

# Termografska ispitivanja procesne opreme

---

Gapit, Marina

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:690209>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-30**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Marina Gapit

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Marina Gapit

**TERMOGRAFSKA ISPITIVANJA PROCESNE OPREME**

**ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada: Prof. dr. sc. Nenad Bolf

Članovi povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nenad Bolf

Dr. sc. Željka Ujević Andrijić

Izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar

Zagreb, rujan 2018.

## **SAŽETAK**

U ovom radu dana su teorijska načela toplinskog zračenja, prikazani su mehanizmi prijenosa topline i zakoni elektromagnetskog zračenja. Navedena znanja potrebna su za razumijevanje infracrvene termografije koja ima veliku primjenu u kemijskoj industriji. Infracrvena termografija nerazarajuća je beskontaktna metoda analize toplinskog zračenja koja pronalazi primjenu za dijagnostiku stanja industrijskog postrojenja.

Praktični dio rada proveden je na rafinerijskom postrojenju. Infracrvenom kamerom dijagnosticirana je industrijska peć na postrojenju atmosferske destilacije. Snimljene infracrvene slike analizirane su kako bi se dijagnosticiralo stanje peći i procesne opreme.

### **Ključne riječi:**

Infracrvena termografija, dijagnostika, industrijska peć

## **ABSTRACT**

In this paper are presented theoretical principles of thermal radiation, heat transfer mechanisms and electromagnetic radiation laws. This knowledge is needed to understand infrared thermography that has a great application in the chemical industry. Infrared thermography is a non-destructive, non-contact method of heat radiation analysis that finds application for the diagnosis of the state of the industrial plant.

The practical part of the work was carried out at the refinery plant. An infrared camera was used to diagnose an industrial furnace at the atmospheric distillation plant. Recorded infrared images were analyzed to diagnose the state of the furnace and process equipment.

### **Key words:**

Infrared thermography, process diagnostics, industrial furnace

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. Termografija .....	2
2.2. Temperatura i toplinsko zračenje .....	3
2.2.1. Mehanizmi prijenosa topline.....	4
2.3. Elektromagnetsko zračenje i spektar .....	5
2.3.1. Osnova IC zračenja .....	7
2.3.2. Zakoni elektromagnetskog zračenja.....	7
2.3.3. Crno tijelo .....	9
2.3.4. Realna tijela .....	10
2.4. Termografski sustav .....	12
2.5. Primjena infracrvene termografije .....	13
2.5.1. Termografija u stvarnom vremenu.....	16
2.5.2. Primjena termografije u ispitivanju industrijske procesne peći .....	17
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	20
3.1. Provedba mjerenja .....	20
3.2. Računalni program za analizu IC slika.....	20
3.3. Provedba analize termograma u programu FLIR Tools .....	21
3.4. Eksperimentalni podaci .....	22
4. REZULTATI.....	23
4.1. Kvalitativna analiza .....	23
4.2. Kvantitativna analiza .....	27
5. RASPRAVA .....	29
5.1. Kvalitativna analiza termograma donjeg dijela peći .....	29
5.2. Kvalitativna analiza radijacijskog dijela peći .....	29
5.3. Kvalitativna analiza konvekcijskog dijela peći .....	30
5.4. Kvantitativna analiza .....	30
6. ZAKLJUČAK .....	32
7. POPIS SIMBOLA.....	33
8. LITERATURA .....	34

9. PRILOZI.....	36
9.1. Karakteristike IC FLIR T360 kamere.....	36
10. ŽIVOTOPIS .....	37

*Zahvaljujem svome mentoru, prof. dr. sc. Nenadu Bolfu na stručnom vodstvu pri izradi završnoga rada.*

*Veliko hvala asistentici Mariji Lukić, mag. ing. cheming. na prenesenom znanju i pomoći pri izradi ovoga rada.*

*Zahvaljujem se roditeljima, obitelji i prijateljima na neiscrpoj podršci i motivaciji tokom studiranja.*

## 1. UVOD

Svako tijelo ili objekt može se opisati fizikalnim veličinama kako bi se prikupile informacije o njegovim svojstvima, a jedna od tih veličina je temperatura. Toplina iz električne, mehaničke i kemijske aktivnosti je nusprodukt svih procesa, a neočekivan porast temperature može biti indikator mnogih nepravilnosti kako u samoj izradi uređaja tako i o lošem održavanju.

Mjerenja temperature možemo podijeliti na kontaktna i beskontaktna. Uređaji za kontaktna mjerenja rade na načelu prijenosa topline, dok beskontaktni mjere zračenje koje emitira ispitivani objekt. Termografija je beskontaktna metoda mjerenja i bilježenja temperature i njezine raspodjele na površinama objekata. Infracrvena termografija je mjerna metoda kojom se bilježi zračenje površina objekata u određenom području infracrvenog spektra. Svako tijelo odašilje u svoju okolinu elektromagnetsko zračenje, čiji intenzitet prvenstveno ovisi o temperaturi površine tijela. Ako je ta temperatura viša od približno 600 °C tada je zračenje tog tijela vidljivo ljudskom oku. Najveća prednost termografije je u tome što je karakteristična za svaku pojedinu tvar te olakšava praćenje toplinskih promjena, a služi i kao smjernica inženjeru za provođenje daljnjih radnji kod vođenja procesa kao i održavanju postrojenja.

Kako bi se moglo pristupiti primjeni termografskih sustava potrebno je poznavati mehanizme prijenosa topline i teoriju zračenja. Navedena teorijske osnove su bitne za odabir optimalnih parametara za ispravnu interpretaciju termograma. Osim znanja, pri provedbi mjerenja potrebno je iskustvo u izboru metode mjerenja, ali i izbor odgovarajuće kamere.

Prikazan je i postupak termografskog ispitivanja industrijske peći. Ispitivanje daje informacije o stanju procesne opreme (cijevi, ventila, itd.) i stanju izolacije peći (npr. šamotni dijelovi). Iz analize nerazarajućih ispitivanja može se izraditi termografski izvještaj - rano upozorenje za prevenciju mogućih oštećenja te time izbjegnuti zastoj proizvodnog procesa te dugoročna ušteda).



## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Termografija

Termografija (grč. *therme* – toplina i *grafein* – pisati) je beskontaktna metoda kojom se mjeri i bilježi temperatura i temperaturna raspodjela na površini tijela. Temelji se na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s promatrane površine koje emitira svako realno tijelo. Provodi se termografskim kamerama koje registriraju emitiranu energiju zračenja tijela, odnosno objekata, u svrhu određivanja temperature njihove površine. Kamere koje se koriste u termografskom mjerenju sadrže optički sustav kroz koji prolazi zračenje te pada na senzor koji se naziva fotodetektor. Fotodetektor pretvara energiju zračenja u naponski signal. Signal se nakon pojačavanja i obrade prikazuje na zaslonu odnosno termogramu. Rezultat termografskih snimanja je dvodimezijska slika odnosno termogram koji prikazuje raspodjelu temperature po površini objekta u sivim ili tonovima boje. <sup>1,2</sup>

Prema pristupu mjerenjima i obradi rezultata termografija se dijeli na aktivnu i pasivnu te na kvalitativnu i kvantitativnu. Aktivna termografija promatra dinamičko ponašanje površine objekta koje je izloženo toplinskoj pobudi. Toplinska pobuda postiže se na različite načine, primjerice impulsna pobuda, periodička, lock-in, vibracijska pobuda te mnoge druge. Cilj ovih pobuda je slanje određenog paketa energije u promatrani objekt te promatranje njihovih odziva. Za razliku od aktivne, pasivna termografija promatra objekte koji su u stacionarnom stanju. Razlike u iznosima infracrvenog zračenja koje dolaze s površine objekata su ili posljedica razlika u temperaturi ili razlika u svojstvima promatrane površine. Naknadna obrada snimljenih termograma može biti kvalitativna odnosno na taj način se uočavaju temperaturne razlike na pojedinim mjestima. Kvantitativna obrada podrazumijeva utvrđivanje iznosa temperatura, temperaturnih razlika ili emisijskih faktora na različitim mjestima prikazanih termogramom. Termografija se primjenjuje u svrhu provjere sigurnosti, uštede energije te preventivnog održavanja. <sup>3,4</sup>

Infracrvena (IC) termografija je mjerna metoda kojom se određuje raspodjela temperature na površini objekta mjerenjem intenziteta zračenja u infracrvenom području elektromagnetskog spektra. IC termografija se koristi u svrhu kontrole i održavanja, otkrivanju kritično visokih temperatura, procjene stanja opreme, pri različitim postupcima kontrole bez razaranja, pri određivanju kvalitete toplinske izolacije te kod različitih problema gdje je prisutan prijelaz topline. <sup>5,6</sup>

Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke pa tako i termografija. <sup>7</sup>

Prednosti termografije:

- Beskontaktno mjerenje
- Široke mogućnosti primjene
- Brzi odziv
- Relativno jednostavna interpretacija termograma

Nedostaci termografije:

- Mogućnost promatranja samo površinskih efekata
- Komplicirano provođenje toplinskih stimulacija velikih objekata
- Utjecaj emisijskog faktora, atmosfere, geometrije objekata, udaljenosti i ostalih karakteristika objekata na rezultat mjerenja

## **2.2. Temperatura i toplinsko zračenje**

Temperatura je veličina koja karakterizira stupanj zagrijanosti tijela. Ona je vanjska, makroskopska manifestacija unutrašnjeg toplinskog stanja tijela. Donja granica temperature koja se još naziva i apsolutna nula iznosi 0 K odnosno -273,15 °C, dok gornja granica temperature nije poznata.

Toplinsko zračenje predstavlja funkciju temperature i strukture objekta. Dio je sveukupnog elektromagnetskog zračenja te nastaje pri vibracijskim i rotacijskim prijelazima u atomima i molekulama na temperaturama iznad apsolutne nule. <sup>2,8</sup>

### 2.2.1. Mehanizmi prijenosa topline

U osnovi razlikujemo tri različita mehanizma prijenosa topline: <sup>2</sup>

- kondukcija ili provođenje
- konvekcija ili komešanje (s promjenama agregatnog stanja ili bez nje)
- radijacija ili zračenje

Kondukcija je način izmjene topline pri kojem se ona prenosi na razini atoma i molekula direktnim dodirom.<sup>2</sup> Budući da se događa u tijelima čije su osnovne čestice vezane na položaj u kojem se nalaze u samom tijelu, kondukcija se većinom odvija u krutim tijelima. Moguće je da se pojavi kod tekućina, no samo kod onih koje se nalaze u vrlo malom prostoru jer na taj način ne može doći do znatnijeg gibanja njihovih makroskopskih dijelova. Prijenos topline je, prema II. Zakonu termodinamike, usmjeren od čestica više temperature prema česticama niže temperature. Čestice više temperature imaju veću kinetičku energiju titranja te u dodiru sa drugim česticama dolazi do prijenosa energije sa čestica više energije na one s nižom energijom pa se proces odvija u smjeru smanjenja temperature.<sup>4,9</sup>

Fourierov zakon je temeljni zakon koji opisuje prijenos topline kondukcijom:

$$\Phi = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{\delta}{\lambda}} \times A \quad (1)$$

