

Merilne tehnike v infrardeči termografiji

Termografija je tehnika prikazovanja in merjenja porazdelitve temperature po površini merjenca. Merilni instrumenti so lahko običajni kontaktni termometri, točkovni pirometri, tekoči kristali, profloometri in termokamere, skratka vse naprave, s katerimi lahko merimo temperaturo.



Izraz »infrardeča termografija« pa je rezerviran za merjenje z napravami, ki sprejemajo infrardeče sevanje in preko njega nekontaktno izmerijo temperaturo. V vrh te družine naprav spadajo termokamere, ki so danes dosegle tehnološko zrelost in predstavljajo najelegantnejši, najučinkovitejši in najhitrejši način prikaza ter merjenja porazdelitve temperature.

Razvejano fizikalno ozadje IR-termografije ima za posledico tudi razvejano množico specifičnih merilnih metod, ki jih mora termografer poznati in obvladati, sicer mimogrede pride do napačnega rezultata, ki je lahko tudi nevaren. V prispevku je dan opis najosnovnejših, a najpomembnejših merilnih metod, predvsem z namenom opozoriti začetnike v IR-termografiji na pomembnost primerne znanja in jih spodbuditi k organiziranemu izobraževanju in usposabljanju.

1 Uvod

Infrardeča termografija, ki kot svoje glavno orodje uporablja termokamere, je uveljavljena in priznana merilna in diagnostična metoda na mnogih področjih človekove dejavnosti. V zadnjih letih se je njen pomen še posebej povečal v sferi vzdrževanja različne opreme in omrežij za distribucijo energije. Tako danes radi govorimo o preventivnem in napovednem vzdr-

ževanju, kjer ima IR-termografija pomembno vlogo.

Večina električnih in elektronskih komponent se pred odpovedjo pregreva, a z IR-termografijo lahko hitro izmerimo in prikažemo porazdelitev temperature in tako odkrijemo nevarno pregreta mesta ter komponente. S pravočasnim popravilom preprečimo odpovedi in zastoje v proizvodnji, s tem povezano materialno škodo in, ne nazadnje, povečamo varnost delavcev.

Preventivno vzdrževanje seveda ni le stvar organiziranosti. Poleg natančnih planov in urnikov pregledov komponent zahteva tudi dobro poznavanje merilnih metod in tehnik IR-termografije, pravilno tolmačenje ter učinkovito obdelavo dobljenih rezultatov meritve.

Ravno pri tem pa se v praksi velikokrat zatakne. Ocena je, da je v Sloveniji približno 350 termokamer z različnimi zmogljivostmi in za različne namene. Kljub sorazmerno velikemu številu termokamer pa je poznavanje osnov IR-termografije relativno slabo. Usposobljenih termograferjev višje stopnje II z mednarodno veljavnim certifikatom je le 5, termograferjev stopnje I pa 18.

Pomanjkljivo poznavanje IR-termografije ima običajno za posledico napačno izvajane meritve, napačno tolmačenje rezultatov in seveda, kar je v bistvu najbolj kri-

Avtor:

Niko Tršan, univ. dipl. inž. fizike,
strokovni sodelavec
ONE, d. o. o.
Dunajska 22
1000 Ljubljana

tično, napačne ukrepe pri popravi-
lih opreme. Posledice pa utegnejo
biti tudi katastrofalne, ne le v ne-
pričakovanih odpovedih in zasto-
jih proizvodnje, temveč tudi pri
varnosti delavcev.

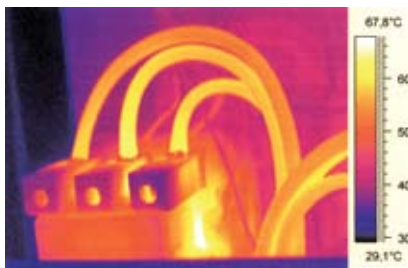
Prispevek opisuje nekaj osnovnih
merilnih tehnik, ki so potrebne
tako pri določanju objektnih pa-
rametrov kot pri snemanju termo-
gramov.

2 Nekaj primerov uporabe termokamer v preventivnem vzdrževanju

2.1 Električne naprave

Termokamere se zelo pogosto
uporabljajo za pregledovanje ele-
ktričnih naprav, tako nizko- kot
visokonapetostnih. Slabi električni
stiki imajo povečano električni-
no upornost in posledično se bolj
grejejo. Poleg izgube energije in s
tem višjih stroškov niso tako red-
ki primeri, ko pregrevanje takih
stikov povzroči požar v električni
omari. V tem primeru je škoda lah-
ko velika, varnost ljudi pa resno
zmanjšana.

