

I. Salopek Čubrić, Z. Skenderi, B. Mijović\*

## PRIMJENA TERMOGRAFIJE I SUBJEKTIVNOG ISPITIVANJA PRI EVALUACIJI UDOBNOSTI

UDK 620.179.1:687.17]:331.45/48

PRIMLJENO: 23.4.2009.

PRIHVAĆENO: 15.5.2009.

**SAŽETAK:** Rad prikazuje široke mogućnosti primjene infracrvene termografije u različitim područjima ljudske djelatnosti. U eksperimentalnom dijelu rada izvršeno je ispitivanje udobnosti nošenja odjevnog predmeta u kojem su ocjenjivači davali ocjene vezane uz vlažnost, toplinu i ukupnu udobnost prije umjerenog rada i nakon njega. Eksperiment je proveden pri ovim temperaturama:  $23\pm 1$  °C,  $26\pm 1$  °C,  $29\pm 1$  °C i  $32\pm 1$  °C i konstantnoj relativnoj vlažnosti zraka  $67\pm 3\%$ . Za određivanje zona pojačanog znojenja tijela upotrijebljene su fotografije ispitanika snimljene nakon izvršenog rada. Uočene zone uspoređene su s termografskim snimkama.

Iz rezultata subjektivnog ocjenjivanja topline, vlažnosti i udobnosti u tri uvjeta okoline vidljivo je smanjenje osjećaja udobnosti i povećanje osjećaja vlažnosti i topline s porastom temperature. Pri temperaturi 32 °C apsorpcija znoja u materijalu trostruko je veća od apsorpcije na temperaturi 23 °C. Uočene su i znatne razlike između intenziteta znojenja muških i ženskih ispitanika, pa je tako pri temperaturi 32 °C apsorpcija znoja kod muških ispitanika 2,3 puta veća nego kod ženskih. Usporedbom područja na kojima je vidljivo nakupljanje znoja na majici s termografskom snimkom uočava se u tim zonama promjena temperature.

**Ključne riječi:** infracrvena termografija (ICT), udobnost, subjektivna ispitivanja, tekstilni plošni proizvodi

### UVOD

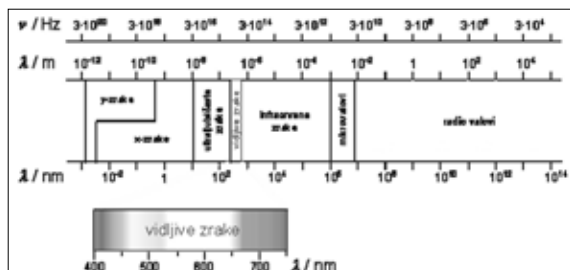
Tijela neprekidno emitiraju elektromagnetsko zračenje ako im je temperatura veća od apsolutne nule (0 °K, -273,15 °C). Navedeno svojstvo iskorišteno je kod termografije – beskontaktna metoda mjerenja temperature površine nekog tijela (Pašagić, 2009.). Bazično načelo mjerenja temperature je kvantificiranje infracrvenog zračenja (IC) s površine mjernog objekta. Razina temperature i njezine raspodjele daju na indirek-

tan način informacije stanja površine i strukture objekta koji su određeni vrstom tvari i njegovim stanjem. Opće je poznato da elektromagnetsko zračenje karakterizira njegova dualnost, tj. njegovo ponašanje kao vala kada se prenosi kroz prostor ili kao čestice pri interakciji s tvari. Infracrveno zračenje pripada toplinskom području elektromagnetskog spektra zračenja čije su valne dužine u području od 0,1 do 100 mm (slika 1).

U području toplinskog zračenja je i vidljivi dio spektra elektromagnetskog zračenja čije je područje valnih dužina 0,4 do 0,7 mm. Valna dužina IC zračenja općenito je podijeljena na ova područja:

\*Mr. sc. Ivana Salopek Čubrić (ivana.salopek@ttf.hr), prof. dr. sc. Zenun Skenderi, prof. dr. sc. Budimir Mijović, Tekstilno-tehnološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Baruna Filipovića 28a, 10000 Zagreb.