Pri čemu su:  $\Phi$  – toplinski tok [W] ,

$A$  – područje pod pravim kutom prema smjeru u kojem toplina teče

$\vartheta_1 - \vartheta_2$  - temperaturna razlika mjerena u °C

$\delta$  – debljina stijenke iskazana u m

$\lambda$  – toplinska provodnost materijala stijenke izražena u W/m\*K. Nazivnik

$\frac{\delta}{\lambda}$  – specifični toplinski otpor.<sup>4</sup>

Konvekcija je prijenos topline između fluida (plina ili kapljevine) u gibanju i krute stijenke kada su oni na različitim temperaturama. Prijenos topline strujanjem uvijek je popraćen i prijenosom topline provođenjem jer su u fluidu čestice različite temperature u stalnom direktnom dodiru. Konvekciju možemo podijeliti u dvije skupine s obzirom na gibanje fluida,

na prirodnu i prisilnu konvekciju. Kod prirodne ili slobodne konvekcije strujanje tekućine uzrokovano je nejednolikom temperaturnom raspodjelom u tekućini, a time i nejednolikim rasporedom gustoće. Kod prisilne ili prinudne konvekcije, strujanje tekućine izazvano je izvana nametnutom razlikom tlakova pa se strujanje događa bez obzira na prijelaz topline.<sup>4,9</sup>

Toplinski tok izmijenjen konvekcijom opisan je Newtonovim zakonom hlađenja:

$$\Phi = \alpha * (\vartheta_s - \vartheta_\infty) * A \quad (2)$$

pri čemu je:  $\Phi$  – toplinski tok [W],  
 $\alpha$  – koeficijent konvekcijskog prijelaza topline [W/m<sup>2</sup>K],  
 $\vartheta_s$  – temperatura stijenke [°C],  
 $\vartheta_\infty$  – temperatura tekućine udaljene od stijenke [°C],  
 $A$  – površina okomita na smjer izmjene topline [m<sup>2</sup>].<sup>4</sup>

Zračenje je vrsta prijenosa topline koje se odvija u obliku elektromagnetskih valova između tijela različitih temperatura. Ono nastaje zbog promjena elektronskih konfiguracija unutar atoma tvari, a uvelike se razlikuje od već spomenutih mehanizama prijenosa topline, kondukcije i konvekcije, u tome što se širenje elektromagnetskih valova odvija bez materijalna posrednika, te stoga se zračenje može odvijati i u vakuumu.<sup>9</sup> Sva tijela zrače određeno elektromagnetsko zračenje, bez obzira na svoju temperaturu, a izvor termalne radijacije je unutrašnja energija tijela. Kod prijenosa topline zračenjem zadovoljen je II. Zakon termodinamike s obzirom da toplina prelazi sa toplije na hladnije tijelo. No, s obzirom da tijelo odašilje vlastito emitirano zračenje, a apsorbira zračenje od drugih tijela, njegovo ukupno zračenje je razlika emitiranog i apsorbiranog zračenja.<sup>2,4</sup>

### 2.3. Elektromagnetsko zračenje i spektar

Sva tijela kojima je temperatura veća od temperature apsolutne nule kontinuirano emitiraju elektromagnetsko zračenje, koje kroz vakuum putuje brzinom svjetlosti 3\*10<sup>8</sup> m/s. Takvo zračenje posljedica je titranja elektrona oko jezgre atoma, a čine ga veoma mali, nevidljivi paketići energije koji se nazivaju kvanti ili fotoni. Priroda elektromagnetskog zračenja je dualna što znači da se zračenje u svojoj interakciji s tvari ponaša kao čestica, a kada se širi kroz prostor kao val.<sup>10,11</sup>

Svaki val opisan je frekvencijom, amplitudom, valnom duljinom, brzinom, itd. Valna duljina zračenja  $\lambda$  ovisi o frekvenciji vala  $\nu$  i brzini širenja vala  $c$  preko izraza:

$$c = \nu \times \lambda \quad (3)$$

Pri čemu su:  $c$  – brzina vala [m/s],

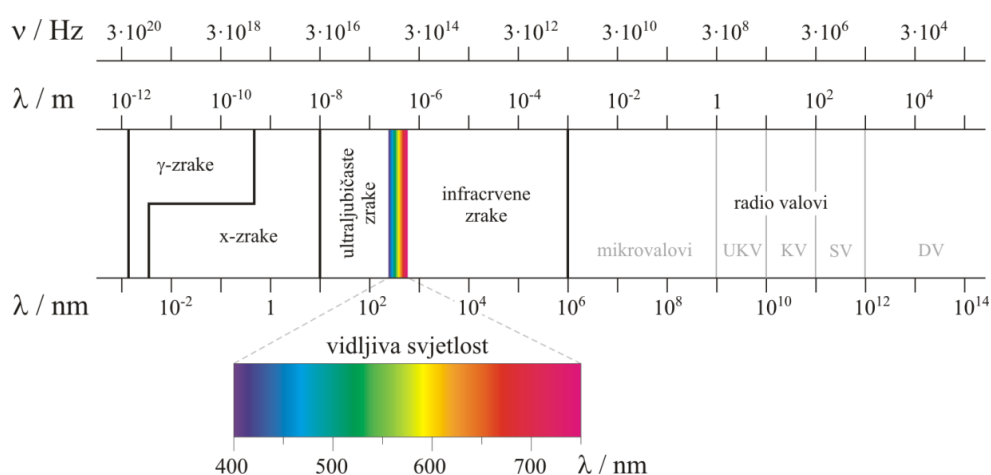
$\lambda$  – valna duljina [m],

$\nu$  – frekvencija [1/ s].

Brzina širenja vala ovisna je o mediju kroz koji se val širi, no frekvencija vala je neovisna o vrsti medija te je ona konstantna. Brzina širenja vala u vakuumu je jednaka brzini širenja svjetlosti te iznosi  $2,998 \cdot 10^8$  m/s te je i ona praktički konstantna. Obzirom da je valna duljina direktno zavisna o ove dvije veličine tako i ona postaje konstantna.<sup>7</sup>

Energija se zračenjem prenosi na čitavom spektru valnih duljina. Užarena tijela zrače kontinuiranim spektrom čiji oblik i raspored ovisi o temperaturi samog tijela. Toplinski utjecaj može biti djelotvoran samo ako valna duljina zračenja pada unutar spektra od 0,1 do 100  $\mu\text{m}$  što znači da onaj dio spektra koji je vezan za izmjenu topline obuhvaća djelomično ultraljubičasto i u potpunosti vidljivo i infracrveno zračenje.<sup>8,11</sup>

Vidljivi spektar naziva se onaj dio spektra elektromagnetskih valova koje ljudsko oko može vidjeti te obuhvaća područje valnih duljina,  $\lambda$  od 400 nm do 700 nm. Infracrveni spektar nalazi se odmah nakon vidljivog na valnim duljinama od 750 nm do 3 mm.<sup>10,12</sup>



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja<sup>13</sup>

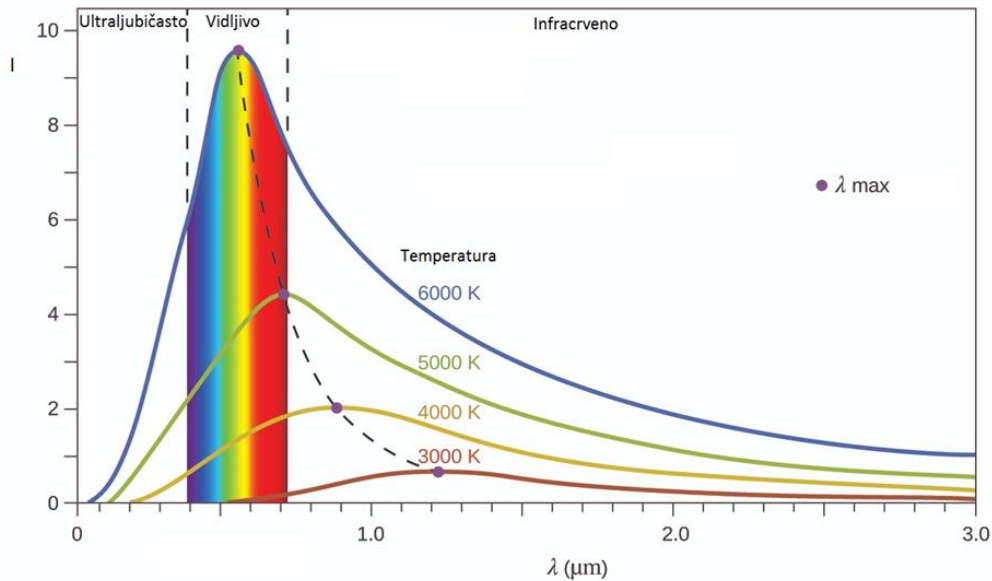
### 2.3.1. Osnova IC zračenja

Sunčeva svjetlost je izvor topline te sadrži cijeli spektar boja. Vidljiva svjetlost može se rastaviti na svjetla svih valnih duljina od 400 nm do 800 nm staklenom prizmom ili optičkom rešetkom. S prizmom od kamene soli i nekih drugih tvari mogu se dobiti spektri zraka većih valnih duljina od 800 nm do preko  $10^5$  nm koje se nazivaju infracrvene zrake, a njihovo spektralno područje naziva se infracrveno područje. Infracrvene zrake otkrio je astronom William Herschel početkom 19. stoljeća. Mjerio je temperaturu u području pojedinih boja spektra vidljive svjetlosti dobivenih razlaganjem pomoću optičke prizme. Primijetio je kako temperatura boja raste od ljubičaste prema crvenoj, no da se taj porast nastavlja i u području gdje nema vidljive svjetlosti. Na temelju toga zaključio je kako postoji zračenje i izvan vidljivog dijela spektra kojeg je nazvao termometrijskim spektrom. To zračenje kasnije je nazvano infracrvenim (IC) zračenjem. <sup>2,11</sup>

### 2.3.2. Zakoni elektromagnetskog zračenja

Zračenje je, kako je već spomenuto, vrsta prijenosa topline koje se odvija u obliku elektromagnetskih valova. Ono je proces karakterističan za svako tijelo. Užarena, čvrsta tijela emitiraju kontinuirani spektar, no intenzitet svih boja u spektru nije isti. Intenzitet određene boje ovisi o temperaturi užarenog čvrstog tijela. Tijelo na početku zagrijavanja postaje tamnocrveno te daljnjim zagrijavanjem žuto-crveno pa zatim žuto i bijelo usijano. Porastom temperature tijela intenzitet boja se pomiče prema kraćim valnim duljinama. <sup>4,11</sup>

Krajem 19. stoljeća, njemački fizičar Max Planck definirao je spektralno isijavanje elektromagnetskog zračenja kao funkciju apsolutne temperature i valne duljine. Emitirano zračenje crnoga tijela za odabranu temperaturu ovisi o valnoj duljini te se ono kontinuirano mijenja kroz cijeli spektar. Porastom temperature tijela raste i intenzitet emitiranog zračenja što je grafički prikazano na slici 2. <sup>2,10</sup>



**Slika 2.** Spektralna raspodjela emisije crnog tijela <sup>14</sup>

Porastom temperature veći dio emitiranog zračenja pomiče se prema području kraćih valnih duljina. Taj fenomen uočio je Wilhelm Wien te je iznio Zakon pomaka kojim se opisuje kako topliji objekt emitira kraće valne duljine ukupnog zračenja. 10

