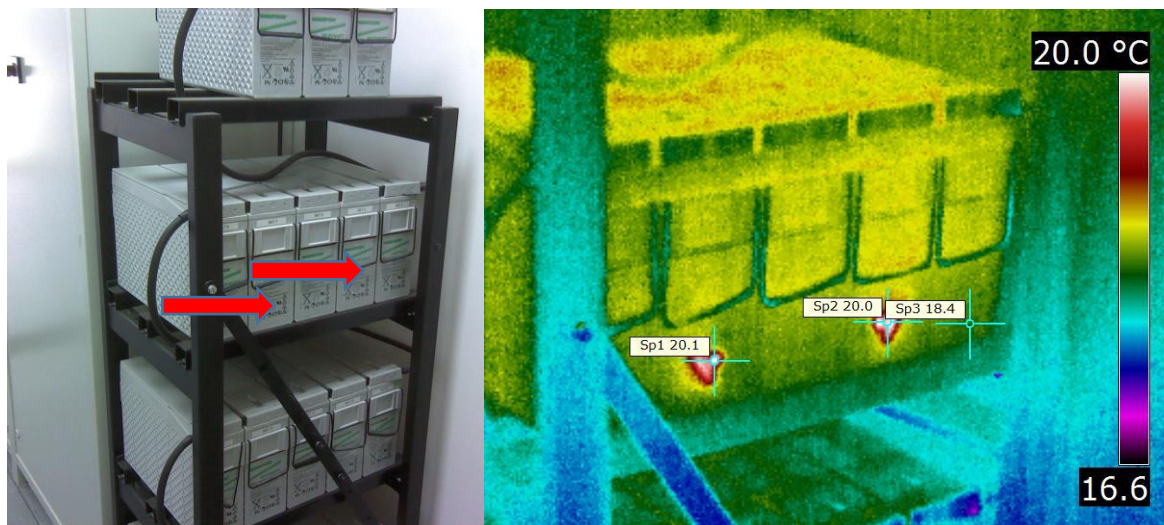
Trenutno opterećenje [% I _n]	Prekoračenje radne temperature Δt [°C]	Stanje objekta 0-3	Preporučene mjere
40	-	2	Izvršiti korekcije kod prvog zaustavljanja rada

Napomene: Ormar Z16, rastalni osigurači nazivne struje 25 A smješteni ispod elektronike. Struja u trenutku mjerenja $I = 9.7 \text{ A}$. 1. i 4. s osigurač s desne strane se pregrijavaju previše za efektivnu vrijednost struje koja teče kroz njih. Provjeriti stanje spoja, očistiti i zategnuti kod prvog zaustavljanja rada, po potrebi promijeniti osigurač.

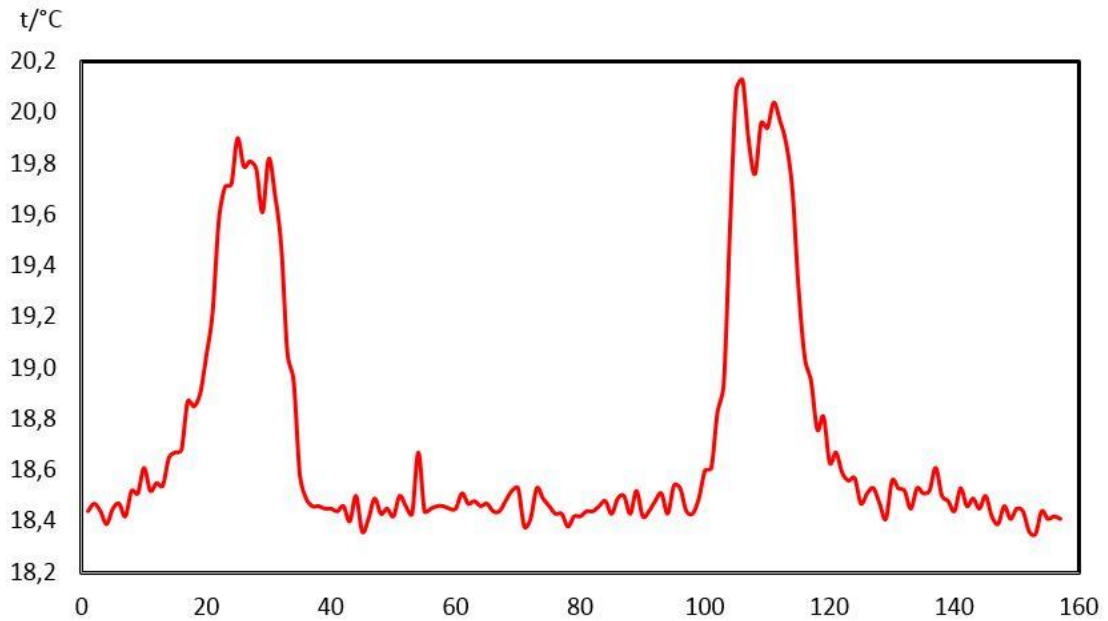
b)

Slika 114 Termografsko mjerenje NN instalacije (ormarić naponskih grana u TS a) i rastalni osigurači razdjelnika b))

Zasebno će se razmatrati problem termografije baterijskog paketa pomoćnog napajanja. U tekstu navodimo pomoćni DC razvod prijenosne trafostanice, ali slično vrijedi i za bilo koji UPS baterijski sustav.



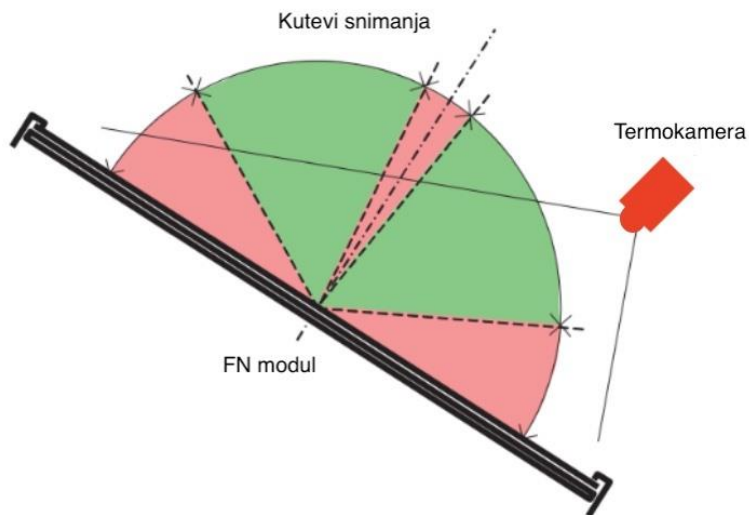
Slika 115 Fotografija i termogram baterijskog paketa pomoćnog napajanja trafostanice



Slika 116 Temperaturni profil dobiven analizom iz prethodnog termograma (baterijski paket)

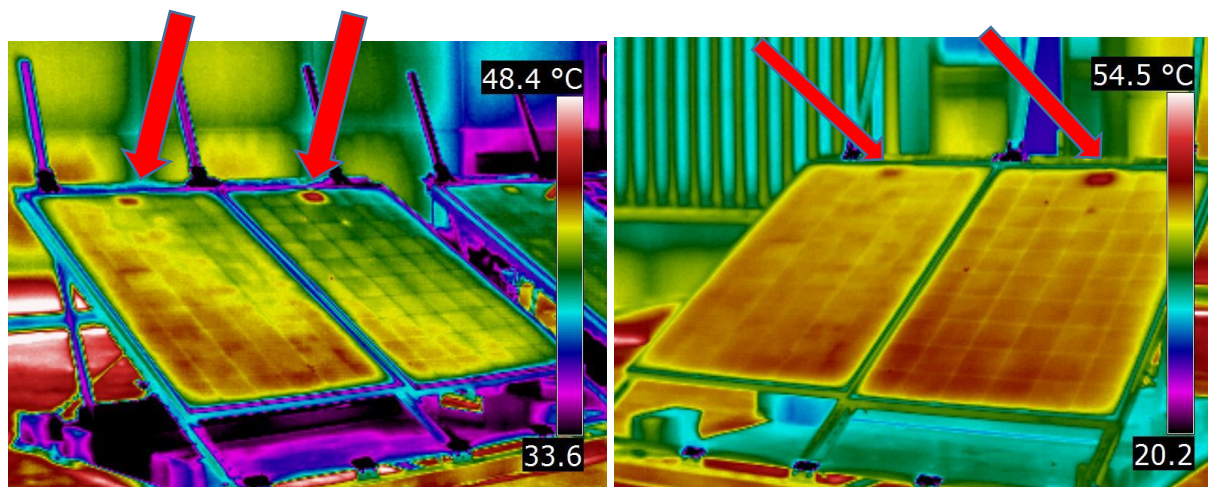
Fotografija prikazuje dio baterijskog paketa TS Rudine 20/110 kV/kV, a na termogramu se uočava zagrijavanje dva bloka. Zagrijavanje se dodatno potvrđuje na temperaturnom profilu prikazanom na grafu iznad. Samo zagrijavanje nije veliko, odnosno nadtemperatura je približno 2 °C. Međutim, uzmemo li u obzir činjenicu da je baterijski paket bio opterećen samo malom strujom punjenja, ovo je kvar. Daljnjim ispitivanjem treba utvrditi radi li se o kvaru na AC/DC ispravljaču ili samom baterijskom bloku.

U nastavku teksta opisat ćemo termografski pregled solarne elektrane. Termografsko mjerenje staklenih površina čak i iskusnom termografistu može biti izazovno zbog refleksivnosti stakla kao materijala, kao i činjenice da indeks loma stakla ovisi o frekvenciji svjetla. [8.1] Pogreška uzrokovana ovim problemom može se svesti u prihvatljive granice ako se kut snimanja fotonaponskog modula drži u rasponu od 5° do 60°, gdje se dogovorom uzima da je kut 0° okomica na plohu FN panela. [8.2] Kao što je vidljivo na slici (Slika 117), trebalo bi izbjegavati raspon kutova označenih crvenom boju, odnosno mjeriti pod kutovima označenim zelenom bojom. Iako je to u većini praktičnih slučajeva neostvarivo, napominjemo da se pouzdanim rezultatima dobivaju mjerenjima sa stražnje strane FN panela.



Slika 117 Izbor kuta snimanja prilikom termografskog snimanja FN panela

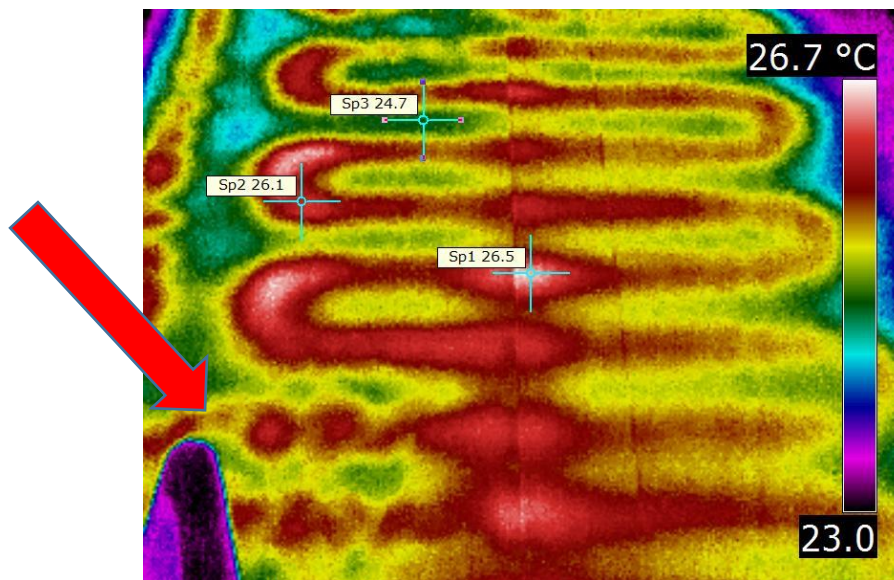
Ne ulazeći u problematiku rada fotonaponskih panela, jer bismo time izašli iz okvira ovog udžbenika, napomenimo da su solarne elektrane osjetljive na tzv. vruće točke. Riječ je o mjestima na panelu gdje se uslijed nečistoća događa lokalno zagrijavanje i generiranje vrlo visokih temperatura koje, osim što smanjuju učinkovitost elektrane, dovode i do mogućnosti pucanja staklenog pokrova.



Slika 118 Termografsko mjerenje polikristalnih FN panela (uočavaju se vruće točke, na termogramu označene strelicama)

Termografija je izuzetno pouzdana metoda za detekciju vrućih točaka na solarnim FN elektranama. Kao što se može vidjeti na gornjim termogramima, uslijed nečistoća na staklenom pokrovu solarnog modula došlo je do generiranja vrućih točaka temperature preko 54 °C. Ovakva situacija zahtijeva hitnu intervenciju u vidu čišćenja staklenog pokrova modula.

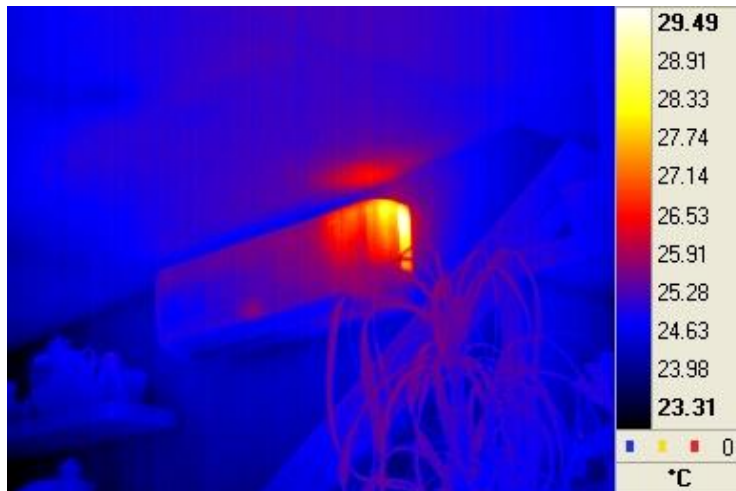
Idući primjer koji ćemo obraditi je podno grijanje. Termografija omogućava da se brzo i učinkovito pregledaju dijelovi sustava podnog grijanja te se utvrdi prisustvo eventualnog kvara.



Slika 119 Termogram podnog grijanja

Na termogramu uočavamo podno grijanje ispod keramičkih pločica. Dio grijača označen strelicom je evidentno u kvaru te zbog toga nije moguće postići postavljenu temperaturu prostorije.

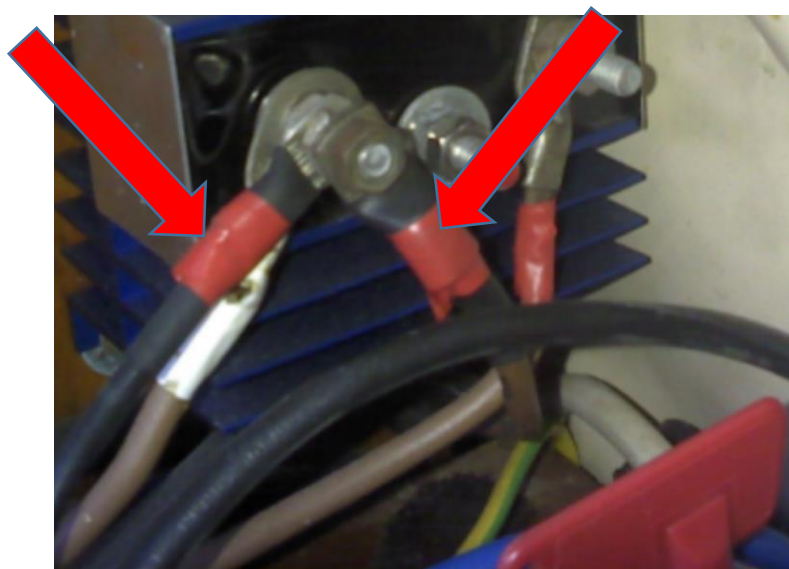
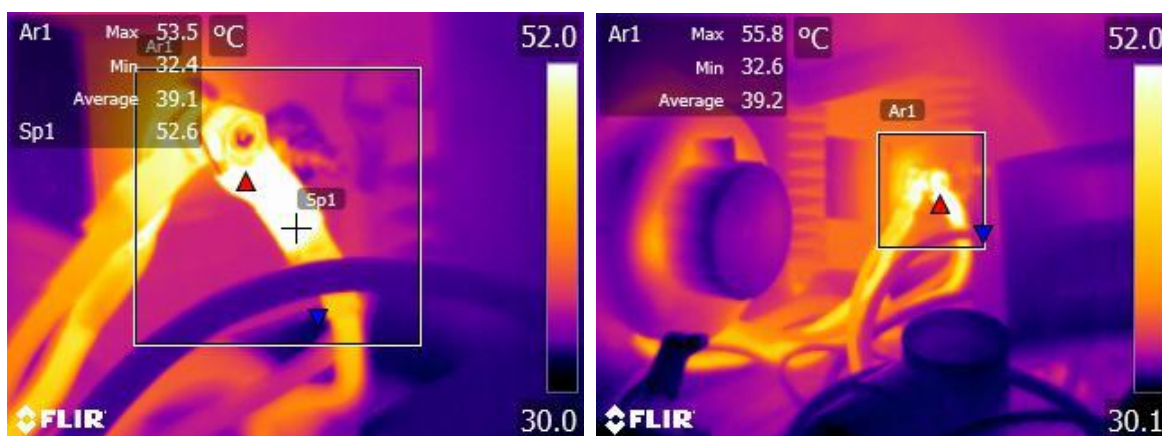
Sljedeći primjer odnosi se na lažni kvar na elektroničkom sklopovlju unutarnje jedinice klimatizacijskog split-sustava.



Slika 120 Termografsko mjerenje na elektroničkom sklopovlju unutarnje jedinice klimatizacijskog split-sustava.

Neiskusni bi promatrač temeljem ovog snimka mogao zaključiti da se radi o kvaru. Međutim, ovaj klimatizacijski uređaj je ugašen i riječ je o potrošnji u tzv. *stand-by* modu, odnosno zagrijavanju koje nije posljedica kvara, već potrošnje upravljačkog podsustava. Samim time nema potrebe za intervencijom. Ovaj primjer navodimo i kako bismo ukazali na važnost energetske učinkovitosti kućnih uređaja.

Za kraj ovog potpoglavlja prikazat ćemo mjerenja rađena na brodskoj NN instalaciji. Riječ je o DC motoru koji podiže sidro (vinč).

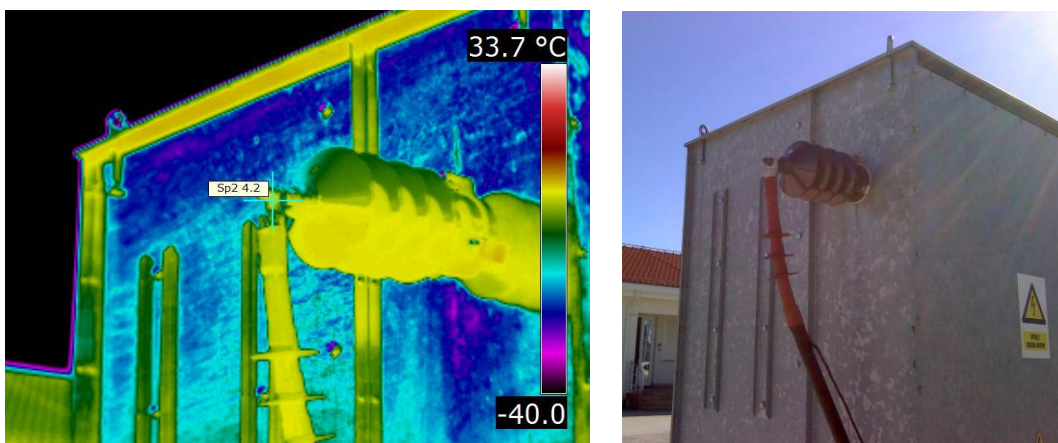


Slika 121 Termografski snimak i fotografija motora za podizanje brodskog sidra (sidreno vitlo)

Na termogramu je jasno uočljivo zagrijavanje DC kabela (negativni priključak). Evidentno je da je kabel poddimenzioniran te da se na njemu javlja nedozvoljeno velik pad napona, čime ni motor ne dobiva dostatnu struju za uredan rad. Potrebno je postojeći kabel hitno zamijeniti kabelom odgovarajućeg presjeka, ili paralelno postojećem kabeu položiti dodatni kabel.