- kratkovalno infracrveno, valne dužine (0,7-1) do 5  $\mu\text{m}$
- srednjovalno infracrveno, valne dužine 5 do (25-40)  $\mu\text{m}$
- dugovalno infracrveno, valne dužine (25-40) do (200-350)  $\mu\text{m}$ .



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja  
Figure 1. Spectrum of electromagnetic radiation

Infracrvene kamere detektiraju toplinu uzorka u infracrvenom spektru elektromagnetskog zračenja valnih dužina od 1 do 100 mm (FLIR Systems, 2005.).

Načelo rada termografske kamere prikazano je na slici 2. Mjerno osjetilo (IC leće/detektor) visoke rezolucije (640 x 480 točaka) mjeri količinu energije koja dolazi na njegovu površinu s promatranog tijela. Ova energija jednaka je zbroju energije zračenja od promatranog tijela (proporcionalna vlastitoj energiji tijela) i energije koja dolazi od energije okoline refleksijom na objektu. U kameri se, pored osjetila, nalazi elektronička jedinica optike – fleksibilni međusklop s pretvornikom električnih u videosignale, te zaslon kamere (slika 2). Računalo obrađuje primljene signale s kartice i na zaslonu prikazuje IC zapis koji se naziva termogram.

Infracrvena kamera ima integriranu vizualnu kameru visoke rezolucije. U ovisnosti o valnoj duljini IC spektra, leće se proizvode iz različ-

tih vrsta tvari kao što su germanij, cink selenid, cink sulfid, safir, silikon itd. (Švaić i sur., 2009.). Mjerna osjetljivost suvremenih kamera je <45 mK, a točnost visoka ( $\pm 1\%$ ). Opremljene su USB (Universal Serial Bus) i Fireware konektorima i GPS (Global Positioning System) sustavom.



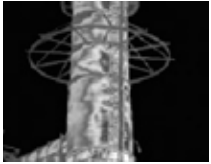
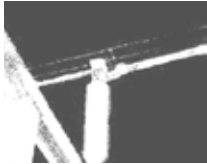

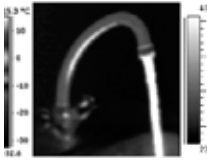

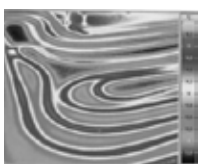








Slika 2. Načelo rada termovizijske kamere  
Figure 2. Operating principle of thermovision camera

Određivanje prave vrijednosti temperature promatranog tijela temelji se na unosu podataka u računalni program kamere prije mjerenja, i to: temperaturu i relativnu vlažnost zraka, temperaturu objekata okoline, udaljenost mjernog osjetila (kamere) od tijela i emisijska svojstva površine tijela.

## PODRUČJA PRIMJENE

Područja primjene termografije vrlo su široka. Najraširenija je primjena u ovim područjima ljudske djelatnosti: elektroenergetika, graditeljstvo, strojarstvo, promet, biomedicina, veterina, zaštita građana i tekstilna tehnologija (Tablica 1); (BVBS, 2009., TCI, 2009., FAS, 2009., NDT, 2009., HUIT, 2009., Thermografie, 2009.).