Valna duljina maksimalnog zračenja definirana je sljedećim izrazom:

$$\lambda_{max} = \frac{k}{T} \quad (4)$$

Pri čemu su :  $k$  – konstanta proporcionalnosti koja iznosi 2897,8 [ K $\mu$ m ]

$T$  – temperatura crnog tijela [ K ]

$\lambda_{max}$  – valna duljina maksimalnog zračenja [  $\mu$ m ]

Kako u prirodi ne postoji tijelo koje bi zračilo najveću moguću energiju pri danoj temperaturi, uvodi se pojam crnog tijela. Zračenje koje crno tijelo emitira ovisi samo o njegovoj temperaturi, te prema Stefan – Boltzmannovom zakonu, izračunavanjem površine ispod krivulje kod koje je energija zračenja ovisna o valnoj duljini dobiva se formula za snagu zračenja crnog tijela:

$$W_{uk} = \sigma \times T^4 \quad (5)$$

pri čemu su:  $W_{uk}$  – ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina crnog tijela [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],

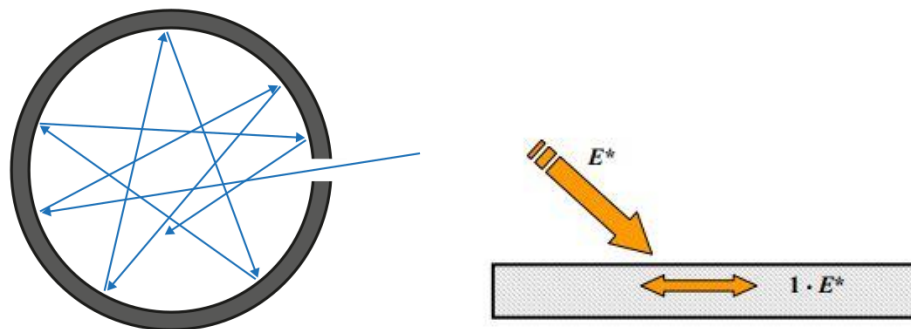
$\sigma$  –konstanta zračenja crnog tijela zvana Stefan – Boltzmannova konstanta koja iznosi  $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$ , a

$T$  – označava temperaturu iskazanu u kelvinima.

### 2.3.3. Crno tijelo

Crno tijelo je idealno tijelo koje apsorbira svo zračenje koje pada na njega, bez obzira na valnu duljinu ili kut upada. Zračenjem crno tijelo prima svu energiju te mu je faktor apsorpcije jednak jedan. Ono istovremeno emitira količinu energije koja je jednaka dozračenjoj.

Zračenje crnog tijela može se simulirati malim otvorom izotermne šupljine čija unutrašnja površina ima velik faktor apsorpcije (slika 3). Zraka koja je ušla kroz otvor potpuno je apsorbirana, pa je intenzitet reflektirane zrake kroz otvor gotovo sveden na nulu. To dokazuje da je uhvaćeno zračenje kroz otvor šupljine upravo zračenje crnog tijela za zadanu temperaturu šupljine. Što je otvor šupljine manji, a faktor apsorpcije veći, to se ta dva zračenja bolje poklapaju. <sup>11,7</sup>



**Slika 3.** Crno tijelo apsorbira cjelokupno prispjelo zračenje <sup>7</sup>



To je idealizirano tijelo koje služi kao etalon pri analizi ponašanja realnih tijela. Osim što apsorbira sve zračenje, ono pri određenoj temperaturi emitira više zračenja nego bilo koje realno tijelo, odnosno crno tijelo temperature  $T$  zrači najveću moguću količinu energije pri toj temperaturi.

#### 2.3.4. Realna tijela

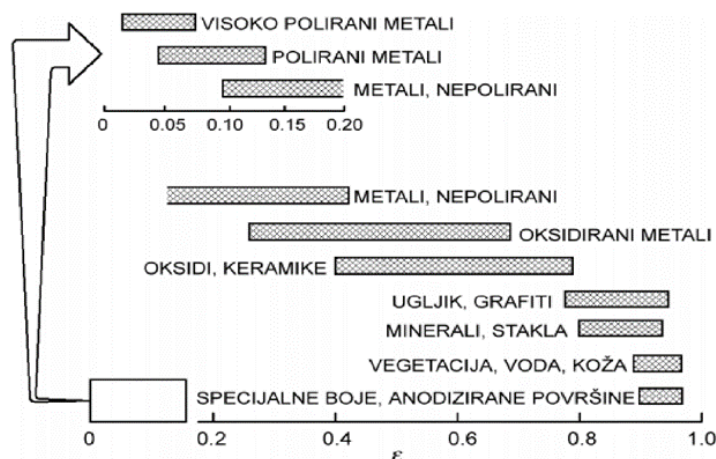
Realna tijela se ne ponašaju prema zakonima koje vrijede za crno tijelo. Oni pri istoj temperaturi apsorbiraju, a time i zrače, manju energiju od crnog tijela koja se može izračunati prema Stefan-Boltzmannovom zakonu za realna tijela:

$$W_{uk} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (6)$$

Pri čemu je  $\varepsilon$  emisijski faktor površine realnog tijela i ima vrijednost između 0 i 1. To je omjer vlastite emitirane energije realnog tijela i vlastite emisije crnog tijela pri istoj temperaturi:

$$\varepsilon = \frac{q_T}{q_{c,T}} \quad (7)$$

Vrijednost emisijskog faktora ovisi o vrsti materijala, temperaturi i stanju površine. Vlastita emisija realnih tijela je funkcija temperature tijela i emisijskog faktora. Što tijelo ima višu temperaturu i višu vrijednost emisijskog faktora ono više emitira, i obrnuto.<sup>10,7</sup>



Slika 4. Emisivnost različitih materijala <sup>10</sup>

Zakon koji povezuje faktor apsorpcije i faktor emisije naziva se Kirchhoffov zakon. Faktor apsorpcije ovisi o temperaturi tijela, stanju njegove površine te o intervalu valnih duljina upadnih zraka. On pokazuje koliki će dio zračenja biti apsorbiran od strane promatranog tijela. Ako se temperatura ne mijenja, faktori apsorpcije i emisije su međusobno jednaki. Iz toga proizlazi da su tijela koja su dobri emiteri ujedno i dobri apsorberi, i obrnuto.<sup>2,8</sup>

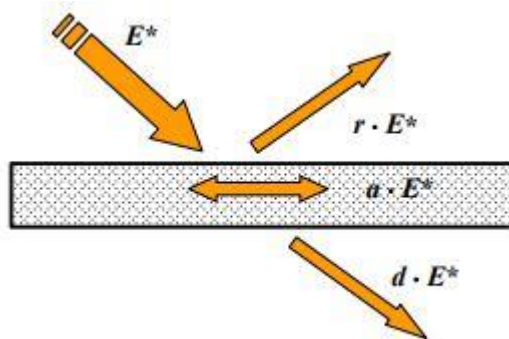
Ukupna odzračena energija s površine promatranog tijela sastoji se od vlastite emisije, s izvorom u promatranom tijelu, reflektiranog zračenja, čiji su izvor zračenja objekti ispred promatranog tijela, te propuštenog zračenja, čiji su izvor zračenja objekti iza promatranog tijela.<sup>2,8</sup>

Zračenje koje dolazi na površinu realnog tijela djelomično se apsorbira, djelomično reflektira te djelomično propusti (slika 5):

$$E^* = a \times E^* + r \times E^* + d \times E^* \quad (8)$$

Iz čega slijedi:

$$1 = a + r + d \quad (9)$$



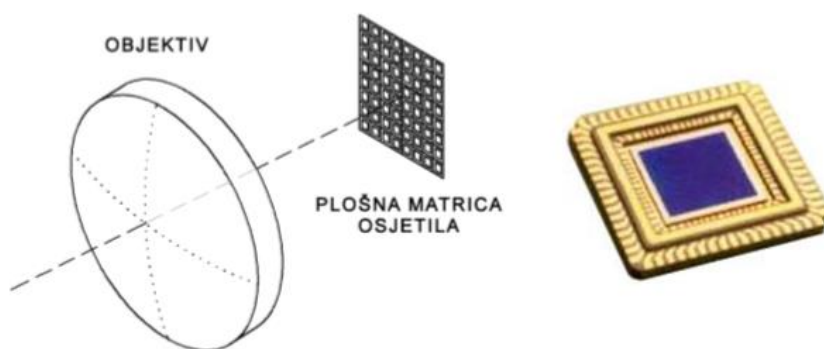
**Slika 5.** Apsorbirano, reflektirano i propušteno zračenje <sup>7</sup>

Omjer između apsorbiranog i prispjelog zračenja zove se faktor apsorpcije, omjer između reflektiranog i prispjelog zračenja faktor refleksije, a omjer između propuštenog i prispjelog zračenja faktor dijatermije.<sup>2,7</sup>

## 2.4. Termografski sustav

Termografski sustav sastoji se od termografske kamere kojom se snima termogram te programa za analizu termograma. Termografska kamera, zvana još i infracrvena kamera, pretvara IC toplinsko zračenje u vidljivu 2D sliku. Sastoji se od IC optike, osjetnika IC zračenja, jedinice za pretvorbu električnog u video signal, monitora i kartice za pohranu podataka.<sup>8</sup> IC optika po obliku je jednaka optici fotografskih uređaja budući da su karakteristike elektromagnetskog zračenja jednake za cijeli elektromagnetski spektar. Razlika je u materijalima koji se koriste za izradu leća, pa su tako leće na termografskim kamerama napravljene od materijala koje propuštaju infracrveno zračenje, a to su; germanij, cink sulfid te cink selenid za dugovalna zračenja te silikon, safir, kvarc ili magnezij za srednjevalna IC zračenja.<sup>7</sup> Termokamera kao osjetnik IC zračenja sadrži plošnu matricu osjetila (engl. FPA – Focal Plane Array) koja omogućuje mjerenje temperatura u više točaka površine objekta istovremeno.<sup>14</sup> U središtu senzora FPA nalazi se mikrobolometar – detektor osjetljiv na temperaturu koji upija dugovalno infracrveno zračenje. Kad mikrobolometar upija svjetlost od izvora topline, njegova unutrašnja temperatura raste i mijenja se električni otpor. Čip za očitavanje zatim pretvara te vrijednosti otpora izravno u digitalni signal. Današnje termografske kamere većinom imaju razlučivost 320 x 240 piksela, a svaki piksel predstavlja različitu temperaturu.

