

# IR TERMOKAMERE - FIZIKALNE OSNOVE

Niko Tršan\*

mag. Ivan Božič, univ. dipl. inž. el.\*\*

## IZVLEČEK

Toplotno oziroma infrardeče sevanje ni vidno, ker je njegova valovna dolžina prevelika za senzorje v naših očeh. Predstavlja del elektromagnetnega spektra, ki ga čutimo kot toploto. Za razliko od vidnega spektra, vsa telesa nad absolutno ničlo sevajo infrardečo elektromagnetno energijo. Višja kot je temperatura predmeta, večje je njegovo infrardeče sevanje. Infrardeča kamera detektira in pretvori nevidne valove v vidne slike in nam omogoči videti tisto, kar sicer naše oko ne zazna.

Zaradi dejstva, da se zlasti v industrijskem okolju stvari pogosto čezmerno segrevajo ali ohlajajo preden se pokvarijo, so termokamere učinkovito diagnostično orodje z možnostjo zelo široke in raznolike uporabe. Termokamere postajajo nepogrešljive pri pri-zadevanjih za večjo proizvodnjo in energetska učinkovitost, višjo kakovost, večjo varnost delavcev...

**Ključne besede:** termokamera, IR termografija, termogram, infrardeče sevanje, emitivnost

## ABSTRACT

Thermal, or infrared radiation is not visible because its wavelength is too long for the sensors in our eyes to detect. It is the part of the electromagnetic spectrum that we perceive as heat. Unlike visible light, in the infrared spectrum, everything with a temperature above absolute zero emits infrared electromagnetic energy. The higher the temperature of the object, the greater the infrared radiation emitted. The Infrared camera detect and convert these invisible wavelengths into visible light images. and allows us to see what our eyes cannot.

Especially in the industrial environment, almost everything gets hotter or cooler before it fails, making infrared cameras extremely valuable diagnostic tools with many diverse applications. And as industry strives to improve manufacturing efficiencies, manage energy, improve product quality, and enhance worker safety, new applications for infrared cameras continually emerge.

## 1. Uvod

Termokamere, ki jih pogosto imenujemo tudi infrardeče ali pa toplotne kamere, so človekovo sposobnost zaznavanja svetlobe razširile iz vidnega v srednji in dolgovalovni infrardeči del spektra. Po delovanju in zgradbi so enake običajnim TV video kameram, imajo optiko, detektor IR sevanja, elektroniko za obdelavo signalov in zaslon za prikaz toplotne slike. Format slike običajno ustreza različnim TV standardom, od tod tudi ime »termovizija«, ki pa se vse manj uporablja. Ime je zaščitila švedska firma AGA, ki je leta 1965 izdelala prvo termokamero za nevojaške uporabnike. Američani te naprave že od začetkov razvoja, ki se je pri njih začel v petdesetih letih, imenujejo FLIR, »Forward Looking Infra-Red«, medtem ko Evropejci pogosteje uporabljajo ime »Thermal Imager« ali »IR Camera«.

Uporabnost termokamer je omejena na območje »atmosferskih oken«, to je na tisti del spektra IR sevanja, ki ga ozračje prepušča v zadovoljivi meri. Najpomembnejši sta okni v območju valovnih dolžin med 3 in 5 ter med 8 in 14 mikrometri. Za termokamere je ugodna okoliščina, da telesa z normalnimi zemeljskimi temperaturami, to je približno 300 K, sevajo največ energije

prav v območju valovnih dolžin med 8 in 14 mikrometri.

Na kratko lahko rečemo, da termokamere združujejo tehnologije, ki v stvarnem času pretvarjajo toplotno sliko v vidno. Medtem ko je vidna slika predvsem rezultat razlik v reflektivnosti površin teles in je za njen nastanek nujno potrebna osvetlitev, bodisi z naravno ali umetno svetlobo, je toplotna slika rezultat lastnega sevanja, ki ga določata temperatura ter emitivnost površine sevalca. Prav v tem pa tiči razlog za izredno razširjeno uporabo termokamer na vseh področjih človekovega delovanja.

## 2. Kratka zgodovina

Prvi resnejši koraki so bili storjeni v letu 1940, ko so začeli iskati tehnične rešitve v dveh smereh. Prva je bila razvoj multielementnega diskretnega IR detektorja in optomehanskega analizatorja slike skenerja, druga pa je šla v razvoj IR vidikonske elektronke. Oba koncepta sta se zgledovala po televiziji, odtod tudi ime termovizija. Ta razdelitev na sisteme z optomehanskim in elektronskim skeniranjem velja še danes, treba pa je dodati, da so vsi operativni visoko kvalitetni vojaški sistemi še vedno optomehanski, se pa vlagajo velikanska sredstva v raziskave in razvoj matričnih IR detektorjev z elektronskim skeniranjem.

Leta 1956 so Američani izdelali prvo termokamero, ki je delovala v območju valovnih dolžin med 8 in 14 mikrometri. Uporabljalo jo je letalstvo za snemanje tal.

Leta 1960 je firma Perkin Elmer razvila prvo kopensko termokamero, imenovano »Prism Scanner«. Tehnične zmogljivosti, merjeno z današnjimi merili, so bile zelo skromne:

- vidno polje: 5 ° (okroglo)
- prostorska ločljivost: 1 miliradian
- temperaturna ločljivost: 1°C
- slikovna frekvenca: 5 sl./sec.
- zaslon: katodna elektronka z dolgo perzistenčnim fosforjem

To je bil začetek intenzivnega in uspešnega razvoja dolge vrste termokamer za različne aplikacije. V letih od 1960 do 1974 so v Ameriki razvili okrog 60 različnih prototipov in proizvedli nekaj sto termokamer za vse rodove vojske. V razvoju, proizvodnji ter uvajanju termokamer v industrijske namene je bila prva, in mnogo let tudi edina, švedska firma AGA, ki je tudi zaščitila ime »termovizija« (thermovision). Njihova prva industrijska termokamera je zagledala luč sveta le nekaj let po Perkin Elmerjevi, kvaliteta slike pa je bila primerljiva z ameriško.

\* Ljubljana, trsan.niko@siol.net

\*\* ZVD Zavod za varstvo pri delu d.d., ivan.bozic@zvd.si

## 3. Področja uporabe termokamer

Termokamere so prvi pričeli uporabljati vojaki. Razlog je izredno preprost. Termokamera vidi namreč zelo dobro tudi v pogojih za oko zmanjšane vidljivosti, kot so noč, dim, prah in ne pregosta megla. Današnje armade, predvsem bogatih zahodnih držav, so dobro opremljene z mnogimi tipi termokamer.

Iz istih razlogov jo vse bolj uporabljajo tudi policisti.

