

Kako izbrati infrardeči termometer?

2. del

Bojan TEŽAK

Izvleček: Poleg pogosto uporabljenih ročnih IR-termometrov, ki večinoma delujejo v valovnem območju 8 do 10 μm , je še cela vrsta industrijskih stacionarnih IR-termometrov, ki delujejo pri različnih valovnih dolžinah in so primerni za najrazličnejšo uporabo. Prispevek opisuje, kako valovna dolžina merjenja vpliva na točnost meritve.

Ključne besede: IR-termometer, infrardeče merjenje temperature

■ 1 Uvod

Z ročnimi IR-termometri lahko merimo v zelo širokem temperaturnem območju od -35 do 1800 $^{\circ}\text{C}$ [1]. Za kontrolo specifičnega tehnološkega postopka, merjenje temperature različnih materialov ali za vgradnjo v razne naprave pa je bolj smiselno uporabiti IR-termometre, ki so prilagojeni posamezni vrsti aplikacije.

Eden izmed pomembnih parametrov, ki določajo namen uporabe IR-termometra, je valovna dolžina merjenja.

■ 2 Telesa na višji temperaturi sevajo več

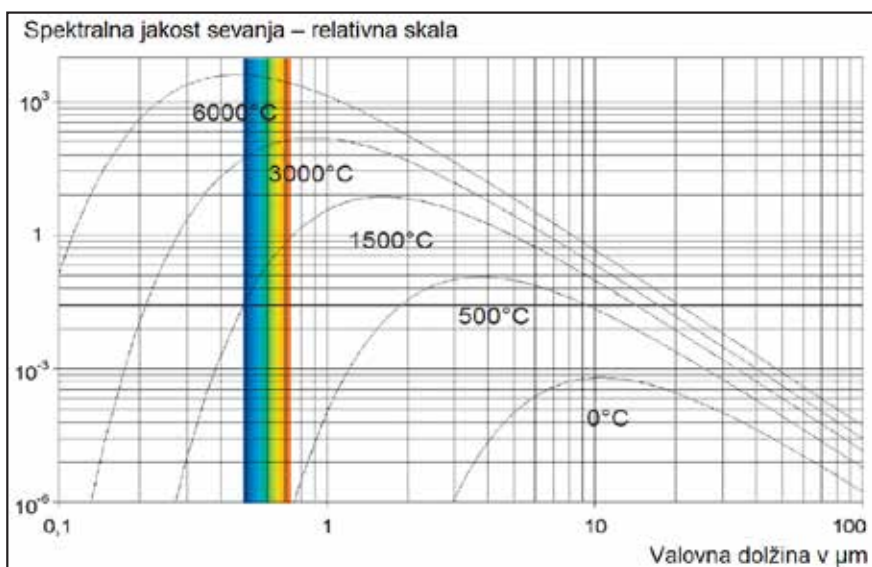
Slika 1 prikazuje, da se vrh sevanja teles z višjo temperaturo premika h krajšim valovnim dolžinam.

merjenje sobnih temperatur je primeren termometer, ki je občutljiv na valovne dolžine okoli 10 μm , za merjenje teles na 500 $^{\circ}\text{C}$ je bolj primeren termometer, ki deluje okoli 4 μm in za 1000 $^{\circ}\text{C}$ termometer, občutljiv okoli 2 μm .

Jeklo na temperaturi 550 $^{\circ}\text{C}$ vidimo kot temno rdeče, saj že seva dovolj energije z valovno dolžino, ki je na zgornjem robu zaznavanja človeškega očesa (slika 1). Telesa na tej temperaturi začnejo "žareti" v temno rdeči barvi. Z višanjem temperature telo seva vse več energije tudi s krajšimi valovnimi dolžinami. Ko je dovolj energije pri vseh valovnih dolžinah vidnega dela spektra, vidimo telo v beli barvi.

Na sliki 2 je ponazorjeno, kako temperatura jeklenih gredic, ki prihajajo iz valjarne na odlagališče, narašča od leve proti desni. Gredice na levi so najdlje na odlagališču, zato so najbolj hladne. Čeprav so na temperaturi nad 300 $^{\circ}\text{C}$, jih vidimo kot črne. Ko se jim približamo, občutimo njihovo temperaturo. Koža je veliko bolj občutljiva za toploto kot oči. Šele ko doseže temperatura okoli 550 $^{\circ}\text{C}$, jo zaznamo tudi z očmi, najprej v temno rdeči barvi.

