

Mogućnosti primjene termografije u hidrotérmičkoj obradi drva

Possibilities for Thermography Application in Hydrothermal Wood Processing

Pregledni rad • Review paper

Prispjelo – received: 7. 3. 2012.

Prihvaćeno – accepted: 15. 11. 2012.

UDK: 630*847.23

doi:10.5552/drind.2012.1209

SAŽETAK • U ovom je radu na temelju dosadašnjih istraživanja dan pregled mogućnosti primjene IC termografije kako u energetske ispitivanjima hidrotérmičkih procesa, tako i u nedestruktivnom ispitivanju drva. Time je ustanovljeno polazište za buduća istraživanja i praktičnu primjenu pri karakterizaciji toplinskih svojstava različitih vrsta drva. Prikazani su eksperimentalni rezultati razmatranja prolaska topline kroz drvo, a primjenom IC termografije omogućeno je otkrivanje grešaka u strukturi materijala poput udubina, truleži i, za proces sušenja najvažnijih, pukotina. Jedan od bitnih ciljeva jest usmjeravanje budućih istraživanja na karakterizaciju toplinskih svojstava domaćih vrsta drva. Drugo moguće područje jest primjena u energetske ispitivanjima u daljnjemu laboratorijskom i industrijskom praćenju hidrotérmičkih procesa.

Ključne riječi: IC termografija, svojstva drva, hidrotérmička obrada

ABSTRACT • This paper gives an overview of possibilities for using IR thermography method. There are two main directions for further research: energy analysis of hydrothermal process and non-destructive evaluation of wood, especially the determination of thermal properties of wood. In this way the starting point has been established for further research and practical application of this method in wood industry. The experimental data of heat flux in wood have been analyzed, and this method can be used for defects detection in material structure, particularly holes, rot and drying cracks. One of the most important future aims is the characterization and research of thermal properties of domestic wood species.

Key words: IR thermography, wood thermal properties, hydrothermal processing

1. UVOD 1 INTRODUCTION

Infracrvena (IC) termografija beskontaktna je metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela. Temelji se na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s promatrane površine. Rezultat ter-

mografskog mjerenja jest termogram, koji u sivome ili nekom spektru boja daje sliku temperaturne raspodjele na površini promatranog objekta. Temperaturna raspodjela posredno daje informacije o različitim stanjima same površine promatranog objekta.

Za pravilno razumijevanje termografskog mjerenja i odgovarajućeg termograma bitna su obilježja

¹ Autori su, redom, izvanredni profesor, izvanredni profesor, docentica, asistent i student Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska.

¹ Authors are associate professor, associate professor, assistant professor, assistant and student at Faculty of Forestry, University of Zagreb, Croatia.

promatranog tijela s obzirom na dolazno zračenje kao i na zračenje koje tijelo emitira u prostor (faktori apsorpcije, refleksije, dijatermije i emisije).

Infracrvena termografija je metoda upotrebe infracrvene termovizijske kamere za prikazivanje i mjerenje toplinske energije koju zrači neki objekt. Zračenje koje dolazi na površinu realnog tijela djelomično se apsorbira, djelomično reflektira, a djelomično ga to tijelo propušta. Omjer između apsorbiranoga i prispjelog zračenja na površinu tijela naziva se faktorom apsorpcije (a), a omjer između reflektiranoga i prispjelog zračenja – faktorom refleksije (r). Većina je inženjerski zanimljivih površina nepropusna (osim nekih materijala kao što su staklo i plastični filmovi) te se cjelokupno dospjelo zračenje na tim površinama djelomično apsorbira, a djelomično reflektira (Andrassy i sur., 2008).

Udio dospjelog zračenja koji će se apsorbirati, odnosno reflektirati ovisi o materijalu i stanju površine te o temperaturi, valnoj duljini dospjelog zračenja i o kutu upada zračenja, a nije zanemariva ni ovisnost o temperaturi zraka. Za inženjersku su primjenu prihvatljivi materijali s prosječnim vrijednostima faktora apsorpcije i faktora refleksije. Zračenje realnih tijela znatno odstupa od zračenja crnog tijela, te je raspodjela intenziteta zračenja prema spektru valnih duljina drugačija.

Netar objekta koji se mora pravilno odrediti jest emisivnost, koja označava mjeru količine zračenja emitiranoga iz objekta u usporedbi sa zračenjem iz savršeno crnog tijela jednake temperature. Faktor emisije (ε) definira se kao omjer vlastite emisije realnog tijela pri određenoj temperaturi i vlastite emisije crnog tijela pri jednakoj temperaturi. Faktor emisije realnih tijela ovisi o temperaturi i stanju površine, te bitno ovisi o kutu otklona od normale na promatranu površinu. Objekt mjerenja, ovisno o materijalu i površinskoj obradi, obično ima faktor emisivnosti od oko 0,1 do 0,95. Faktor emisivnosti polirane površine metala, npr. ogledala, iznosi manje od 0,1, dok, primjerice, oksidirana ili obojena površina ima veći stupanj emisivnosti od polirane površine.