**Tablica 1. Područja primjene termografije****Table 1. Field applications of thermography**

PRIMJENA	PRIMJERI	
<b>ELEKTROENERGETIKA</b> - inspekcija dalekovoda, inspekcija transformatora i transformatorskih stanica, inspekcija elektroenergetskih postrojenja.		
<b>GRADITELJSTVO</b> - inspekcija mostova i cesta, inspekcija krovova i pročelja, kontrola izolacijskih i drugih svojstava građevina, kontrola instalacija.		
<b>STROJARSTVO</b> - inspekcija turbina, motora i pumpi, inspekcija kompresora, inspekcija toplinskih postrojenja, inspekcija plinovoda.		
<b>PROMET (zračni, vodeni i cestovni)</b> - navigacija, kontrola prometa, sigurnost vozača, kontrola svojstava prijevoznih sredstava.		
<b>BIOMEDICINA I VETERINA</b> - zaštita zdravlja (npr. promatranje promjena općeg zdravlja, zacjeljivanja rana, detekcija raka), proučavanje života divljih životinja, zdravlje životinja.		
<b>ZAŠTITA GRAĐANA (vojska, policija, GSS)</b> - lociranje osoba u bijegu i žrtava, spašavanje osoba, detekcija žarišta, osobna zaštita.		
<b>TEKSTILNA TEHNOLOGIJA</b> - udobnost u različitim uvjetima okoline, izolacijska svojstva odjeće i obuće, zaštitna odjeća i obuća pri ekstremnim uvjetima.		

### Primjena IC termografije u području tekstilnog inženjerstva

U području tekstilnog inženjerstva primjena termografije najraširenija je pri ispitivanju izola-

cijskih svojstava odjeće. Metoda služi za dobivanje uvida u distribuciju temperature na površini kože u različitim uvjetima okoline i u različitim odjevnim kompletima. Kako je temperatura kože jedan od bitnih pokazatelja izmjene topline iz-

među tijela i okoline, distribucija temperature na koži bitan je čimbenik za evaluaciju toplinske udobnosti. Pritom se u prvom redu ispituje odjeća koja se nosi pri ekstremno niskim i visokim temperaturama, kao što su zaštitna odjeća (primjerice vatrogasna odjeća) i odjeća specijalnih namjena (npr. vojne i policijske uniforme). Termografija, također, služi i za evaluaciju svojstava odjeće za osobnu uporabu (*Mijović i sur., 2008., 2009.*). Pokušalo se da se navedena metoda iskoristi za evaluaciju pristalosti odjeće i pritiska odjeće na tijelo i utjecaja aktivnosti različitog intenziteta na distribuciju temperature (*Choi i sur., 2008.*). Na području ispitivanja plošnih proizvoda termografija služi za ocjenu oštećenja tekstila i elektrokonduktivnih tkanina (*Banaszczyk i sur., 2008.*) i dr.

Isparavanje znoja je glavni mehanizam hlađenja tijela u toplijim uvjetima okoline. U dijelu objavljenih studija primijenjene su različite metode kako bi se kvantificirala količina znoja koja se izlučuje (*Havenith i sur., 2008., Machado-Moreira i sur., 2008.*) ili utjecaj aktivnosti na promjenu intenziteta znojenja.

U ovom je radu prikazano istraživanje u kojem metoda termografskog mjerenja služi za određivanje područja pojačanog znojenja ispitanika. Osim metode termografije, u istraživanju je primijenjena metoda subjektivnog ocjenjivanja te analitička metoda mjerenja promjene mase uzoraka.

## EKSPERIMENT

Za potrebe ispitivanja proizvedeni su pamučni pleteni plošni proizvodi i iz njih izrađene majice kratkih rukava prema tjelesnim mjerama ispitanika. Također su oblikovani evaluacijski upitnici za uporabu tijekom subjektivnog ocjenjivanja.

Evaluacijski upitnici uključuju tri skale, i to:

- skalu udobnosti
- skalu topline i
- skalu vlažnosti.

Formirane skale su simetrične i sastoje od četiri stupnja, a ocjene koje se u svakoj skali daju su u rasponu od 1 do 4 (slika 3).