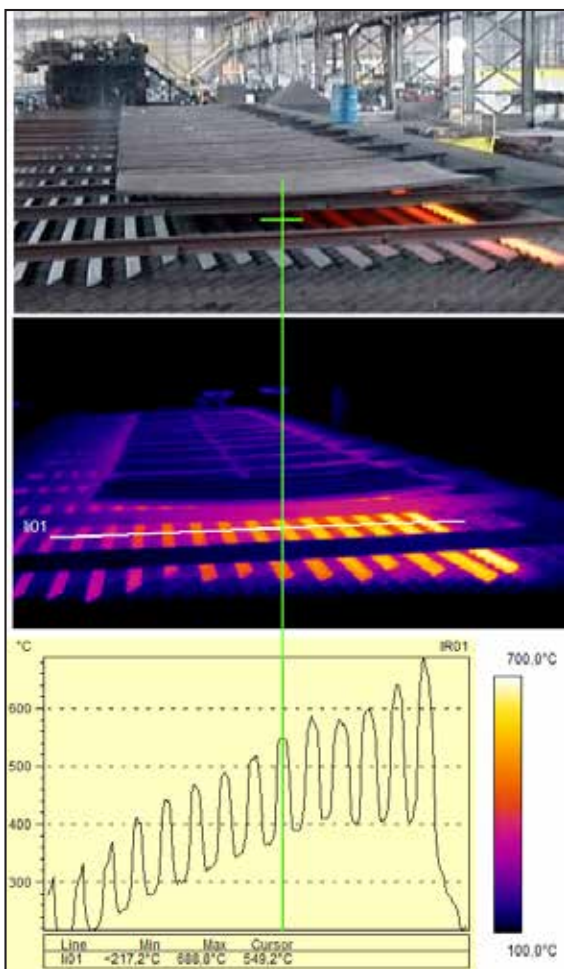
Fotografija na sliki 2 je bila posneta nekoliko kasneje kot termogram, kar



Slika 1. Z mavričnimi barvami so poudarjene valovne dolžine vidnega dela spektra [2]

Bojan Težak, univ. dipl. inž.,
Terming termografija, d. o. o.,
Ljubljana

Smiselno je torej, da za merjenje v želenem temperaturnem območju uporabimo termometer, ki deluje v ustreznem valovnem območju. Za



Slika 2. Primerjava jeklenih gredic na odlagališču v vidnem in IR-delu spektra (8 do 14 μm)

se vidi iz tega, da je na fotografiji že nova gredica, ki je na termogramu še ni. Gredice na odlagališču so se medtem že nekoliko ohladile, zato gredico, na fotografiji označeno z

zelenim križcem, vidimo bolj črno kot pa temno rdečo, kot bi pričakovali.

■ 3 Prepustnost atmosfere

Čeprav je tehnično z izbiro primerne filtra mogoče narediti termometer za zeleno valovno dolžino, pa postavlja omejitve neenakomerna prepustnost atmosfere za različne valovne dolžine. Velik vpliv na zmanjšanje prepustnosti atmosfere predstavlja absorpcija in sipanje zaradi koncentracije vodne pare, dima, prahu in plinov, kot sta CO_2 in ozon O_3 .

Slika 3 prikazuje spektralno prepustnost atmosfere in vpliv plinov pri posameznih valovnih dolžinah.