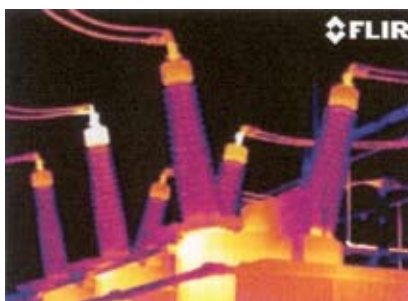
Tudi transformatorji se pogosto
pregledajo s termokamero. Tem-
perature hladilnih reber in visoko-
napetostnih stikov se tako lahko
medsebojno primerjajo. S primer-
javo ob različnih časih izmerjenih
temperatur hladilnih teles in visoko-
napetostnih stikov so zagoto-
vljeni pogoji za pravočasna popra-
vila, še preden pride do resnejših
okvar. Termokamera napake na
visokonapetostnih daljnovodih ja-
sno pokaže.



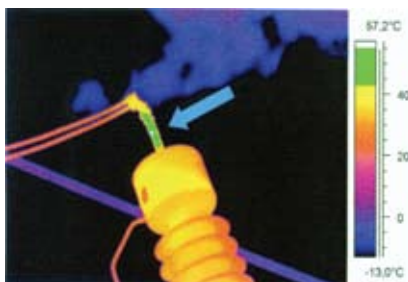
Slika 1: Slab električni stik in notra-
nja poškodba



Slika 2: Vroča točka v električni
omarici



Slika 3: Sumljiva oljna stikala



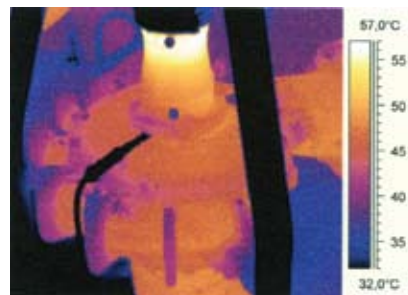
Slika 4: Vroča točka na stiku skoznika

2.2 Mehanski sistemi

V mnogih industrijah so mehanski
sistemi hrbtenica delovanja. S ter-
mografskim pregledom pridoblje-
ni podatki so neprecenljiv vir do-
datnih informacij pri proučevanju
raznih anomalij, kot so na primer
nezaželene vibracije.



Slika 5: Sumljivi ležaji



Slika 6: Pregret motor črpalke

2.3 Cevovodi

Infrardeča termografija je močno
orodje tudi pri odkrivanju napak
na cevovodih in toplotni izolaciji.
Pregled s termokamero nam takoj
da sliko celotne napeljave, tako
ni treba mukotrpno pregledovati
krajših odsekov posamezne cevi.
Termokamera tudi hitro pokaže
blokiran odseke cevovodov in za-
mašene toplotne izmenjevalce.

3 Objektni parametri

Najpomembnejša naloga IR-ter-
mografije je prikaz porazdelitve
temperature po merjeni površini
in izračun njene čim bolj natančne
vrednosti.

Termokamera sprejema EM-seva-
nje, ki prihaja od merjenega objek-
ta. To sestoji iz več komponent, la-
stnega sevanja telesa, zrcaljenega
in prepuščenega sevanja okolice
ter lastnega sevanja ozračja. Zr-
caljeno sevanje okolice je tisto,
ki iz okolice pade na objekt in se
od njega odbije v termokamero.
Prepuščeno sevanje okolice je tisti