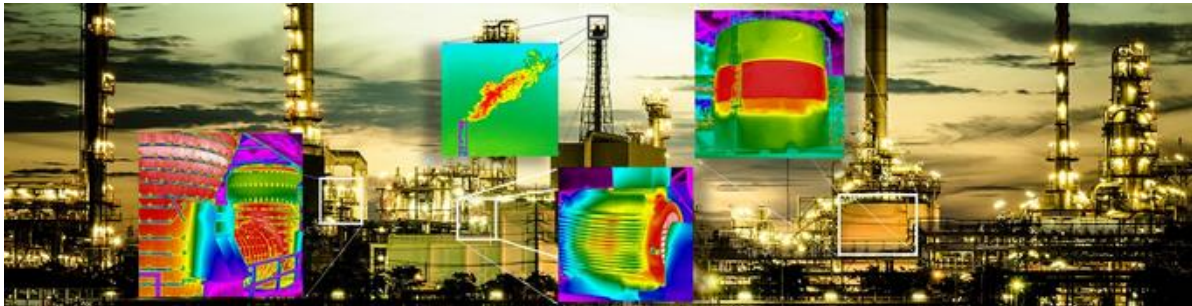
Budući da infracrvena kamera pri mjerenju u obzir uzima koeficijent emisije, udaljenost objekta te temperaturu okoline nije dovoljno samo snimiti objekt kamerom, već je snimljeni termogram potrebno analizirati u za to predviđenom programu.<sup>5</sup>



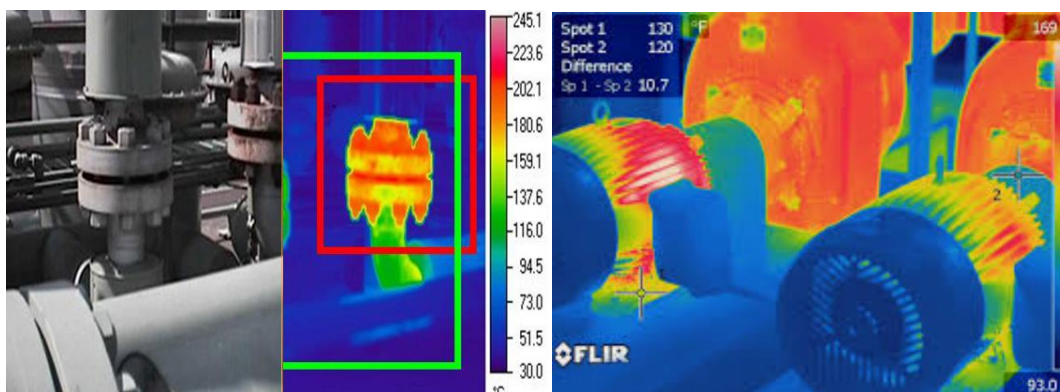
**Slika 6.** Načelo rada termografske kamere, plošna matrica osjetila <sup>14</sup>

## 2.5. Primjena infracrvene termografije

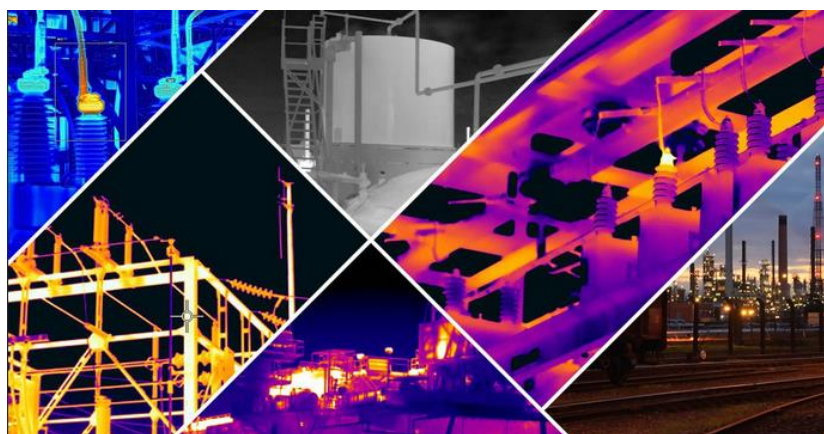
Infracrvena termografija pronašla je svoje mjesto u industriji za osiguranje i održavanje kvalitete. Primjenjuje se u medicini, biologiji, astronomiji, petrokemijskoj industriji, građevinarstvu, znanstvenoj djelatnosti, u termotehnici i u procesnoj tehnici.<sup>15</sup>



Slika 7. Primjena termografije u industrijskom postrojenju <sup>16</sup>



Slika 8. Primjena termografije pri kontroli ventila (slika lijevo) te rada motora (slika desno)<sup>17</sup>



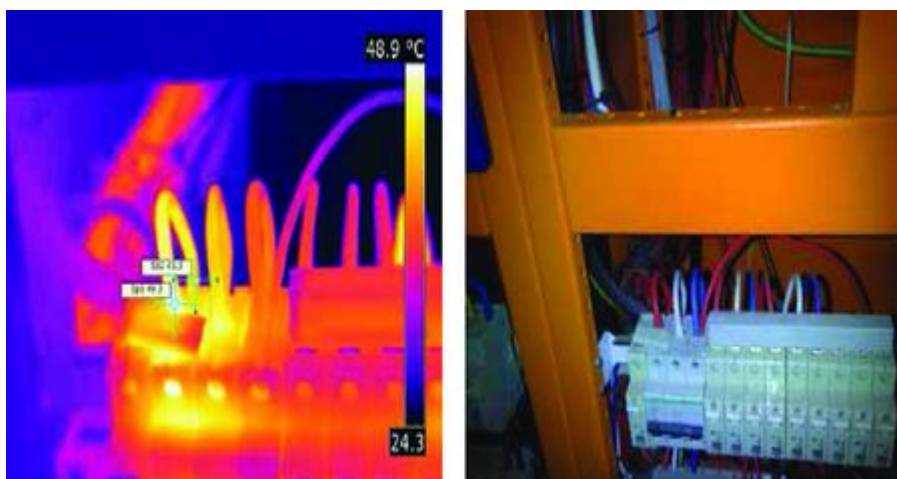
Slika 9. Primjena termografije u kontroli dalekovoda <sup>18</sup>

Primjenom infracrvene termografije u zgradarstvu mjerenjem izolacije zgrade dolazi se do podataka o kvaliteti toplinske izolacije. Mjeri se postojanje „toplih mjesta“, tj. mjesta rasipanja energije, te se stručnom interpretacijom mogu locirati nedostaci konstrukcije kako bi se oni sanirali te poboljšali energetska efikasnost sustava zgrade.<sup>6</sup> Mogućnost beskontaktnog i daljinskog snimanja ukupnog temperaturnog polja površine promatranog objekta daje velike prednosti u odnosu na klasične analize konstrukcije. Primjena IC termografije u zgradarstvu može donijeti značajne uštede bilo putem kratkoročnog sprečavanja ozbiljne degradacije sustava konstrukcije ili pak dugoročnog podizanja energetske efikasnosti zgrade.<sup>8,15</sup>

**Tablica 1.** Pregled primjene infracrvene termografije u industriji<sup>10</sup>

<b>Industrija</b>	<b>Mogućnosti primjene infracrvene tehnologije u dijagnostici</b>
<i>Petrokemijska</i>	Stvaranje naslaga koksa u cijevima i peći, korozija, stanjivanje cijevi, parni sustavi, razina kapljevine u spremnicima, naslage u izmjenjivačima
<i>Proizvodnja vapna</i>	Zona izgaranja, oplata peći, vrući klinker, provjera elektrostatskih filtara za pročišćavanje ispušnih plinova
<i>Lijevanje i kalupljenje</i>	Toplinska raspodjela na površini kalupa, začepljenje rashladnih kanala, provjera valjanosti prototipa
<i>Elektronička</i>	Neispravnost komponenata na tiskanim pločicama, loše zalemljeni spojevi, kratki spojevi, neprikladno odvođenje topline
<i>Prehrambena</i>	Gubici energije, izolacija rashladnih uređaja, pećnice, sušare, posude za prženje, transporter, ležajevi, pakiranje, hermetičko zatvaranje, miješanje konditorskih proizvoda (čokolade), pržionice (kave)
<i>Staklarska</i>	Vatrostalni materijal, staklo, kalupi, kaljenje, toplinsko motrenje armiranog stakla
<i>Papirna</i>	Prevlačenje i tiskanje tapeta i fotografskog papira, neravnomjerna raspodjela mokrine, sušenje, neugodni tlačni valjci, nejednoliko isparavanje, stanje ležajeva, parovodi, oštećenja na površini valjka za miješanje
<i>Plastična</i>	Toplinsko oblikovanje, oblikovanje boca, vakuumsko oblikovanje, lameliranje prevlaka, kalandriranje, ekstruzija optičkih vlakana
<i>Gumarska</i>	Mljevenje, miješanje, kalupljenje, kalandriranje, ekstrudiranje, procjena kvalitete, vulkaniziranje, ispitivanje guma, hlađenje i valjanje toplih gumenih površina
<i>Tanki filmovi</i>	Motrenje mrežaste strukture, lameliranje prevlaka, pakiranje, toplinska konzistentnost

Termografski pregledi provode se i pri kontroli električnih instalacija. Mjerenja su kvalitativnog i kvantitativnog karaktera, a obuhvaćaju proizvodnju električne energije u hidroelektranama, termoelektranama i nuklearnim elektranama, distribuciju električne energije preko dalekovoda, transformatorskih stanica i podstanica te razvod do potrošača.<sup>2</sup>



**Slika 10.** Prikaz digitalne (desno) te IC slike (lijevo) osigurača <sup>19</sup>

Stanje opreme na kojoj je uočeno povećanje temperature može se po Jouleovu zakonu klasificirati temeljem kriterija prema poznatoj referentnoj temperaturi (*Tablica 3.*)

**Tablica 2.** Klasifikacija stanja opreme prema Jouleovu zakonu

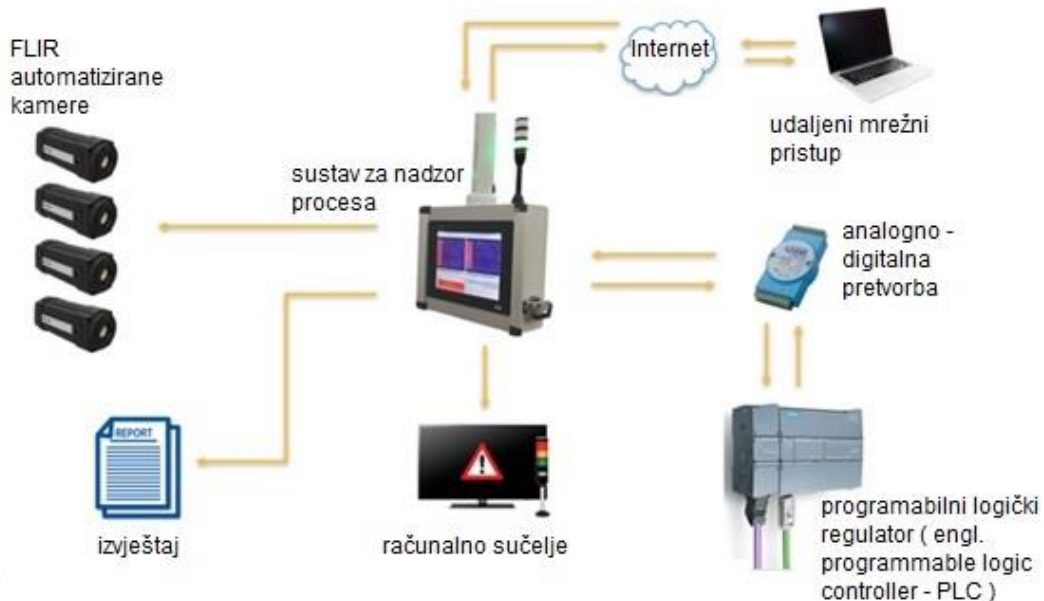
$\Delta T$ preko 30 °C ili ako je apsolutna temperatura preko 80 °C Zahtijeva <u>HITNU</u> intervenciju!	Klasa A
$\Delta T$ od 5 °C do 30 °C Zahtijeva intervenciju kod prvog zaustavljanja pogona!	Klasa B
$\Delta T$ do 5 °C Zahtijeva praćenje stanja i planiranje skore intervencije!	Klasa C

Postoje dva načina termografskih mjerenja: kvalitativna i kvantitativna. Kvalitativna se termografija primjenjuje tamo gdje točna vrijednost temperature nije bitna, kao na primjer u nadzoru, lokaciji ukopanih objekata, inspekciji krovova i fasada, mjerenjima u svrhu zaštite okoliša i slično. Kod kvantitativnih mjerenja trenutačno stanje uspoređujemo s referentnim termogramom pa se na osnovi takve usporedbe zaključuje o stanju objekta. Ona kao rezultat daje stvarnu temperaturu promatranog objekta. Značajna je kod određivanja stanja objekta ili preventivnog održavanja, mjerenja u svrhu istraživanja, razvoja i slično, a poznavanje točnog iznosa temperature daje informaciju o ispravnom ili neispravnom radu promatranog uređaja.<sup>2,20</sup>

### 2.5.1. Termografija u stvarnom vremenu

Razvoj infracrvene termografije usmjeren je na mjerenje stanja procesa u stvarnom vremenu (engl. *real time monitoring*). Sustav nadzora toplinskih procesa emitiranom energijom osigurava cjelovito rješenje za praćenje procesa putem integriranog toplinskog snimanja.