Infracrveni prozor

Ako su visokonaponska ili srednjenaponska postrojenja oklopljena, termografsko mjerenje je značajno otežano. Naime, da bi se termokamerom moglo vidjeti zagrijavanje kroz metalni oklop, nužno je da iznos zagrijavanja bude značajan. Samim time preventivna svrha termografskih pregleda je značajno umanjena. Primjer termografskog mjerenja na malooskom otporniku koji je potpuno oklopljen metalnim kućištem dan je na donjoj slici (Slika 122).



Slika 122 Termogram i digitalna fotografija malooskog otpornika potpuno zatvorenog u metalno kućište

Slika 122 prikazuje termografsko mjerenje malooskog otpornika u TS VE Rudine 20/110 kV/kV. Malooski otpornik služi za uzemljenje nul-točke na sekundarnoj strani energetskog transformatora, odnosno ograničava struju kratkog spoja na, u ovom slučaju, 150 A. Kao što se vidi na termogramu, pregled je zapravo besmislen budući da se unutrašnjost ne vidi, pa je moguće samo ispitati temperaturu spoja s kablom. Budući da kroz malooski otpornik u uobičajenom pogonskom stanju nema struje, nije očekivano da će spoj pokazati povišenu temperaturu pa ova snimka ne govori ništa. Rješenje za ovakve situacije je ugradnja infracrvenih prozora, odnosno otvora koji su prozirni za termokameru. Takvi prozori moraju biti otporni na električne lukove reda veličine 10 kA te biti premazani slojevima koji su otporni na vlagu, visoke i niske temperature. Primjer takvog prozora prikazuje Slika 123.

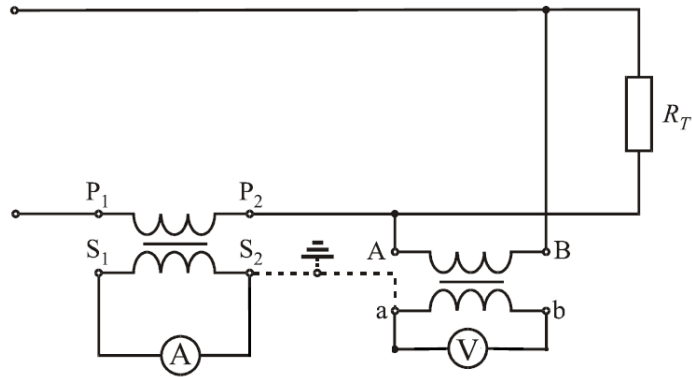


Slika 123 Primjer infracrvenog prozora ugrađenog na sredjenaponske kabelaške ćelije (6 kV postrojenje u TS Cemex)

Strujna klješta

Ovo cjelina ukratko prikazuje najosnovnije spoznaje o mjernim transformatorima. Više detalja može se naći npr. u [8.2.] Mjerni transformatori služe za snižavanje (transformiranje) izmjeničnih napona i struja na iznose koji se mogu mjeriti uobičajenim instrumentima. Oni ujedno i izoliraju (galvanski odvajaju) mjerne instrumente od visokonaponskih krugova tako da je i rukovanje instrumentima bezopasno. Preveliki se naponi snižavaju na niže iznose naponskim mjernim transformatorima, a prevelike struje strujnim mjernim transformatorima. Mjerni se transformatori sastoje od feromagnetske (željezne) jezgre te od primarnog i sekundarnog namota. Primarni se namot uključuje u mjereni strujni krug, a na sekundarni se namot uključuju mjerni instrumenti.

Primarni namot naponskog transformatora priključuje se paralelno trošilu čiji se napon mjeri, Slika 124. Pritom struja kroz njegov primarni namot mora biti zanemariva u odnosu na struju trošila. Primarni namot strujnog transformatora uključuje se u seriju s trošilom i kroz njega teče struja trošila. Pritom pad napona na njegovu primarnom namotu mora biti zanemariv u odnosu na napon trošila, slično kao pad napona na ampermetru pri izravnom mjerenju struje. Budući da se na sekundarne namote mjernih transformatora, osim voltmetara odnosno ampermetara, priključuju i strujne i naponske grane vatmetara, varmetara, fazometara, brojila električne energije itd., od transformatora se traži da transformiraju mjerene veličine u **stalnom omjeru i bez faznoga pomaka**.



Slika 124 Priključak strujnog i naponskog mjernog transformatora. [8.2]

Strujni transformatori

Strujni transformatori transformiraju mjerenu struju u praktično stalnom omjeru na vrijednost koja je prikladna za mjerenje. U idealnom slučaju, kada bi struja magnetiziranja bila jednaka nuli, bilo bi [8.2]:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (8.5.)$$

Za takav idealni transformator omjer primarne I_1 i sekundarne struje I_2 konstantan je i jednak omjeru broja zavoja sekundarnoga N_2 i primarnog namota N_1 :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = k_s \quad (8.6.)$$

Omjer nazivne primarne i sekundarne struje ili broja zavoja sekundarnog i primarnog namota naziva se **prijenosnim omjerom** k_s strujnog transformatora. Vrijednost struje kroz primarni namot idealnog transformatora može se lako odrediti ako se izmjeri sekundarna struja i pomnoži s omjerom broja zavoja. Ako je sekundarni krug strujnog transformatora otvoren, primarna je struja jednaka struji magnetiziranja i cjelokupna primarna struja služi za magnetiziranje željezne jezgre (nema sekundarnih amperzavoja koji bi se suprotstavljali primarnim amperzavojima). Na taj način brze promjene magnetskog toka mogu inducirati veoma visoki napon u sekundarnom namotu. Taj visoki napon može biti opasan po život, a s druge strane visoka indukcija uzrokuje velike gubitke u jezgri transformatora, što dovodi do pretjeranog zagrijavanja transformatora, pa i do njegova termičkog uništenja. Radi toga sekundarne stezaljke strujnog transformatora u pogonu **nikada ne smiju biti otvorene** te impedancija instrumenata u sekundarnom krugu ne smije prijeći određenu vrijednost. Iz nazivne snage S_n i nazivne sekundarne struje I_{2n} može se onda odrediti kolika najviše smije biti impedancija u sekundarnom krugu [8.2]:

$$Z_2 \leq \frac{S_n}{I_{2n}^2} \quad (8.7.)$$

Stezaljke primarnog namota strujnih mjernih transformatora označavaju se s **P1** i **P2**, a sekundarne sa **S1** i **S2**. Postoji mnogo izvedaba strujnih transformatora, ovisno o namjeni, primarnim strujama i pogonskom naponu. Vrlo je česta izvedba strujnog transformatora kod kojega se primarni vodič provlači kroz otvor na jezgri transformatora, to su tzv. **prstenasti transformatori**. Taj vodič onda predstavlja primarni zavoj strujnog transformatora ($N_1 = 1$), dok je sekundarni namot namotan oko jezgre kroz koju se provlači

primarni zavoj. Osnovni podatci zadani za svaki strujni transformator jesu nazivna primarna i sekundarna struja (sekundarna je struja standardizirana na 1 A ili 5 A), nazivna snaga i razred točnosti.

Česta izvedba strujnog mjernog transformatora su **strujna kliješta**, tj. strujni transformator čija se željezna jezgra može rasklopiti i obuhvatiti vodič. Bitna prednost strujnih kliješta je što, za razliku od klasičnog ampermetra, ne zahtijevaju prekid kruga čija se struja mjeri. [8.2] Zahvaljujući toj činjenici, prilikom termografskih mjerenja moguće je odrediti opterećenje na nekom NN elementu (npr. razvodnom ormaru, elektromotoru itd.) bez da se remeti redoviti rad postrojenja.

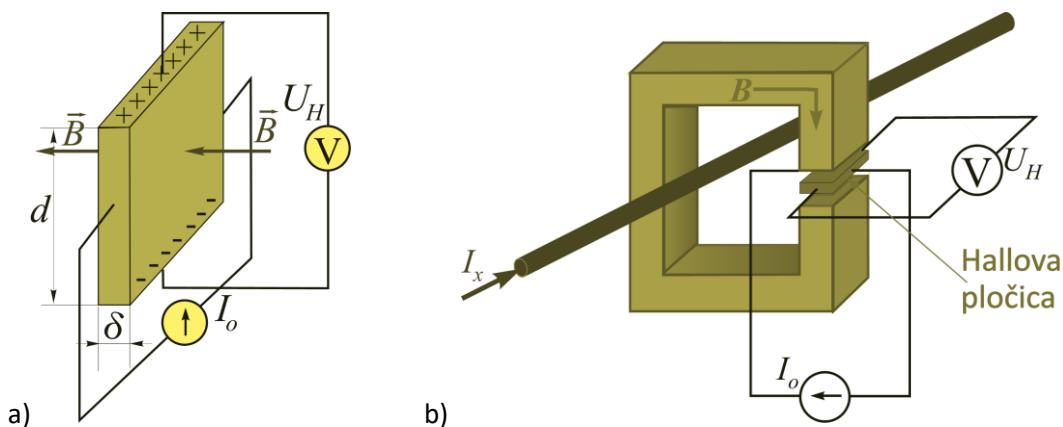


Slika 125 Strujna kliješta proizvođača Fluke u klasičnoj inačici prikazana su na slici a), s dodatnim Rogowski svitkom na slici b) te clamp-gun izvedbi proizvođača Milwaukee na slici c)

Hallova sonda

U slučaju da je potrebno mjeriti istosmjerne struje klasična strujna kliješta nisu rješenje. Naime, za ispravan rad transformatora, pa tako i strujnih kliješta, potreban je vremenski promjenjiv magnetski tok. Budući da tok istosmjerne struje nije promjenjiv, za istosmjernu struju koriste se Hallove sonde. Hallova sonda radi na principu Hallovog efekta. Ako poluvodičku pločicu kroz koju teče struja postavimo u magnetsko polje, na krajevima pločice pojavit će se napon. Smjer ovog napona okomit je na ravninu što je čine smjer struje i smjer magnetskog polja. Na krajevima pločice akumulira se naboj. Akumuliranje naboja traje sve dok se ne izjednače električna i magnetska sila i tada napon na krajevima pločice poprima maksimalan iznos. Hallova se pločica postavlja u zračni raspored feromagnetske jezgre tako da je magnetsko polje razmjerno nepoznatoj struji I_x . Za $N_1 = 1$ Hallov napon je razmjern mjerenoj struji pa se voltmetar može baždariti izravno u amperima [8.3]:

$$U_H = k_H I_x \quad (8.8.)$$



Slika 126 a) objašnjenje Hallovog efekta, b) načelo mjerenja struje Hallovom sondom [8.3]. Primjer mjerenja Hallovom sondom: c) mjerenje struje motora prilikom navijanja opruge 10 kV prekidača i d) mjerenje struje punjenja baterije pomoćnog DC razvoda VN postrojenja

Kao jezgra može se iskoristiti jezgra strujnih kliješta kojoj se u jedan kraj ugradi Hallova pločica. Na taj se način Hallova sonda integrira u strujna kliješta što omogućava mjerenje istosmjernih i izmjeničnih struja jednim uređajem, vidi sliku (Slika 126).

Literatura

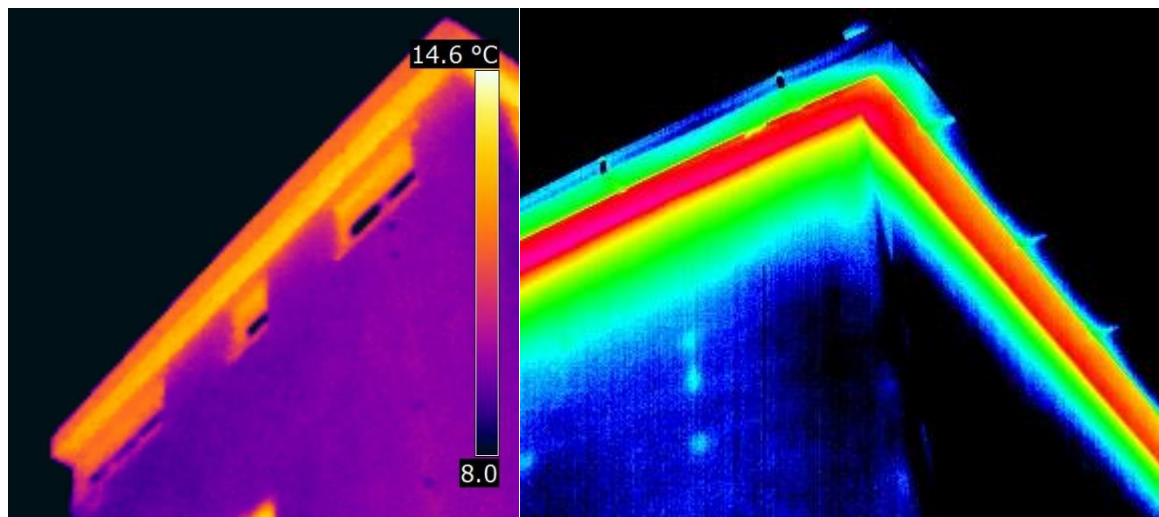
- [8.1] T. Garma, M. Cvetković, V. Bandalo, Experimental Prediction of Shaded Solar Cells Hot-Spots, International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech), Split, 2017.
- [8.2] F. G. Čabo, I. Marinić Kragić, T. Garma, S. Nižetić, Development of thermo-electrical model of photovoltaic panel under hot-spot conditions with experimental validation, Energy 230, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120785>, 2021.
- [8.3] T. Kilić, „Autorizirana predavanja iz. Električnih mjerenja“, FESB, 2020.

9. Građevinarstvo

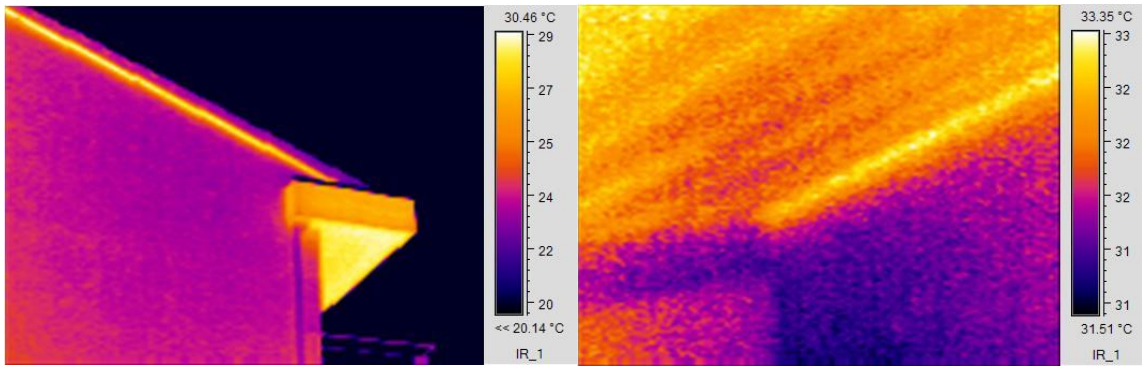
U okviru građevinske struke niz je primjera korištenja termografske kamere. Sva energetska postrojenja, odnosno grijanje, klimatizacija, ventilacija i sl., iako formalno pripadaju strojarskoj struci, usko su vezana u gradnju i korištenje građevina. Procjenjivati energetska svojstva građevine bez termokamere je vrlo upitno s obzirom na to da se uglavnom svodi na proračun svojstva toplinske ovojnice temeljene na jednostavnom jednodimenzionalnom modelu toka topline. Vlaga u konstrukciji može se kvalitetno analizirati upotrebom termografije, uz preporuku potvrđivanja nalaza vlagomjerima. Propusti koji se javljaju na zgradama s klasičnom fasadom, koja se u okvirima postupka energetske obnove prekriva slojem ekspaniranog polistirena ili mineralne vune, mogu se kvalitetno locirati te predložiti sanacija. Određivanje zrakopropusnosti toplinske ovojnice *blower door* testom bez termokamere u cilju iznalaženja mjesta propusta samo je nepotreban trošak.

9.1. Protok topline kroz ovojnicu

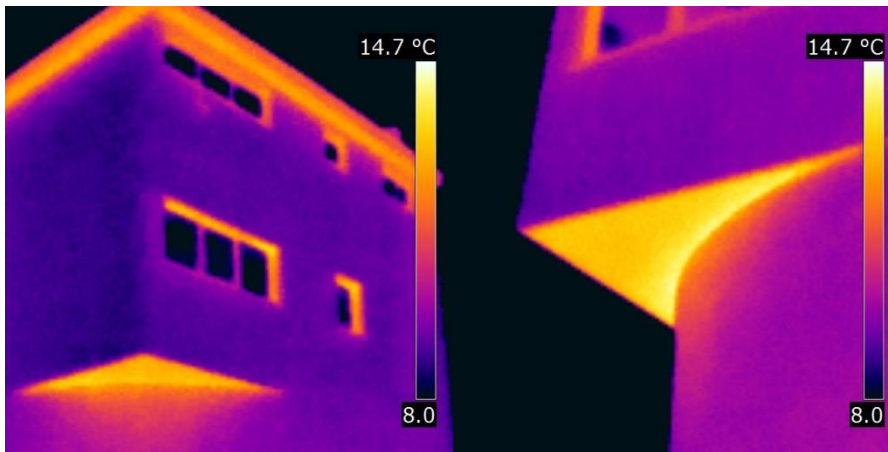
Kako bi se mogao evaluirati protok topline kroz toplinsku ovojnicu, potrebno je na raspolaganju imati dovoljnu razliku topline između unutrašnjeg i vanjskog prostora. Snimanje se uvijek provodi noću, a ako je dio zgrade bio izložen popodnevnom Suncu, treba imati na umu i taj utjecaj. Kako je pozadinska temperatura kod snimanja fasade od približno 10°C (oblačno) do -40°C (vedro), znatan je utjecaj refleksije na termogram iako fasadni materijali imaju emisivnost od približno 0,85 do 0,95 (Slika 38).



Slika 127 Toplinski most neizolirane stropne ploče



Slika 128 Toplinski most neizoliranog detalja ruba krovne AB ploče (izvana i iznutra)



Slika 129 Nedostatak izolacije na istaku prostorije i rubu prozorskih otvora te krovnoj ploči

9.2. Vlaga

Termografija ima izrazito veliku važnost u detekciji vlaženja u građevnom materijalu. Jedan mehanizam je penetracija vlage u građevni materijal (zidovi, podovi, stropovi...) te njeno zadržavanje. Drugi mehanizam je kapilarno podizanje i migracija vlage iz područja veće zasićenosti vlagom prema području manje zasićenosti.