Postoji više čimbenika koji mogu uzrokovati probleme pri mjerenju metodom infracrvene termografije. U osnovne uzroke koji mogu stvoriti takve probleme svrstavaju se udaljenost od kamere do objekta mjerenja, reflektirano zračenje, relativna vlaga, temperatura i brzina strujanja okolnog zraka, količina Sunčeva zračenja, izvedba vanjske optike te prijenos topline.

Uz osnovne, postoje i drugi čimbenici koji mogu rezultirati netočnošću mjerenja poput blizine nekog tijela koje zrači, a ima temperaturu veću od temperature mjerene površine (tzv. reflektirana energija), pa zagrijavanje može ometati rezultate mjerenja. Debljina objektiva na mjernom uređaju može negativno djelovati na mjerenje tako što se određena količina topline koju zrači mjereno tijelo može apsorbirati na objektivu.

S obzirom na to da se stupanj zračenja energije smanjuje s udaljenošću, potrebno je točno odrediti udaljenost između objekta mjerenja i prednje leće objektiva mjernog uređaja. Također treba znati da se uvjeti okoline poput temperature i vlage zraka te udaljenosti od objekta mjerenja uzimaju u obzir radi korekcije jer

se dio zračenja apsorbira u atmosferi između objekta i kamere.

Kada je sadržaj vlage u zraku vrlo visok, udaljenost objekta vrlo velika, a njegova temperatura približno jednaka temperaturi okolnog zraka potrebno je napraviti kompenzaciju temperature atmosfere oko objekta.

Kad je riječ o drvu, problem u dosadašnjim termografskim mjerenjima jest prevelika pojednostavnjenost karakterizacije drva kao materijala te se ono, s obzirom na koeficijent emisivnosti, uglavnom svrstava u samo jednu kategoriju i time se smatra homogenim materijalom.

Da to nije prihvatljivo, pokazuje primjer postojanja gradijenta temperature u drvnom elementu pa toplina prelazi iz područja više temperature prema području niže temperature, ovisno o smjeru drvnih vlakana. Brzina kojom se ta energija prenosi ovisi o svojstvima materijala te o geometrijskom obliku ispitivanoga drvnog uzorka, što se također vrlo često zanemaruje.

Brzina kojom se neko tijelo hladi (po jedinici površine) naziva se totalnom radijacijom, a definirana je zbrojem reflektirane i emitirane energije.

Rasipanje toplinske energije, tj. hlađenje metalnih materijala vrlo je brzo u usporedbi s drvom, u kojemu gdje taj proces teče izuzetno sporo, te se može zaključiti da drvo dulje zadržava toplinu kojoj je bilo izloženo.

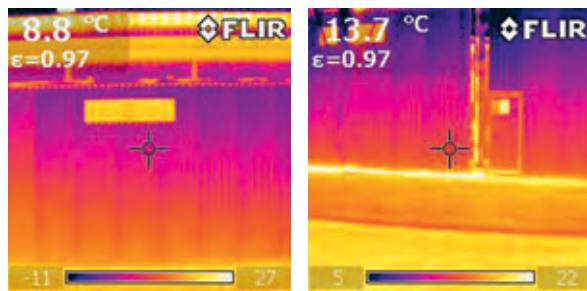
Dva su moguća načina ispitivanja drva metodom termografije – aktivna i pasivna termografija. U aktivnu termografiju pripada proces brzog zagrijavanja drva grijačima, pri čemu temperatura površine brzo raste, dok pasivnoj termografiji pripada proces postupnog zagrijavanja, npr. u proizvodnom procesu, pri kojemu se temperatura nakon napuštanja proizvodnog procesa smanjuje (proces sušenja u sušionicama koji je izuzetno dugotrajan).

U ovom je radu promatrana problematika primjene termografije kao metode analize u drвноj industriji, u kojoj tehnologija IC snimanja može imati veliko područje primjene. Usto, cilj ovog rada jest prikazati dosadašnja istraživanja te navesti mogućnosti primjene IC termografije u drвноj tehnologiji, pri ispitivanju različitih svojstava drva kao materijala, s posebnim osvrtom na primjenu u hidrotermičkoj obradi drva.

Metoda termografije pokazala se pogodnom za:

1. kontrolu postrojenja za hidrotermičku obradu drva (sl. 1, 2. i 3), u kojima se utvrđuju zone povišene temperature i, sukladno tome, neželjeni gubici toplinske energije,
2. ispitivanje svojstava drva,
3. otkrivanje grešaka drva.