Udobno 1	Manje udobno 2	Neudobno 3	Vrlo neudobno 4
a)			
Toplo 1	Toplije 2	Hladnije 3	Hladno 4
b)			
Sušo 1	Vlažnije 2	Vlažno 3	Vrlo vlažno 4
c)			

Slika 3. Subjektivne skale: a) skala udobnosti, b) skala topline, c) skala vlažnosti

Figure 3. Subjective scales: a) comfort scale, b) heat scale, c) humidity scale

U prostoriji u kojoj je izveden eksperiment uspostavljeni su sljedeći uvjeti:  $23 \pm 1$  °C,  $26 \pm 1$  °C,  $29 \pm 1$  °C i  $32 \pm 1$  °C. Relativna vlažnost zraka održavana je konstantnom na  $67 \pm 3\%$ .

Ispitivanje je provedeno u četiri faze:

- pripremna faza
- aklimatizacija
- fizički rad
- odmor.

### Pripremna faza

U ovoj su fazi izmjerene mase majica analitičkom vagom i pripremljena je mjerna oprema – fotografski aparat i IC kamera. Karakteristike kamere su ove:

- tip: Flir P65,
- temperaturna osjetljivost:  $0,08$  °C at  $30$  °C,
- detektor: Focal Plane Array (FPA),
- raspon rezolucije:  $7,5$  to  $13$   $\mu\text{m}$ .

Ispitanici (4 muškarca i 4 žene) upoznati su s ciljevima i protokolom eksperimenta, a svaki je ispitanik ispunio medicinski upitnik. U upitniku su postavljena pitanja vezana za opće zdravlje ispitanika i eventualne zdravstvene probleme koji bi predstavljali prepreke sudjelovanju u eksperimentu. Ispitanicima su potom podijeljene majice.

## Aklimatizacija

U fazi aklimatizacije ispitanici su smješteni u prostor u kojem se izvodi ispitivanje s uspostavljenim uvjetima temperature i relativne vlažnosti zraka kako je prethodno definirano.

Tijekom aklimatizacije ispitanici su popunili evaluacijski obrazac u kojem su dali svoje ocjene trenutnog osjećaja topline, vlažnosti i udobnosti.