Princip detekcije zaostale vlage u materijalu temelji se na činjenici da je specifični toplinski kapacitet vode skoro četiri puta veći od zraka. Uzme li se za primjer mineralna vuna koja se kao izolator sastoji od vlakana i zraka u međuprostoru, pri penetraciji vode toplinski se kapacitet mineralne vune znatno poveća. Pošto je dnevna temperatura redovito veća od noćne, pri noćnom hlađenju zgrade vlažni materijal, zbog većeg toplinskog kapaciteta, sporije će se hladiti pa će se vlažna područja u infracrvenom spektru vidjeti kao toplije zone. Eksperiment na slikama (Slika 130 i Slika 131) ilustrira što se događa s vlažnim materijalom. Sredina spužve natopi se vodom i ubaci u najlon vrećicu čime se simulira toplinska izolacija prekrivena hidroizolacijom. Reflektor od 1 kW predstavlja zagrijavanje Sunca. U nizu termograma (Slika 131) prvi predstavlja navlaženu spužvu (središnji dio) u najlon vrećici prije zagrijavanja. Drugi je termogram stanje nakon zagrijavanja kada se ukloni izvor topline. To je situacija zgrade u prvim večernjim satima. Vlažni je

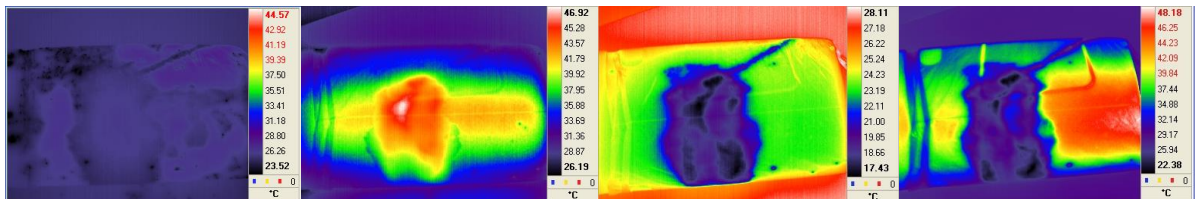
materijal radi većeg toplinskog kapaciteta zadržao toplinu, dok se suhi rashladio. Treći je termogram situacija kad se spužva i vrećica stave u hladnjak te izvade iz hladnjaka. Vlažni je dio zadržao hladnoću, a suhi se dio zagrijao. To je situacija zgrade ujutro prije svitanja. Četvrti je termogram za vrijeme novog grijanja reflektorom koji nije uklonjen. Vlažni se dio sporije zagrijava te je hladniji, no velike su refleksije od reflektora. To je situacija snimanja po danu dok Sunce grije. Temeljem ovog, isključi li se situacija da se snimanje vrši ranim jutrom prije svitanja, vidi se pravilo da se termogrami snimaju u večernjim satima.

Tablica 7 Specifični toplinski kapacitet [1.1]

Specifični toplinski kapacitet c_p [J/kgK] pri 25°C	
Zrak	1012
Aluminij	897
Bakar	385
Voda	4181



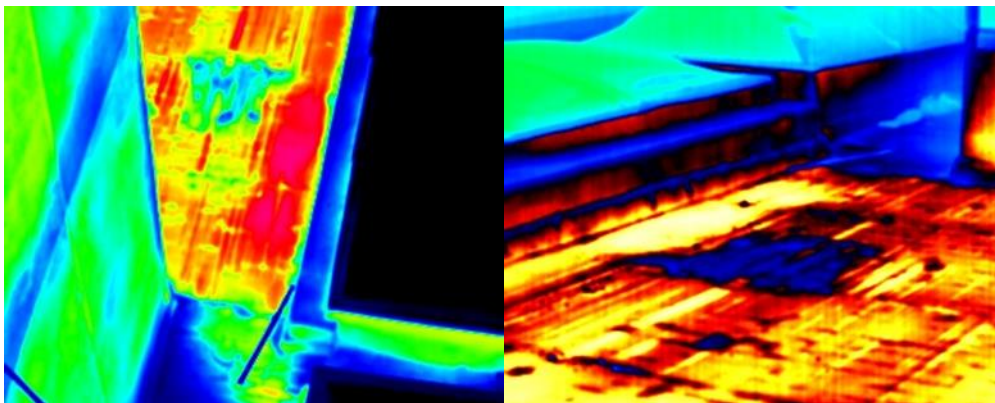
Slika 130 Primjer koji ilustrira način detekcije vlage



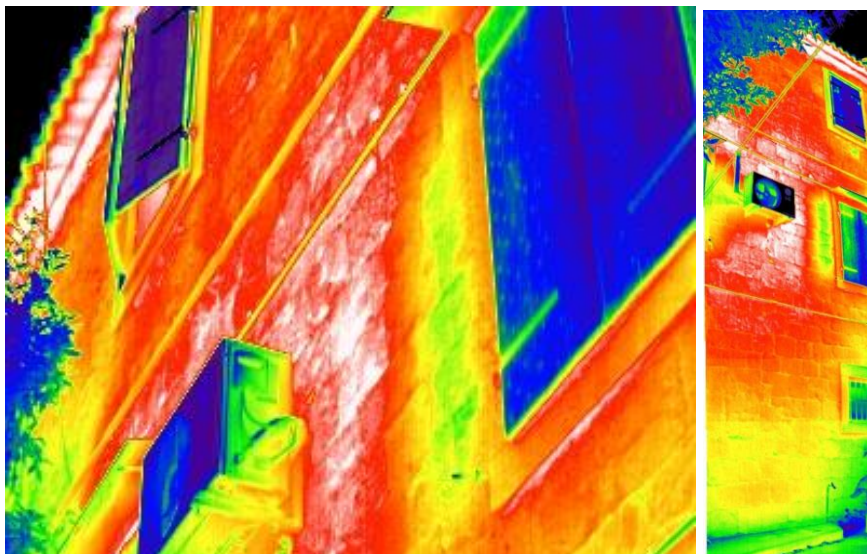
Slika 131 Nezagrijano, nakon zagrijavanja s uklonjenim reflektorom, nakon hlađenja i za vrijeme novog zagrijavanja

Sljedeći termogrami prikazuju neke primjere detekcije vlage u materijalu. Slika 132 prikazuje vlagu zarobljenu ispod hidroizolacije koja u toj zoni ima oštećenje. Slika 136 prikazuje vlagu ispod podnih pločica terase. Na termogramu se također vidi velika reflektivnost (mala emisivnost) keramičkih pločica pa one kao takve predstavljaju problem za termografiju. Na fotografiji iste slike vide se i tragovi kalcifikata. Kalcifikat je jedan optički pokazatelj da mjesto gdje se on nalazi je mjesto gdje voda ulazi i izlazi iz materijala, noseći sa sobom kalcifikat. Dakle, to je optički pokazatelj da postoji vlaga u materijalu koja migrira u i izvan materijala. Na slici je (Slika 137) prikazan termogram u dvije skale boja. Radi se o zgradi s

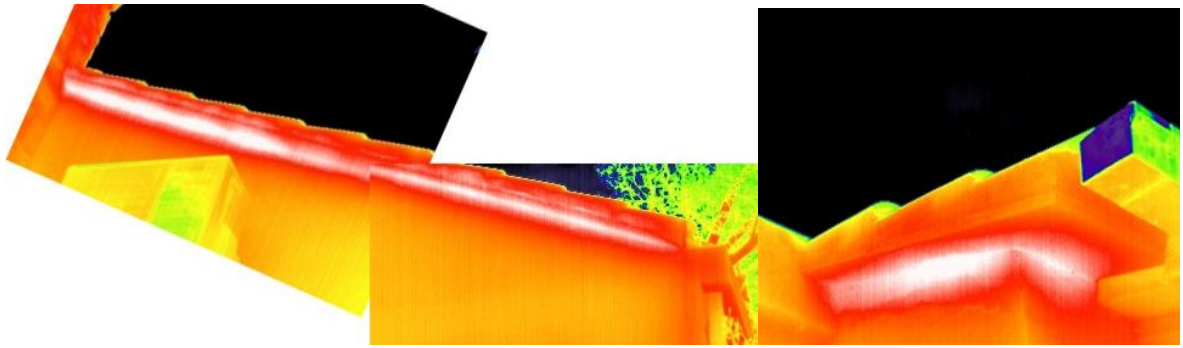
fasadom iz ekspaniranog polistirena u koju je ušla vlaga ispod EPS-a te probija na fasadu u vidu horizontalnih linija. Slično se vidi na termogramima (Slika 48, Slika 49). Iskustvo govori da je najčešća lokacija prodora vlage ispod fasada izoliranih EPS-om ili mineralnom vunom premali preklap poklopnice na vrhu zida i kamene klupčice prozora i vrata. Kamen kao materijal propustan je za vodu (Slika 133, Slika 134), a pogotovo klupčice iz kamena niti imaju uzdignute rubove ispod fasade i stolarije, niti imaju dovoljno nagiba, niti imaju dovoljno veliku okapnicu. Savjet je da ih se ne montira na zgradama, naročito kad se radi o modernim sustavima fasada. Slika 138 prikazuje vlagu zarobljenu u kamenu koji je vlagopropustan i porozan.



Slika 132 Vlaga ispod hidroizolacije



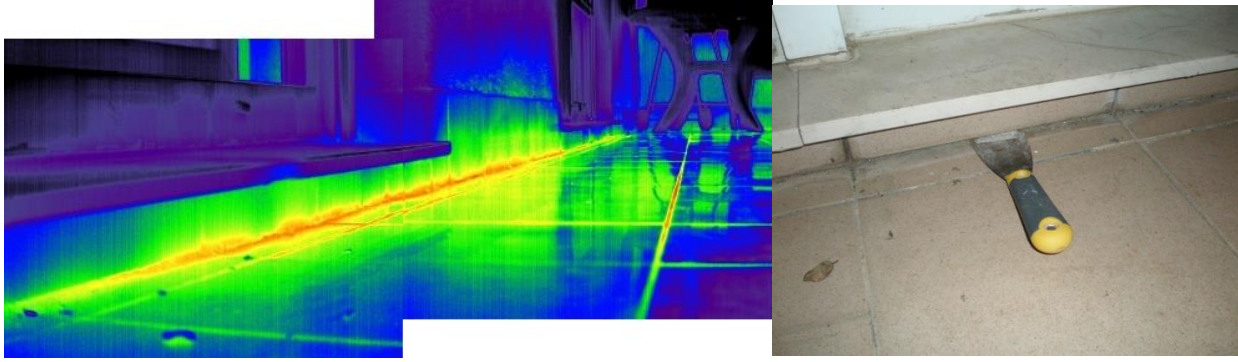
Slika 133 Vlaga u zidu iza klima-uređaja i na rubu krovišta



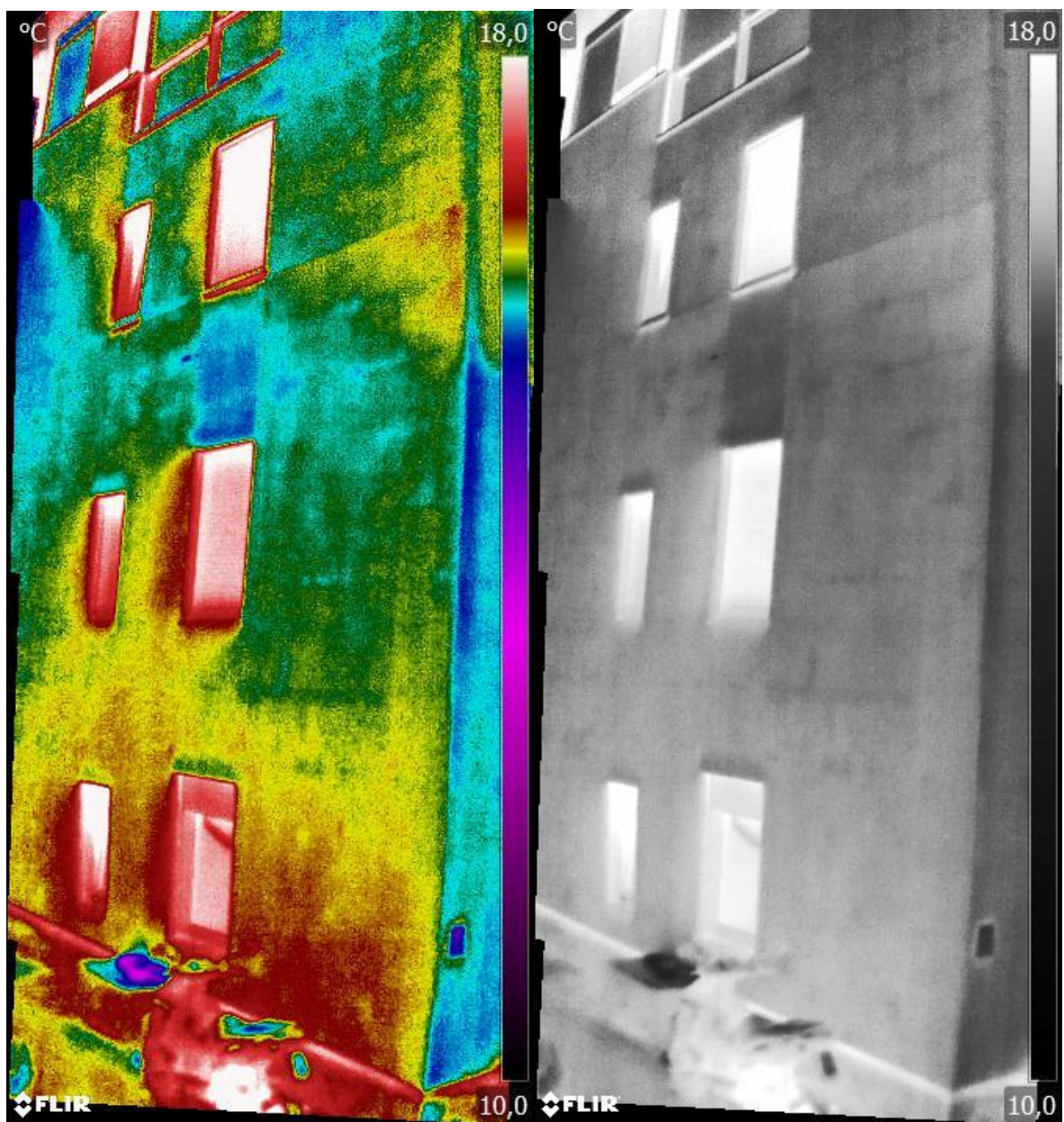
Slika 134 Vlaga u zidu ispod vodopropusnog kamenog ruba krovišta



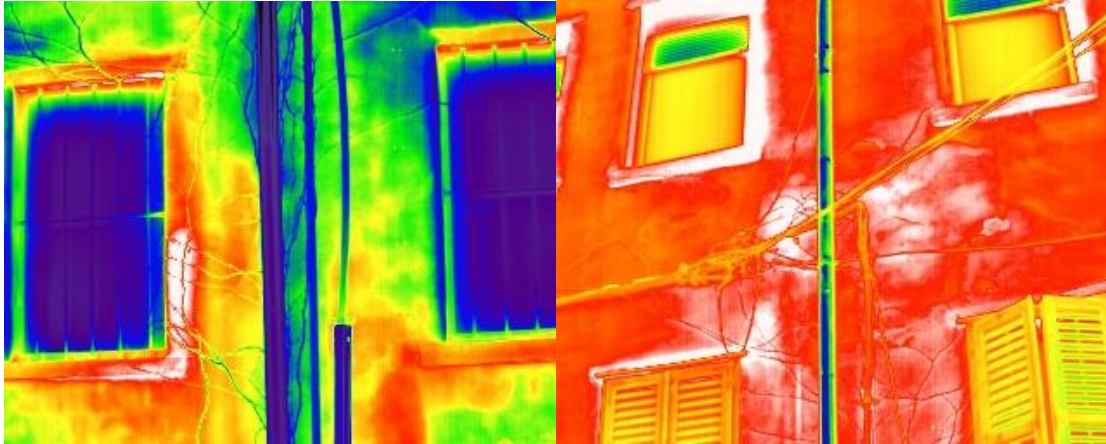
Slika 135 Vlaga u zidu zgrade iza katedrale sv. Duje



Slika 136 Vlaga ispod podnih pločica i tragovi kalcifikata

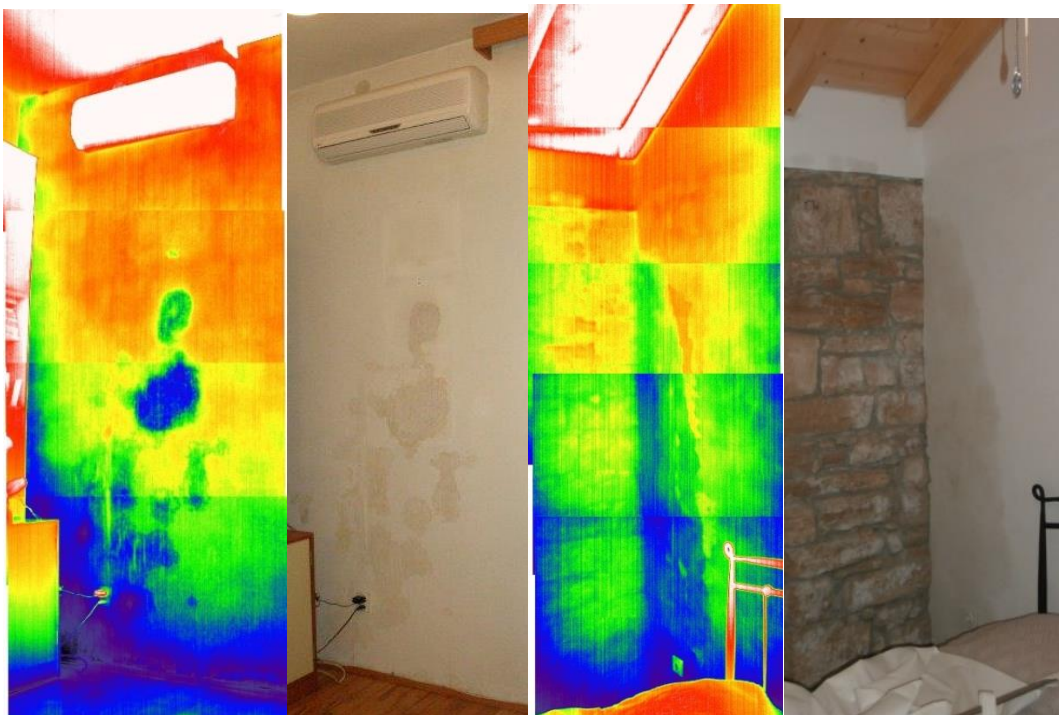


Slika 137 Horizontalne linije predstavljaju proboj vlage koja se zadržava ispod toplinske izolacije fasade

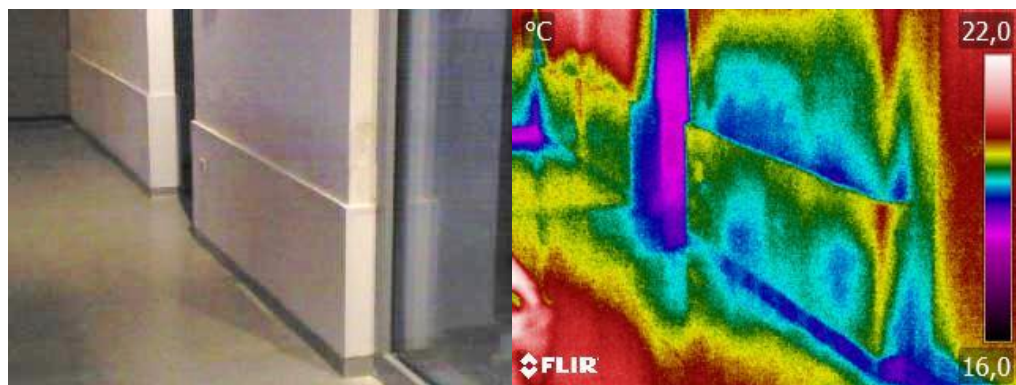


Slika 138 Vlaga zarobljena u kamenu

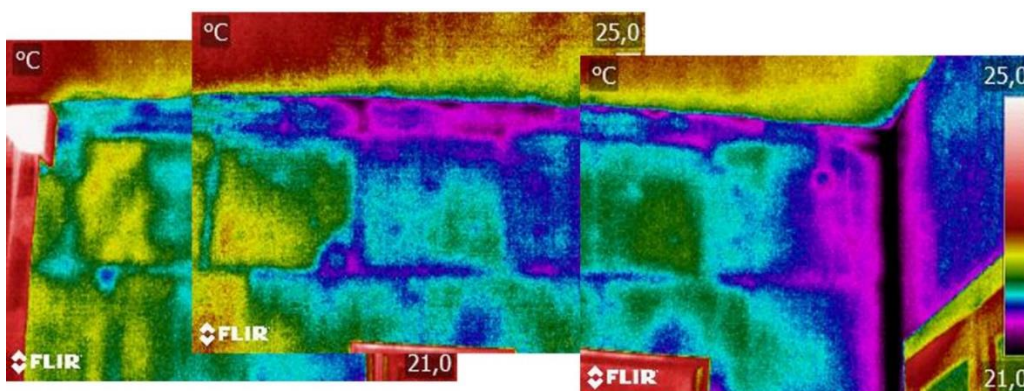
Vlaga u unutrašnjosti zgrade, također zbog dinamike grijanja i hlađenja, manifestira se kao zona različite topline. Takva mjesta treba redovito provjeriti i dubinskim vlagomjerom kako bi se potvrdilo da se stvarno radi o vlazi, a ne o nekom drugom toplinskom efektu poput topline kanalizacione cijevi, nekakve šahte ili praznog prostora, energetskih instalacija i sl. Slike od 139 do 142 pokazuju vlagu lociranu u zidovima.