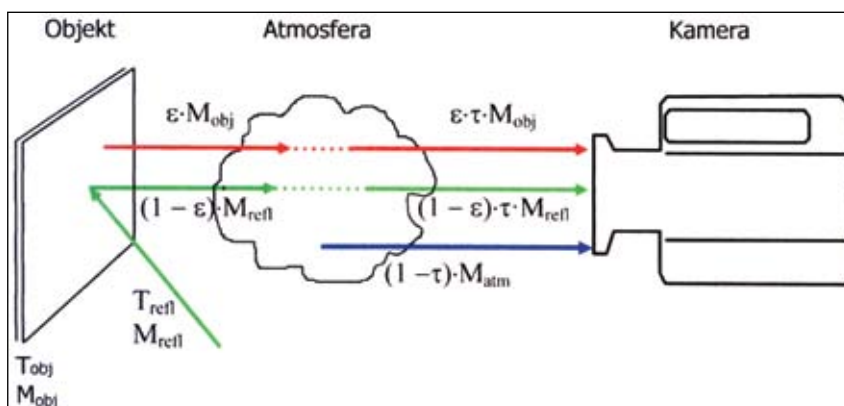
Slika 7: Poškodovan cevovod



Slika 8: Zapora parovoda

del, ki iz okolice prehaja skozi delno prozorno telo merjenca v termokamero. Lastno sevanje ozračja pri normalnih temperaturah je za termografijo v praksi do razdalj reda 100 metrov zanemarljivo. Poleg tega so v veliki večini primerov merjena telesa neprozorna za valovne dolžine sevanja, ki jih sprejema termokamera, zato je na sliki 9 prikazana poenostavljena geometrija.

Najpomembnejše je lastno sevanje, saj iz njega kamera izračuna pravo termodinamsko temperaturo, ki jo s sevano energijo povezuje Stefan-Boltzmannov zakon. Po tem zakonu je sevana energija sorazmerna četrti potenci absolutne temperature T in faktorju emitivnosti ϵ , ki ima vrednosti med 0 in 1. Večina realnih teles v naravi ima emitivnost med 0,1 in 0,95. Emitivnost je tako najpomembnejši objektni parameter, ki v največji meri vpliva na natančnost izmerjene temperature, zato mora termografer emitivnost in njen vpliv na rezultat zelo dobro poznati. Ostale



Slika 9: Deleži sevanja, ki padejo v termokamero

komponente sevanja pa mora kamera kompenzirati oziroma njihov vpliv na rezultat izničiti.

Drugi objektni parameter po pomembnosti je zrcaljeno sevanje, ki je v IR-termografiji dobilo ime »reflektirana navidezna temperatura okolice«. V FLIR-termokamerah in programih za obdelavo termogramov je ta parameter zapisan kot T_{REFL} , reflektirana navidezna temperatura.

Pridevnik »navidezna« pomeni, da gre za sevalno količino, da to ni temperatura.

V primeru neprozornega objekta termokamera vidi celoten tok energije, ki je vsota lastnega sevanja objekta, odbitega sevanja okolice od objekta in lastnega sevanja ozračja:

$$M_{tot} = \epsilon \cdot \tau \cdot M_{obj} + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot M_{refl} + (1 - \tau) \cdot M_{atm}$$

$$M_{tot} = \epsilon \cdot \tau \cdot T_{obj}^4 + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot T_{refl}^4 + (1 - \tau) \cdot T_{atm}^4$$

Temperaturo objekta T_{obj} izračuna termokamera, medtem ko mora objektne parametre ϵ , T_{REFL} , T_{atm} in τ določiti in vstaviti v termokamero termografer. V veliki večini praktičnih primerov lahko zanemarimo vpliv temperature okoliškega zraka

T_{atm} in prepustnosti τ atmosfere. Meritve temperature z uporabo IR-sevanja so lahko zelo preproste ali pa skoraj nemogoče. Načeloma lahko rečemo, da težavnost merjenja temperature s sevanjem obsega stopnje od nič do neskončnosti. Težavnostna stopnja nič je meritev temperature teles, ki imajo emitivnost ena. Tako telo imenujemo črno in je idealni sevalec in absorber, a ga v naravi ni oziroma ga še niso odkrili. Meritve z emitivnostmi blizu 1 so lahke. Po drugi strani pa emitivnost 0 pomeni, da temperature ne moremo izmeriti, saj telo ne seva lastne energije, temveč vso nanj padlo energijo odbija kot idealno zrcalo. V tem primeru je stopnja težavnosti neskončna. Bliže je emitivnost vrednosti 0, večja je stopnja težavnosti meritve temperature, bližje stopnji neskončno. Pomembno je, da lahko termografer vnaprej oceni kakovost meritev. Odvisna je od dveh faktorjev: termograferjeve izurjenosti in tarče z njeno okolico. Večja je termograferjeva izurjenost, kompleksnejših tarč se lahko loteva. Toda ni mogoče vedno pričakovati dobrih merilnih rezultatov. Včasih so pogoj tako brezupni, da se s termokamero praktično ne more dobiti uporabnih rezultatov.