## Fizički rad

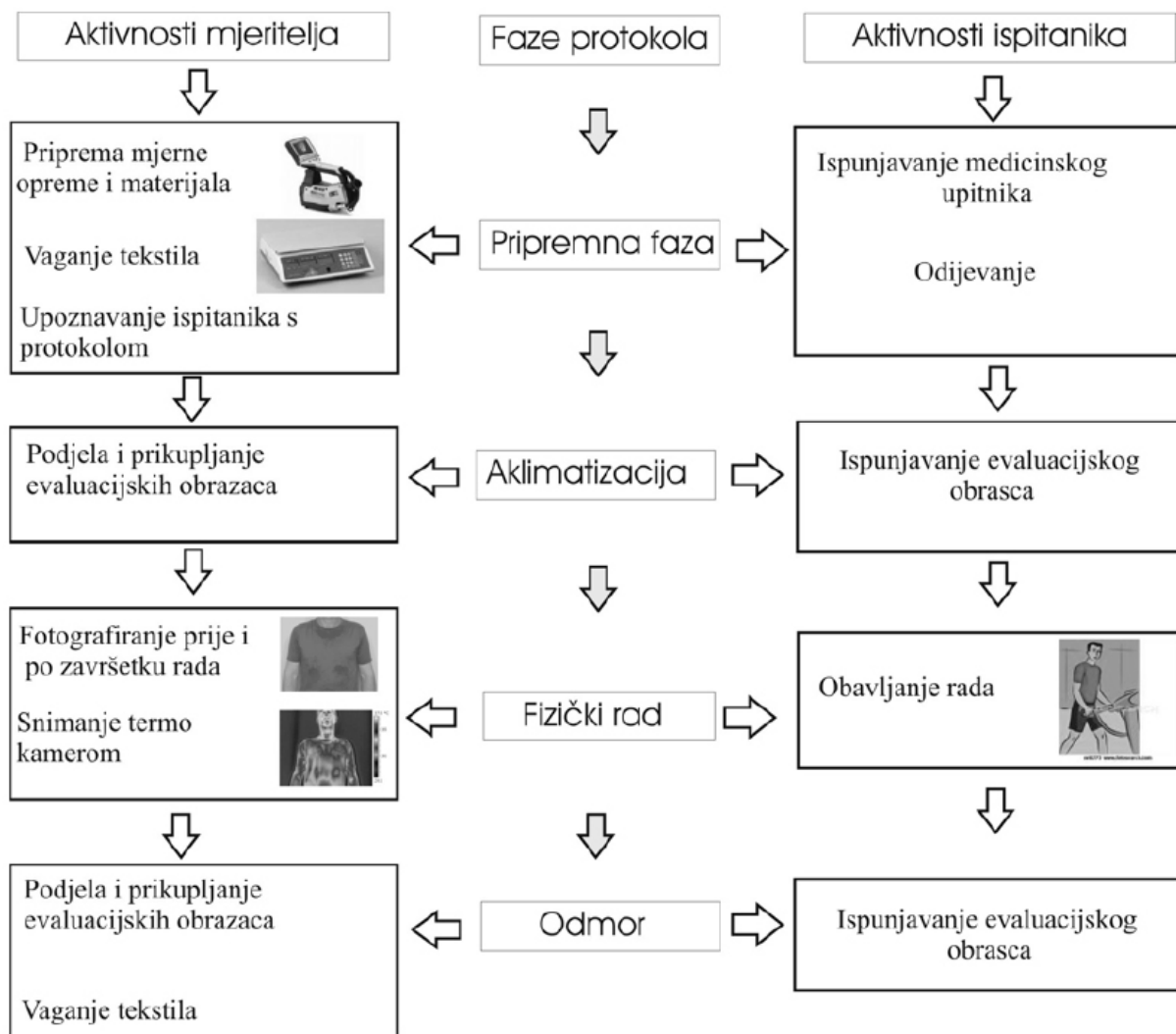
Ispitanici su obavljali fizički rad umjerenog intenziteta pri kojem su podizali i prenosili teret.

Prije početka rada i po završetku svaki je ispitanik snimljen fotografskim aparatom i IC kamerom.

## Odmor

Po završetku fizičkog rada, u fazi odmora, ispitanici su skinuli majice koje su odmah vage na analitičkoj vagi, a zatim su ponovo ispunili evaluacijski upitnik.

Opisani protokol ispitivanja prikazan je na slici 4.



Slika 4. Protokol ispitivanja  
Figure 4. Experiment protocol

## REZULTATI I DISKUSIJA

U Tablici 2 prikazani su rezultati subjektivnog ocjenjivanja topline, vlažnosti i udobnosti u tri uvjeta okoline ( $23\pm 1$  °C,  $26\pm 1$  °C,  $29\pm 1$  °C). Rezultati su odvojeno prikazani za muške (M) i ženske (Ž) ispitanike i to za fazu I (prije početka rada) i fazu II (po završetku rada).

**Tablica 2. Rezultati subjektivnog ispitivanja**

**Table 2. Results of subjective investigation**

Ispitanici	Ocjena					
	Udobnost		Toplina		Vlažnost	
$23\pm 1$ °C						
	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II
M	1	2	2-3	2	1	1-2
Ž	1	1	3	2	1	1
$26\pm 1$ °C						
	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II
M	1	2-3	1-2	1-2	1	2
Ž	1	2	2	2	1	1-2
$29\pm 1$ °C						
	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II
M	1	2-3	1	1	2	3-4
Ž	1	2-3	1-2	1	2	3
$32\pm 1$ °C						
	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II
M	1-2	3	1	1	3	4
Ž	1	3	1	1	2	3

Iz ocjena prikazanih u Tablici 2 vidljivo je smanjenje osjećaja udobnosti i povećanje osjećaja vlažnosti i topline s porastom temperature. Najviša ocjena udobnosti je 3, što odgovara terminu „neudobno“. Najviše ocjene vlažnosti (maksimalna ocjena 4) dali su muški ispitanici u uvjetima  $29\pm 1$  °C i  $32\pm 1$  °C. Vidljivo je kako su u fazi II muški ispitanici u svim navedenim temperaturnim uvjetima dali više ocjene od ženskih ispitanika.