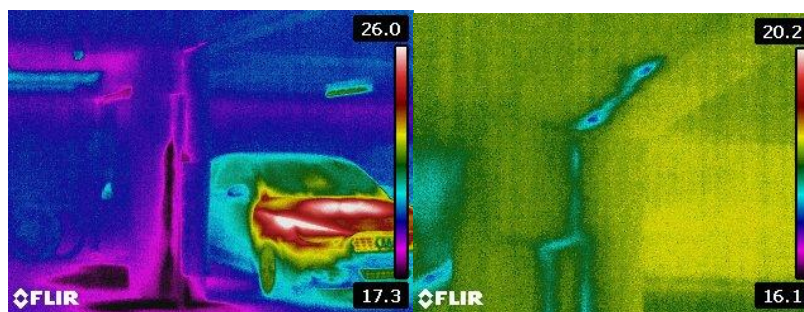
Slika 139 Nakupine vode u zidu, prodor od strane krovišta



Slika 140 Nakupina vlage u zidu, prodor od strane podne ploče

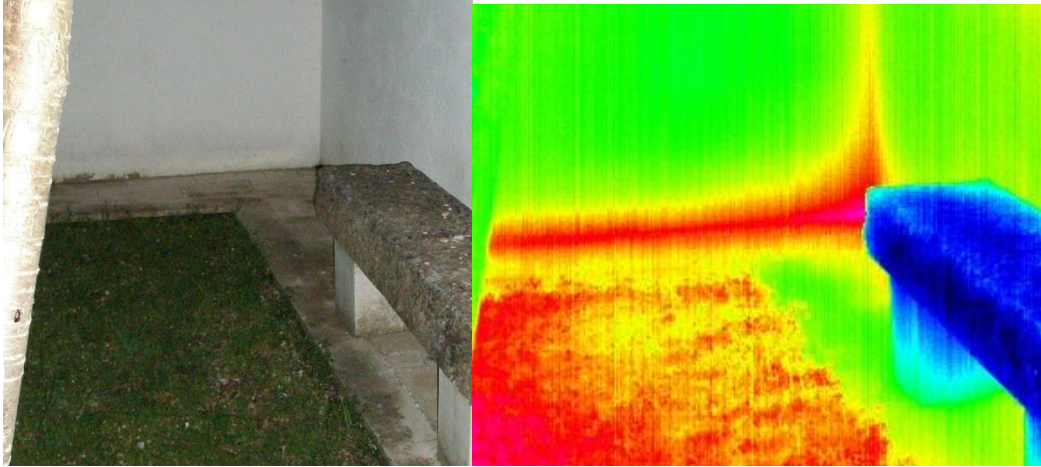


Slika 141 Nakupina vlage u zidu, prodor od strane krovišta

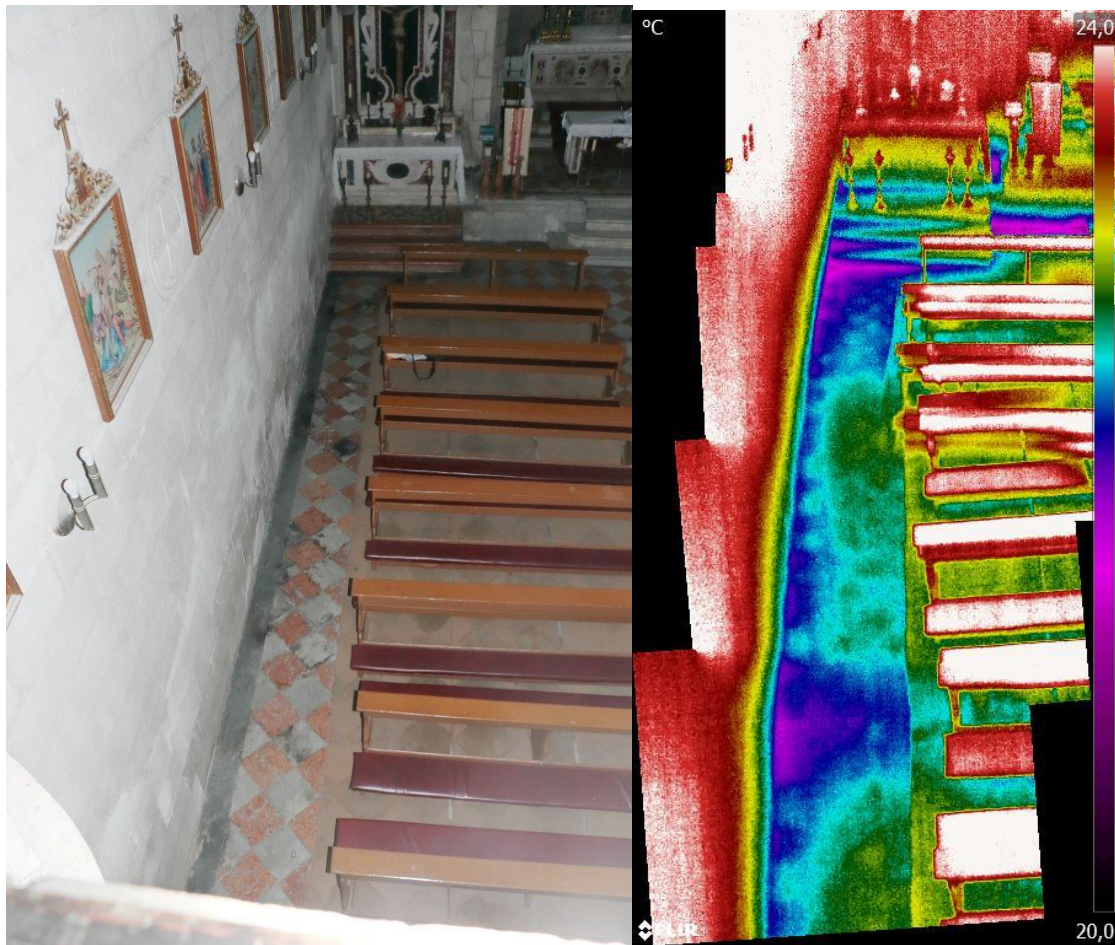


Slika 142 Primjeri vlage u zidu u području dilatacije zgrade

Drugi je mehanizam vlaga iz tla koja se kapilarno širi iz područja veće vlažnosti u područje manje vlažnosti. Ovu situaciju treba razlikovati od slučaja kad je zid uronjen u zemlju koja je natopljena vodom (podzemne vode i sl.). Karakteristično za ovu vlagu (koja nije od podzemnih voda i sl.) jest da se uzdiže do približno jedan metar iznad poda. Često se ova vlaga može riješiti uređajima koji funkcioniraju na principu razlike naboja, te mijenjaju polaritet naboja u zidu pa vlagu tjeraju od zida i time isušuju zidove. Također, ove situacije mogu se rješavati kemijskim putem injektiranjem zida.



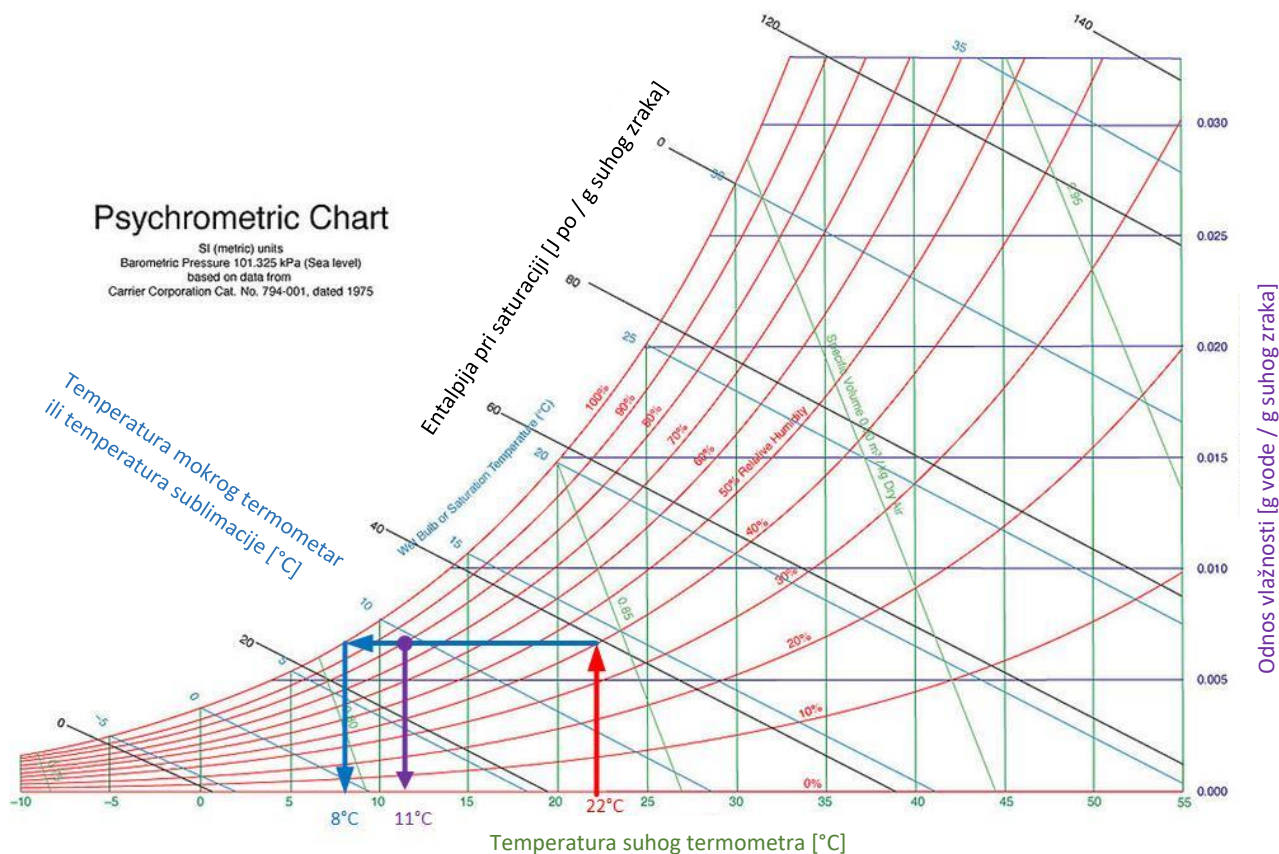
Slika 143 Primjer kapilarnog podizanja vlage od tla u zid



Slika 144 Primjer kapilarnog podizanja vlage od tla u zid (Nova crkva, Šibenik)

9.3. Kondenzacija

Kondenzacija u elementima građevina javlja se radi fizikalne pojave kondenzacije vodene pare na hladnoj površini. Pojava kondenzacije ovisi o količini vlage u zraku i temperaturi površine elementa građevine. Relativna vlažnost zraka opisuje koliko posto ima vlage u zraku, od maksimalno topive vlage u zraku određene temperature. Isti postotak relativne vlage pri višoj temperaturi značit će veću količinu (litara/m³) vode u istom volumenu zraka. Zagrije li se zrak, on u sebe može povući više vlage negoli je bilo dok je bio hladan, a ako se takav ohladi, višak vlage će se kondenzirati u vidu kondenzata na hladnijim površinama. Slika 145 prikazuje psihometrijski dijagram gdje su na apscisi temperatura, ordinati iznos vlage, a crvene linije su postotci relativne vlažnosti. Za primjer je dato da neki prostor ima izmjereno 22 °C i 40 % Rh. Crvena strelica pokazuje gdje se nalazi točka za to stanje. Kada se postavi pitanje koje temperature treba biti hladna površina da bi došlo do kondenzacije, horizontalnom plavom strelicom se ide do 100 % Rh i vertikalnom plavom strelicom očita da je to 8 °C. Kako se smatra da čak nije potrebno da je 100% relativne vlažnosti (orošena površina) da bi se stvorili uvjeti za gljivice i plijesni, već da je dovoljno i 80 % Rh, ljubičasta strelica prikazuje temperaturu površine do 11 °C kada za par uzastopnih dana pri toj vlažnosti postoje uvjeti za razvoj gljivica i pljesni.

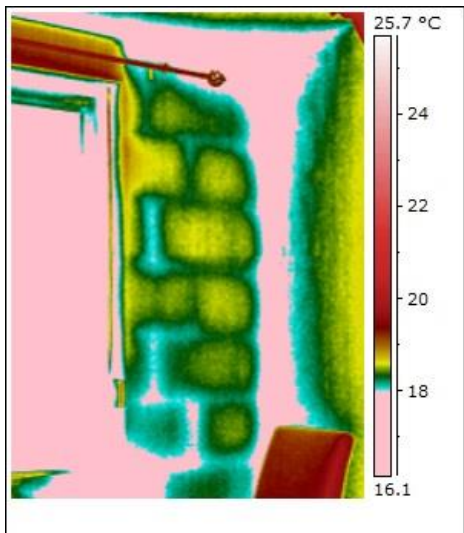


Slika 145 Psihometrijski dijagram [9.1]

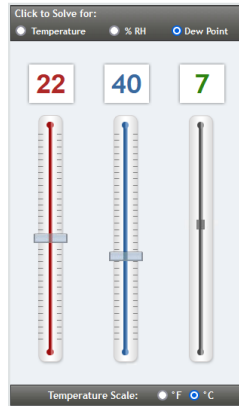
Slika 146 prikazuje jednostavan termo-higro-pirometar gdje se pirometrom mjeri površina zida, termometar i pirometar očitavaju stanje zraka (uzduh) pa se podaci uspoređuju sa psihometrijskim dijagramom te se aktivira postavljeni alarm (na temperaturi kondenzacije ili 80 % Rh, ovisno o postavkama). Termokamere nekih proizvođača mogu se *bluetoothom* spojiti na termo-higrometar te u drugoj boji označiti prostor izotermi gdje postoje uvjeti kondenzacije, čime se ostvaruje kontrola „uživo“. No i uz pomoć termokamere, termo-higrometra te psihometrijskih dijagrama može se u drugoj boji označiti područje izotermi kod kojih dolazi do kondenzacije (bilo 100% bilo 80% Rh). Jedan takav termogram pokazuje slika (Slika 147). Kako trenutak kad se termografist nalazi na terenu ne mora biti baš onda kad kondenzacije ima (na primjer, netko je zimi neposredno pred snimanje zračio sobu te spustio vlažnost zraka), dobro je nekoliko dana ostaviti snimač („logger“) temperature i vlage te se tako može dobiti stanje zraka za duži period. Tu nedostaje podatak o temperaturi površine zida, no ovakav pristup olakšava procjenu realnog stanja. Pri računanju temperature kondenzacije na internetu postoje kalkulatori rosišta (*dew point calculator*), a jedan takav [9.2] prikazan je na slici (Slika 148).



Slika 146 Gljivice i pljesni te termo-higrometar-pirometar za utvrđivanje uvjeta kondenzacije



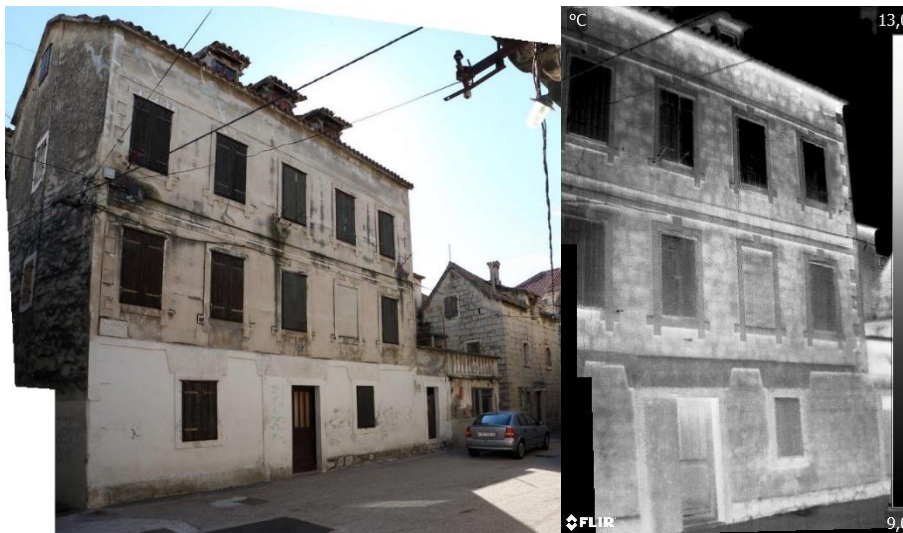
Slika 147 Svjetlo ružičasta izoterma označava područja gdje postoje uvjeti kondenzacije (autor E. Modun)



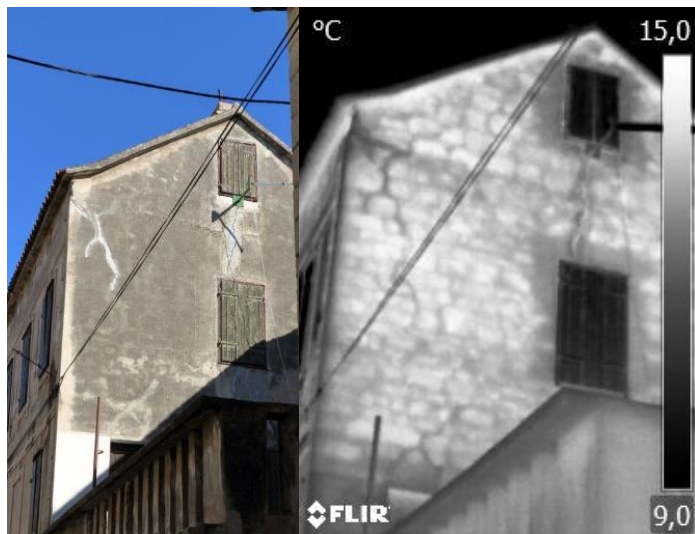
Slika 148 Kalkulator rosišta (dew point calculator) [9.2]

9.4. Sastav zidova

Termografija se pokazala vrlo korisnom metodom pri utvrđivanju sastava zidova ispod fasade, odnosno ispod površine raznih elemenata zidova i podova. Kako bi se mogli vidjeti oku nevidljivi slojevi zida ispod površine (ispod žbuke, gipsanih ploča i sl.), nužno je postojanje razlike temperatura s obje strane, odnosno postojanje toplinskog toka. Sljedeći primjeri pokazuju otkrivanje i lociranje građe zida ispod toplinske ovojnice. Termogrami (Slika 149 do Slika 159) su napravljeni za potrebe Interreg PMO-GATE EU projekta međugranične suradnje Italije i Hrvatske [9.3], [9.4]. Jedan od ciljeva bio je procjena rizika od šteta uslijed eventualnih elementarnih nepogoda i potresa gdje se u sklopu evaluacije potresne otpornosti Kaštel Kambelovca analizirala konstrukcija zgrada kod kojih je sastav zida sakriven žbukom.