V civilno sfero so se termokamere počasi pričele prebijati okrog leta 1965, ko so Švedi razvili prvo industrijsko termokamero. Dandanes skoraj ni področja človekovega delovanja, kjer se je ne bi dalo s pridom uporabiti, še posebej pa to velja za termografijo.

Termografija je, kratko povedano, tehnika prikazovanja (vizualizacije) porazdelitve temperature na merjencu. To lahko opravimo z uporabo različnih pripomočkov in naprav. Najcenejše, a najbolj mukotrpno in dolgotrajno, je počasno merjenje temperature v izbranih točkah s cenanim kontaktnim ali nekontaktnim točkovnim termometrom ter grafični prikaz rezultatov. Danes uporabljajo termokamere skoraj povsod, kjer se med nekim procesom ustvarja ali prenaša toplota, saj se s tem spreminja tudi temperatura in njena porazdelitev.

Za ilustracijo navajamo nekaj primerov uporabe:

- pregledovanje in nadzorovanje terena pri zmanjšani vidljivosti (noč, prah, dim, meglice),
- daljinsko merjenje temperature,
- merjenje toplotnih izgub stavb, iskanje toplotnih mostov in vlažnih mest, ugotavljanje kvalitete izolacijskih materialov, itd.,
- proizvodnja in distribucija električne energije; pregledi in nadzorovanje generatorjev, napetostnih regulatorjev, relejev, transformatorjev, stikališč, toplotnih izmenjevalcev, hladilnih stolpov, visoko- in nizkonapetostnih linij, kablov, itd.,
- proizvodnja in končna kontrola kvalitete vseh vrst gospodinskih aparatov (hladilniki, štedilniki, televizorji, itd.),
- proizvodnja v železarnah, v plavžih, vroče valjanje, itd.,
- proizvodnja gumarskih izdelkov, cementsa, stekla, itd.,
- vzdrževanje energetske opreme,
- nadzorovanje ležajev (pregrevanje, disipacija toplote, mazanje, itd.),

- nedestruktivno testiranje raznih mehanizmov in izdelkov kot so osi, ulitki, odkovki, zvari,
- pregledovanje tiskanih vezij,
- merjenje in analiza mehanskih napetosti, ki so posledica dinamičnih obremenitev (vibracije),
- odkrivanje začetnih požarov v rudnikih,
- zgodnje odkrivanje motenj in bolezni vegetacije,
- odkrivanje in merjenje stopnje določenega tipa onesnaženja okolice,
- odkrivanje plitvo zakopanih in zazidanih objektov ter napeljav,
- iskanje preživelih v elementarnih nesrečah in v dimu gorečih stavb.

V zadnjih desetih letih se je uporaba termokamer v termografiji zelo povečala. Najbolj množično jih uporabljajo v Ameriki in Evropski skupnosti.

S termokamero hitro, enostavno in zanesljivo najdemo šibka mesta v sistemu za prenos energije. Američani so izkustveno ugotovili, da v 345 kV prenosnem sistemu s termokamero najdemo šibka mesta, ki so potencialno nevarna, v nekaj tednih, medtem ko bi jih z drugimi metodami lahko iskali leta.

Vroče točke, ki jih s termokamero hitro in enostavno ter nekontaktno lociramo in izmerimo temperaturo, so praviloma posledica slabega delovanja ali že poškodovanega materiala. Temperaturna razlika 5 °C v trifaznem sistemu že lahko pomeni resnejšo napako, medtem ko v tiskanem vezju mikrokomponenta, ki ima le za 1 °C višjo temperaturo od drugih, že spada med nezanesljive. S kontaktnim merjenjem v tem primeru razmere tako zmotimo, da je rezultat meritve popolnoma napačen.

Termokamera v plavžu prihrani do 5 % koksa, kar pomeni, da se, ob današnjih cenovnih razmerjih, investicija vanjo izplača v šestih mesecih.

Lociranje napake v talnem ogrevanju, počene cevi na primer, je s termokamero opravljeno v nekaj minutah in na nekaj cm natančno. Pomaga pa nam tudi pri iskanju izgubljenih napeljav ali predmetov (tudi mikrofonov), prekritih z ometom.

## 4. Fizikalne osnove

### 4.1. Sevanje teles

Vsa materialna telesa v vesolju, ki imajo temperaturo nad absolutno ničlo, sevajo elektromagnetno valovanje, čigar intenziteta in valovna dolžina sta odvisni od absolutne temperature. Te-

lesa z višjo temperaturo sevajo z večjo intenziteto in krajšo valovno dolžino kot telesa z nižjo. Moč sevanja je sorazmerna s četrto potenco absolutne temperature. Ta naravni zakon je v zadnji tretjini 19. stoletja odkril slovenski fizik Jožef Štefan.

Poleg temperature je tudi emitivnost ( $\epsilon$ ) površine zelo pomemben podatek, njena vrednost se giblje med 0 in 1. Idealno črno telo, ki ga v naravi sicer ni, ima emitivnost 1. Koncept črnega telesa je zelo pomemben v termografiji. Idealen absorber je tudi idealen sevalec. Ta naravni zakon je znan kot Kirchoffov zakon:

$$\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda) \quad 1)$$

$\alpha$ ..... absorptivnost

$\epsilon$ ..... emitivnost

$\lambda$  ..... valovna dolžina

Idealno črno telo absorbira vso nanj vpadlo energijo, nič je ne odbije in nič je ne prepušča, zato je za oko nevidno, torej črno. Druga skrajnost je belo telo. Nič ne seva, vso nanj vpadlo energijo odbija, njegova emitivnost pa je 0. Resnična telesa, imenujemo jih siva in barvna, so seveda nekje vmes.

Zvezo med absorptivnostjo ( $\alpha$ ), prepustnostjo ( $\tau$ ) in reflektivnostjo ( $\rho$ ), ki je posledica zakona o ohranitvi energije:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad 2)$$

lahko za neprozorno telo ( $\tau = 0$ ), ob upoštevanju Kirchoffovega zakona, zapišemo:

$$\rho = 1 - \epsilon \quad 3)$$

Sevanje črnega telesa popisuje Planckova enačba:

$$M_{\lambda, RB} = \epsilon(\lambda) M_{\lambda, BB} \quad 4)$$

$h$ ..... Planckova konstanta =

..... 6,626·10<sup>-34</sup> Js

$k$ ..... Boltzmannova konstanta =

..... 1.381·10<sup>-23</sup> JK<sup>-1</sup>

$c$ ..... hitrost svetlobe v vakuumu =

..... 2.997·10<sup>8</sup> ms<sup>-1</sup>

$T$  .... absolutna temperatura

$\lambda$ ..... valovna dolžina

BB.. črno telo (Black Body)

Sevanje realnega telesa pa je podano z enačbo:

$$M_{\lambda, RB} = \epsilon(\lambda) M_{\lambda, BB} \quad 5)$$

$\epsilon(\lambda, T)$  ....emitivnost

RB .....realno telo

Enačbo 5) lahko štejemo za definicijo emitivnosti.