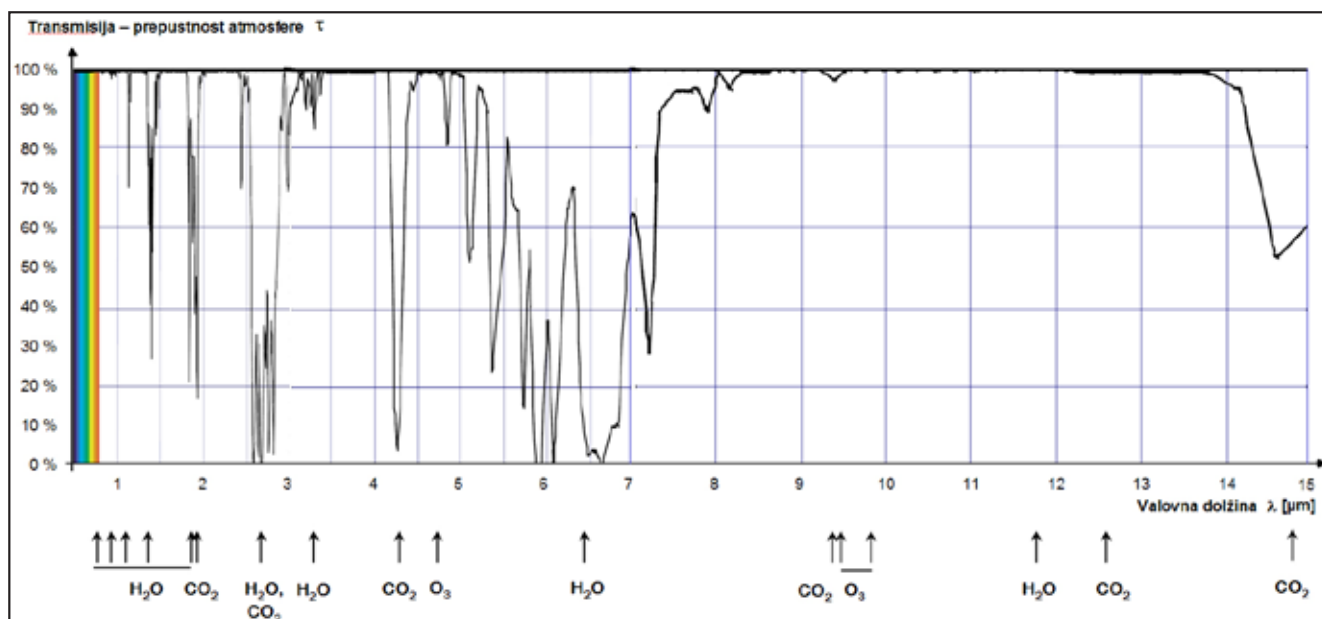
Vodna para ima izrazit vpliv na prepustnost pri 1,38 μm , 1,87 μm , 2,7 μm in 6,3 μm .

Ogljikov dioksid CO_2 absorbira valovanje pri 2,0 μm , 2,7 μm , 4,3 μm in 15,0 μm . Ozon O_3 največ absorbira valovanje v pasu med 9,3 μm in 9,8 μm [4].

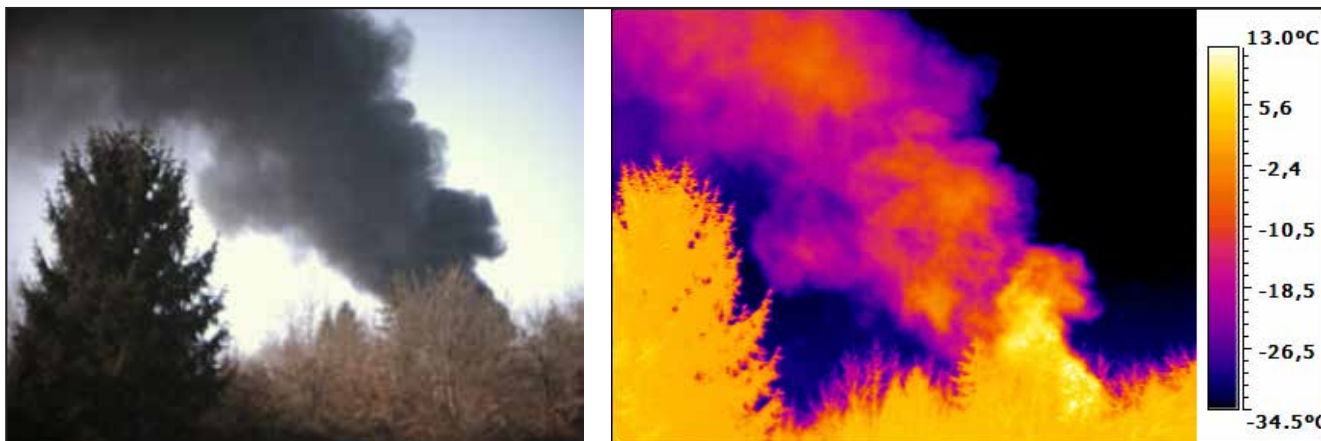
IR-termometri so narejeni tako, da merijo v tako imenovanih atmosferskih oknih oziroma v valovno najbolj prepustnih območjih. S slike 3 je razvidno široko območje med 8 in 14 μm , ki je primerno za merjenje teles na sobnih temperaturah. Področje 7,9 μm se uporablja za merjenje tanke plastike (poliester, poliuretan, teflon, poliamid), ki je za to valovno dolžino neprepustna. Valovna dolžina 5,2 μm je primerna za merjenje steklene površine. Na sliki 5 je podana odvisnost emisivnosti steklene površine od valovne dolžine.

Steklo ima največjo emisivnost v območju med 5 in 8 μm . Z upoštevanjem prepustnosti atmosfere je najprimernejše območje za merjenje steklenih površin prav 5,2 μm .