S infracrvenim toplinskim podacima u stvarnom vremenu i softverskom podrškom, sustav se povezuje s automatiziranim strojevima te preuzima nadzor nad procesom.



Slika 11. Shema praćenja procesa putem integriranog toplinskog snimanja<sup>21</sup>

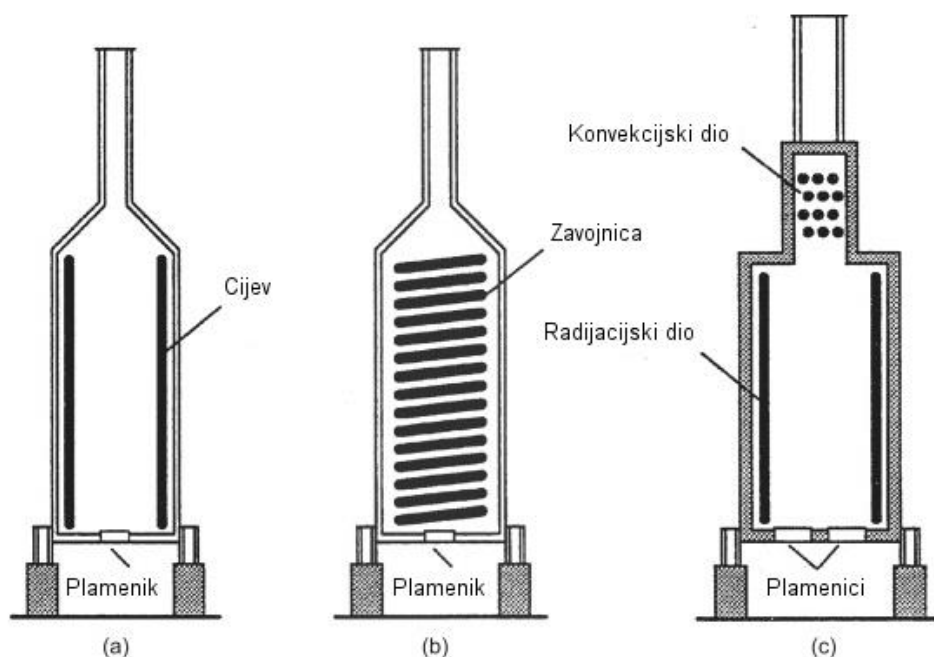
## 2.5.2. Primjena termografije u ispitivanju industrijske procesne peći

Peći su vrsta procesne opreme u kojima se oslobađa toplina koja se direktno ili indirektno prenosi na čvrstu ili tekuću masu kako bi se izazvala fizička ili kemijska promjena. U industriji nailazimo na različite vrste peći s obzirom na njihove različite funkcije pa ih prema tome možemo podijeliti na peći za taljenje te one za prženje. Mogu se razvrstati s obzirom na različite oblike, od kojih su najčešći u obliku kutije, valjka ili cilindra, a prema načinu paljenja na električne, nuklearne, solarne, te peći za sagorijevanje.<sup>22</sup>

Industrijska procesna peć za atmosfersku destilaciju je vrsta peći koja koristi plin ili loživo ulje kao pogonsko gorivo. Ona je sastavni dio svake rafinerije te prva radna jedinica rafinerije u procesu prerade nafte. Budući da industrijska peć osigurava sirovinu za sekundarne procese rafinerije, o njenom kapacitetu ovisi kapacitet cijelog pogona.<sup>23</sup>

Ovisno o primjeni industrijske peći različito su projektirane kako bi se osigurala maksimalna efikasnost. Osnovna konstrukcija sastoji se od cilindrične komore obložene vatrostalnim opekama. Unutar peći nalaze se cijevi za protok pare koje mogu biti postavljene na nekoliko različitih načina; oko stijenke peći te u horizontalnim ili vertikalnim položajima. Pomoću plamenika koji se nalaze ispod peći spaljuje se loživo ulje te se zagrijava cijela peć. U donjem dijelu peći prijenos topline provodi se zračenjem preko cijevi koje su napunjene željenom sirovinom. Iznad radijacijskog nalazi se konvekcijski dio peći u kojem se prijenos topline odvija mehanizmom konvekcije tako da se toplina iz užarenih plinova prenosi na cijevi sa sirovinom.<sup>24</sup>





**Slika 12.** Shema industrijske procesne peći s različito postavljenim cijevima <sup>24</sup>

Infracrvenu termografiju primjenjuje se kao dijagnostički alat za održavanje i kontrolu ispravnosti rada industrijskog pogona. Jedna je od najdragocjenijih metoda dijagnoze s obzirom da osigurava neprekidan rad pogona te se stoga naveliko koristi u petrokemijskom sektoru. Infracrvene kamere nadziru visokotemperaturne instalacije i peći s obzirom na svoju sposobnost mjerenja temperatura do 2000 °C. One osiguravaju brzu i preciznu dijagnozu peći te daju uvid u stanje cijelog uređaja, a analizom slike u softveru lako se mogu uočiti problematična područja prije nego što nastupe kvarovi. <sup>25</sup>

U ovom radu ispitivana je industrijska procesna peć za atmosfersku destilaciju koja je dio postrojenja rafinerije. Ispitivanje se provodilo kako bi se dobio uvid u trenutno stanje procesne peći. Time se mogu spriječiti ozbiljni kvarovi i smanjiti broj neplaniranih ispada pogona.



**Slika 13.** Industrijska peć za atmosfersku destilaciju <sup>26</sup>

## 3. EKSPERIMENTALNI DIO

### 3.1. Provedba mjerenja

Za uvid u stanje procesne peći za atmosfersku destilaciju snimljena je površina peći infracrvenom kamerom FLIR, model T360. Snimanje je provedeno 18. svibnja 2018. između 10 i 11 sati.

Na termokameri podešavaju se parametri, no uslijed ograničenog vremena parametri su postavljeni na uobičajene vrijednosti ( $\varepsilon = 0,95$ ,  $T = 24$  °C,  $RH = 54$  %). Navedeni parametri korigiraju se tijekom obrade slike u računalnom programu.

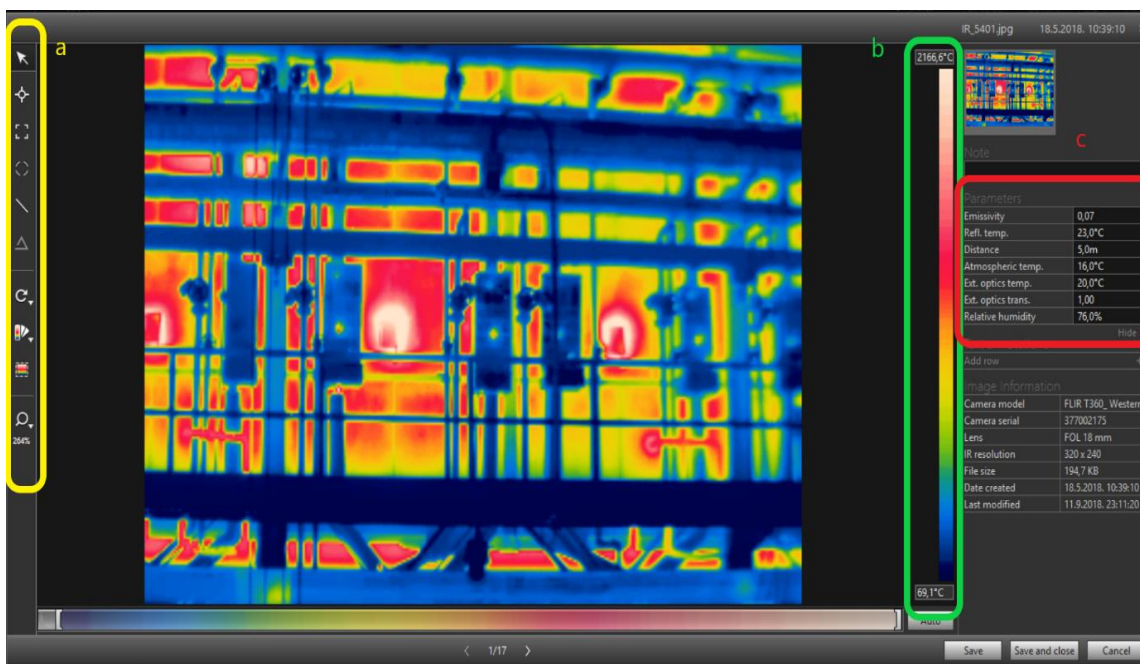
Procesna peć sastoji se od tri segmenta i svaki segment peći se zasebno mjerio:

- donji dio peći na kojima su vidljivi otvori (kontrolni prozori) za provjeru unutrašnjosti peći,
- radijacijski dio ,
- konvekcijski dio.

### 3.2. Računalni program za analizu IC slika

Računalni program FLIR Tools služi za uređivanje i naknadnu analizu. Nudi mogućnost podešavanja temperaturnog područja i raspona, promjene palete boja te prilagodbe parametara emisivnost, reflektirane temperature, temperature okoline, vlažnosti i udaljenosti kamere od mjernog mjesta .<sup>27</sup>

Na sučelju programa nalaze se alati za obradu slika. Postoji mogućnost određivanja temperature u točki (engl. „Spot measurement“) i određenog područja pomoću opcija „Box measurement“, „Ellipse measurement“ i „Line measurement“ pa je na tom području moguće odrediti minimalnu, maksimalnu i prosječnu temperaturu te temperaturni profil.



**Slika 14.** Sučelje programa s alatom za obradu slika, temperaturnom skalom i tablicom parametara

### 3.3. Provedba analize termograma u programu FLIR Tools

Snimljeni termogrami učitaju se u program. Otvaranjem slike na desnoj strani prikazuje se temperaturna skala na kojoj se vidi raspon temperatura. Odmah pored temperaturne skale na sučelju programa pojavljuje se tablica parametara u kojima se podešava emisivnost, reflektirana temperatura, udaljenost, temperatura okoline te relativna vlažnost zraka (*slika 14*). Emisivnost je namještena na 0,61, temperatura okoline na 16 °C, relativna vlažnost na 76% i udaljenost oko 5 m. Nakon promjene parametara pritiskom na dugme „Auto“ mijenja se raspon temperatura na skali.