Celotno sevano moč dobimo z integracijo enačbe 4) preko vseh valovnih dolžin, to pa je znani Štefanov zakon:

$$M = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda = \sigma T^4 \quad (6)$$

Logaritmični diferencial enačbe 6) ilustrira dejstvo, da je toplotna slika rezultat lastnega sevanja, ki je odvisno od temperature in emitivnosti, za razliko od vidne slike, ki je rezultat le razlik v reflektivnosti.

$$\frac{dM}{M} = 4 \frac{dT}{T} + \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} \quad (7)$$

Kdor se rad igra s številkami, lahko hitro ugotovi, da zmanjšanje emitivnosti od 1,00 na 0,99 pri temperaturi 300 K pomeni enako zmanjšanje sevanje moči kot znižanje temperature za 0,75 K (ob tem, da je temperatura okolice 0 K in da torej na naš sevalec ne pade nobeno sevanje iz okolice).

Najboljše današnje termokamere, ki imajo ekvivalentno šumno temperaturo nekaj stotink stopinje, lahko ustvarijo zelo kvalitetno termično sliko IR scene že pri temperaturnih razlikah reda 2 stopinji.

Na sliki 1 je Planckova funkcija, porazdelitev gostote sevanega toka črnega telesa.

Telesa s temperaturo okrog 300 K sevajo največ pri valovni dolžini 10 mikrometrov, medtem ko v pasu 8 do 13 mikrometrov sevajo približno  $150 \text{ Wm}^{-2}$ .

#### 4.2. Emitivnost in temperatura

S termokamero ne le opazujemo okoli v drugi valovni dolžini kot z golim očesom, kar predvsem zanima vojake in policiste, temveč lahko izmerimo sevano moč, prikažemo porazdelitev temperature po površini ter po enačbi 6) določimo temperaturo, kar sta glavni nalogi termografije. Emitivnost površine, ki jo opazujemo in ji s termokame-

ro merimo temperaturo brez dotika, je torej zelo pomemben podatek, ki ga moramo poznati, če hočemo izmeriti pravo termodinamsko temperaturo. Emitivnosti je več vrst oziroma variant: spektralna, totalna, utežena, usmerjena in hemisferna.

*Spektralna, utežena in totalna emitivnost* popisujejo spektralno porazdelitev sevanja, medtem ko *usmerjena in hemisferna* popisujeta geometrijsko porazdelitev sevanja. Hemisferna emitivnost je razmerje sevanih energijskih tokov v celoten polprostor, medtem ko je usmerjena emitivnost razmerje sevanja v dani prostorski kot (razmerje intenzitet sevanja).

V industrijski praksi se uporabljata največ hemisferna in usmerjena emitivnost, ki ju zaradi enostavnosti večina imenuje kar »efektivna« emitivnost. V primerih, ko je emitivnost zelo usmerjena, torej ko je sevanje telesa zelo odvisno od smeri opazovanja, moramo to dejstvo upoštevati pri meritvah in interpretaciji rezultatov. V praksi pa se takim primerom, če se le da, izognemo, tako da merimo temperaturo s čim bolj pravokotno na površino usmerjeno termokamero in tudi emitivnost, ki jo ob tem upoštevamo, imenujemo »pravokotna«.

Natančno določanje emitivnosti je zamudno delo in zahteva drago opremo. Zato je najbolje, da pri delu s termokamero uporabljamo podatke o emitivnosti iz literature. Če potrebnega podatka o emitivnosti merjenčeve površine ni mogoče najti, pa sta na voljo enostavna, a dovolj natančna, postopka za njeno določitev, in to s pomočjo termokamere.

Enačba 3) izraža povezavo med reflektivnostjo in emitivnostjo neprozornih snovi. Črno telo ima reflektivnost nič. Sivo telo, na primer z emitivnostjo 0,70, pa ima reflektivnost 0,30, torej 30 % nanj padlega valovanja odbija.

Pri merjenju temperature teles z emitivnostjo, manjšo od 1, moramo paziti, da se v njih ne zrcali kakšno telo z višjo (nižjo) temperaturo, kot jo ima merjenec. V tem primeru prek zrcaljenja merimo višjo (nižjo) temperaturo. Termokamera namreč ne ve, katero je lastno sevanje telesa in katero je sevanje okolice, ki se odbija od njega, saj izmeri od telesa prihajajoč energijski tok  $M_m$ , ki je:

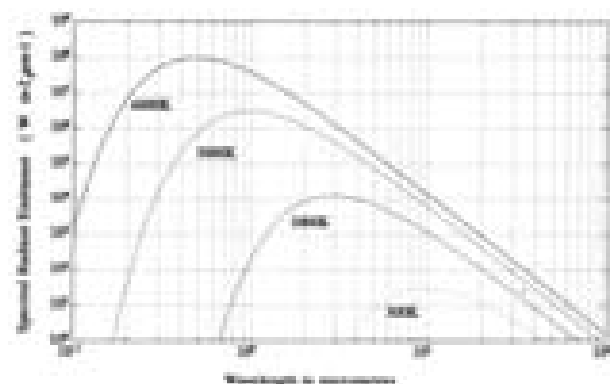
$$M_m = \varepsilon M(T_t) + (1-\varepsilon)M(T_b) \quad (8)$$

$\varepsilon M(T_t)$ ..... energijski tok, ki ga seva tarča z emitivnostjo  $\varepsilon$ ,  
 $(1-\varepsilon)M(T_b)$ .... energijski tok okolice, ki se odbija od tarče.

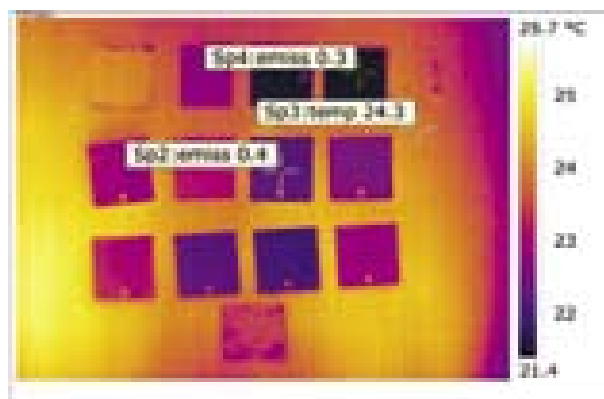
Vse termokamere imajo korekcijski program, ki upošteva od merjenca zrcaljeno sevanje in tako prikaže njegovo pravilno termodinamsko temperaturo. V primeru, da se IR sevanje na poti od merjenca do kamere zelo absorbira v ozračju ali dodatni optiki na kameri, moramo upoštevati tudi te izgube, sicer dobimo prenizko vrednost temperature. Večina termokamer upošteva v korekcijskem programu tudi te vplive. Pogosto se pojavi vprašanje, kako natančno lahko določimo emitivnost in kako to vpliva na natančnost meritve temperature.