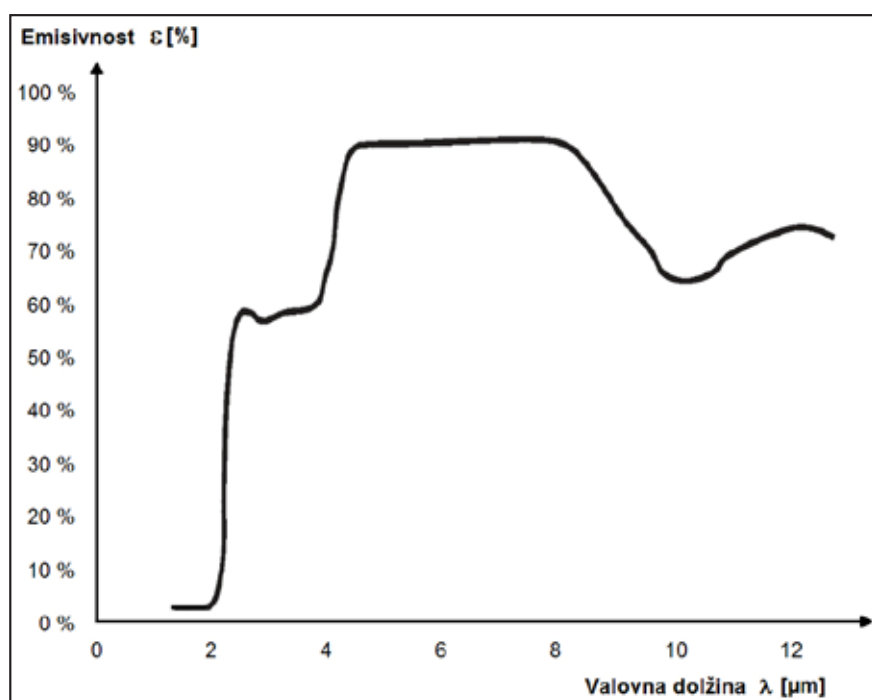
Atmosfersko okno pri 4,64 μm izkoriščamo za merjenje temperature plina CO , okno pri 4,24 μm pa za CO_2 . Oba plina imata pri teh valovnih dolžinah visoko emisivnost.



Slika 3. Prepustnost atmosfere na razdalji 10 m [3]



Slika 4. Gost dim, ki poleg vodne pare vsebuje tudi trdne delce, je neprepusten v valovnem območju IR-kamere med 8 in 14 μm



Slika 5. Emisivnost stekla v odvisnosti od valovne dolžine [2]

Okno 3,9 μm je primerno za merjenje skozi plamen [1]. Pri valovni dolžini 3,43 μm imajo visoko emisivnost nekateri plastični materiali, kot so polietilen, polipropilen, najlon in polistirol. Za merjenje visokih temperatur so primerne valovne dolžine 2,3, 1,6, 1 in 0,8 μm [4]. Za merjenje talin pri visokih temperaturah do 2000 °C lahko uporabimo termometer z valovno dolžino 0,525 μm , ki deluje v vidnem delu spektra in minimizira napake zaradi emisivnosti in atmosfere [1].

Imamo torej razmeroma ozka uporabna valovna območja merjenja.

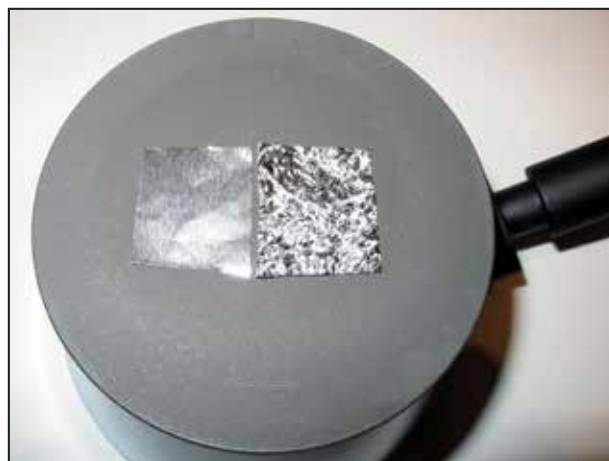
Termometre, ki merijo v tako ozkem spektralnem območju, imenujemo enovalovni ali enobarvni termometri. Glede na spektralno območje je izbrana tudi vrsta detektorja. Za omejitve merilnega območja pa se uporabljajo spektralni filtri.