Slika 149 Kameni zid ispod žbukane fasade



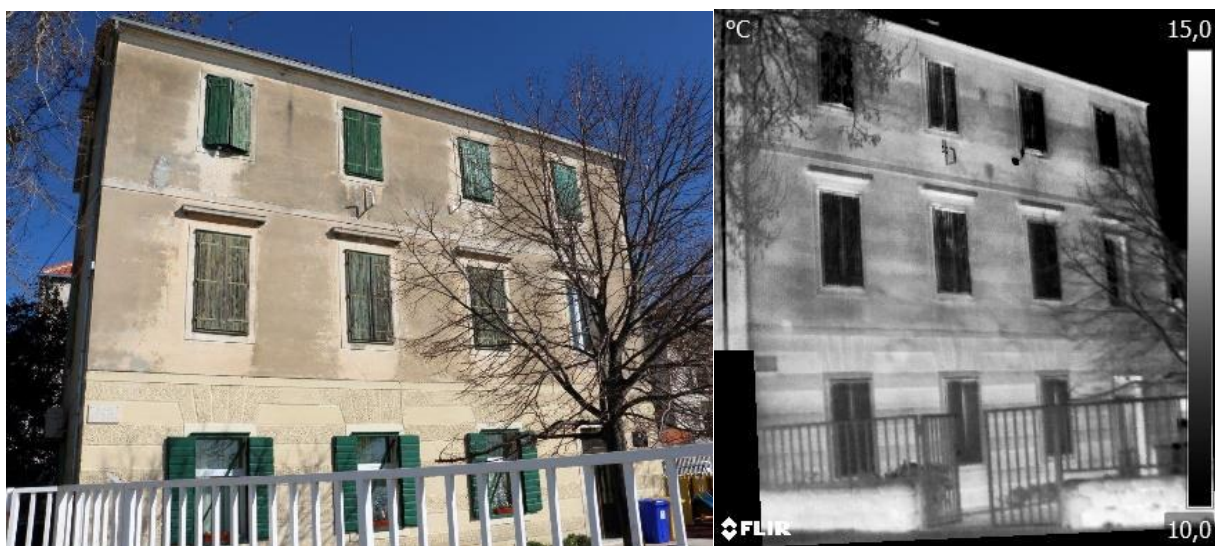
Slika 150 Kameni zid ispod žbukane fasade uz lociranje pukotina znatno većih od zakrpa na fasadi



Slika 151 Kameni zid ispod fasadne žbuke



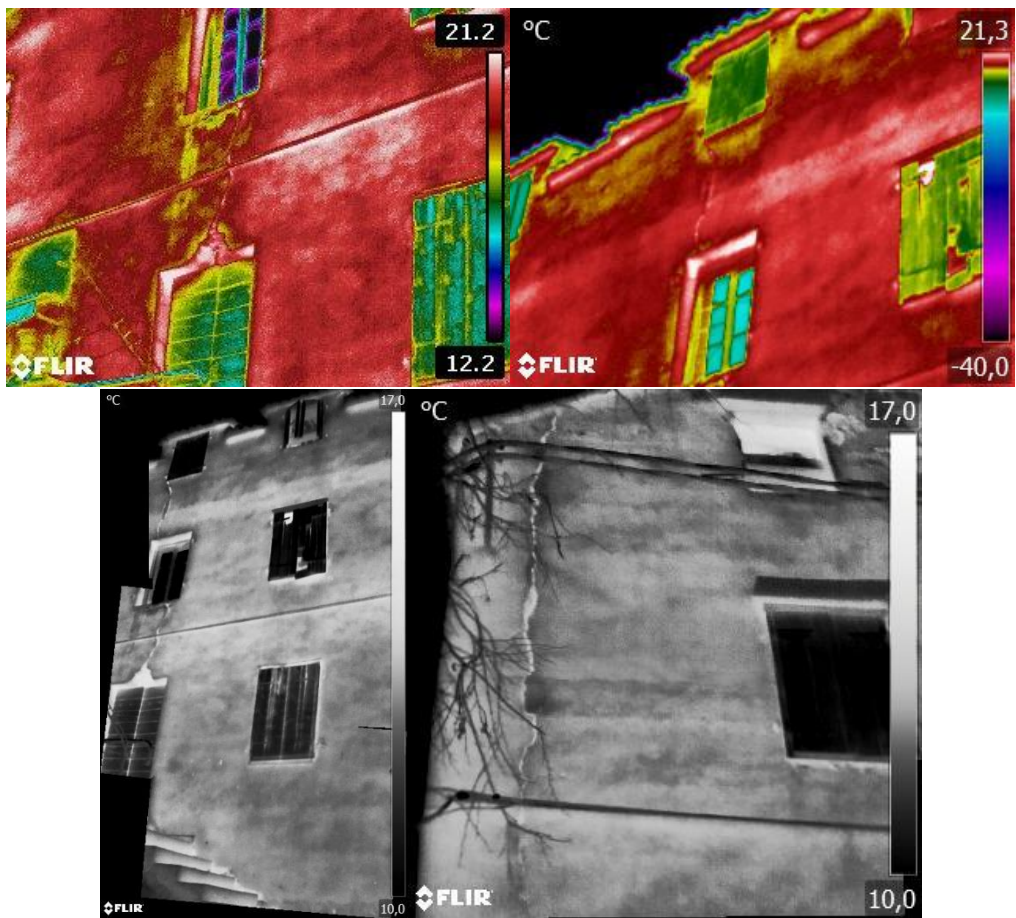
Slika 152 Slojevi betonskog zida i opekam zazidani prozori



Slika 153 Slojevi betonskog zida ispod fasade i fasadnih štukatura



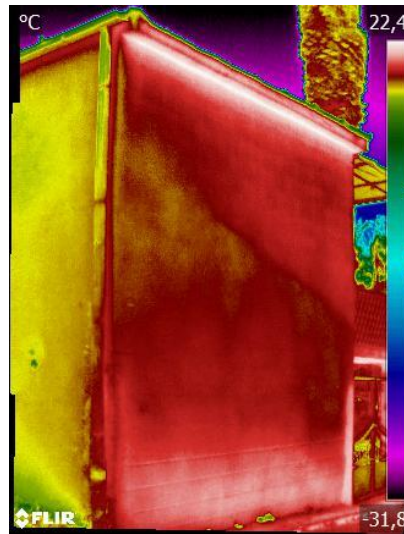
Slika 154 Horizontalni slojevi nalivanja betona vidljivi ispod različitih vrsti fasada te zazidana vrata s kamenim okvirom.



Slika 155 Detekcija i evaluacija pukotina na betonskoj zgradi



Slika 156 Različit sastav zida kao posljedica pregrađivanja i dogradnje



Slika 157 Termogram betonske zgrade kosog krova kojoj je naknadno bloketama dozidan kat te za krov postavljena armiranobetonska ploča

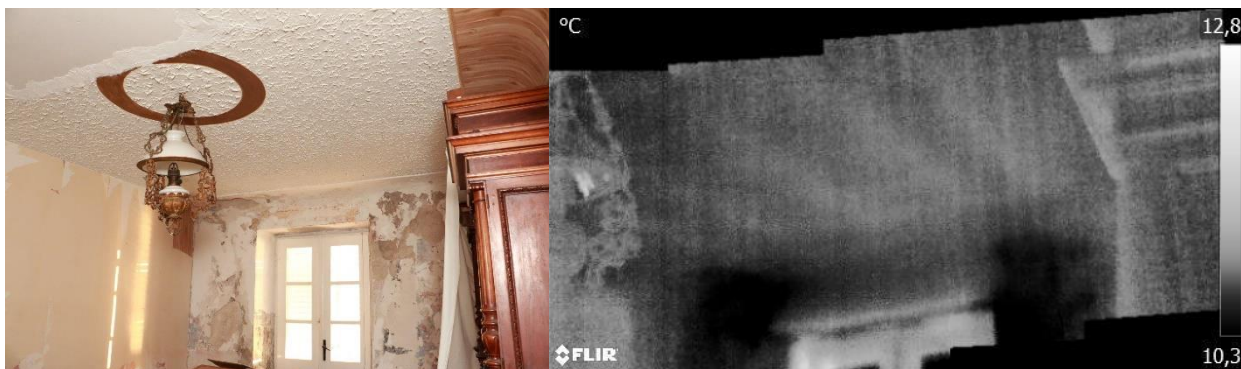


Slika 158 Zid od bloketa i betonski serklaži ruba krova i ugla zgrade

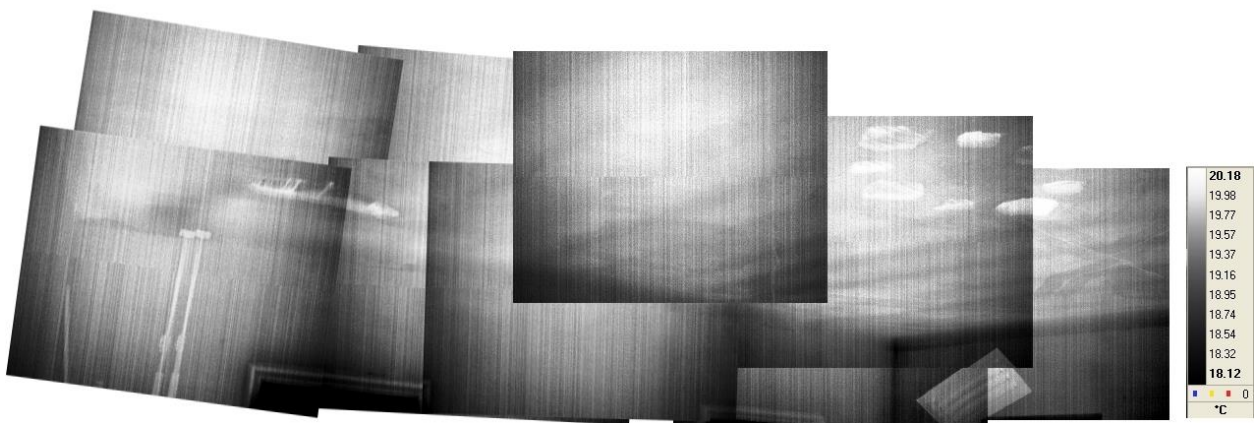


Slika 159 Montažne betonske ploče

Na istom principu kojim su evaluirani vanjski zidovi može se evaluirati i unutrašnjost poput stropova/podova, za što je također nužan toplinski tok.

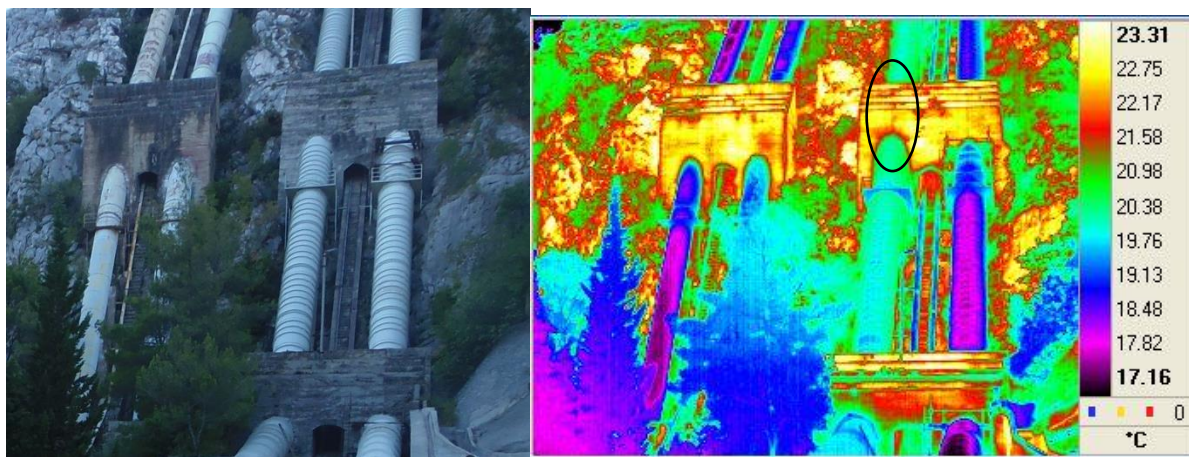


Slika 160 Lokacije stropnih greda povijesne zgrade Kaštel Rušinac u Kaštelima



Slika 161 Lociranje greda ispod sloja žbuke, trstike i dasaka pri sanaciji Bajamontijevog stana palače Bajamonti (Dešković) na splitskoj rivi.

Termografija se može koristiti i pri evaluaciji integriteta konstrukcija, kao što je betonski blok cjevovoda HE Kraljevac na kojem se iz veće udaljenosti termografijom otkrila pukotina.



Slika 162 Pukotina na betonskom bloku cjevovoda locirana s udaljenosti od približno 100 m.

9.5. Termografija pri ispitivanju zrakopropusnosti

Blower door test je metoda mjerenja zrakopropusnosti zgrada. Osim ove osnovne namjene, *blower door* se može koristiti i za ispitivanje nepropusnosti kanala kao i za pomoć pri lociranju mjesta curenja zraka u ovojnici zgrade. U potonjem slučaju često se koristi u kombinaciji s infracrvenom termografijom, što je i razlog zašto ćemo je obraditi u sklopu ovog udžbenika. Ispitivanje zrakopropusnosti (*blower door* test) u Republici Hrvatskoj je obaveza predviđena Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20).

Ugrubo govoreći, svaki set za ispitivanje zrakopropusnosti (*blower door* set) ima četiri osnovna dijela, i to:

- 1) baždareni ventilator s podesivom brzinom i protokom zraka, dovoljno jak za stvaranje razlike tlaka
- 2) diferencijalni manometar, tj. instrument za mjerenje razlike tlaka kojeg generira ventilator
- 3) podesivi okvir s ceradom kojim se omogućava da se ventilator ugradi u neki otvor zgrade, npr. vrata, te da se ostatak otvora adekvatno zabrtvi
- 4) računalni *software* kojim se kontrolira sustav i vrše svi potrebni proračuni te generira izvještaj.

Dijelovi seta s fotografijom na mjestu mjerenja prikazani su na slici (Slika 163).

Blower door testom moguće je utvrditi kvalitetu građevinskih radova, kvalitetu toplinske ovojnice, potencijal ušteda u zgradi itd. Upravo zato danas se u sklopu energetskeg pregleda zgrade radi i test zrakopropusnosti te se na taj način lociraju putevi propuštanja zraka, procijene gubici energije koji proizlaze iz tog propuštanja zraka, kao i opravdanost ugradnje mehaničke ventilacije i šira usklađenost sa standardima građenja.

9.5.1. Kratka povijest *blower door* testa

Prva zabilježena mjerenja zrakopropusnosti izvršena su u Švedskoj krajem sedamdesetih godina 20. stoljeća, kad se u svrhu ispitivanja ventilator montirao na prozor, umjesto na vrata kako je danas uobičajeno. Istraživači Harrje, Blomsterberg i Persily sa Sveučilišta Princeton razvili su metodu s ventilatorima ugrađenima na vrata s ciljem lociranja curenja u stambenim zgradama. Slična mjerenja provodio je i Orr u Kanadi [9.5].

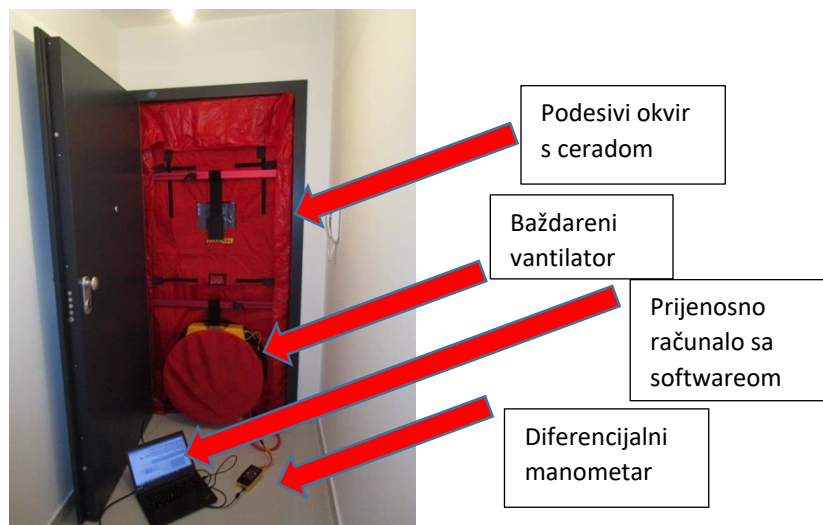
Pomalo začuđujuće, već ova prva, i u usporedbi s današnjom opremom primitivna, mjerenja pokazala su mogućnosti ušteda energije u kućama. U početku se smatralo da je osnovni uzrok gubitka topline curenje zraka oko vrata, prozora i električnih utičnica. Međutim, Harrje, Dutt i Beya [9.6] su pomoću *blower door* testa uočili ono što danas nazivamo toplinskim mostovima, posebice u potkrovljima stambenih zgrada. Sam sustav postao je komercijalno dostupan u Sjedinjenim Američkim Državama početkom osamdesetih godina 20. stoljeća.

9.5.2. Postavljanje opreme za *blower door* test

Oprema se pomoću podesivog okvira i cerade ugrađuje na vrata, primjerice na ulazna vrata stana unutar zgrade čiju zrakopropusnost želimo izmjeriti. Sva unutarnja vrata trebaju se ostaviti otvorenima, za razliku od vanjskih vrata i prozora koje treba zatvoriti. Također, sve zaklopke i zatvori sustava ventilacije i klimatizacije, kao i vrata kamina trebaju biti zatvoreni. Sve vodovodne cijevi trebaju biti zatvorene ili ispunjene vodom. Također, nužno je isključiti uređaje koji vrše izmjenu zraka kao što su nape. Senzor vanjskog tlaka treba biti zaštićen od vjetra i izravne sunčeve svjetlosti. Vrata u čije se otvore ugrađuje ispitna oprema treba učvrstiti drvenim ili gumenim klinovima kako ne bi „poletjela“ i oštetila zid. Prije uključivanja ventilatora i samog testa podtlaka ili nadtlaka snima se tzv. tišina, odnosno razlika tlaka pri ugašenom ventilatoru.