Na sliki 2 je termogram vzorcev s premaži, ki imajo različno emitivnost za pas 7,7 do 13 mikrometrov.

Vzorci so bili nameščeni na leseni plošči z emitivnostjo 0,92 in temperaturo 24,3 °C. V ravnotežnem stanju imajo tudi vzorci enako temperaturo kot podlaga. Termogram pa jasno kaže, da termokamera vidi vzorce različno tople. Natančnost meritev emitivnosti s termokamero je odvisna od temperaturne razlike med merjenim vzorcem in okolico, od vrednosti emitivnosti vzorca in od šumne temperature termokamere. Natančnost je večja oziroma napaka je manjša pri večji temperaturni razliki,



Slika 1. Sevanje črnega telesa



Slika 2. Termogram vzorcev z različnimi emitivnostmi

pri večjih emitivnostih in manjši šumni temperaturi termokamere in je reda 5 do 10 %. Za orientacijo podatek: 10-odstotna napaka pri meritvi emitivnosti, ki je enaka ali večja od 0,5, pridela absolutno napako pri meritvi temperature do 500°C reda 3,0 °C.

Proizvajalci vsako termokamero kalibrirajo z referenčnim temperaturnim izvorom, ki ima emitivnost vsaj 0,97. Tipično je kalibracija, in s tem tudi točnost kamere, natančna v okviru 2 %, kar zadostuje 90 % uporabnikom.

V tabeli 1 so podatki o emitivnosti za nekaj najpogostejše merjenih materialov.

Čeprav je temperatura jasno definirana in je njen koncept dobro znan, je vpeljanih kar nekaj »efektivnih radiometričnih« temperatur. V splošnem so to temperature, ki bi jih določeno telo imelo, če bi bilo črno in bi sevalo ekvivalentno količino radiometrično definirane sevanja.

Te temperature so: sevalna (radiacijska), svetilna, porazdelitvena (distribucijska) in barvna temperatura. Definicije so povezane tudi s pojmi črno, sivo in barvno telo.

*Sevalna temperatura* je tista, ki bi jo sevajoče telo imelo, če bi kot črno

telo sevalo enak energijski tok. Če je  $M$  totalni sevani energijski tok črnega telesa, potem je sevalna temperatura  $T_s$  enaka termodinamski  $T$ , povezani pa sta s Stefan-Boltzmannovo enačbo za sevanje črnega telesa:

$$I = \sigma \cdot T_s^4 \quad (9)$$

Za sivo telo velja:

$$T_s = T \quad (10)$$

$T$  .....termodinamska temperatura

*Svetilna temperatura* je definirana kot temperatura črnega telesa, ki seva enak energijski tok, pri izbrani valovni dolžini, kot realno telo. Nekateri jo imenujejo tudi monokromatska, enobarvna.

*Porazdelitvena temperatura* je definirana kot temperatura črnega telesa, čigar spektralna porazdelitev sevanja se najbolje ujema s spektralno porazdelitvijo sevanja realnega telesa.

*Barvna temperatura* je definirana kot temperatura črnega telesa, ki ima iste koordinate na barvnem diagramu kot realno telo. V termografiji se barvna temperatura ne uporablja.

Sonce ni idealno črno telo. Meritve so pokazale, da je njegova svetilna temperatura 4500 K za dolgovalovni del IR spektra, medtem ko je za vidni del 6000 K. Povprečna (efektivna) sevalna temperatura Sonca je 5500 K, medtem ko je povprečna termodinamska temperatura njegove fotosfere 5900 K.

### 4.3. Vplivi ozračja

Ozračje kot medij med opazovanim objektom in sredstvom za opazovanje, s svojimi lastnostmi zelo vpliva na sliko, zato ga je treba poznati, meriti in preračunati njegove vplive.

IR sevanje se pri prehodu skozi ozračje oslabi s procesom absorpcije ter sipanja na molekulah, aerosolih, dimu, prahu, dežju in snegu. Poznavanje mehanizmov, predvsem pa stopnje slabljenja sevanja, je zelo pomembno s stališča uporabe termokamer v vojaške in policijske namene. Od tega je namreč odvisna razdalja odkrivanja in prepoznavanja objektov, kar je nedvomno najpomembnejši podatek. V splošnem velja, da je slabljenje manjše, čim manjši so delci in čim daljša je valovna dolžina. To je zelo pomembno dejstvo, kajti pomeni, da je slabljenje IR svetlobe z valovnimi dolžinami med 8 do 14 mikrometri bistveno manjše

Tabela 1. Usmerjena pravokotna (efektivna) emitivnost nekaterih materialov

| MATERIAL                           | TEMPERATURA (°C)           | EMITIVNOST |                    |
|------------------------------------|----------------------------|------------|--------------------|
| Aluminij:                          | Polirana pločevina         | 100        | 0,05               |
|                                    | Oksidirana                 | 100        | 0,55 – 0,65 – 0,80 |
|                                    | Vakuumsko neparjen         | 20         | 0,04               |
| Medenina:                          | Polirana                   | 100        | 0,03               |
|                                    | Peskana                    | 20         | 0,20               |
|                                    | Oksidirana                 | 100        | 0,61               |
| Baker:                             | Poliran                    | 100        | 0,05               |
|                                    | Močno oksidirana           | 20         | 0,78               |
| Zlato:                             | Polirano                   | 100        | 0,02               |
| Železo:                            | Lito, polirano             | 40         | 0,21               |
|                                    | Lito, oksidirano           | 100        | 0,64               |
|                                    | Pločevina, zelo oksidirano | 20         | 0,69               |
| Magnezij:                          | Poliran                    | 20         | 0,07               |
| Nerjavno jeklo:                    | Kovano                     | 20         | 0,16               |
|                                    | Oksidirano na 800 °C       | 60         | 0,85               |
| Jeklo:                             | Polirano                   | 100        | 0,07               |
|                                    | Oksidirano                 | 200        | 0,79               |
| Olje, mazalno                      |                            | 20         | 0,05               |
| Plast na niklju:                   | Nikelj sam                 | 20         | 0,27; 0,46; 0,72   |
|                                    | Film 0,025; 0,050; 0,125mm | 20         | 0,82               |
|                                    | Debela plast               |            |                    |
| Opeka:                             | Navadna, rdeča(glinasta)   | 20         | 0,93               |
| Ogljik:                            | Saje, sveča                | 20         | 0,95               |
|                                    | Grafit, popiljena površina | 20         | 0,98               |
| Beton                              |                            | 20         | 0,92               |
| Steklo:                            | Polirana plošča            | 20         | 0,94               |
| Lak:                               | Bel                        | 100        | 0,92               |
|                                    | Črn, mat                   | 100        | 0,97               |
| Barve, oljne, povprečje za 16 barv |                            | 100        | 0,94               |
| Papir, bel pisemski                |                            | 20         | 0,93               |
| Omet, grobi                        |                            | 20         | 0,91               |
| Pesek                              |                            | 20         | 0,90               |
| Koža, človeška                     |                            | 32         | 0,98               |
| Prst:                              | suha                       | 20         | 0,92               |
|                                    | vlažna                     | 20         | 0,95               |
| Voda destilirana                   |                            | 20         | 0,96               |
| Les, skobljan                      |                            | 20         | 0,92               |