Kako bi se kvalitetno napravila analiza termograma potrebni su sljedeći podaci; koeficijent emisivnosti materijala od kojeg je peć izrađena, vanjska temperatura i relativna vlažnost zraka prilikom snimanja te udaljenost od objekta koji se snima (*Tablica 3*). Pri odabiru odgovarajućeg koeficijenta emisivnosti potrebno je znati od kojeg je materijala izrađena oplata peći. Kod procesne peći za atmosfersku destilaciju materijal je čelik prekriven slojem hrđe nastale uslijed korozivnih atmosferskih uvjeta. Koeficijent emisivnosti takvog čelika u literaturi iznosi 0,61 – 0,85. Nepoznavanje prave vrijednosti otežava kvantitativnu analizu.<sup>28</sup> Ovisno o iznosu koeficijenta dobivaju se različite temperature.

### 3.4. Eksperimentalni podaci

Tablica 3. Vrijednosti parametara

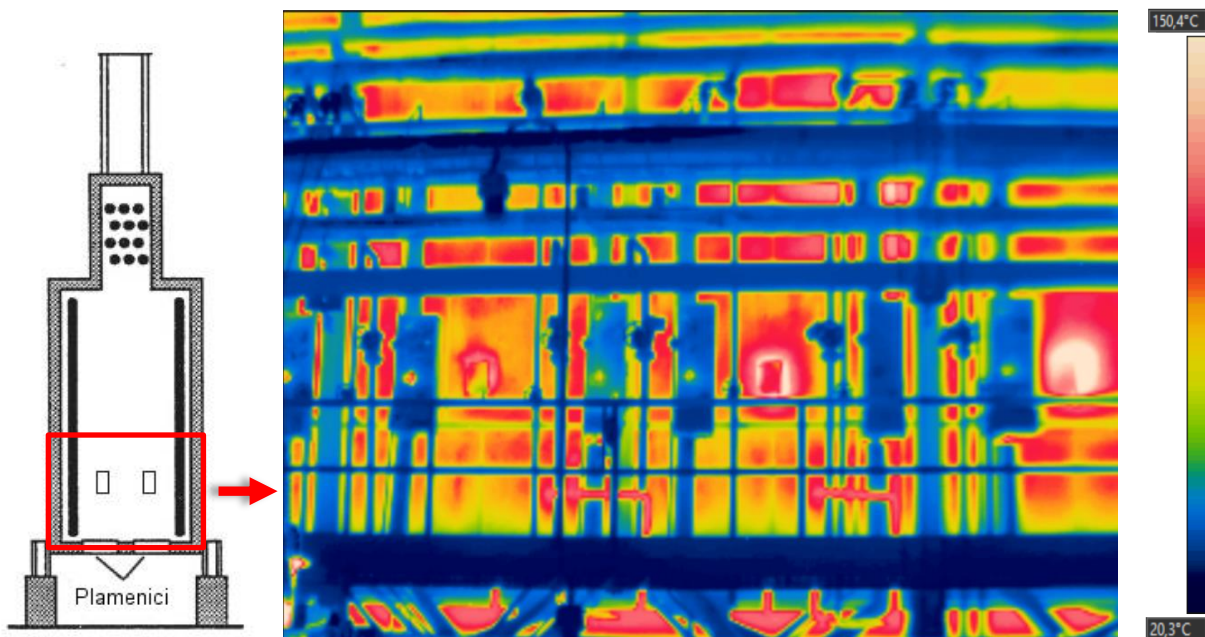
<b>Parametar</b>	<b>Iznos parametra</b>
<b>Emisivnost</b>	0,61
<b>Reflektirana temperatura</b>	20 °C
<b>Udaljenost</b>	5 m
<b>Temperatura okolnog zraka</b>	16 °C
<b>Temperatura vanjske optike</b>	20 °C
<b>Relativna vlažnost</b>	76,0 %

## 4. REZULTATI

Kvalitativnom analizom moguće je brzo i jednostavno analizirati temperaturni gradijent objekta. Plavom bojom su prikazana najhladnija područja na slici, crvenom toplija, a najveća temperatura prikazana je bijelom bojom.

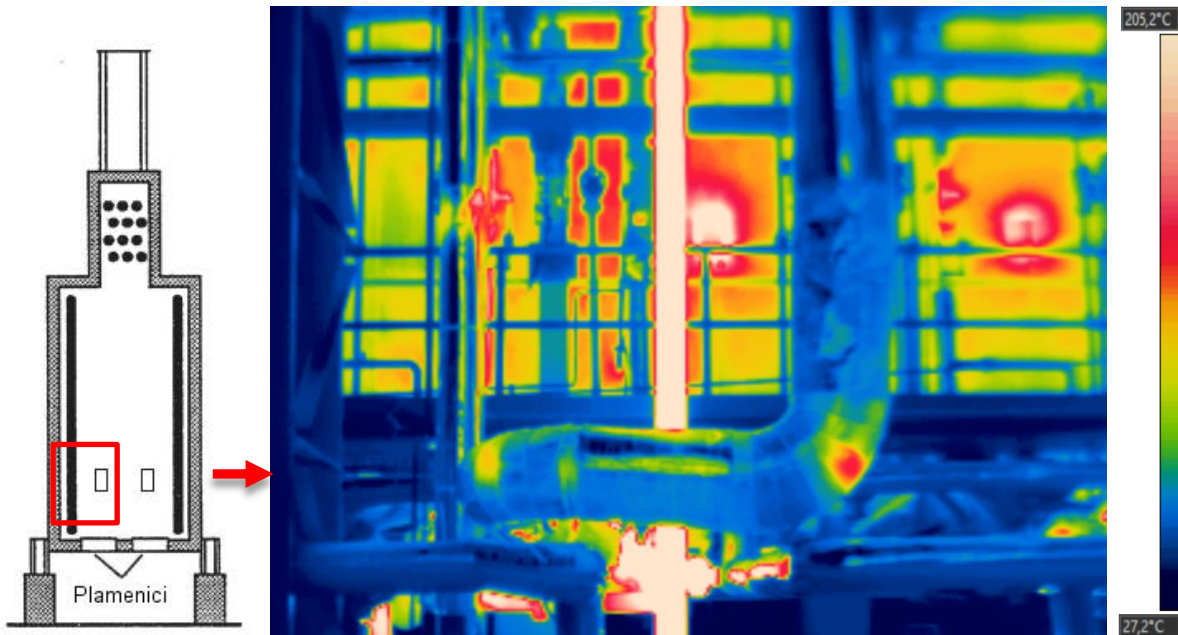
Kvantitativnom analizom pokušava se odrediti temperatura pojedine točke ili područja pri čemu, kako je već navedeno, treba poznavati parametre da bi se dobila informacija o ozbiljnosti temperaturne anomalije.

### 4.1. Kvalitativna analiza



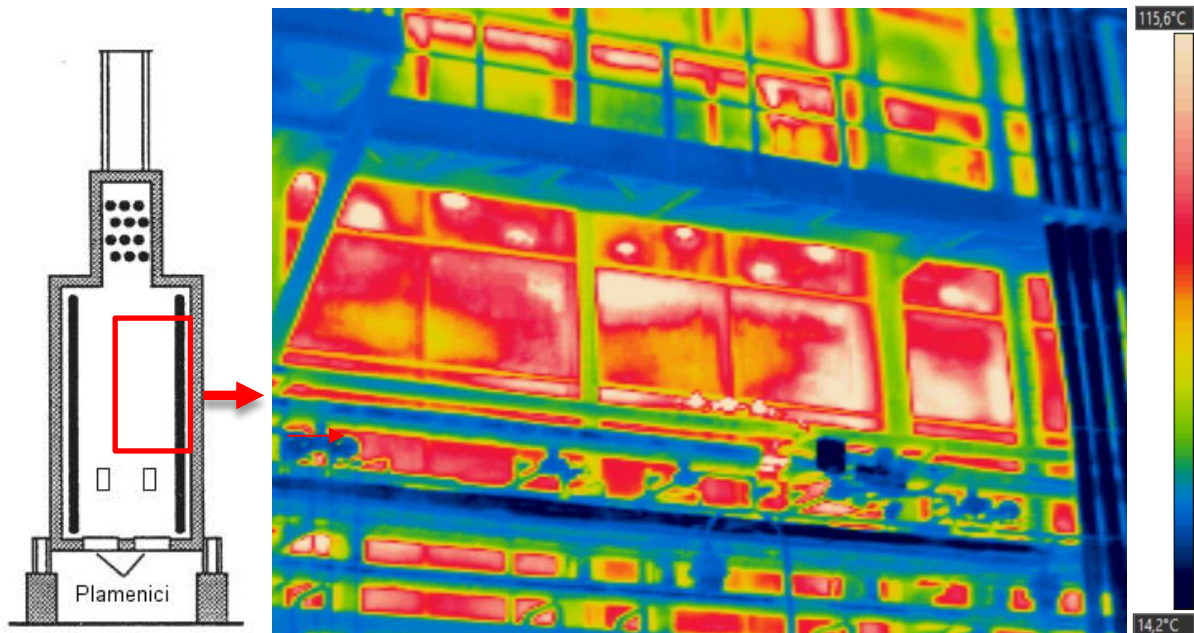
Slika 15. Termogram donjeg dijela peći

S lijeve strane slika nalazi se shema procesne peći. Crvenim okvirom je označen snimljeni dio. Termogram na slici 15 prikazuje donji dio peći. Na temperaturnoj skali ovog termograma minimalna temperatura iznosi 20,3 °C, a maksimalna je 150,4 °C.



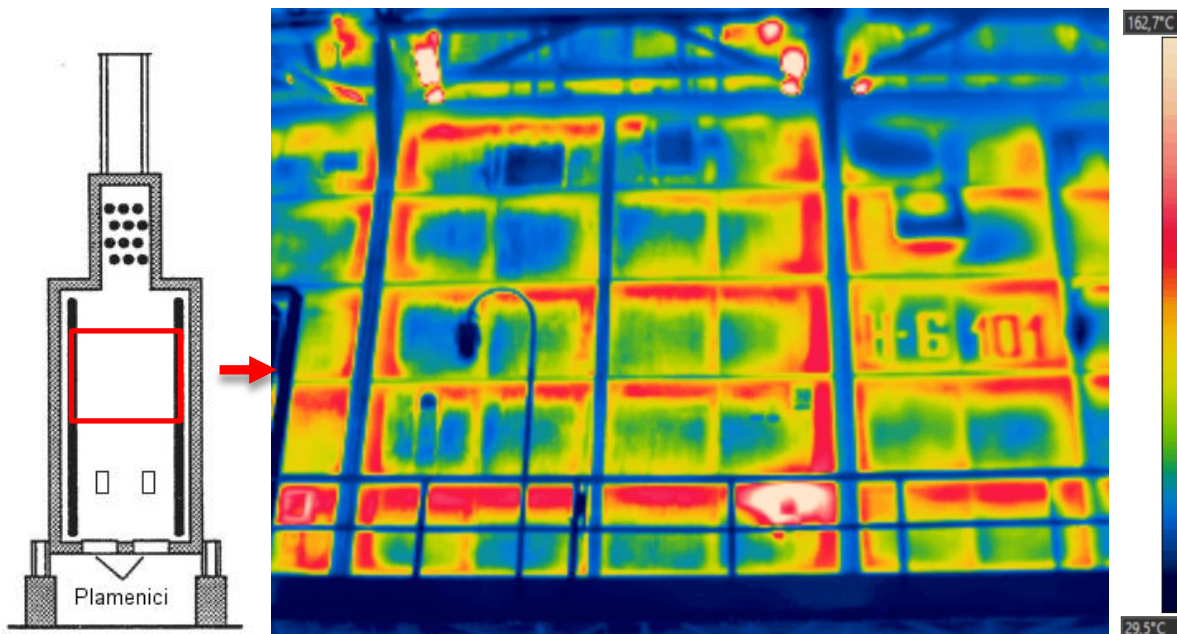
**Slika 16.** Termografski prikaz cijevi za protok pojne mase te cijevi za protok vruće pare

Na slici 16 prikazan je lijevi donji dio peći. Njime se analizira stanje cijevi pojnog toka (velika cijev) te cijevi za protok vruće pare (ravna okomita cijev). Temperaturna skala pokazuje temperaturu od 27,2 °C kao minimalnu, te 205,2 °C kao maksimalnu.