9.5.3. Postupak ispitivanja

Osnovna namjena baždarenog ventilatora (koji je dio *blower door* seta) je upuhati ili ispuhati zrak u prostoriju/zgradu, tako da nastane podtlak ili nadtlak, i to točno poznatog iznosa. Kao posljedica ovog podtlaka ili nadtlaka, odnosno razlike tlaka s dvije strane npr. zida, zrak struji kroz sve otvore u nekom ograđenom dijelu zgrade. Ako je toplinska ovojnica zgrade kvalitetna, broj i veličina pukotina su mali pa se zadana razlika tlaka može postići s manjom količinom zraka, odnosno manjom snagom ventilatora. Ako je mjerenje pravilno izvršeno, test će u režimu podtlaka i nadtlaka dati slične rezultate. Ventilator ima podesive otvore pomoću kojih je moguće definirati količinu zraka. Uz set redovito dolaze tablice pomoću kojih se određuje koliko otvora treba izabrati za određeni volumen prostorije. Preporuka je koristiti najmanju moguću količinu zraka, odnosno broj otvora. Uz same hardverske komponente seta, ključan dio je i računalni paket koji analizira podatke iz diferencijalnog manometra, te sukladno njima upravlja radom ventilatora, vodi korisnika kroz postupak mjerenja i proračunava potrebne podatke. U konačnici, ono što korisnik dobije na kraju mjerenja je „ekvivalentna pukotina“. Sam sustav ne može locirati pukotine, niti utvrditi njihov stvaran broj, već pretpostavlja idealan zid sa samo jednom pukotinom čiju površinu određuje temeljem mjerenja. Upravo u dijelu lociranja stvarnih pukotina infracrvena termografija je nezaobilazna i zasad najbolja metoda.



Slika 163 Oprema za blower door test ugrađena u novom, neuseljenom stanu

Podaci koji se iz mjerenja zrakopropusnosti mogu izračunati ovise o propisima/normama po kojima se radi mjerenja, kao i o tehničkim mogućnostima *softwarea*. Primjerice, moguće je odrediti protok zraka pri određenoj razlici tlaka, najčešće 50 Pa, ili protok zraka po jedinici površine. Kao što je već rečeno, najzanimljiviji podatak je „ekvivalentna pukotina“, odnosno površina jedne zamišljene pukotine u idealnom zidu koja nadomješta sve stvarne pukotine u realnom zidu. Protok i ekvivalentna pukotina će biti tim manji što je kvaliteta ovojnice zgrade veća.

Napomena: *blower door* test usporediv je s ispitivanjem električne izolacije, npr. kabela. Prilikom ispitivanja izolacije napon se često podiže iznad normalnih pogonskih uvjeta s ciljem mjerenja relativno male struje curenja. Pritom instrument iz poznatog napona i mjerene struje odredi iznos otpora izolacije. Kod *blower door* testa razlika tlaka podiže se na poznate vrijednosti koje su značajno iznad uobičajenih s ciljem detekcije curenja zraka koje se u normalnom režimu korištenja zgrade ne može uočiti, osim ako su oštećenja značajna.

Nakon samog spajanja opreme, a prije početka i na kraju mjerenja, potrebno je snimiti nultu razliku tlaka, tzv. tišinu. Ovo snimanje provodi se pri ugašenom i pokrivenom ventilatoru kako bi se dobila referentna vrijednost. Slika 164 prikazuje primjer mjerenja nulte razlike tlaka.

Baseline, initial [Pa]	-0,45	-0,41	-0,35	-0,73	-0,12	-0,24	-0,12	-0,17	-0,92	-0,84	-0,74	-0,60
Average baseline, initial	ΔP_{01}	-0,47	ΔP_{01}	-0,52	ΔP_{01}	0,01						

Slika 164 Snimanje nulte razlike tlaka

Samo mjerenje provodi se pri raznim tlakovima koji se inkrementalno povećavaju pri čemu razlika između pojedinih tlakova ne smije biti veća od 10 Pa i potrebno je provesti barem 5 mjerenja pri razlici tlakova ravnomjerno raspoređenoj između najviše i najniže. Najmanja razlika tlakova mora biti približno 10 Pa ili peterostruka nulta fluktuacija Δp_{01} . Najveća razlika tlakova mora biti barem 50 Pa, preporuka je da se ide do 100 Pa ili do peterostruke nulte fluktuacija Δp_{01} .

Building pressure [Pa]	88,2	80,9	75	69,5	63,7	57,2	51,6	44,9	39,6	33,1	27,1	21,1
------------------------	------	------	----	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Slika 165 Mjerenje pri razlikama tlaka od 88.1 Pa do 21.1 Pa.

U slučaju da nemamo instrumentarij koji će generirati razliku tlaka od 50 Pa, potrebno je postići razliku tlakova od barem 25 Pa. Vrijednosti za traženih 50 Pa dobivaju se ekstrapolacijom dobivenih rezultata na vrijednosti 50 Pa. Iako se standardom [9.7] dozvoljava samo jedna grupa mjerenja, preporuka je da se radi i podtlačni i nadtlračni test. Nakon završetka ispitivanja potrebno je još jednom provjeriti da nije došlo do otvaranja zabrtvljenih i zatvorenih otvora, odnosno bilo kojih promjena koje bi mogle utjecati na rezultate. U cilju izračunavanja i izražavanja pojedinih izmjerenih veličina potrebno je definirati sljedeće tri geometrijske veličine koje se koriste kod određivanja zrakopropusnosti:

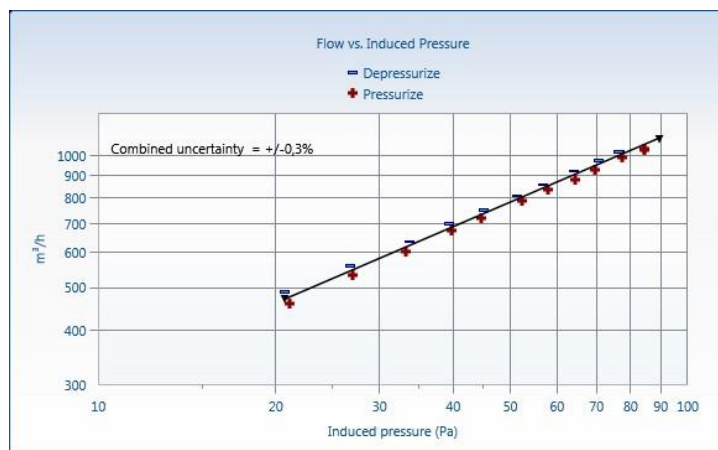
- 1) **Unutrašnji volumen V** – volumen unutrašnjosti prostora pri čemu se ne odbijaju unutrašnji zidovi, podovi te udubine unutar ovojnice zgrade
- 2) **Površina ovojnice (envelope) A_E** – ukupna površina svih zidova, podova i stropova koji omeđuju unutrašnji volumen. Ovo uključuje zidove i podove ispod nivoa terena.
- 3) **Neto podna površina A_F** – ukupna površina svih zidova, podova i stropova koji omeđuju unutrašnji volumen. Ovo uključuje zidove i podove ispod nivoa terena.

Proračun se vrši računalnim softverom. U konkretnom primjeru koristio se softver proizvođača opreme [9.8].

9.5.4. Primjeri mjerenja

U nastavku teksta dat ćemo nekoliko primjera rezultata mjerenja *blower door* testa.

Slika 163 daje grafički prikaz odnosa protoka (u m^3/h) i razlike tlaka (u Pa). Rezultat se prikazuje u log-log mjerilu, pri čemu bi ovisnost trebala biti linearna, odnosno parametar r^2 što bliže 1. Ako je r^2 vrlo blizu jedan, mjerenje je dobro napravljeno, i obrnuto.



Slika 166 Odnos protoka i razlike tlaka u log-log mjerilu

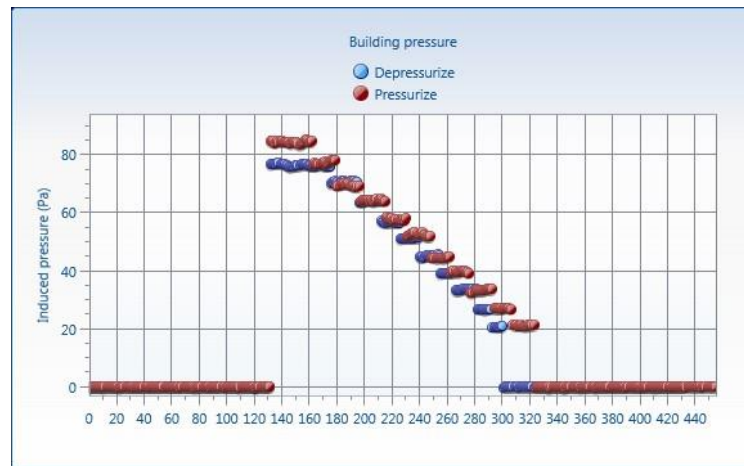
Tablica 8 prikazuje izdvojene parametre grafičkog prikaza na prethodnoj slici.

Tablica 8 Parametri grafičkog prikaza na prethodnoj slici.

Korelacija, r [%]:	99,98		
Koeficijent r^2	0,9998		
	Srednja vrijednost	95% interval pouzdanosti	
		Donji	Gornji
Nagib pravca, n:	0,565	0,56005	0,57091
Odsječak na y-osi, C_{env} [$m^3/h/Pa^n$]:	87,435	85,60	89,31
Korigirani odsječak na y-osi, C_L [$m^3/h/Pa^n$]:	87,435	85,60	89,31

Mjerenje se smatra ispravnim ako je korelacija barem 98 %. Kao što je poznato, pravac je određen koeficijentom smjera (nagibom) i odsječkom na y-osi. Fizikalno gledano, koeficijent smjera pravca na Slici (Slika 166) ima značenje koeficijenta strujanja (n) i trebao bi se kretati u rasponu od 0.5 do 1.0. Odsječak na y-osi je koeficijent protoka zraka (C_{env} [$m^3/h/Pa^n$]). Ako se ovaj parametar korigira s obzirom na odnos vanjske i unutarnje temperature zraka, dobije se koeficijent C_L .

Slika 167 predstavlja grafički prikaz generirane razlike tlaka u vremenu.



Slika 167 Grafički prikaz generirane razlike tlaka (u Pa) u funkciji vremena (u s). Crvene točke odnose se na nadtladni (pressurize) test, a plave na podtladni (depressurize).

Zbirni rezultati *blower door* testa prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 9 Zbirni rezultati *blower door* testa

	Rezultati	95% interval pouzdanosti		Mjerna nesigurnost
		Donja granica	Gornja granica	
Protok zraka pri 50 Pa, [m ³ /h]	782,0	779,5	784,0	±0,3%
Broj izmjena zraka pri 50 Pa, n_{50} [/h]	8,99	8,715	9,255	±3,0%
Protok po jedinici površine ovojnice pri 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	6,515	6,318	6,711	±3,0%
Protok po jedinici površine poda pri 50 Pa, [m ³ /h/m ²]	24,430	23,694	25,166	±3,0%
Efektivna površina curenja pri 50 Pa, [cm ²]	238,5	237,5	239,0	±0,3%
Ekvivalentna površina curenja pri 50 Pa, [cm ²]	390,5	389,5	391,5	±0,3%
Površina curenja po jedinici površine ovojnice pri 50 Pa, [cm ² /m ²]	1,986	1,926	2,046	±3,0%
Površina curenja po jedinici površine poda pri 50 Pa, [cm ² /m ²]	7,45	-	-	±3,0%

Kao što je već ranije spomenuto, najvažniji rezultat *blower door* testa je površina ekvivalentne pukotine. Dakle, pretpostavlja se da je ovojnica (npr. zid) potpuno idealna te da ima jednu pukotinu upravo te površine. Realno, ovojnica ima više manjih pukotina, što će biti razmatrano naknadno. Iz Tablice (Tablica 9) je vidljivo da pri 50 Pa imamo ekvivalentnu pukotinu površine približno 391 cm² pri čemu je mjerna nesigurnost ± 0.3 %. Ako se gleda površina ekvivalentne pukotine po jedinici površine ovojnice, odnosno poda, dobije se rezultat od približno 2 cm²/m², odnosno 7.5 cm²/m², respektivno. U oba slučaja mjerna

nesigurnost je $\pm 3.0\%$. Realni zid, dakako, neće imati jednu veliku lako uočljivu pukotinu, nego više manjih, čija točna lokacija ne mora biti jasno uočljiva. Štoviše, sam *blower door* test ne daje lokaciju ovih pukotina, već za to služe posebne metode. U nastavku teksta opisat ćemo spomenute metode.

Detekcija generatorom dima zasniva se na tome da operater prilikom podtlačnog ili nadtlračnog testa s odgovarajuće strane zida (ako je podtlak, s unutarnje i obrnuto) obilazi sumnjiva mjesta i gleda gdje će dim biti uvučen. Slika 168 predstavlja primjer takve detekcije.



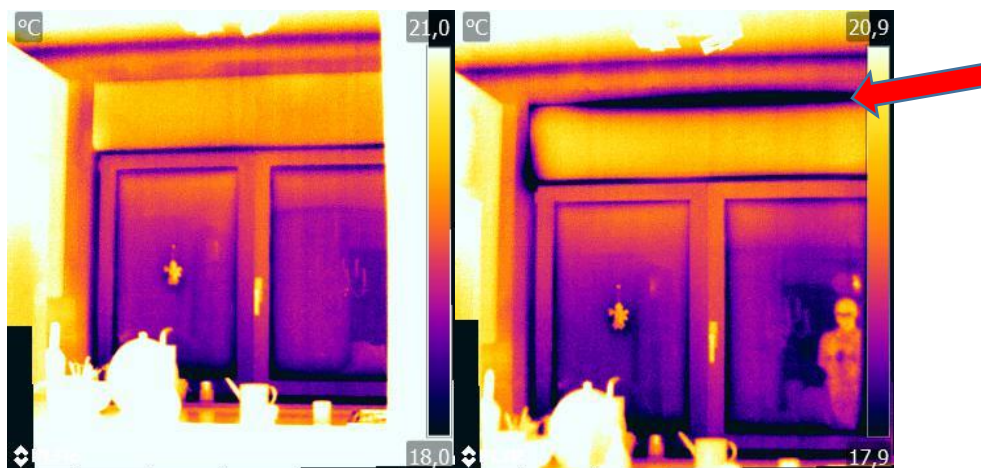
Slika 168 Detekcija mjesta pukotine (curenja) pomoću generatora dima

Sljedeća metoda bazira se na korištenju anemometra. Načelo detekcije je slično, samo što operater neće gledati gdje se dim uvlači, nego gdje je brzina strujanja zraka na anemometru veća.



Slika 169 Detekcija mjesta pukotine (curenja) pomoću anemometra

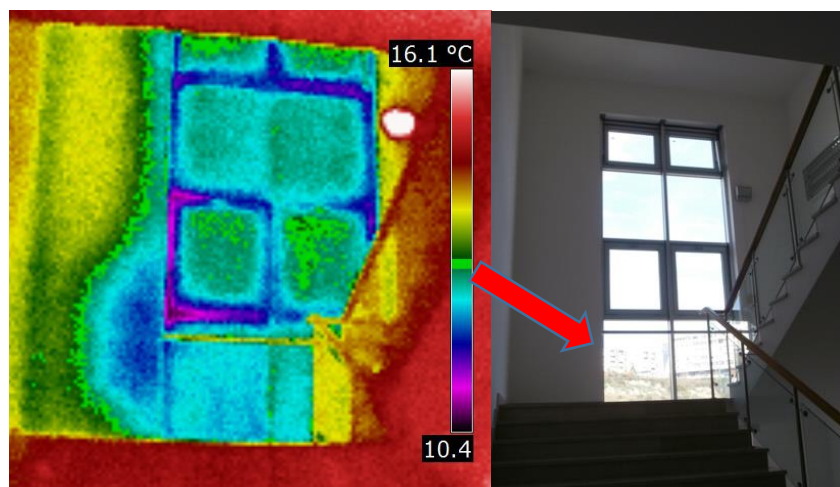
Treća metoda, ujedno i najpouzdanija, je primjena infracrvene termografije. Ova metoda omogućuje brzo i pouzdano pretraživanje većih površina ovojnice te detekciju mjesta curenja. Ako se radi podtlačni test u sezoni grijanja, termografist će mjereći s unutarnje strane pukotinu uočiti kao hladno mjesto. U sezoni hlađenja hladna će se mjesta uočiti u nadtlračnom testu mjerenjem s vanjske strane.



Slika 170 Detekcija mjesta curenja primjenom termografije. Lijeva slika je termogram prozora prije blower door testa, a desna nakon. Pukotina je označena crvenom strelicom.

Slika 170 prikazuje detekciju mjesta curenja primjenom termografije. Mjerenje je napravljeno u novom, neuseljennom stanu tijekom zimskog perioda. Za vrijeme podtlačnog testa vanjski hladni zrak prodire u unutrašnjost stana što omogućava detekciju pukotine. U ovom se slučaju vidi da kutija rolete iznad prozora nije dobro izolirana.

Slika 171 prikazuje loše ugrađeni prozor posljedica čega je prodor vanjskog zraka i gubici topline.



Slika 171 Detekcija mjesta curenja primjenom termografije. Mjesto curenja je na fotografiji označeno strelicom.

Zaključno, kao što je navedeno u ovom poglavlju, *blower door* test (test zrakopropusnosti) omogućuje evaluaciju kvalitete toplinske ovojnice, procjenu gubitaka i mogućnosti povećanja energetske učinkovitosti zgrade. Krajnji rezultat testa je površina ekvivalentne pukotine kojom se nadomještavaju

stvarne pukotine ovojnice. Infracrvena termografija je neizostavna metoda kojom se pouzdano utvrđuje lokacija stvarnih pukotina prilikom *blower door* testa.

Literatura

[9.1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Psychrometrics>

[9.2] <http://www.dpcalc.org/>

[9.3] Željana, Nikolić, Luka Runjić, Nives Ostojić Škomrlj; Elena Benvenuti, Seismic Vulnerability Assessment of Historical Masonry Buildings in Croatian Coastal Area, Applied Sciences, 11, 13; 1, 27 doi:10.3390/app11135997, 2021.

[9.4] Željana Nikolić, Elena Benvenuti, Luka Runjić, Seismic Risk Assessment of Urban Areas by a Hybrid Empirical-Analytical Procedure Based on Peak Ground Acceleration, Applied Sciences-Basel, 12, 7; 3585, 25 doi:10.3390/app12073585, 2022.

[9.5] Max Sherman, The Use of Blower-Door Data¹, Indoor Air, 5 (3): 215–224, 1995. doi:10.1111/j.1600-0668.1995.t01-1-00008.x. S2CID 110498827.

[9.6] D.T. Harrje, G.S. Dutt, J.E. Beya, Locating and Eliminating Obscure, but Major Energy Losses in Residential Housing, ASHRAE Transactions II., 85, 521–534, 1979.

[9.7] HRN EN ISO 9972:2015: Toplinske značajke zgrada – Određivanje propusnosti zraka kod zgrada – Metoda razlike tlakova

[9.8] Blower Door Operation Manual - For Series 200, 300, 1000 and 3000 systems, rev-2015-03-16, Retrotec inc., 2015.

10. Popratni instrumenti

Kako bi se u potpunosti mogla provesti termografska evaluacija, uz minimalna znanja o objektu koji se snima (sastav, način rada, očekivani konstrukcijski elementi, mehanički i električni sklopovi, procesi koji se odvijaju) i samu termokameru također su potrebni i instrumenti poput termometra i vlagomjera (Slika 172) kojima se utvrđuje stanje okolne atmosfere kako bi se ispravno kompenzirao utjecaj vlage u zraku i njene temperature. Često se ovaj uređaj može putem Bluetooth veze povezati s kamerom kako bi uz termogram bili zabilježeni i podaci o vlazi i temperaturi. Neke izvedbe kamera predviđene za graditeljstvo imaju ugrađenu i opciju preračunavanja točke rosišta te se izotermom prikažu zone gdje postoje uvjeti za orošavanje. No utvrditi postoje li uvjeti za orošavanje može se i naknadno obradom termograma ako je poznata temperatura i vlažnost zraka u trenutku snimanja (poglavlje 9.3). Kod detekcije vlage često se želi znati stanje vlažnosti u danima oko perioda snimanja, s obzirom na to da trenutak snimanja možda nije mjerodavan kako bi se utvrdilo stanje u nekom objektu. Za to se koriste termo-higrometri (*data loggeri*) koji nekoliko dana bilježe stanje u prostoriji (Slika 173). Laserskim daljinomjerima (Slika 174) očitava se

udaljenost od objekta s ciljem da se ispravno kompenzira utjecaj vlage s obzirom na to da količina vlage između objekta i kamere ovisi o udaljenosti. Anemometar (Slika 175) je potreban ako se vrši kompenzacija zbog vjetrova, odnosno da bi se utvrdila i zabilježila brzina vjetrova u trenutku snimanja.