Tabela 2.

| PLIN                              | RAZMERJE [%] | DELCI [na milijon]       |
|-----------------------------------|--------------|--------------------------|
| Dušik, N <sub>2</sub>             | 78,1         | -                        |
| Kisik, O <sub>2</sub>             | 20,9         | -                        |
| Ozon, O <sub>3</sub>              | -            | Od 0 do 0,3 v troposferi |
| Argon, Ar                         | 0,9          | -                        |
| Ogljikov dioksid, CO <sub>2</sub> | 0,035        | 350                      |
| Neon, Ne                          | 0,0018       | 18                       |
| Helij, He                         | 0,0005       | 5                        |
| Vodik, H                          |              | 0,5                      |

kot slabljenje vidne svetlobe, pri enakih fizikalnih pogojih v ozračju seveda. S termo kamerami tako torej vidimo skozi prah, dim, skozi tanjše in redkejše oblake, skozi meglice (mrč) veliko bolje kot s prostim očesom.

Ozračje sestavljajo različni plini in suspendirani delci. V tabeli 2 so naštetih najpomembnejši in njihova medsebojna prostorninska razmerja v suhem ozračju.

Poleg omenjenih plinov je v ozračju tudi vodna para, s spremenljivo koncentracijo med 0 in 2 % ter vrsta drugih, na primer CO, HNO<sub>3</sub>, NI-13, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO, itd.

Delci v ozračju so zelo različne sestave, oblike in velikosti, zato jih je veliko težje matematično-fizikalno opisati kot molekule. Delijo se v dve veliki skupini:

- aerosoli,
- hidrometi.

Aerosoli so zelo majhni, premere imajo manjše od mikrometra in so zato suspendirani (razpršeni, viseči, lebdeči) v ozračju. Največjo koncentracijo imajo blizu zemeljske površine in zelo slabijo vidno svetlobo, zato se njihova prisotnost opazi kot mrč ali kot spremenjena barva ozračja nad horizontom, ki je belkasta oziroma manj modra.

Hidrometi so sestavljeni predvsem iz vodnih delcev večjih dimenzij. Primeri so različni oblaki, meglice, dež, toča, sneg, vodni (morski) pršec, itd.

V tabeli 2 so podatki za nekaj tipov najpogostejših delcev v ozračju.

Največji del termičnega sevanja med 2 in 20 mikrometri se absorbira na vodni pari, ogljikovem dioksidu in ozonu, ki

tako v največji meri omejujejo prepustnost ozračja na atmosferski »okni« 3 do 5 in 7,5 do 14 mikrometrov.

Slabljenje sevanja na poti skozi ozračje se na termični sliki odraža kot zmanjšanje kontrasta in naraščanje šuma. To je še posebej opazno pri termokamerah, ko se v primeru močnega slabljenja razmerje signal/šum zmanjša in slika postane snežena. Do tega pride v dežju, gostejši megli in sneženju. Termokamera učinkovito premaguje noč, manj pa slabo vreme.

Video in termično sliko poslabša tudi turbulenca v ozračju. Njena značilnost je spreminjanje gostote, s tem pa se spreminja tudi lomni količnik zraka, kar ima za posledico zmanjšanje kvalitete slike. Termokamera je precej manj občutljiva na turbulenco, medtem ko je to tudi ena od praktičnih omejitev za povečavo pri videokamerah, kajti pri večji povečavi se efekti turbulence bolje vidijo in so zato bolj moteči.

Poznavanje mehanizmov, predvsem pa stopnje slabljenja sevanja, je pomembno s stališča učinkovite uporabe vseh optoelektronskih naprav, ne le termokamer. Iz meteoroloških podatkov morajo uporabniki znati določiti zmogljivost ter s tem uporabnost termokamer, videokamer ter druge optoelektronske opreme.

Za uporabnike, ki uporabljajo termokamere v dobrih vremenskih razmerah na krajših razdaljah, reda 10 m, ozračje ni moteč dejavnik. Če pa so razdalje večje in je relativna vlažnost visoka, je treba v korekcijski program vnesti ustrezne parametre, običajno so to razdalja, tempe-

ratura zraka in relativna vlažnost. Iz teh podatkov korekcijski program izračuna prepustnost ozračja in jo upošteva pri izračunu temperature.

Na grafih na naslednji strani je prikazana prepustnost ozračja kot funkcija valovne dolžine za razdalje 1 m, 3 m, 10 m, 30 m, 100 m in 300 m.

## 5. Opis termokamer

### 5.1. Sestava termokamere

Glavni sestavni moduli tipične termokamere so:

- optika,
- detektor,
- elektronika,
- prikazovalnik slike.

Večina optoelektronskih naprav sprejema ali oddaja EM sevanje v obsegu valovnih dolžin od približno 0,2 do 20 mikrometrov, to je od ultravijolične, prek vidne do daljne infrardeče svetlobe. Najpomembnejše značilnosti tega dela spektra so, da ga ozračje večji del prepušča, da je naše oko občutljivo za svetlobo z valovnimi dolžinami od 0,4 do 0,7 mikrometra, in da telesa v območju zemeljskih temperatur največji del energije sevajo v pasu valovnih dolžin med 3 in 14 mikrometri, kar izkoriščajo termokamere.

Na sliki 3 je sodobna termokamera z nehlajenim matričnim bolometričnim IR detektorjem, ki ima 320x240 detektorskih elementov.