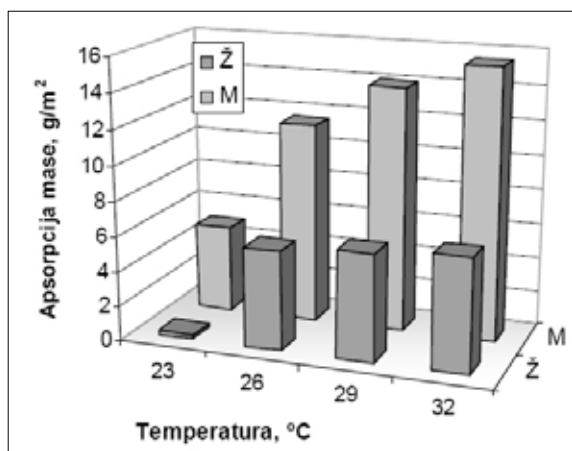
Apsorpcija znoja za muške i ženske ispitanike u različitim uvjetima okoline prikazana je na slici 5.

Prema očekivanju, zabilježeno je povećanje apsorpcije mase s povišenjem temperature. Tako je apsorpcija izmjerena na temperaturi 32 °C trostruko veća od apsorpcije pri temperaturi 23 °C.

Uočene su znatnije razlike između apsorpcija ženskih i muških ispitanika. Pri temperaturi 32 °C apsorpcija je kod muških ispitanika 2,3 puta veća nego kod ženskih. Također je moguće vi-

djeti kako kod ženskih ispitanika nema znatnijih razlika apsorpcije pri temperaturama 26 °C, 29 °C i 32 °C, što kod muških ispitanika nije slučaj.

Na slikama 6. i 7. dane su fotografija i termografska snimka ispitanika koje su snimljene neposredno nakon završetka fizičkog rada. Usporede li se područja na slici 6. na kojima je vidljivo nakupljanje znoja na majici s termografskom snimkom na slici 7., uočava se da je u navedenim zonama prisutna promjena temperature. Uzima se da je uočena promjena temperature povezana s povećanjem količine znoja na koži koji hladi tijelo.



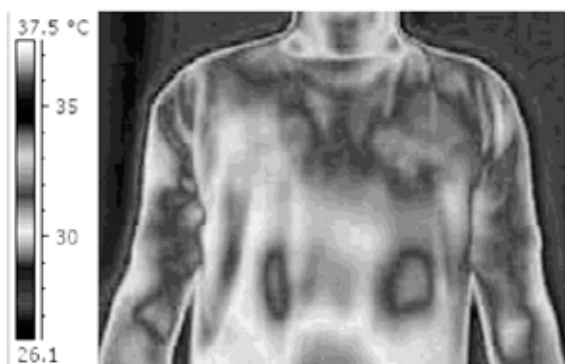
Slika 5. Apsorpcija mase na tekstu

Figure 5. Mass absorption on textile



Slika 6. Fotografija ispitanika

Figure 6. Photograph of subject



Slika 7. Termografska snimka ispitanika

Figure 7. Thermogram of subject

## LITERATURA

Banaszczyk, J., Anca, A., De Mey, G.: Infrared thermography of electroconductive woven textile, U: *Zbornik 9. konferencije o infracrvenoj termografiji*, Technical University of Lodz, Krakov, 2008.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, dostupno na: <http://www.bmvbs.de/>, posjećeno: 15. travnja 2009.