Slika 172 Termo-higrometar (termometar i vlagomjer u jednom kućištu)



Slika 173 Termo-higrometar s data-logger opcijom (za višednevna snimanja stanja temperature i vlažnosti u prostoru)

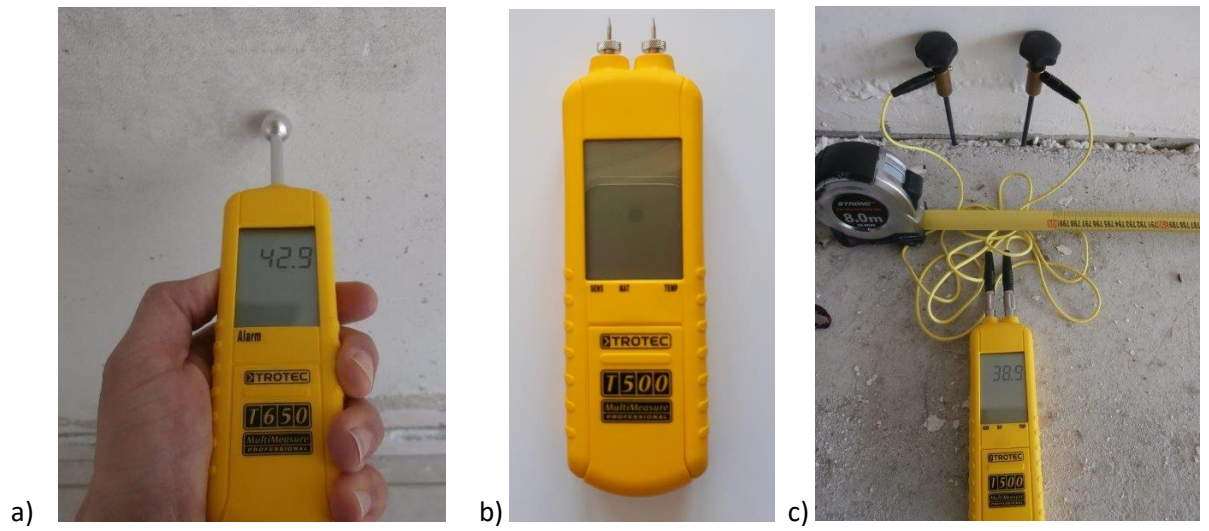


Slika 174 Laserski daljinomjer



Slika 175 Anemometar

Često je toplinski nalaz na termogramu, kad se sumnja na vlagu, potrebno potvrditi i usporediti s vlagomjerom kojim se utvrđuje vlažnost u materijalu. Potrebno je naglasiti da se vlagomjeri koji mjere vlažnost materijala razlikuju od vlagomjera koji mjere relativnu vlažnost zraka (Slika 172 i 173) s obzirom na vrstu senzora kao i namjenu. Kod evaluacije vlaženja u zgradama od velike je koristi dubinski (dielektrički) vlagomjer kojim se utvrđuje maseni udio vlage u materijalu. Vlagomjer mjeri maseni udio vlage na dubini od 2 do 4 cm te vrijednosti iskazuje u digitalnoj razini (*DL – digital level*) koja se temeljem saznanja o vrsti materijala putem dijagrama konvertira u maseni udio vlage. Maseni udio u gipskartonskim pločama (Knauf) ne može se evaluirati ovim vlagomjerom, već ubodnim vlagomjerom. Ubodnim vlagomjerom utvrđuje se maseni udio vlage između šiljaka kojima se ubode materijal. Ovim se uređajem ne utvrđuje dubinska, već samo površinska vlažnost. Ovakvi ubodni vlagomjeri prvenstveno su namijenjeni očitavanju vlage drva, što je bitno pri postavljanju drvenih podova. Često je radi evaporacije površinska vlažnost znatno manja od dubinske pa se uređaj ne preporučuje osim u slučajevima mjerenja vlažnosti iza slojeva materijala koji nisu dostupni termokamerom, poput vlage iza toplinske izolacije, odnosno prije spomenutih gipskartonskih ploča (Knauf). Postoje produženi šiljci (sonde) kojima se kroz probušene rupe može utvrditi stanje vlažnosti duboko ispod površine zida ili poda, odnosno iza toplinske izolacije.



Slika 176 Dielektrički (dubinski) vlagomjer (a), ubodni vlagomjer (b) i ubodni vlagomjer s dodacima veće dubine mjerenja

11. Relevantne norme

Područje termografije pokriva nekoliko normi. Ovdje će biti spomenute hrvatske norme vezane za termografiju, a to su:

HRN EN 16714-1:2016 Nerazorno ispitivanje-termografsko ispitivanje – 1. dio: Opća načela

HRN EN 16714-2:2016 Nerazorno ispitivanje-termografsko ispitivanje – 2. dio: Oprema

HRN EN 16714-3:2016 Nerazorno ispitivanje-termografsko ispitivanje – 3. dio: Nazivi i definicije

Uz ove norme potrebno je navesti:

HRN EN 17119:2018 Nerazorno ispitivanje-termografsko ispitivanje – Aktivna termografija.

HRN EN 13187 - Toplinske značajke zgrada - Kvalitativno otkrivanje toplinskih mostova u obodnim konstrukcijama zgrada - Metoda infracrvenog snimanja

ISO 18436-7 - Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for qualification and assessment of personnel -- Part 7: Thermography

HRN EN ISO 9712 (extending and replacing EN 473): Nerazorno ispitivanje -- Kvalifikacija i certifikacija NDT osoblja (ISO 9712:2012; EN ISO 9712:2012)

11.1. Opća načela

Cilj HRN EN 16714:2016 jest specificirati glavna načela termografije kao metode ispitivanja bez razaranja. Termografija se koristi za otkrivanje i lokaliziranje diskontinuiteta poput pukotina, delaminacije i uključaka kod različitih materijala poput kompozita, metala i prevlaka. Često je za ispitivanje potrebna toplinska uzbuda (toplinski tok), što ovisi o vrsti materijala, geometriji i vrsti pogrešaka koje je potrebno otkriti. Kriteriji prihvatljivosti ne definiraju se ovim standardom!

Uz navedene standarde postoji i čitav niz drugih normi vezanih za termografiju, osposobljavanje i sl. Moguće su i situacije kad se ugovorom između naručitelja i izvršitelja mjerenja definira neka druga norma, te onda treba vidjeti postoje li određeni zahtjevi na certifikaciju osoblja koje provodi ispitivanje.

11.1.1. Priprema za ispitivanje

Kod pripreme za ispitivanje potrebno je voditi računa o sljedećim činjenicama:

- a) razmotriti poziciju, pristupačnost i geometriju objekta

- b) svrha testiranja
- c) cilj testiranja
- d) područje na kojem se testiranje provodi
- e) vrsta očekivanih nehomogenosti (npr. geometrija, orijentacija, dubina, pukotine)
- f) zahtjevi vezani uz testiranje, a posebno u vezi:
 - prostorne rezolucije
 - rezolucije s obzirom na vrijeme (brzina akvizicije)
 - toplinske rezolucije
 - preciznosti mjerenja
- g) oprema, uključujući:
 - odabir izvora energije (nametnutog toplinskog toka) i njenih parametara
 - odabir IC kamere i parametri odabrane kamere
 - prostorni razmještaj izvora energije (topline), IC kamere i objekta koji se ispituje
 - verifikacija opreme za ispitivanje (s obzirom na ispravnost rada)
- h) procedura ispitivanja koja uključuje:
 - prostorni razmještaj (kadar, kut, fokus, izbjegavanje refleksija)
 - kriterij zabilježbe indikacija (veličina, lokacija, broj indikacija)
 - parametri mjerenja
- i) vremenski uvjeti za vrijeme testiranja (doba dana, vlažnost, udaljenost, vjetar)
- j) stanje objekata u vrijeme testiranja
- k) svojstva površine poput emisivnosti, transmisivnosti, refleksivnosti
- l) kvalifikacija osoblja koje vrši mjerenje
- m) svrha izvještaja o mjerenju.

Prilikom testiranja potrebno je provesti kontrolu čitavog mjernog sustava i termografskih parametara, pri čemu treba upotrijebiti barem jedan od tri vrste testnih uzoraka, a to su:

- a) tip 1 – referentni kalibracijski uzorak za kontrolu i ispitivanje mjernog sustava
- b) tip 2 – referentni uzorak s umjetno napravljenim oštećenjima u cilju utvrđivanja osjetljivosti vrste materijala koji se ispituje
- c) tip 3 – referentni uzorak s realnim oštećenjima u cilju utvrđivanja osjetljivosti vrste materijala koji se ispituje (originalnog objekta ispitivanja).

Kao kalibracijski uzorak kod tipa 1 može se koristiti crno tijelo, pri čemu je potrebno provjeriti opremu na barem dvije temperature koje će se javljati pri ispitivanju. Kod ispitivanja izvora topline može se koristiti velika metalna ploča kako bi se utvrdila homogenost toplinskog izvora.

Kod tipa 2 koriste se umjetna oštećenja poput slijepih rupa s ravnim dnom, utora ili stepenastih površina, a sve od materijala od kojeg će biti i objekt ispitivanja. Voditi računa o nehomogenosti materijala, kao što je to slučaj kod kompozita.

Kod tipa 3 koriste se stvarni uzorci koji se ispituju gdje se koriste stvarne pogreške nastale u postupku proizvodnje ili pri eksploataciji. Vrsta materijala i geometrija trebaju biti slični onoj od objekta koji se ispituje. Pogreške treba potvrditi putem neke od metoda kontrole bez razaranja poput CT-a, ultrazvuka i sl.

Kontrola opreme je potrebna kako bi se utvrdilo da oprema ispravno funkcionira, a svaki dio opreme može se prekontrolirati prije spomenutim testnim uzorcima tip 1, tip 2 ili tip 3.

Kvaliteta provedenih mjerenja uvelike ovisi o hrapavosti, obliku površine i emisivnosti. Kod površina visoke reflektivnosti (niske emisivnosti) ili visoke transmisivnosti, potrebno je koristiti prevlake visoke emisivnosti. Vrsta, debljina i ostali parametri prevlaka trebaju biti odabrani u ovisnosti o objektu mjerenja, što se postiže uz pomoć referentnih uzoraka tipa 2 ili tipa 3.

11.1.2. Procedura ispitivanja

Termografsko ispitivanje može biti aktivno ili pasivno ovisno o tome je li se vrši samo snimanje objekta (pasivno) ili se i pobuđuje toplinski tok kroz objekt (aktivno). Također, ispitivanje može biti kvantitativno, usporedno i kvalitativno.

Kako bi ispitivanje bilo uspješno, potrebno je zadovoljiti sljedeće:

- a) pravilan odabir termokamere s obzirom na osjetljivost i temperaturni raspon za koji je termokamera kalibrirana
- b) odabir dijela termograma koji omogućuje usporedbu s područjem bez anomalija
- c) izbjegavanje refleksije ispravnim odabirom kuta snimanja
- d) kontrola ili smanjenje utjecaja okolnih izvora topline, vlage ili strujanja zraka
- e) odabir leća kako bi se ostvarila potrebna prostorna rezolucija
- f) dobar fokus objektiva
- g) odabir prikladnog prikaza termograma poput temperaturnog raspona, palete boja, kontrasta itd.

Norma HRN EN 16714:2016 također definira osnovne vrste termografije (pasivna, aktivna, kvalitativna, kvantitativna i komparativna). Stoga će ovdje još jednom biti dan pregled vrsti termografija prema HRN EN 16714:2016.

Pasivna termografija temelji se na snimanju temperaturnih razlika bez umjetnog pobuđivanja toplinskog toka. Jedinu izvor je vlastita unutrašnja toplina tijela te razlike s obzirom na okolinu. U principu nema ovisnosti o vremenu pri snimanju, a tipični primjeri pasivne termografije su evaluacija toplinske ovojnice zgrada, utvrđivanje vlaženja, toplinski mostovi, gubici topline, kontrola instalacija, elektroinstalacija i mehaničkih sustava. Pasivna termografija zahtijeva kalibraciju kamere prema pouzdanosti koja se u mjerenju zahtijeva te ispravno utvrđivanje parametara mjerenja (emisivnost, prividna reflektirana temperatura i sl.)

Aktivna termografija je metoda snimanja gdje se generira nestacionarni toplinski tok putem toplinskih izvora koji se koriste isključivo u svrhu ispitivanja. Izvor topline može biti periodički (npr. sinusoida), kontinuiran ili kratkotrajan. Izvor topline može biti svjetlo, Sunce, ultrazvuk te zrak ili tekućina različite temperature. Sam izvor topline potrebno je prethodno ispitati na testnim uzorcima tipa 2 ili tipa 3. Aktivna termografija koristi se za utvrđivanje pogrešaka ili diskontinuiteta (npr. šupljine, odljepljivanje, delaminacija, pukotine, varijacije debljine) pri proizvodnji, eksploataciji ili održavanju metala i kompozita.

Aktivna se termografija, s obzirom na vrstu pobude, dijeli na:

- a) tranzijentnu (npr. pulsna termografija)

b) modulirajuću (npr. *lock-in* termografija).

S obzirom na tip ispitivanja razlikuje se:

- a) fazna ili *lock-in* termografija, gdje se uspoređuju kašnjenja u fazi između izvora i objekta
- b) vremensko derivacijska termografija
- c) diferencijalna termografija.

Aktivna termografija uključuje pravilan izbor metode, intenziteta i načina variranja toplinske uzbude (toplinskog toka).

Kvalitativna termografija je ona kod koje se prikazuje toplinski tok, odnosno prividna temperaturna raspodjela na površini objekta s ciljem utvrđivanja stanja. Tipičan primjer je utvrđivanje curenja cjevovoda, spremnika, podnog grijanja ili izgled elemenata konstrukcije prekrivene oblogama. Kvalitativna termografija može se primjenjivati kod utvrđivanja delaminacije materijala.

Komparativna termografija temelji se na određivanju prividne temperature ili faznih pomaka kod usporedbe jednog te istog objekta u raznim vremenskim odmacima i sličnim uvjetima, ili pak kod usporedbe različitih objekata iste strukture pri istim uvjetima. I komparativna termografija može biti kvalitativna ili kvantitativna. Pritom, kako bi metoda bila uspješna, potrebno je vršiti snimanje na istim područjima tijekom mjerenja. Pri komparativnoj termografiji također se utvrđuju termografski parametri (emisivnost, reflektivnost...) te zahtijeva stabilnost temperaturne kalibracije kamere kroz čitavo vrijeme snimanja.

Kvantitativna termografija je procedura kod koje se temperaturna raspodjela i ostali parametri određuju iz termograma. Ova ispitivanja temeljena su na temperaturnim mjerenjima, gdje se zahtijeva široko znanje materijalnih parametara (emisivnost i sl.) te njihove ovisnosti (npr. temperaturna ovisnost) o parametrima mjerenja (npr. valna duljina) i parametrima prostora (temperatura okoline, vlažnost i sl.). Tipični primjeri ovakve termografije su utvrđivanje dubine pogrešaka i sl. Ova termografija često zahtijeva odabir primjerenog spektralnog filtera kako bi se iskoristila spektralna svojstva objekta mjerenja.

11.1.3. Kvalifikacija osoblja

Kompetentnost osoblja koje radi prema ovom standardu utvrđuje se prema standardu HRN EN ISO 9712 te:

- a) relevantnim standardima, pravilnicima, specifikacijama, uputama za ispitivanje i opisima metoda ispitivanja
- b) vrsti opreme i načinu korištenja opreme
- c) obliku, smještaju, strukturi i načinu rada opreme koja se testira
- d) pravilima zaštite na radu u vezi optičkih, akustičkih, električnih, elektromagnetskih i ostalih izvora.

11.1.4. Ocjenjivanje

Pravila ocjenjivanja i upute za mjerenja specificiraju se prema zahtjevima specifikacija. Načini zapisivanja, procjene i zabilježbe indikacija definiraju se uputama za ispitivanje. Također mora biti specificiran kriterij

razlikovanja indikacija od pogrešaka te lažnih pogrešaka (anomalija) uslijed razlika u emisivnosti, refleksija i nečistoća.

11.1.5. Izvještaj o ispitivanju

Izvještaj o ispitivanju treba sadržavati barem sljedeće detalje:

- a) referiranje na ovaj standard (HRN EN 16714:2016)
- b) svrha ispitivanja
- c) referiranje na redoslijed ispitivanja
- d) datum i mjesto gdje se provodi ispitivanje
- e) korištena tehnika ispitivanja (aktivna/pasivna, kvalitativna/kvantitativna/usporedna)
- f) svojstva prevlaka ako su korištene za povećanje emisivnosti
- g) referentni testni uzorak
- h) način označavanja kriterija prihvatljivosti i/ili referiranje na metodu opisivanja, upute o ispitivanju, normu ili praksu
- i) vrsta korištene opreme
- j) parametri okoliša (npr. temperatura zraka, vlažnost)
- k) uvjeti okoline i radno stanje objekta mjerenja
- l) opis i identificiranje objekata mjerenja
- m) detalji u vezi s granicama prihvatljivosti (npr. veličina, lokacija, temperatura)
- n) rezultati ispitivanja
- o) određivanje mjerene nesigurnosti, ako je zatraženo u specifikacijama
- p) označavanje lokacije indikacija na objektu mjerenja
- q) ime, vrsta ovlaštenja i potpis provoditelja ispitivanja, uz navođenje datuma
- r) ime, vrsta ovlaštenja i potpis osobe koja odobrava ispitivanje, uz navođenje datuma.

11.1.6. Čuvanje zabilješki

Zabilješke, uključujući izvještaje, termograme i sl., trebaju biti pohranjene u skladu sa zahtjevima poput standarda, ugovora ili prakse.

11.2. Oprema

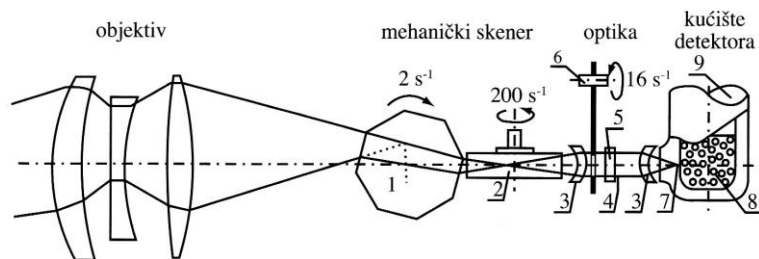
Zahtjeve za opremom opisuje norma HRN EN 16714-2:2016. Dosta stvari iz ovog poglavlja već je obrađeno, no u cilju upoznavanja s konkretnom normom bit će dijelom ponovo navedene. Odabir IC kamere vrši se s obzirom na primjenu i temperaturu objekta koji se ispituje. Relevantni parametri IC kamere su:

- spektralna osjetljivost
- temperaturni raspon
- toplinska rezolucija
- prostorna rezolucija
- brzina akvizicije (snimanja)
- vremenska rezolucija.

Ovi parametri trebaju biti specificirani od strane proizvođača IC kamere.

Standard klasificira kamere prema vrsti detektora i dijeli ih na:

- jedan detektor s dvodimenzionalnim opto-mehaničkim skeniranjem (set zrcala koja rotiraju i prenose na detektor dio po dio slike, Slika 177)
- linijski skeneri s jednodimenzionalnim opto-mehaničkim skeniranjem ili linearni zapis
- Focal Point Array (FPA, Slika 11) detektor – dvodimenzionalni matični detektor bez mehaničkog skeniranja.