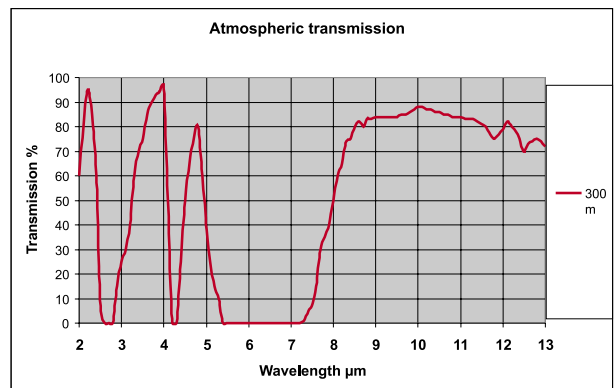
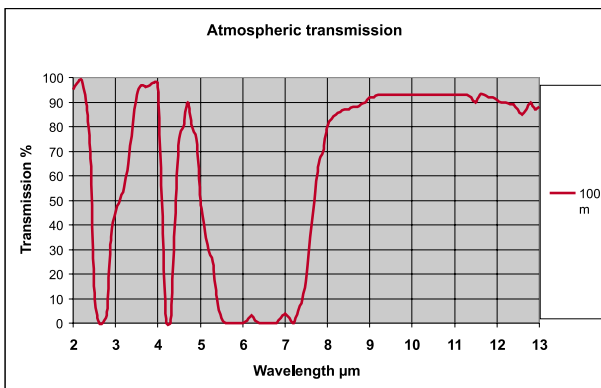
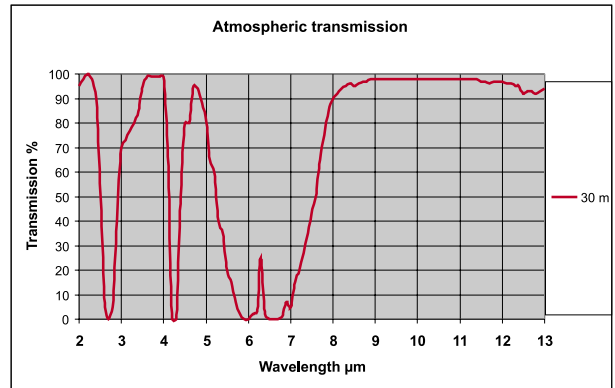
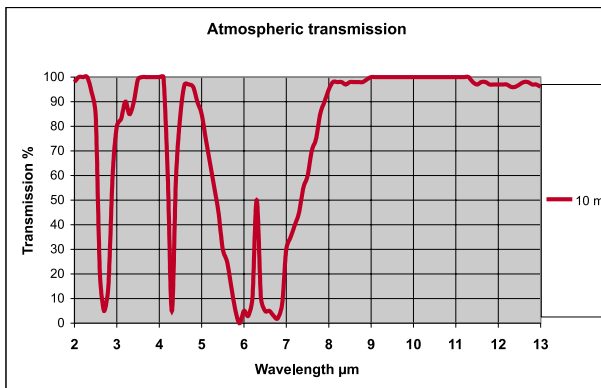
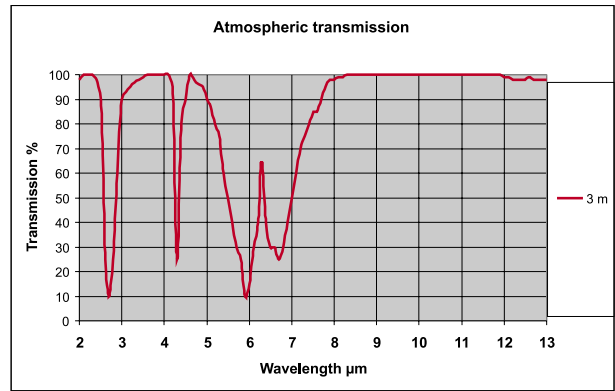
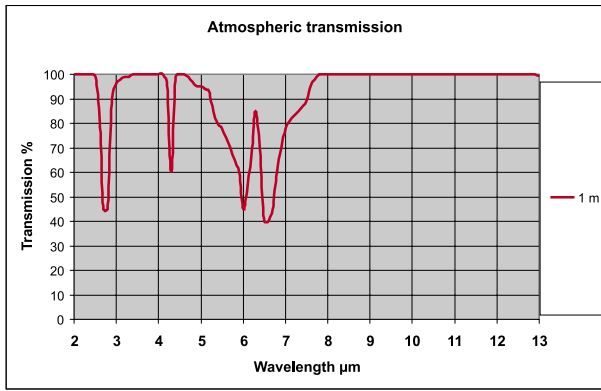
Slika 3. Presek skozi sodobno termokamero z nehlajenim detektorjem IR sevanja

Detektor je srce termovizijske kamere, saj IR sevanje iz scene, ki ga naj usmerja optika, pretvarja v električne signale. Njemu je podrejena celotna zasnova naprave, z njim je določena kvaliteta slike, občutljivost in, ne nazadnje, cena. Detektor je zaenkrat še najdražji element termokamere.

Detektorji se delijo v dve veliki skupini: v ftonske in termične. Ftonske so približno tisočkrat hitrejši in občutljivejši.

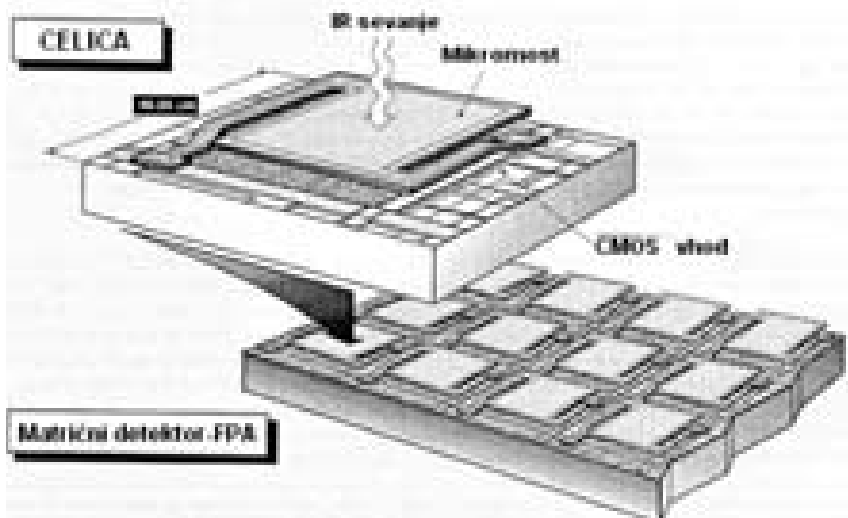
Tabela 3.

| TIP              | RADIJ (μm)                         | KONCENTRACIJA (cm <sup>-3</sup> )    |
|------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Molekule zraka   | 10 <sup>-4</sup>                   | 10 <sup>19</sup>                     |
| Aerosoli         | 10 <sup>-</sup> do 1               | 10 do 10 <sup>3</sup>                |
| Megla            | 1 do 10                            | 10 do 100                            |
| Oblak            | 1 do 10                            | 10 do 300                            |
| Deževne kapljice | 10 <sup>2</sup> do 10 <sup>4</sup> | 10 <sup>-2</sup> do 10 <sup>-5</sup> |