■ 4 Emisivnost in emitivnost

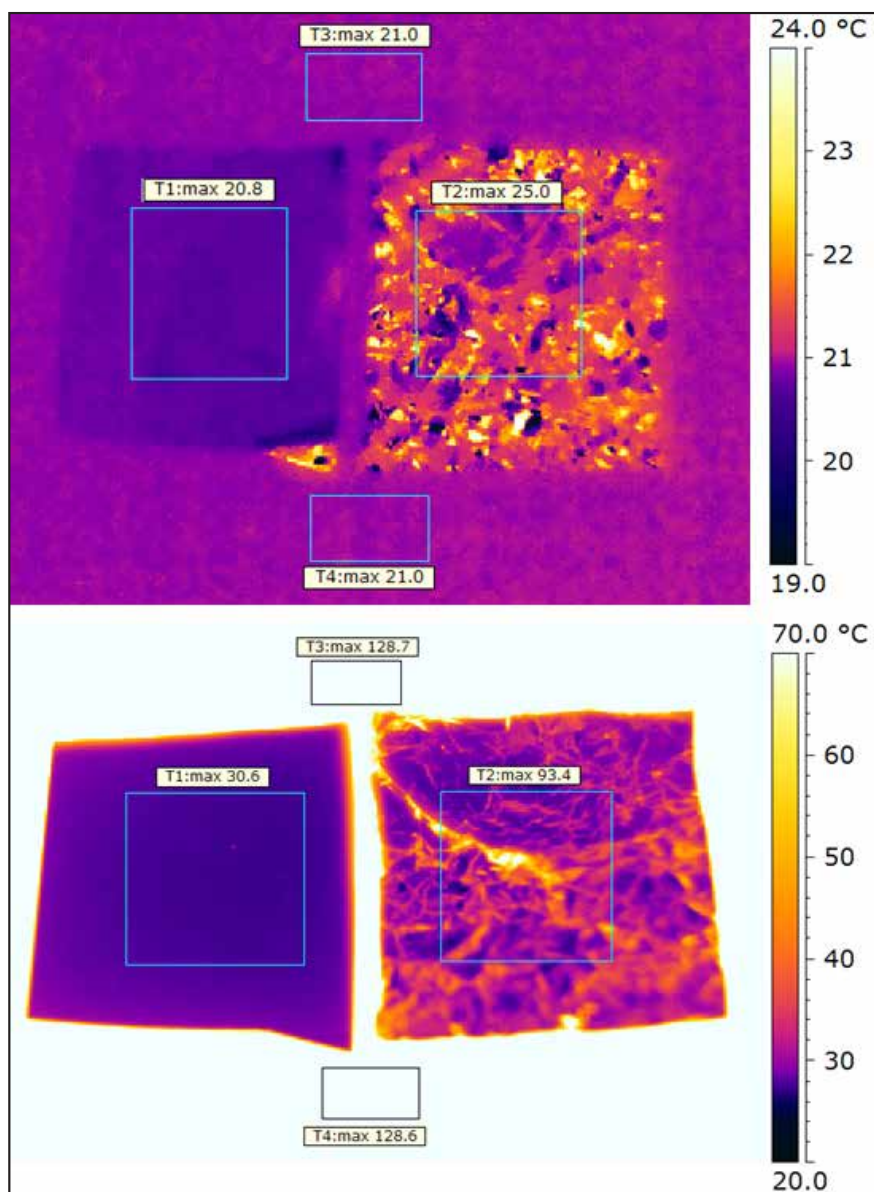
V prejšnjem prispevku [5] smo videli, da je emisivnost kovin-

skih površin višja pri krajših valovnih dolžinah. Steklo ima zelo razgibano odvisnost emisivnosti od valovne dolžine (slika 5), prav tako tudi plastika. Za kvalitetno meritev je potrebno izbrati termometer, ki meri pri valovnih dolžinah, kjer ima merjenec visoko emisivnost in je prepustnost atmosfere velika.

Sposobnost sevanja površine ni odvisna samo od vrednosti za emisivnost materiala (kovine, les, koža itd.), ampak tudi od lastnosti površine konkretnega materiala, ki je lahko oksidirana, nagubana, z ostrimi robovi ali je ravna, mastna, umazana, prašna itd. Namesto o emisivnosti govorimo o emitivnosti ali o sposobnosti sevanja konkretne površine in je poleg naštetega odvisna tudi od temperature površine in valovnega območja meritve. Kako razgibanost oziroma geometrija površine vpliva na emitivnost, prikazuje slika 6.