Choi, H.Y., Lee, J.S.: Quantitative thermographic analysis method for evaluating the thermal properties of PET irradiated by ultra-violet, *Fibres and Polymers*, 9, 2008., 3, 355-359.

Federation of American Scientists, dostupno na: <http://www.fas.org/>, posjećeno: 15. travnja 2009.

FLIR Systems: *ThermaCAM™ P65*, upute za korištenje, 2005.

Havenith, G., Fogarty, A., Bartlett, R., Smith, C., Ventenat, V.: Male and female upper body sweat distribution during running measured with technical absorbents, *European Journal of Applied Physiology*, 104, 2008., 2, 245-256.

Hrvatska udruga za infracrvenu termografiju, dostupno na: <http://www.huict.hr/>, posjećeno: 15. travnja 2009.

Kemijско-tehnološki fakultet: Rječnik kemijskih pojmova, dostupno na <http://www.ktf-split.hr/>, posjećeno: 15. travnja 2009.

Machado-Moreira, C. A., Wilmink, F., Meijer, A., Mekjavic, I. B.: Local differences in sweat secretion from the head during rest and exercise in the heat, *European Journal of Applied Physiology*, 104, 2008., 2, 257-265.

Mijović, B., Skenderi, Z., Salopek, I.: Investigation of evaporation through clothing using the thermovision camera, U: *Zbornik 2. međunarodne konferencije „Tekstil budućnosti“*, University Gent, Kotrijk, 2008.

Mijović, B., Salopek, I., Skenderi, Z.: Measurement of thermal parameters of skin-fabric-environment, *Periodicum Bilogorum* (u tisku).

Mijović, B., Skenderi, Z., Salopek, I.: Comparison of Subjective and Objective Measurement of Sweat Transfer Rate, *Collegium Antropologicum*, 33, 2009., 2, 315-320.

*NDT Database & Journal*, dostupno na: <http://www.ndt.net>, posjećeno: 15. travnja 2009.

Pašagić, V.: Primjena termografije u građevinarstvu, *Građevinar*, 60, 2009., 12, 1055-1064.

Švaić, S., Boras, I.: *Infracrvena termografija*, dostupno na <http://www.fsb.hr>, posjećeno: 14. travnja 2009.

*Technologies Consulting International*, dostupno na: <http://www.tciintl.com>, posjećeno: 15. travnja 2009.

*Thermografie*, dostupno na: <http://www.radio101.de/>, posjećeno: 15. travnja 2009.

### **INFRARED THERMOGRAPHY AND ITS APPLICATION IN WORK ENVIRONMENT**

*SUMMARY: The paper presents wide applications of infrared thermography in different fields of human activities. The experimental part consists of investigation of garment wear comfort, where the subjects were asked to grade humidity, heat and comfort before and after moderate work activity. The experiment was carried out under the following temperatures:  $23\pm 1$  °C,  $26\pm 1$  °C,  $29\pm 1$  °C and  $32\pm 1$  °C, and with a relative air humidity of  $67\pm 3\%$ . The subjects were photographed after work in order to determine areas of intense sweating, which were then compared to the thermograms.*

*The results obtained by the subjective evaluation of heat, humidity and comfort in three different environments show that increases in temperature diminish the feeling of comfort while enhancing the sensation of heat and humidity. Sweat absorption in garment material at 32 °C was three times bigger than the one at 23 °C. Significant differences between the intensity of male and female sweating were also noted. At 32 °C the absorption measured in male subjects was 2.3 times bigger than the absorption measured in female subjects. The comparison of thermogram values with areas of visible sweat accumulation indicates changes of body temperature in these areas.*

**Key words:** *infrared thermography (IRT), comfort, subjective investigation, textile fabric*

*Original scientific paper*

*Received: 2009-04-23*

*Accepted: 2009-05-15*