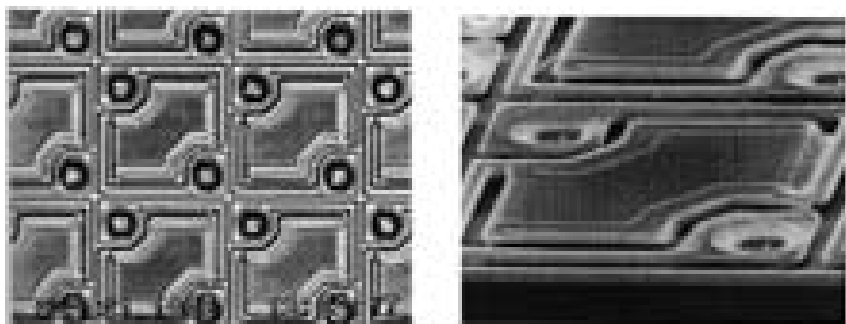


Tisti, ki delujejo v pasu 8 do 13 mikrometrov, se morajo hladiti na temperaturo 80 K, kar jih precej podraži, hkrati pa zmanjša njihovo zanesljivost in skrajša življenjsko dobo. Dandanes se fotonski detektorji še vedno množično uporabljajo v vojaških termokamerah, medtem ko civilisti prisegajo na nehla-jene termične detektorje.

Fotonski IR detektorji, tako fotoprevodni kot fotovoltaični, izkoriščajo fotoefekt, medtem ko termični izkoriščajo spremembe različnih lastnosti materialov, ki so funkcija temperature. Med najbolj razširjenimi in obetavnimi so bolometrični, feroelektrični in piroelektrični detektorji. Trenutno so v prednosti nehla-jeni bolometrični detektorji, kajti njihova izdelava je najcenejša, ker sloni na monolitnem procesu, ki je



Slika 4. Shema nehla-jenega matričnega mikrobolometričnega IR detektorja



Slika 5. Video in SEM sliki mikrobolometričnega detektorja na substratu CMOS integriranega vezja

kompatibilen s standardnim silicijevim procesom na 8-inčnih in večjih Si rezinah. Poleg tega imajo velik dinamični obseg, linearni odziv, ne potrebujejo čoperja tako kot feroelektrični in piroelektrični detektorji, imajo zelo majhen presluh med posameznimi elementi in široko spektralno odzivnost.

Na sliki 4 je prerez mikrobolometričnega detektorja. Vsak posamezen element sestoji iz silicijevega nitrida v obliki mikromostu, ki stoji nad CMOS silicijevim substratom in je podprt z dvema nožicama tudi iz silicijevega nitrida. Na mikromost je naparjena tanka plast bolometerskega materiala. Običajno je to vanadijev oksid (VOx), ki je trenutno najboljši material s temperaturnim koeficientom upornosti približno 2 %/K pri sobni temperaturi. Vsak detektor je povezan preko dveh poti s spodnjo celico na substratu, kjer je že vsa potrebna elektronika za čitanje in predobdelavo signalov.



Slika 6. Modul bolometričnega nehlajenega matričnega IR detektorja s 320x240 elementi



Slika 7. Modul hlajenega PtSi matričnega IR detektorja s 320x240 elementi

Odzivni čas termičnih detektorjev je reda milisekunde, tako da so zelo primerni za ustvarjanje slik v stvarnem času po televizijskih normah.

Optika ima tudi pri termokamerah nalogo, da ustvari čim boljše sliko scene. Konstruirana in izdelana je po enakih principih kot optika za vidno svetlobo, a od nje se razlikuje z nekaj posebnostmi, ki zelo grenijo življenje izdelovalcem. Materiali, iz katerih se izdeluje, pa so pravi posebnosti, tako po lastnostih, kot ceni. Njihova najpomembnejša lastnost je, da čim bolje prepuščajo IR sevanje. Med številno množico je najbolj znan in uporaben germanij. Uporablja se skoraj v vseh napravah, ki sprejemajo IR sevanje v pasu od 8 do 14 mikrometrov. V spektru od 3 do 5 mikrometrov je najbolj uporabljan material silicij, pogosto pa srečamo tudi safir, seveda za manjše optične elemente.

Elektronika obdeluje električne signale detektorja z algoritmi, dobro znanimi in preskušeni v televizijski in računalniški tehniki. Termična slika je prikazana na zaslonu, ki je pri sodobnih termokamerah najpogosteje tipa LCD. V termokamerah je običajno vgrajen tudi program za kvantitativno analizo toplotne slike (termograma), tako da lahko takoj na mestu samem odčitamo temperaturo v poljubni točki na površini merjenca.

## 6. Tehnične karakteristike in izbira termokamere

Tradicionalno so merilni IR instrumenti razporejeni v tri skupine:

- točkovni IR termometri, temperaturo merijo le v eni točki,
- IR profilometri, merijo temperaturo na liniji,
- IR kamere, prikažejo in merijo temperaturo na 2D sliki.

IR kamere so pravi termografski instrumenti, ki prikažejo porazdelitev sevine energije na površini merjenca. Ta po-

razdelitev, ki je običajno predstavljena v črno-beli ali barvni paleti, se imenuje termogram.

Sodobne termokamere tretje generacije, ki imajo matrične IR detektorje, tako fotonske kot termične, lahko razvrstimo v nekaj skupin, ki se razlikujejo predvsem v lastnostih vgrajenega IR detektorja, toda s tem jim je že določeno tudi področje optimalne uporabe in uporabnosti.

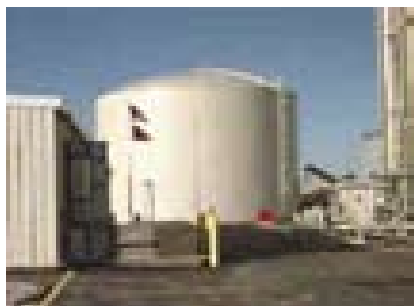
- Termokamere z matričnim in nehlajenim IR detektorjem za dolgovalovno (LW) območje 7 do 14 mikrometrov. Detektorji so tu iz družine bolometrov (VOx in silicij) ali pa feroelektrikov. Zelo so primerne za večnamensko uporabo na širšem področju, na primer v:
  - napovednem vzdrževanju,
  - pregledih stavb, streh in infrastrukture,
  - nadzoru procesov,
  - neporušni kontroli materialov,
  - medicinskih in bioloških študijah,
  - varovanju in nadzoru terena, nočnih aktivnostih, zaščiti in reševanju, gašenju požarov.
- Termokamere s hlajenim detektorjem za srednjevalovno (MW) območje 3,5 do 5 mikrometrov. Tipični detektorski materiali so tu PtSi, InSb in HgCdTe. Primernejše so za meritve procesov, kjer so obratovalne temperature visoke, nad 500°C in za uporabo v razmerah, ko sonce ne osvetljuje merjenca.