Slika 6. Gladek in naguban aluminijast listič na hladni plošči



Slika 7. Zgornji termogram prikazuje stanje pred začetkom gretja, ko so bili kuhalna plošča in lističa na sobni temperaturi, spodnji pa po koncu gretja, ko je temperatura plošče dosegla skoraj 130 °C

Dva lističa tanke alufolije smo pogreli na električni kuhalni plošči. Dogajanje smo spremljali z IR-kamero, ki deluje v valovnem območju 8 do 14 μm . Prvi listič je bil gladek, drugega pa smo najprej zmečkali v kepo in ga nato razgrnili, da je ostal naguban.

IR-kamera vidi naguban listič na zgornjem termogramu na *sliki 7* kot navidezno toplejši, ker zaradi nagubanosti difuzno reflektira temperaturo okolice iz vseh smeri. Ko lističa segrejemo na skoraj 130 °C, se zaradi majhne emisivnosti navidezna temperatura levega lističa poveča samo za 10 °C. Desni listič, ki je iz

enakega materiala, ima popolnoma enako emisivnost, vendar ima zaradi nagubanosti površine v gubah bistveno večjo emisivnost. IR-kamera izmeri najvišjo temperaturo preko 90 °C. Primer ponazarja, kako razgibanost površine vpliva na sposobnost sevanja. Zaradi enostavnosti je bila emisivnost na IR-kameri nastavljena na 95 %, saj smo želeli pokazati vpliv različnih površin na meritev, ne pa izmeriti pravo temperaturo lističev.

■ 5 Potenca n

Odziv IR-termometra v omejenem valovnem območju je proporcionalen

n -ti potenci temperature merjenca [4]:

$$U \approx C\varepsilon T_{obj}^n \quad (1)$$

- U detektorjev odziv
 - C konstanta termometra
 - ε emitivnost merjenca
 - T_{obj} temperatura objekta v kelvinih
 - n potenca, ki je odvisna od valovnega območja integriranja Plancove enačbe
- $$n = f(\lambda_1, \lambda_2)$$

Odziv termometra je direktno proporcionalen emitivnosti ε . Napaka pri oceni emitivnosti ε se proporcionalno odraža v odzivu meritve U . Kako pa je glede na spremembo emitivnosti odvisna izračunana temperatura objekta T_{obj} ?

Iz enačbe (1) sledi:

$$T_{obj} = \left(\frac{U}{C\varepsilon}\right)^{\frac{1}{n}} = C_1 U^{\frac{1}{n}} \quad \text{kjer je}$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{C\varepsilon}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

Spremembi odziva detektorja U sledi sprememba temperature objekta T_{obj} :

$$\frac{\Delta T_{obj}}{\Delta U} = \frac{C_1 U^{\frac{1}{n}-1}}{n} \quad \text{ali}$$

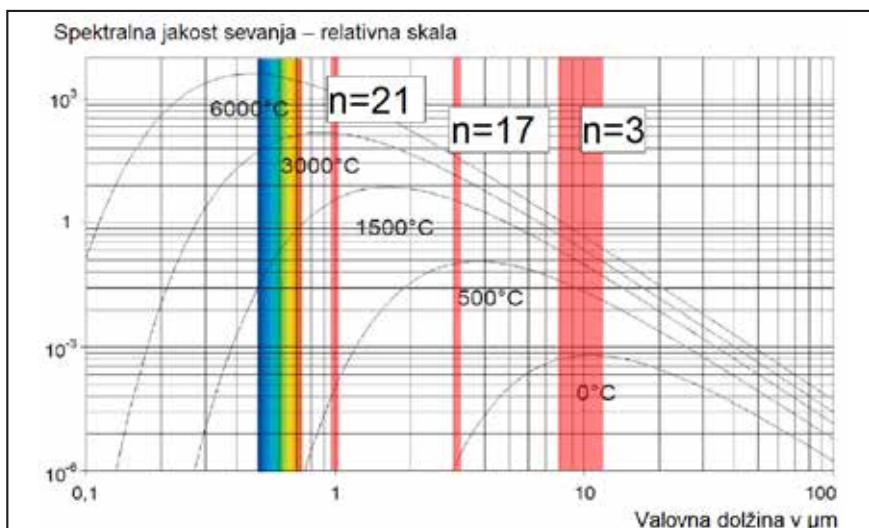
$$\Delta T_{obj} = \frac{C_1 U^{\frac{1}{n}-1}}{n} \Delta U \quad \text{in:} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta T_{obj}}{T_{obj}} = \frac{C_1 U^{\frac{1}{n}-1} \Delta U}{n C_1 U^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{n} \frac{\Delta U}{U} \quad (4)$$