3.1 Emitivnost in reflektirana navidezna temperatura okolice

Kako ju merimo in ocenimo

Meritev ali ocenitev emitivnosti in reflektirane navidezne temperature je v teoriji preprosta. V praksi pa utegne biti zelo težka in kompleksna. Znanje in izkušnje so sorazmerne številu opravljenih meritev in testov z emitivnostjo, zato se jih splača narediti čim več. Za čiste začetnike v termografiji je najboljša pot, da vzamejo kamero v roke, gredo na teren in merijo pojave prenosa toplote ter zbirajo podatke o emitivnosti.

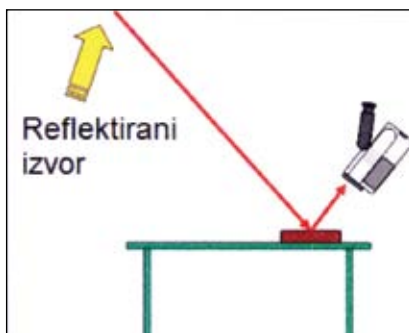
Nadzor nad reflektirano temperaturo okolice

Vsaka meritev, pa naj gre za tarčo na terenu ali meritev emitivnosti vzorca v delavnici, se začne z meritvijo ali pa vsaj z oceno reflektirane navidezne temperature T_{REFL} . Preden začnemo z delom na izbrani tarči, je zelo priporočljivo, da kamero obrnemo malce v nasprotno smer in pregledamo okolico. Je morda kje vroč izvor, ki bi se utegnil zrcaliti v naši tarči? Želimo, da bi bila T_{REFL} preprosta lepa ravna ploskev z enakomerno temperaturo, ki seva proti naši tarči, ne pa skupek vročih in hladnih točk, ki bi povzročale težave. Če pri tem pregledovanju okolice najdemo kak vroč izvor, si ga zapomnimo, da se mu bomo pozneje lahko izognili ali ga vsaj nadzorovali. Če je mesto meritve notranji prostor in imajo zidovi dokaj enakomerno navidezno temperaturo,

se lahko kar to vzame za T_{REFL} . Če pa nekoliko variira (ne preveč), se vzame neko pametno povprečje. Pogosto se zgodi, da je T_{REFL} kar enaka temperaturi zraka, čeprav seveda to ni isto. Taki primeri so redki in se lahko zgodijo le v notranjih prostorih, nikoli pa zunaj na prostem.

Meritev reflektirane navidezne temperature

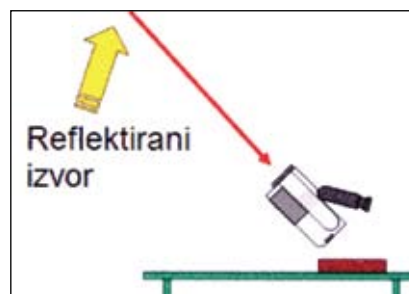
Ko smo našli nekaj, na čemer bi radi izmerili temperaturo ali celo že pred tem, pogledamo z našo kamero malo naokrog. Prepričamo se, da se v tarči ne reflektira vroča točka. Če je le mogoče, poskusimo poskrbeti, da bo to enakomerna navidezna temperatura. Ker je to navidezna temperatura reflektiranega izvora, ne smemo ničesar kompenzirati, torej moramo vnesti v kamero emitivnost 1 in razdaljo 0 metrov.



Slika 10: Določitev reflektiranega izvora

Kaj je s temperaturo zraka, relativno vlažnostjo in reflektirano navidezno temperaturo? Na kakšne vrednosti naj se nastavijo? Ni pomembno! Temperatura zraka in relativna vlažnost nimata nobene vloge oziroma sta 0 in v računa-

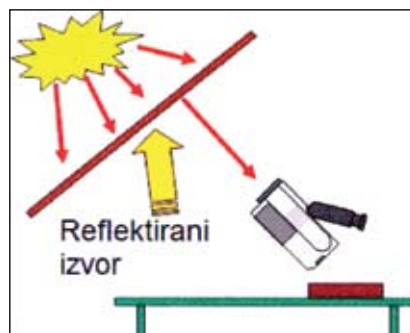
nju nista upoštevani, ker je izbrana razdalja 0 metrov. Isto velja za T_{REFL} , saj smo emitivnost postavili na 1,0. Hkrati to pomeni, da je reflektivnost 0. Torej je vseeno, koliko je T_{REFL} , ker jo kamera pri svojem računanju pomnoži z 0.