- Visoko občutljive termokamere za posebno zahtevne aplikacije, kjer je pomembna hitrost meritve in velika temperaturna občutljivost. Vanje je običajno vgrajen hlajen fotonski (QWIP) IR detektor iz GaAs.

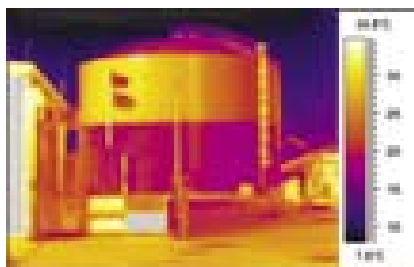
Termokamera mora biti s svojimi tehničnimi lastnostmi prilagojena zahtevam, ki jih določa uporaba, tako da lahko z njo izmerimo vse tisto, kar zahteva termografski projekt. Pri izbiri se seveda naslanjamo na tehnične karakteristike proizvajalca, saj iz njih ocenimo, ali bo termokamera izpolnila naša pričakovanja in bomo dobili zanesljive ter uporabne rezultate meritev.

## 7. Primeri termogramov

Na slikah 11 do 15 je nekaj splošnih termičnih posnetkov, od rezervoarja tekočega plina, prek latentnega požara, do krajinskega termograma z luno v ozadju.



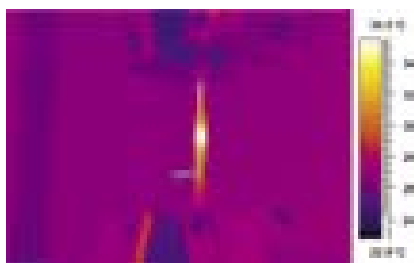
Slika 11. Videoposnetek rezervoarja plina



Slika 12. Termični posnetek rezervoarja plina



Slika 13. Lociranje latentnega požara v tovarni izolacijskega materiala

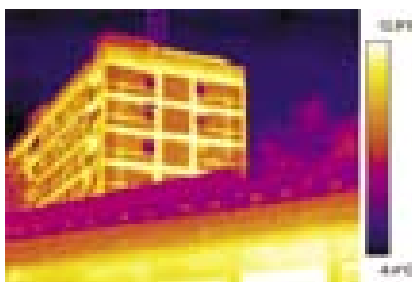


Sliki 14 in 15. Termograma plastične palice pri nategu in šentviške cerkve z luno v ozadju

Termokamere so v gradbeništvu pričeli uporabljati skoraj takoj, in sicer pri energetskih pregledih stavb. Termični

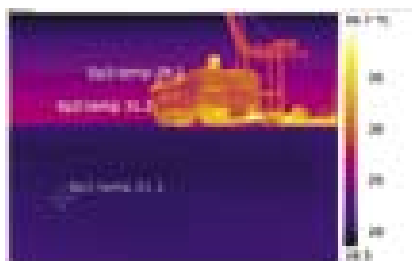
posnetek pokaže variacijo temperature po zunanjem plašču in toplejši deli oddajajo več toplote, kar največkrat pomeni, da je tam toplotna izolacija slabša. Vzrokov za slabšo izolacijo je več, od tega, da jo graditelj sploh ni vgradil, do okvare ali prisotnosti močnejše vlage. Seveda pa je tovrstna zanesljiva analiza izgubljanja energije mogoča le v zimskem času. Rezultati meritev, in iz njih določenih izgub, s sodobnimi termokamerami, so zanesljivi že ob 10-stopinjski razliki med temperaturo znotraj in zunaj objekta.

V gradbeništvu lahko uvrstimo tudi mestni toplotni sistem. S termokamero lahko že med samo gradnjo iščemo razne anomalije v delovnih procesih, kjer se sprošča toplota, kot na primer asfaltiranje, čeprav to običajno ni primarni namen uporabe termokamere. Do veljave in koristnosti pa pride termokamera pri iskanju mest, kjer sistem pušča toplo vodo. Ti pregledi se morajo izvajati ponoči, v suhem vremenu, tako da termokamera pokaže povišano temperaturo površine na mestih puščanja. Ko se tako mesto odkrije, se ga običajno preveri še z občutljivim geofonskim mikrofonom. Praksa je pokazala, da se tako lahko odkrijejo napake tudi do globine 3 m.



Slika 16. Termogram stanovanjskega bloka

Na sliki 16 je termogram stanovanjskega bloka, ki je bil očitno zgrajen v šestdesetih letih, pred prvo naftno krizo. Plašč bloka je v celoti precej toplejši od zraka, lepo pa se vidijo toplotni mostovi nosilnih betonskih plošč.



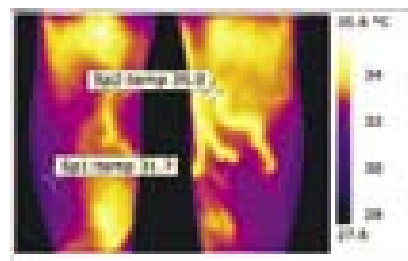
Slika 17. Termogram, posnet v luki Koper

Na termogramu s slike 17 se vidi, da je ladja natovorjena do slabe četrtine, kar se s termokamero dobro vidi. Tako odkrivajo tudi morske tihotapce.

Termogram s slike 18 pa je tipičen za slabe električne spoje, kar je pogosto vzrok za požare.



Slika 18. Termogram električnih kontaktov



Slika 19. Termogram nog

Termogram na sliki 19 dokazuje, da je termokamera uporabna tudi v medicini.

## 8. Sklep

IR termografija je s pojavom termokamer postala natančna, učinkovita in hitra merilno-testna tehnika. V številnih industrijah, od proizvodnje letal, avtomobilske industrije, elektronike, gospodinskih aparatov, naftnih derivatov, itd. so že vpeljali termokamere kot obvezno testno-merilno opremo, bodisi na proizvodnih linijah, v končni kontroli kvalitete ali pa v raziskovalno razvojnih oddelkih. V Sloveniji termokamere niso neznanne, saj so v Iskri že leta 1984 razvili civilno termokamero, imenovano TopScan 808 in jo celo prodali v nekaj držav. Neka tržna analiza je ugotovila, da bi Slovenija v takratnih razmerah gospodarjenja potrebovala vsaj 50 termokamer. Po osamosvojitvi pa so se razmere očitno spremenile in takrat so le zelo redki, na primer Gorenje, ugotovili, da se vlaganje v novo, visokotehnološko, a žal še vedno dokaj drago, opremo hitro obrestuje in ne predstavlja le nepotrebne stroška.

Pričakujemo lahko, da bodo slovenska podjetja kmalu spoznala, da jim v pogojih gospodarjenja v združeni Evropi uporaba IR termografije lahko pomaga v bitkah za večjo konkurenčnost na trgu.