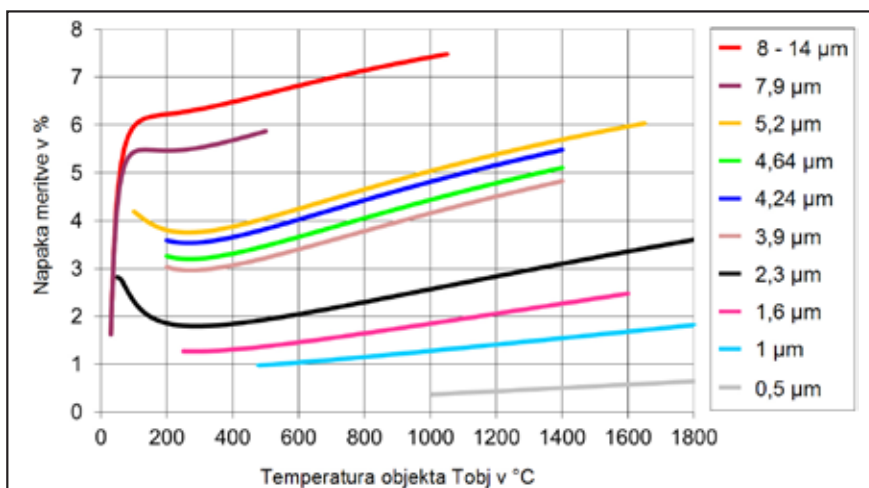
Enačbo (4) lahko izrazimo tudi z emitivnostjo:

$$\frac{\Delta T_{obj}}{T_{obj}} = \frac{1}{n} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad \text{oz.} \quad \frac{\Delta T_{obj}}{\Delta \varepsilon} = \frac{1}{n} \frac{T_{obj}}{\varepsilon} \quad (5)$$

Kar pomeni, da ima sprememba emitivnosti ε , ki proporcionalno vpliva na odziv detektorja U , za faktor n manjši vpliv na izračunano temperaturo objekta T_{obj} . Večji, kot je n



Slika 8. Če želimo čim večjo potenco n , ki zagotavlja manjšo odvisnost od emisivnosti merjenca in prepustnosti atmosfere, moramo izbrati termometer, ki deluje pri čim krajši valovni dolžini [1]



Slika 9. Napaka meritve zaradi 10-odstotne napačne ocene emisivnosti merjenca [6]

, manj bo meritev odvisna od emitivnosti. Za faktor n je manjši tudi vpliv prepustnosti atmosfere.

Potenca n je določena z izrazom [4]:

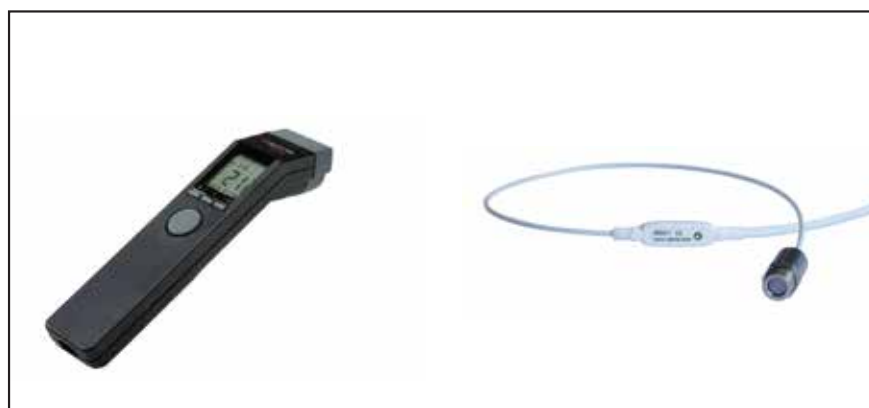
$$n = \frac{C_2}{\lambda_e T_{obj}} = \frac{14388}{\lambda_e T_{obj}} \quad (6)$$

C_2 druga radiacijska konstanta, ki je enaka $1,4388 \cdot 10^{-2}$ mK

λ_e efektivno valovno območje (območje merjenja) v μm

Na *sliki 9* je prikazana napaka meritve v procentih, ki jo naredimo v primeru 10-odstotne napačne ocene za emisivnost merjenca. Višina napake je odvisna od valovne dolžine in temperature merjenca.