Slika 11: Meritev reflektirane navidezne temperature

Modifikacija reflektirane navidezne temperature

Če so težave z reflektiranim izvorom, recimo da ga je težko identificirati ali jih je več, poskusimo z zaslonko, kosom lepenke blokirati njegovo sevanje.



Slika 12: Modifikacija reflektiranega izvora

Kos lepenke tako postane reflektirani izvor, ki ga je lahko določiti. Paziti moramo le na to, da na lepenki ne ustvarimo vročih točk, odtisi rok na primer. Prav tako naj ne bo predolgo in preblizu vročega izvora, ker se lahko segreje, pa

smo spet na začetku problema. Nekaj besed o svetilih kot izvorih toplote: žarnice vseh vrst so točkasti reflektirani izvori. Ne splača se jih ugašati. Prvič, potrebujejo veliko časa, da se ohladijo. Drugič, gibanje naokrog po temi je lahko nevarno! In velja si zapomniti: termograferji smo zelo pogosto reflektirani izvor.

Tabele z emitivnostjo

Tabele z zbirko emitivnosti za različne snovi obstajajo, kot se zdi, že od nekdaj. Prav tako se zdi, da so v vseh tabelah zbrani enaki podatki in celo zapisani na enak način. Te tabele imajo omejeno vrednost za praktičnega in izkušenega termograferja. Tabele nam dajo neke logično sprejemljive vrednosti za nekovine. Če pobrsamo po tabeli, vidimo, da ima zelo velika večina nekovin visoko emitivnost. Vrednosti tudi ne variirajo prav veliko za različne vzorce, niti ne s časom za isti vzorec, kot je to pri kovinah. Tabele so zelo nezanesljive za kovine, celo neuporabne za mnogo primerov. Delni vzrok za tako stanje so težave pri opisovanju pogojev, pri katerih so merili emitivnost. Ti opisi so skoraj vedno subjektivni. Kaj pomeni »oksidiran« ali »svetleče obdelan« ali »močno oksidiran« in podobno? Naš vzorec, ki mu želimo izmeriti emitivnost, zagotovo ne bo enak onemu v tabeli. Kar nam tabele dejansko povedo, je le to, da so kovine materiali, ki imajo emitivnost med skoraj 0 in skoraj 1, odvisno od stopnje oksidiranosti. Razlog je ta, da ima čista nova neoksidirana kovina zelo nizko emitivnost, čisti

kovinski oksid z zadostno debelino, ki je neprozoren, pa ima zelo visoko emitivnost. Nikoli se ne zanašajmo na tabele, če naše delo zahteva veliko natančnost. V vseh drugih primerih pa bodimo razumno skeptični.

Merjenje emitivnosti

Za natančne meritve emitivnosti je potrebna draga oprema in precej časa. Tega si termografer običajno ne more privoščiti, temveč jo mora hitro in dovolj natančno izmeriti s pomočjo svoje termokamere. Tu je skrajšano navodilo, kako se to naredi.

Priprave:

1. Izberemo mesto, kamor bomo dali vzorec.
2. Izmerimo reflektirano navidezno temperaturo na tem mestu in jo vnesemo v kamero.
3. Nalepimo na vzorec košček visokoemitivnostnega referenčnega traku z znano emitivnostjo. Dober je običajni električni izolirni trak, ki ima emitivnost 0,95. Barva ni pomembna, lahko črn, bel ali rdeč.
4. Segrejemo vzorec:
 - a. vsaj 20 K nad temperaturo okoli,
 - b. segrevanje mora biti čim bolj enakomerno!
5. Izberemo in nastavimo ustrezne funkcije na termokameri.

Meritev:

1. V kamero vnesemo emitivnost referenčnega traka.
2. S termokamero izmerimo temperaturo traku ob nastavljeni emitivnosti 0,95 in jo zapišemo.

3. Premaknemo merilne funkcije kamere (merna točka, ploskev, izoterma) na površino vzorca, kjer ni traku, a čim bližje traku.
4. Spreminjamo emitivnost na kameri, dokler ne pokaže temperature, ki smo jo pred tem izmerili na traku.
5. Odčitamo to emitivnost in jo zabeležimo.

V fazi priprav izberimo mesto, kjer so merilni pogoji dobri. Naj ne bo prisiljene konvekcije in termični pogoji naj bodo konstantni, tako da ne nastajajo točkasti reflektirani izvori. Uporabljajmo visokakovostne referenčne trakove z znano emitivnostjo, ki so preverjeno neprozorni v delu spektra, kjer deluje naša termokamera. Najtežji del je enakomerno segreti vzorce. Ta metoda predpostavlja in zahteva, da sta temperaturi referenčnega traku in vzorca enaki, če nista, so rezultati meritev napačni. To tudi pomeni, da ne sme biti nobenih termičnih gradientov po vzorcu. S termokamero jih hitro vidimo.