**Slika 17 .** Termogram radijacijskog dijela peći, desna strana

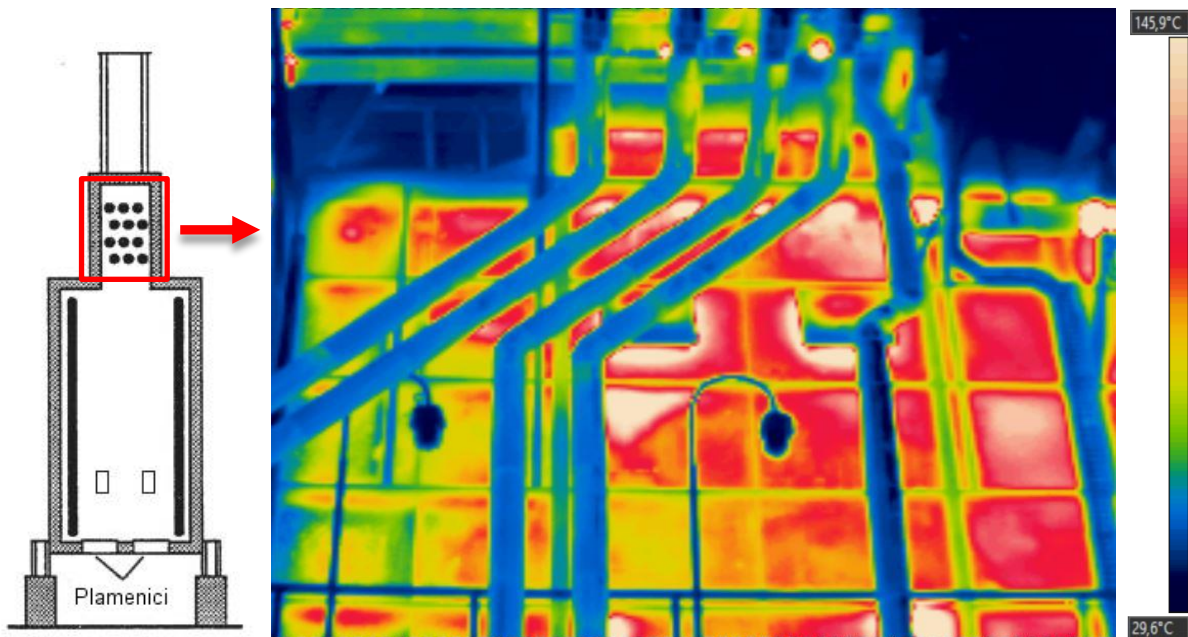
Na slici 17 prikazana je desna strana radijacijskog dijela peći. Temperaturna skala kao minimalnu temperaturu prikazuje 14,2 °C, a maksimalnu 115,6 °C. Na slici su vidljiva temperaturna odstupanja na površini peći što će detaljnije biti objašnjeno u raspravi.



**Slika 18.** Termogram srednjeg radijacijskog dijela peći

Na slici 18 prikazan je termogram srednjeg radijacijskog dijela peći. Na površini ovoga dijela maksimalna temperatura iznosi 162,7 °C, dok je minimalna 29,5°C.



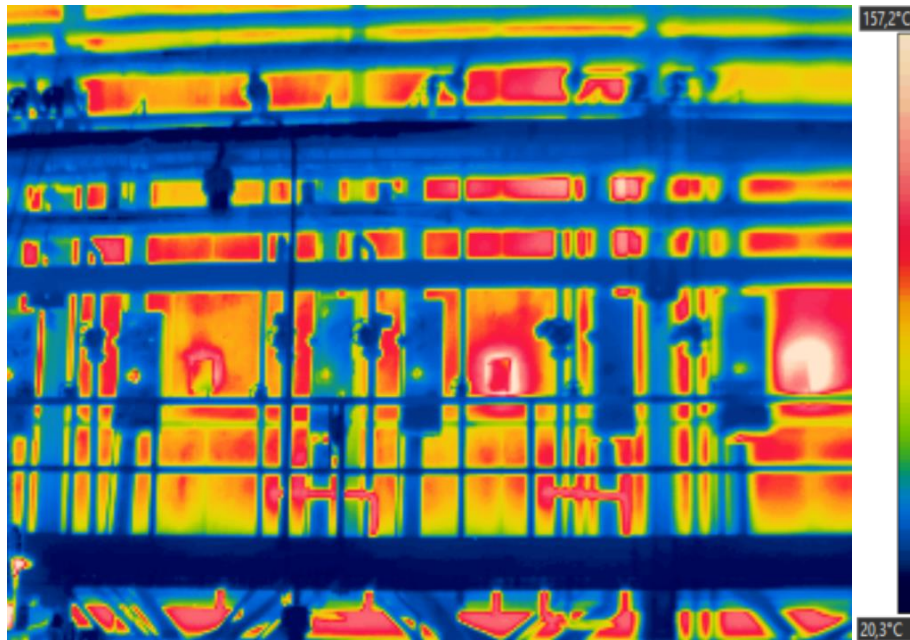


**Slika 19.** Termogram konvekcijskog dijela peći

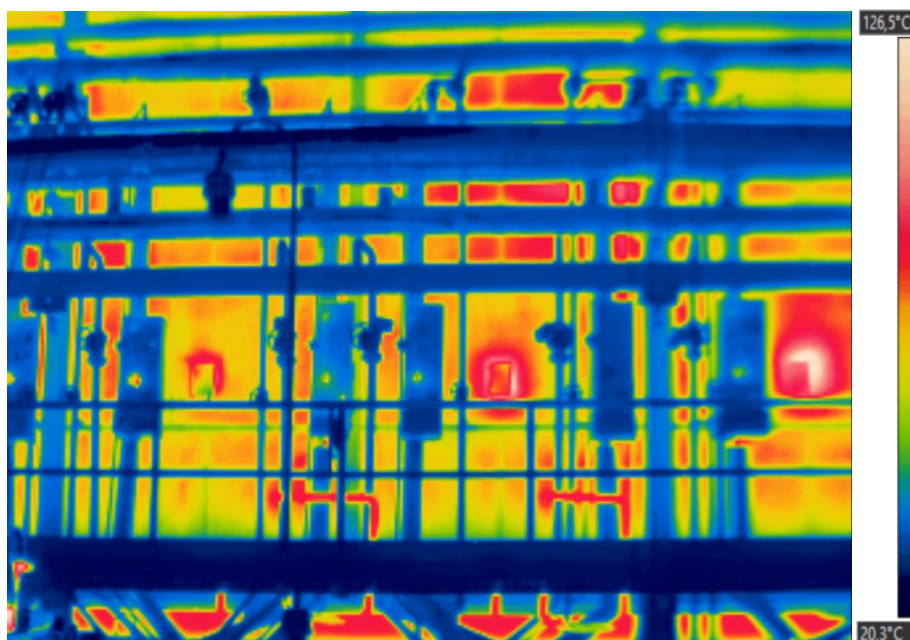
Na slici 19, prikazan je konvekcijski dio peći koji se nalazi iznad radijacijskog dijela. Na temperaturnoj skali minimalna temperatura je 29,6 °C, a maksimalna 145,9 °C.

## 4.2. Kvantitativna analiza

Zbog nepoznavanja prave vrijednosti emisijskog koeficijenta (0,61 – 0,85) nije moguće točno odrediti temperature, stoga je prikazana varijacija temperatura na temperaturnoj skali koja se javlja kad se promjeni faktor emisivnosti. Na slikama 20 i 21 prikazan je primjer odstupanja.



Slika 20. Termogram s koeficijentom emisivnosti 0,61



Slika 21. Termogram s koeficijentom emisivnosti 0,85

Slika 20 prikazuje IC sliku i temperaturnu skalu kada je koeficijent emisivnosti namješten na vrijednost 0,61. Ta je vrijednost u literaturi navedena kao najniži mogući iznos emisivnosti za zadanu površinu. S ovim koeficijentom emisivnosti na temperaturnoj skali maksimalna temperatura je 157,2 °C, a minimalna 20,3 °C.

Na slici 21 prikazan je isti dio površine peći, no s koeficijentom emisivnosti namještenim na 0,85 koji je u literaturi naveden kao maksimalan iznos emisivnosti ovakve površine. Pri ovom faktoru emisivnosti maksimalna temperatura je 126,5 °C, a minimalna 20,3 °C.

## 5. RASPRAVA

### 5.1. Kvalitativna analiza termograma donjeg dijela peći

Na slici 15 uočljiva su tri područja. U donjem dijelu crvena područja prikazuju temperaturni odziv plamenika. Iznad se nalazi ravni plavi dio – metalna konstrukcija i nije sastavni dio peći. Na njemu je uočljivo da je to najhladniji dio jer je najudaljeniji od zagrijane površine peći. U drugom dijelu u sredini IC slike vide se tri područja gdje se nalaze kontrolni prozori.

Dio iznad kontrolnih prozora je radijacijski dio peći i vidljiv je njegov prvi dio. Osim prevladavajuće žuto zelene boje, vidljiv je crveni dio za koji se pretpostavlja da je gubitak topline uslijed nedovoljne izolacije. Pretpostavka je da se radi o dotrajaloj šamotnoj ploči koja se nalazi na unutarnjem dijelu peći i služi kao toplinska izolacija. Ona se treba u doglednoj budućnosti sanirati. U slučaju nepravovremene sanacije može doći do puknuća koji bi rezultirao zastojem proizvodnog pogona.

Na slici 16 fokus je na dvije cijevi. Širokom cijevi ulazi pojna smjesa te je vidljivo da je veoma dobro izolirana. Potencijalno oštećenje, a time i gubitak topline, uočava se samo na pregibu cijevi. Uzrok mogućih gubitaka topline je loša izolacija na tom dijelu, ali je moguće i oštećenje unutar same cijevi uzrokovano agresivnim (korozivnim) medijem koji protječe kroz cijev. Preporuka je provjera stanja cijevi i potencijalna sanacija oštećenja.

Na ravnoj vertikalnoj cijevi kroz koju protječe vruća para nije uočljiva promjena boje (uniformna bijela boja duž cijele cijevi) te je pretpostavka da ona nije izolirana. Budući da nema temperaturnih razlika na površini cijevi, zaključak je da je ona u dobrom stanju.