Za merjenje nizkih temperatur nimamo velike izbire. Uporabiti moramo termometer, ki deluje v območju 8 do 14 μm , kjer je napaka največja. Nad



Slika 10. Večina ročnih termometrov meri v širokem pasu valovnih dolžin 8 do 14 μm , kjer je napaka meritve večja. Miniaturni termometer na desni, ki deluje pri 2,3 μm , meri že od 50 °C naprej in je precej manj odvisen od emisivnosti [1].

50 °C lahko uporabimo termometer, ki deluje pri 2,3 μm in ima zato trikrat manjšo procentualno napako.

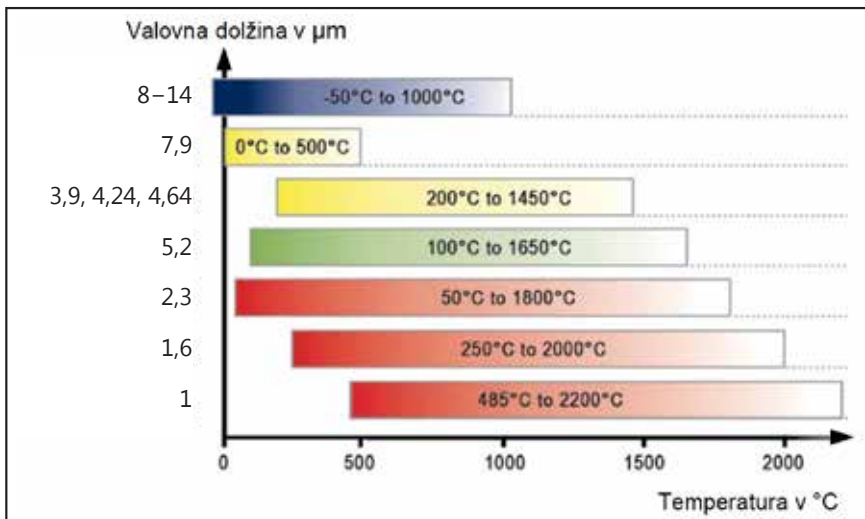
Slika 11 prikazuje merilna območja, ki jih pokrivajo termometri, ki zaznavajo sevanje pri navedenih valovnih dolžinah.

6 Zaključek

Članek opisuje vzroke, zakaj je ozkopasovni IR-termometer boljše izbira glede na širokopasovni. Atmosfera ima na meritve pod 8 μm velik vpliv. Potenca n v odzivu IR-termometra določa, kakšen vpliv na meritev bosta imeli emisivnost in prepustnost atmosfere. Faktor emisivnosti, ki je za posamezen material naveden v raznih tabelah, je samo prvi del zgodbe. Gladka in čista ali pa oksidirana, mastna, umazana, prašna in geometrijsko razgibana površina pa je drugi del, ki določa dejansko sposobnost sevanja površine ali emitivnost. Da zmanjšamo napako meritve, če je le mogoče, uporabimo IR-termometer, ki meri pri krajših valovnih dolžinah.

Viri

- [1] Product Overview (<http://www.optris.com/portable-thermometers>).
- [2] Pyrometerhandbook (<http://lumasenseinc.com/EN/solutions/techoverview/irtemp/>).



Slika 11. Izbira termometra je odvisna od želenega merilnega območja [1]

[3] Krzysztof Chrzanowski: NON-CONTACT THERMOMETRY Measurement Errors, ISBN 83-904273-5-5.

[4] The response of infrared thermometers to radiation 1-800-631-0176 (http://www.m-r-c.co.il/Media/Doc/TechnicalInformation/Temp_Measuring10.pdf).

[5] Težak, B.: Kako izbrati infrardeči termometer, Ventil, november 18/2012/5, str.: 404-407.

[6] Non-contact temperature measurement on metal surfaces via infrared (<http://www.optris.com/temperature-measurement-metal>).

How to choose an infrared thermometer? Part 2

Abstract: In addition to commonly used handheld IR thermometers, operating mostly in the wavelength range of 8 to 10 μm is a series of stationary industrial infrared thermometers, operating at different wavelengths and suitable for different applications. This paper describes how the measurement accuracy depends on wavelength range.

Keywords: infrared thermometer, infrared temperature measurement.

JAKŠA
MAGNETNI VENTILI

od 1965

- vrhunška kakovost izdelkov in storitev
- zelo kratki dobavni roki
- strokovno svetovanje pri izbiri
- izdelava po posebnih zahtevah
- širok proizvodni program
- celoten program na internetu



www.jaksa.si



Jakša d.o.o., Šlandrova 8, 1231 Ljubljana

T (0)1 53 73 066, F (0)1 53 73 067, E info@jaksa.si