Med vzorcem in okolico mora biti dovolj velika temperaturna razlika, sicer je kontrast med površinami z različnimi emitivnostmi premajhen. Lahko so sicer videti, kot da imajo kontrast, toda to je posledica refleksije, zrcaljenja okolice v vzorcu. Težko je reči, koliko naj bo ta temperaturna razlika, a večja je, manjša je napaka. 20 K je kar primerna vrednost.

Po končani pripravi je treba le posneti dober termogram, to pomeni izostren, termično ugašen in

posnet z najmanjše možne razdalje. Elektronskega zuma ne uporabljamo, ker s tem ne pridobimo ničesar, le razločljivost kamere zavržemo.

Z meritvijo dobimo dobro oceno emitivnosti površine vzorca. Shranimo jo v banko podatkov za poznejšo rabo. To je tudi najboljše dosegljiva tabela emitivnosti, ker smo jo ustvarili sami.

4 Sklep

Merilne tehnike v infrardeči termografiji so interdisciplinarne in zato dokaj kompleksne. Vrhunski termografer mora imeti široko znanje iz različnih tehničnih in znanstvenih disciplin ter precejšno mero praktičnih izkušenj. Ni dovolj le, da z obvladovanjem termokamerinih gumbov posnamemo lep termogram, temveč ga

mora znati pravilno analizirati in ovrednotiti ter iz njega izluščiti vse podatke, tudi na videz nepomembne. Le tako bo dosežen cilj, ki ga mora imeti pred očmi vsak termografer in vsak vzdrževalec, to pa je: uspešno odkriti anomalije na opremi in pravočasno odpraviti napake in s tem povečati varnost ter zmanjšati morebitno škodo.



INFRARDEČA TERMOGRAFIJA

Bi radi izmerili porazdelitev temperature po opazovani površini in na tej osnovi ocenili verjetnost okvare stroja, kontrolirali kvaliteto proizvodov, izračunali toplotne izgube, našli mesta, ki morebiti zmanjšujejo varnost pri delu?

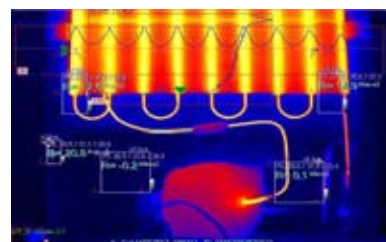
Infrardeča termografija je pravi odgovor za vas. Je nekontaktna in neporušna metoda merjenja temperature in se uporablja na področjih:

- industrija**, kontrola kvalitete, kontrola tehnoloških procesov, raziskave in razvoj,
- preventivno vzdrževanje strojev in opreme**,
- gradbeništvo**, iskanje toplotnih mostov, področij slabše toplotne izolacije, mest s povečano vlažnostjo,
- energetika**, proizvodnja in distribucija električne ter toplotne energije, plinovodi,
- **medicina**.

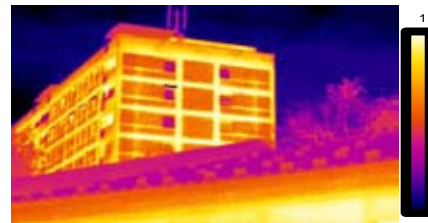
S termokamero elegantno, hitro, zanesljivo in natančno izmerimo ter dokumentiramo porazdelitev temperature.

Švedsko-ameriško podjetje **FLIR Systems AB** je najbolj poznan proizvajalec termokamer. V bogatem naboru vsak uporabnik lahko najde sebi primerno termokamero, tako po zmogljivostih kot po ceni.

V podjetju ONE d.o.o. že 16 let sodelujemo s FLIR in zastopamo ter predstavljamo njihov celotni program s področja Termografije.



Kontrola kvalitete hladilnikov



Termogram slabo izolirane stavbe



Termogram rezervoarja s tekočino

ONE d.o.o., Dunajska 22, Ljubljana, **T:**+386 1 600 3838, **F:** +386 1 600 3839, **M:** +386 41 775 788,
www.one.si, www.flir.si, **E:** info@one.si, niko.trsan@one.si