### 5.2. Kvalitativna analiza radijacijskog dijela peći

Slika 17 prikazuje termogram desnog dijela radijacijske peći. Uočavaju se vertikalne cijevi koje su na termogramu plave boje što znači da su hladnije od ostatka mjerene površine. Razlog tome je dobra izolacija cijevi. Dijelovi površine peći obojene bijelom bojom ukazuju na slabu izolaciju na tim dijelovima. Obzirom da su takvi bijeli točkasti dijelovi pravilno vodoravno raspoređeni pretpostavka je da se na unutarnjoj strani stijenke peći nalazi nosač oplata koji je pričvršćen na stijenku te je na tim spojevima oslabljena izolacija pa dolazi do gubitka topline. Savjet je da se na dijelovima na kojima je pričvršćen nosač oplata izolacija dodatno provjeri te po potrebi bolje izolira.

Na slici 18 prikazan je srednji dio radijacijskog dijela peći. Na njoj se vidi da su glavni konstrukcijski dijelovi peći dobro izolirani s obzirom da su na termogramu prikazani u plavoj boji. Vatrostalne oplatae koje se nalaze između konstrukcijskih dijelova su dobro izolirane, no crveni dijelovi na spojevima konstrukcije i vatrostalnih oplata ukazuju na značajne gubitke topline. Potreban je pregled spoja vatrostalnih oplata i konstrukcije te eventualno učvršćivanje ili zamjena kako bi se i gubitci topline na tim dijelovima sveli na minimum. U donjem dijelu slike pojavljuje se bijeli dio koji označava najvišu temperaturu – intenzivan gubitak topline. U ovom slučaju to je ventil koji nije izoliran. Preporuka da se dodatno provjeriti ventil kako bi se spriječila moguća veća oštećenja.

### **5.3. Kvalitativna analiza konvekcijskog dijela peći**

Na slici 19 prikazan je konvekcijski dio peći sa cijevima kroz koje ulazi sirovina. One su napravljene od lima te su dobro izolirane. Na desnom dijelu prikazanog termograma uočavaju se gubitci topline iskazani crvenom i bijelom bojom. Pretpostavka je da je na tim dijelovima dotrajala izolacija, točnije šamot postavljen unutar peći. Potrebna je dodatna provjera izolacije te popravak iste kako nebi došlo do puknuća na površini cijevi što posljedično dovodi do zastoja proizvodnog pogona.

### **5.4. Kvantitativna analiza**

Metalne površine u pravilu loše emitiraju zračenje i vrijednost faktora emisije kod ovih površina znatno variraju ovisno o stupnju oksidacije površine. Neoksidirane metalne površine imaju niske vrijednosti emisijskih faktora dok one koje su prevučene neprozirnim slojem oksida (hrđom) imaju vrijednost emisijskog faktora blizu jedinice. U literaturi za metalne površine navode se različiti opisi njihovog stanja kao što je „sjajan“, „malo oksidiran“, „hrapav“ itd. pa je teško odrediti stanje promatrane površine. Zbog navedenih razloga nije bilo moguće kvantitativno analizirati termogram jer ovisno o vrijednosti koeficijenta emisivnosti rezultati promatrane površine ili dijela površine znatno odstupaju.

U rezultatima je dan primjer u kojem se najbolje uočava koliko je odabir faktora važan jer se mogu dobiti bitno različiti termogrami, a time i očitavanje temperature u pojedinim dijelovima koje bi trebalo dodatno analizirati. Usporedbom slike 20 i slike 21 primjećuje se različita intenzivnost spektra IC slika za različite iznose koeficijenta emisivnosti. Isto tako se promjenom koeficijenta mijenja iznos maksimalne temperature na temperaturnoj skali, što je i

očekivano. Povećanjem emisivnosti maksimalna temperatura se smanjila za 30,7 °C. Sve navedeno upućuje da se, ukoliko je moguće, prilikom budućeg mjerenja osiguraju markeri, boje ili trake za što točnije određivanje faktora emisivnosti.

## 6. ZAKLJUČAK

Prije početka termografskog snimanja potrebno je napraviti detaljan plan rada i cilj mjerenja, odnosno odrediti područje snimanja, materijal i svojstva snimanog objekta. Nakon provedene kvantitativne i kvalitativne analize iz termograma stanja procesne peći za pregrijavanje sirovine u rafinerijskoj proizvodnji preporučuje se:

- Pregledati kontrolne prozora i ventila te ih , po potrebi, sanirati ili bolje izolirati;
- Učvrstiti spojeve između konstrukcije i vatrostalnih oplata na radijacijskom dijelu;
- Sanirati cijevi pojnog toka na mjestu oštećenja;
- Dodatno pregledati unutarnju izolaciju konvekcijskog dijela peći.

Termografskom analizom nije moguće odrediti razlog gubitaka topline, ali je odličan alat za uočavanje određenih nepravilnosti. Preporuka je da se prilikom interpretacije dobivenih termograma konzultira procesni inženjer upoznat s radom peći jer na osnovi znanja i iskustva može pretpostaviti uzrok uočenih anomalija.

Svrha termografskih ispitivanja je rano upozorenje za sanaciju određenih dijelova ugrađene procesne opreme kako bi se mogućnost zastoja pogona svela na minimum. Procesna peć za atmosfersku destilaciju je bitan dio proizvodnog pogona jer prekid njenog rada prekida proizvodnju i u ostalim proizvodnim jedinicama. Zbog toga se preporučuje primjena prediktivnog održavanja infracrvenom termografijom.

## 7. POPIS SIMBOLA

$\Phi$  – toplinski tok [ W ]

$A$  – površina [ m<sup>2</sup> ]

$\vartheta_1$  – temperatura [ °C ]

$\delta$  – debljina stijenke [ m ]

$\lambda$  – toplinska provodnost materijala [ Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> ]

$\alpha$  – koeficijent konvekcijskog prijelaza topline [ Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> ]

$c$  – brzina vala [ ms<sup>-1</sup> ]

$\lambda$  – valna duljina [ m ]

$\nu$  – frekvencija [ s<sup>-1</sup> ]

$k$  – konstanta proporcionalnosti koja iznosi 2897,8 K $\mu$ m

$T$  – temperatura crnog tijela [ K ]

$W_{uk}$  – ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina [ Wm<sup>-2</sup> ]

$\sigma$  – Stefan – Boltzmannova konstanta koja iznosi 5,6697\*10<sup>-8</sup> [ Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup> ]

$T$  – temperatura [ K ]

$\varepsilon$  – koeficijent emisivnosti

RH – relativna vlažnost zraka [ % ]



## 8. LITERATURA

1. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=60974> (pristup 7. svibnja 2018.)
2. Andrassy, M., Boras, I., Švaić, S., *Osnove termografije s primjenom*, Zagreb, Kigen, 2008.
3. Vollmer, M., *Basic Applications for Teaching: Direct Visualization of Physics Phenomena*, u: Vollmer, M., Möllmann, K., *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 5 (2010)
4. Rumbak, S., *Mehanizmi prijelaza topline i mjerenje temperature primjenom infracrvene termografije u ugroženom prostoru*, 2008.
5. Petrović, K., *Infracrvena termografija – pravi izbor za redovito održavanje ( I . dio )*, **65** (2016) , 110–113
6. Loboda, E. L. *Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV*, u: Loboda, E. L., Anufriev, I. S., Agafontsev, M. V., Kopyev, E. P., Shadrin, E. Y., Reyno, V. V., Vavilov, V. P., Lutsenko, A. V., *Infrared Physics Technology*, 92 (2018), 240–243
7. Švaić, S., Boras, I., *Laboratorijska vježba: Infracrvena termografija*, Zagreb, FSB, 2012
8. Švaić S, Boras, I., *IC Termografija: Primjena kod očuvanja kulturne baštine*, FSB 2009
9. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2007
10. Turković, M., *Dijagnostika procesne opreme infracrvenom termografijom*, Završni rad, FKIT, 2009
11. Filipović, I., Lipanović, S., *Opća i anorganska kemija( I dio)*, Školska knjiga, 1995
12. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57368> (pristup 10. svibnja 2018)
13. [https://www.periodni.com/gallery/spektar\\_elektromagnetskog\\_zracenja.png](https://www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png) (pristup 10. svibnja 2018))
14. Bolf, N., *Vježba T-30*, Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa, FKIT

15. Petrović, K., *Infracrvena ( IC ) termografija – pravi izbor za redovito održavanje ( II . dio )*. **65** (2016), 228–231
16. <https://infraredcameras.com/> (pristup 25. svibnja 2018)
17. <https://www.grainger.com/content/supplylink-12-things-buying-infrared-camera> (pristup 25. svibnja 2018)
18. <https://www.flir.com/es/applications/industrial/> (pristup 25. svibnja 2018)
19. [https://www.cmsrtb.co.za/thermography\\_5.html](https://www.cmsrtb.co.za/thermography_5.html) (pristup 25. svibnja 2018)
20. Bolf, N., *Application of Infrared Thermography in Chemical Engineering*, **53** (2004), 549–555
21. <http://www.emittedenergy.com/integrated-tpms.html> (pristup 17. kolovoza 2018)
22. Ibrahim, H. A., *Fired process heaters*, MATLAB , 2014, str. 327–365
23. China national petroleum corporation, *Industrialized Complete Technology for Atmospheric and Vacuum Distillation Units*, 2015
24. [https://processdesign.mccormick.northwestern.edu/index.php/Utility\\_systems](https://processdesign.mccormick.northwestern.edu/index.php/Utility_systems) (pristup 20. kolovoza 2018)
25. <http://kostelgrad.hr/ic-kontrola-i-pracenje/termotehnika-i-procesna-tehnika/> (pristup 20. kolovoza 2018)
26. <http://www.piecoserwis.pl/en/portfolio-view/fired-heater/> (pristup 20. kolovoza 2018)
27. <https://www.flir.com/products/flir-tools/> (pristup 22. kolovoza 2018)
28. Priručnik za korisnike, *FLIR Tools/Tools+ 5.1*, Intertek, 2015, str. 166

### 9.1. Karakteristike IC FLIR T360 kamere



**Slika 21.** Termografska kamera model FLIR T360\_Western

#### Ulazne značajke:

Mjerno područje:

- od - 20 °C do + 120 °C
- od 0 °C do 350 °C
- opcija visoke temperature i do + 1200 °C

Vidno polje (Field of View, FOW): 25°x19° / 0.4 m

Najmanja žarišna duljina: 0,4 m

Područje valnih duljina: od 7,5 μm do 13 μm

Frekvencija: 30 Hz

#### Tip detektora:

Žarišna plošna matrica osjetila (FPA) mikrobolometra, rezolucije 320x240 piksela

#### Prijenosne značajke:

Razlučivost: 1,36 mRad

Prag osjetljivosti (temperaturna osjetljivost): 0,06 °C pri +30 °C

**Mjerna nesigurnost:** ± 2 °C ili ± 2 % očitavanja

## 10. ŽIVOTOPIS

Marina Gapit [REDACTED] Pohađala je II opću gimnaziju u Zagrebu gdje je 2013. maturirala. Iste godine upisuje studij Primijenjene kemije na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, a 2015. prelazi na studij Kemije i inženjerstva materijala na istome fakultetu.