Slika 177 Agema AGA na FSB-u u Zagrebu, jedan detektor i rotirajuće prizme [1.1]

Klasifikacija se dalje prema normi dijeli na:

- toplinske detektore (mikrobolometri, piroelektrični)
- hlađene (*quantum*) detektore.

O ovome je već prije bilo govora pa se sada neće ponovo navoditi detalji. U ovom se poglavlju donosi samo osvrt na relevantnu aktualnu normu.

S obzirom na prozirnost atmosfere norma razlikuje:

- kratkovalne SW kamere: valna duljina između 0,8 i 2 μm
- srednjevalne SW kamere: valna duljina između 2 i 5 μm
- dugovalne LW kamere: valna duljina između 8 i 14 μm .

Temperaturno područje je interval između najniže i najviše temperature za koju je kamera kalibrirana i specificira se za temperature mjerene na crnom tijelu. Pod temperaturnim rasponom podrazumijeva se ukupni temperaturni raspon za koji se kamera može koristiti, a ovaj raspon sadrži nekoliko mjernih raspona koji se odabiru pri samom mjerenju. Korištenjem optičkih komponenti poput filtera može doći do promjene temperaturnog raspona.

Toplinska rezolucija je sposobnost da IC kamera razlikuje male temperaturne razlike. Kako je prije opisano, naziva se NETD (*Noise equivalent temperature difference*), a ovisi o:

- temperaturi objekta
- vremenu integracije ili odaziva
- temperaturnom rasponu.

Prostorna rezolucija opisuje sposobnost IC kamere da razlikuje male objekte i detalje. Često se kvantificira preko SRF (*Slit Response Funcion*), HRF (*Hole Response Funcion*) ili IFOV (*Instataneous Field of View*), kako je i prije bilo opisano. HRF i SRF računaju se na način da se između kamere i zagrijanog tijela postavi otvor u obliku provrta ili procijepa te se smanjenjem provrta/proreza ili udaljavanjem kamere očitava kada dolazi do pada signala. Ove vrijednosti, odnosno prostorna rezolucija ovise o detektoru i leći, odnosno o lećama koje se koriste IC kamerom. MRTD (*Minimum Resolvable Temperature Difference*), odnosno minimalno razlučiva temperaturna razlika u obzir uzima i karakteristike IC kamera te sposobnost termografista da izmjeri male temperaturne razlike kod sitnih objekata s obzirom na čitav kut kadra. Detalji mjerenja navedenih veličina bit će sadržani u edukaciji Level 2.

Brzina akvizicije (frekvencija kamere) predstavlja broj termograma koji detektor može očitati u jedinici vremena, najčešće u hercima. Ako se očitava samo dio slike (*eng. windowing* ili *windowed frames*), ne očitava se puna rezolucija već znatno manje podataka, pa su onda frekvencije brže. Brzina akvizicije ograničena je sposobnošću hardvera da prebaci podatke. Na brzinu akvizicije također mogu utjecati vrijeme integracije i vrijeme odziva detektora. Za hladene (*quantum*) detektore najviša toplinska rezolucija postiže se za duga vremena integracije, što s druge strane ograničava maksimalnu brzinu akvizicije (frekvenciju snimanja).

Vremenska rezolucija IC kamera važna je kod snimanja objekata koji se kreću, odnosno kod brzih promjena temperature. To je ono gdje će hladene (srednjevalne) kamere pri istoj brzini akvizicije (frekvenciji snimanja) očitati oštru sliku za razliku od dugovalnih kamera (Slika 12).

Raspon temperatura upotrebe kamere (*operating temperature range*) je temperatura okoline gdje se kamera koristi i navedena je od strane proizvođača opreme.

Raspon temperatura skladištenja kamere (*storage temperature range*) je temperatura na kojoj se ugašena kamera može odlagati (skladištiti), a također je navedena od strane proizvođača.

Spektralni filter je filter koji ograničava raspon temperatura IC kamere na usko područje valnih duljina kod kojih se ispituje specifična emisivnost ili apsorpcija određenog materijala/tvari. Primjer ovog je snimanje plinova gdje se u određenom uskom području detektiraju plinovi temeljem činjenice da je u tom uskom području apsorpcija valnih duljina velika pa plinovi postaju vidljivi. To su tzv. *gas finder* kamere. Spektralni filteri nisu univerzalni za sve plinove, već dobro treba obratiti pažnju na karakteristike filtera te koji su plinovi u tom području vidljivi. Često su za ove potrebe korisne srednjevalne kamere, a osim plinova analizira se i plamen, te ostvaruje prozornost plastike i stakla kad se želi vidjeti kroz ove materijale koji su inače u čitavom spektru kamere neprozirni.

Izmjenljive leće dio su opreme nekih IC kamera. Uključuju leće širokog i uskog kuta, teleobjektive i makroobjektive. Radi li se o kalibriranoj IC kameri (IC kamere koje interpretiraju zračenje kao temperaturu), što termografske jesu, potrebno je za svaku od ovih leća ponovo kalibrirati kameru te na raspolaganju imati kalibracijsku krivulju za svaku od leća posebno. Kalibracijska krivulja daje odnos između digitalnog iznosa i temperature crnog tijela, odnosno prividne temperature objekta koji se snima.

IC ogledala su ravne glatke metalne površine koje reflektiraju infracrveno zračenje, a koriste se kad je potrebno analizirati objekte, ili dijelove objekata, koji nisu direktno pristupačni objektivu IC kamere.

Zaštitni prozori izrađeni su od materijala visoke transmisivnosti, a služe kada je IC kameru potrebno zaštititi od mehaničkih, temperaturnih i kemijskih utjecaja. Detalji o utvrđivanju i uračunavanju transmisivnosti prozora, a s ciljem korektnog očitavanja temperature, bit će opisani u dijelu Level 2.

Kućište kamere štiti kameru od ekstremnih utjecaja poput:

- visoke topline
- prašine
- vode
- agresivnih kemikalija
- jakih elektromagnetskih polja
- mehaničkog oštećenja
- eksplozivnih atmosfera.

Izvori toplinskog toka koji se koriste kod aktivne termografije mogu biti:

- fleševi koji u vrlo kratkom vremenu dovode toplinski tok u objekt
- lampe (npr. halogene), LED lampe i laseri
- vrući i hladni zrak
- indukcijski namotaji (beskontaktno zagrijavanje električki vodljivih materijala)
- mehaničke uzbuđene (ultrazvuk, vibracijski aktuatori).

Funkcionalnost sve opreme potrebno je redovito kontrolirati. To uključuje provjeru mehaničkih, optičkih i elektroničkih svojstava te funkcionalnost softvera.

Prije početka ispitivanja korisnik kamere treba kontrolirati sljedeće:

- proceduru pokretanja i generalnu kontrolu funkcija (živi snimak i reagiranje na upravljačke tipke)
- kvalitetu slike (fokus, toplinska rezolucije, NUC (*Non-uniformity correction*) – gdje se utvrđuje da za ravnomjerno zagrijane plohe nema piksela koji ne rade, odnosno daju pogrešan iznos temperature)
- medij za pohranu podataka (da je moguće pohraniti i pregledavati snimke)
- temperaturnu kalibraciju (npr. putem crnog tijela): kamere koje se koriste za kvantitativna mjerenja temperatura, ili njihovih razlika, trebaju biti kalibrirane s dovoljnom točnošću prema međunarodnim temperaturnim skalama.

Dobavljači kamere mogu provoditi dodatne provjere temeljene na prihvaćenim standardima.

Ispitivanje funkcionalnosti IC kamere vrši se:

- a) od strane korisnika prije svake uporabe i nakon bilo kojeg kvara na uređaju
- b) od strane dobavljača kamere u skladu s preporučenim servisnim i kalibracijskim intervalima.

Priručna oprema koja se pri termografiji koristi može biti:

- termometar za mjerenje temperature tvari i zraka
- vlagomjer

- anemometar
- obuhvatni ampermetar (tzv. strujna kliješta)
- kamere u vidljivom spektru (često ugrađene s termokamerom)
- endoskop (optički uređaji za vizualnu kontrolu šupljina iza površine).

11.3. Nazivi i definicije

Norma HRN EN 16714-2:2016 regulira nazive i definicije koji se koriste u termografskom ispitivanju. Kako su HRN EN norme, osim naslova, pisane na engleskom, u cilju lakše interpretacije normi ovdje se navode izvorni engleski nazivi i prijevodi.

absorptance α – koeficijent apsorpcije – odnos između apsorbiranog zračenja i dovedenog zračenja. Koeficijent apsorpcije može varirati s obzirom na valnu duljinu, temperaturu i kut.

active thermography – aktivna termografija – termografska procedura kod koje se umjetni ili prirodni izvor energije koristi kako bi se u cilju ispitivanja generirao nestacionarni toplinski tok.

anti-reflectance coating – antirefleksni sloj – sloj koji prekriva leću i prozor u cilju povećanja transmisivnosti kod određenih valnih duljina pri čemu se smanjuje ili poništava refleksija površina.

atmospheric temperature T_{atm} – temperatura zraka (uzduha) u području između kamere i objekta mjerenja.

atmospheric attenuation – prigušenje atmosfere (uzduha, zraka) – smanjenje gustoće toplinskog toka na putu kroz atmosferu (zrak). Zrak (atmosfera) između objekta i IC kamere prigušuje radijaciju. Uz prigušenje od strane plinova koji tvore zrak (poput ugljičnog dioksida i vlage), također postoji prigušenje zbog prašine, magle, kiše, snijega itd.

comparative thermography – komparativna termografija – termografska procedura kojom se utvrđuju temperaturne razlike, fazne razlike ili razlike sekundarnih parametara.

chromatic aberration – kromatska aberacija – aberacija leća koja ovisi o valnoj duljini. Zbog disperzije zračenja (indeksa loma ovisnog o valnoj duljini) različiti dijelovi spektra projiciraju se u različite ravnine prikaza. Aberacija se povećava s povećanjem širine spektra radijacije.

close-up lens – leće za blizinu – dodatne leće koje se postavljaju ispred postojeće IC leće kako bi se smanjila udaljenost između kamere i objekta (povećao prikaz). Leće za blizinu su jeftina alternativa makroobjektivima kojima se adaptira kut kamere ili leće kako bi se ispitivali manji objekti.

data analysis – analiza podataka – primjena algoritama i proračuna u cilju povećanja kontrasta snimljenih indikacija.

differential temperature – diferencijalna temperatura (razlika temperatura) – temperaturna razlika između dviju vrijednosti zabilježenih na različitim pozicijama ili na istoj poziciji u različitim vremenima.

diffraction limit – granica difrakcije – granica prostorne rezolucije zbog pojave difrakcije optičkog sustava. Ovo je fizikalni limit optike koji se može procijeniti Rayleighovim kriterijem, a ovisi o valnoj duljini zračenja, obliku i dimenzijama fokusirajućih elemenata optike.

emissivity ε – emisivnost – između zračenja stvarnog tijela na nekoj temperaturi i zračenja crnog tijela na toj istoj temperaturi. Koeficijent emisivnosti ovisi o valnoj duljini, kutu, temperaturi i drugim faktorima.

extension ring – ekstenzijski prsten (cijev) – dodatak u obliku šuplje cijevi koji se umeće između leće i detektora kako bi se povećala udaljenost između ravnine projiciranja optike leće. Ovo je jeftinija varijanta makroobjektiva kojom se omogućuje postizanje uvećanja, no na štetu dubinske oštine pa se jasno vide samo površine koje su u fokusu, dok one malo izmaknute iz fokusa su mutne, odnosno prividna temperatura im je niža od realne!

external heating source – vanjski izvor topline – izvor topline koji se koristi za stvaranje nestacionarnog toplinskog toka kod aktivne termografije. Tu spadaju fleševi, halogene lampe, laseri, induktivni namoti, ultrazvuk i sl.

field of view FOV – kut gledanja – dio kadra koji je zabilježen od strane IC kamere.

fill factor – faktor ispune – zbroj svih površina pojedinačnih elemenata detektora (piksela) prema površini čitavog detektora (FPA). Ovo je važan faktor koji opisuje svojstva detektora. Detektori s visokim faktorom ispune omogućavaju homogene termograme, no visoki faktori mogu biti i uzrokom međusobnog utjecaja susjednih detektorskih elemenata (piksela).

fixed pattern noise – fiksni šum uzorka – utjecaj različitih osjetljivosti pojedinih elemenata detektora na očitavanje FPA detektora.

focal point array FPA – FPA detektor – detektor koji se sastoji od jednodimenzionalne ili dvodimenzionalne matrice pojedinačnih elemenata detektora.

frame rate – brzina akvizicije (frekvencija kamere) – broj termograma u sekundi pri određenoj rezoluciji.

image averaging – usrednjavanje snimke – usrednjavanje niza uzastopnih snimki s ciljem poboljšanja toplinske rezolucije. Ovim se poboljšava odnos signal – šum (*SNR signal-to-noise ratio*). Kako bi se izbjeglo zamućivanje snimki, usrednjavanje snimki može se primijeniti samo kod stacionarnih kadrova i sporomijenjajućih temperaturnih raspodjela.

infrared (IR) camera – infracrvena (IC) kamera, termokamera – optički uređaj uključujući leće, filtere, FPA detektor i internu obradu signala pri sakupljanju i kreiranju zapisa radijacije u infracrvenom spektru koju emitira objekt koji se ispituje i na kojem se mjeri tok zračenja i/ili temperatura. Pritom se detektira samo interval valne duljine koja prolazi kroz leće i filtere te se detektira putem FPA detektora osjetljivog na interval.

IR-imager, IR viewer – IC kamera koja samo vizualizira infracrvenu radijaciju bez mogućnosti provođenja mjerenja.

instantaneous field of view IFOV – prostorna rezolucija – dio slike koji padne na jedan element detektora IC kamere. IFOV specificira prostornu rezoluciju IC kamere. Može ga se primijeniti jedino na detektore s jednim elementom detektora. Prostorna rezolucija kod FPA detektora određuje se putem SRF-a (*slit*

response function), odnosno mjerenjem pada signala kod crnog tijela prekrivenog procjepom koji se sužava.

integration time – vrijeme integracije – za ovo vrijeme se upadno zračenje akumulira (integrira) na FPA detektoru. Što je ono duže, više se svjetla (zračenja) prikupi. Slično je kao vrijeme ekspozicije kod fotoaparata. Ako je ovo vrijeme previše dugačko, kod visokih razina zračenja može doći do saturacije (zasićenja) detektora. Najkraće vrijeme integracije je limitirano brzinom samog detektora.

long-wave infrared LWIR – dugovalno infracrveno zračenje – zračenje valnih duljina između $8 \mu\text{m}$ i $14 \mu\text{m}$.

measured field of view IFOV – mjerena (realna) prostorna rezolucija – najmanji objekt (provrt kroz koji se vidi crno tijelo) na kojemu se može provesti mjerenje, a da se pritom na temperaturu objekta ne utječe i pozadina. SRF i HRF testovi su tipičan način određivanja MFOV-a.

mid-wave infrared – srednjevalno infracrveno zračenje – valne duljine između $2 \mu\text{m}$ i $5 \mu\text{m}$.

minimum resolvable temperature difference MRTD – minimalno razlučiva temperaturna razlika – izmjerena sposobnost IC sustava i operatera (termografista) da raspozna periodične crte na ekranu.

modulation (of heat source) – modulacija toplinskog izvora – procedura kod koje je amplituda, faza i/ili frekvencija periodične ili impulsne toplinske uzbude modificirana.

noise equivalent temperature difference NETD – toplinska rezolucija (senzitivnost) – temperaturna razlika crnog tijela koja odgovara odnosu signal – šum kojeg izaziva šum u vremenu. Mjeri se u Kelvinima za određenu temperaturu objekta i određeno integracijsko vrijeme.

non-uniformity correction NUC – korekcija nejednakosti očitavanja – korekcija slike koju provodi softver kamere čime se kompenzira razlika u osjetljivosti elemenata detektora te ostalih optičkih i geometrijskih utjecaja.

passive thermography – pasivna termografija – termografska procedura kod koje nema umjetno nametnutog toplinskog toka u cilju provođenja ispitivanja. Postoji isključivo toplinski tok od strane samog objekta ispitivanja.

phase angle – fazni kut – fazni kut između toplinskog signala na površini objekta i nametnutog toplinskog toka pri frekvenciji f . Mjeri se u stupnjevima ili radijanima. Općenito se sastoji od fizikalnog dijela, koji je zadan faznim kutom između temperature površine objekta i toplinskog toka nametnutog izvana te od instrumentalnog dijela koji je zadan faznim kutom između signala uzbude vanjskog izvora topline i njegove gustoće toplinskog toka.

qualitative thermography – kvalitativna termografija – termografija kod koje se toplinski tok zračenja, temperatura, ili fazni kut sekundarnih izvedenih parametara ne određuju.

quantitative thermography – kvantitativna termografija – termografija kod koje se toplinski tok zračenja, temperatura, ili fazni kut sekundarnih izvedenih parametara određuju.

quantum detektor – detektor hladene kamere – poluvodički detektor koji apsorbira IC zračenje na način da stvara fotoelektrički efekt, čime mijenja električnu provodljivost ili generira fotonapon.

quantum well infrared photon detector, QWIP detector – posebni tip infracrvenog detektora koji se temelji na efektu fotouzbuđe elektrona između baze i prvog nivoa u provodljivim (valentnim) slojevima.

reflectance ρ – reflektivnost – omjer između reflektiranog zračenja i zračenja dospjelog na površinu.

reflected apparent temperature T_{refl} – reflektirana prividna temperatura – prividna temperatura okoline koja se reflektira na površini prema IC kameri. Mjeri se na difuznom reflektoru postavljenom na istom mjestu kao i površina koja se ispituje. Zanemarivanjem reflektirane prividne temperature, ili odabirom pogrešne vrijednosti, može (kod površina male emisivnosti) doći do znatne pogreške u očitavanju temperature!

short-wave infrared SWIR – kratkovalno infracrveno zračenje – valne duljine između $0,8 \mu\text{m}$ i $2 \mu\text{m}$.

spectral absorbance α_λ – spektralna apsorpcija – apsorpcija na određenoj valnoj duljini.

spectral emissivity ε_λ – spektralna emisivnost – emisivnost na određenoj valnoj duljini.

spectral transmittance τ_λ – spektralna transmisivnost – transmisivnost na određenoj valnoj duljini.

spectral aberration – spektralna aberacija – aberacija uzrokovana geometrijom leće. Sferične leće same po sebi ne omogućuju točnu refrakciju zraka u točku fokusa, odnosno ravninu fokusa.

thermal detector – toplinski detektor – detektor koji generira električni signal uslijed temperaturnih promjena na detektoru koje nastaju zbog upada toplinskog zračenja na detektor. Signali koji omogućavaju mjerenje su npr. promjene električnog otpora (bolometri), termomehanički potencijal (termoparovi) ili električna polarizacija.

thermography – termografija – beskontaktna detekcija, obrada i vizualno prikazivanje raspodjele toplinskog zračenja koje potječe od strane objekta i daje se zabilježiti od strane IC detektorskog sustava. Infracrvena termografija (IC termografija) koristi se kao sinonim.

thermographic testing – termografsko ispitivanje – ispitivanje bez razaranja putem termografije.

transmittance τ – transmisivnost – odnos između zračenja objekta i upadnog zračenja koje je prošlo kroz objekt.



Hai cercato la solitudine tutta la vita
Ma adesso che sei veramente solo
Vuoi qualcuno che ascolti la tua voce.