Postoje i druge mogućnosti primjene IC ispitivanja, poput istraživanja procesa međusobnog „zavarivanja“ drvnih elemenata pri kojima se razvija toplina (Ganne-Chédeville i sur., 2008). IC metodom mjerena je temperatura između drvnih uzoraka te je ustanovljeno točna količina energije potrebne za uspješno zavarivanje (sljubljanje) drvnih elemenata. IC metodom ispitivanja koristili su se Xu i sur., 1993, za određivanje kvalitete sljepljenosti spojeva.



Slike 1. i 2. Termografska snimka vrata sušionice (strelice označavaju slabo izolirana mjesta)

Figure 1 and 2 Thermographic image of kiln dryer doors (poor insulation marked with arrows)

2 IC TERMOGRAFIJA U KONTROLI POSTROJENJA ZA HIDROTERMIČKU OBRADU DRVA

2. IR THERMOGRAPHY IN THE CONTROL OF PLANTS FOR HYDROTHERMAL WOOD PROCESSING

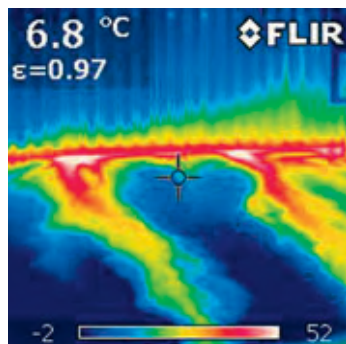
Provedena istraživanja (Pervan, 2009) te analiza rezultata dobivenih tom metodom pokazala su njezinu praktičnu važnost za kontrolu kritičnih mjesta na kojima nastaju toplinski gubici (sl. 1. i 2). Naime, je na temelju snimaka moguće je otkriti svjetlije zone koje označavaju mjesta izlaska zagrijanog zraka zbog lošeg brtvljenja i nedovoljne izolacije postrojenja. Na te spoznaje moguće su pravodobne i ciljane intervencije kojima će se znatno smanjiti toplinski gubici te povećati energetska učinkovitost postrojenja.

Važna mogućnost te metode jest i otkrivanje curenja kondenzata iz parionica (sl. 3), što s vremenom uzrokuje koroziju metalnih dijelova postrojenja (osobito željezne armature), a destruktivno djeluje i na druge materijale od kojih je izgrađeno postrojenje (npr. na betonske temelje).

2.1. Određivanje svojstava drva infracrvenom termografijom

2.1 Determination of wood properties using infrared thermography

U postupku sušenja drvo je, ovisno o primijenjenom režimu sušenja, sklono nastanku pukotina i promjeni oblika. Stoga je metoda IC termografije vrlo pouzdan način potvrde početne kvalitete drva, a služi i kao sredstvo za procjenu smanjenja kvalitete drva tijekom sušenja. Makrodetekcija oštećenja nastalih tijekom sušenja u piljenoj građi dobar je način početnog



Slika 3. Curenje kondenzata iz parionice ispod vrata
Figure 3 Leakage of condensate from steaming chamber

utvrđivanja nastanka greške na određenome mjestu u drvu ili na njegovoj površini. Za takvu svrhu primijenjena metoda mora biti praktična i pouzdana te istovremeno nedestruktivna, jednostavna za korištenje u praksi i široko primjenjiva, što su uvjeti koje IC termografija u potpunosti ispunjava. Za ispravno razumijevanje termografskog mjerenja te naknadnu analizu termograma, osim obilježja promatranog tijela u odnosu prema zračenju koje na nj dolazi i onoga koje to tijelo emitira u prostor, važno je poznavati toplinska svojstva materijala koji se termografski snima i analizira.

Glavna toplinska svojstva drva u termografskim provjerama jesu: specifični toplinski kapacitet (c), toplinska vodljivost (λ) i toplinska difuznost (a). Specifični toplinski kapacitet drva određuje se uz pomoć toplinske energije potrebne za promjenu temperature drva s temperature okoline na neku višu temperaturu i mase drva. Specifični toplinski kapacitet drva neovisan je o vrsti drva i gustoći, ali se razlikuje s obzirom na sadržaj vode. Toplinska vodljivost drva količina je toplinske energije koja u jedinici vremena prolazi kroz drvo određene debljine i površine pri stacionarnoj razlici razlika temperature. Ona varira sa smjerom toplinskog toka, ovisno o smjeru vlakancu, gustoći drva, greškama drva i sadržaju vode u drvu. Toplinska vodljivost drva okomito na vlakanca definirana je (Kollmann i Cote, 1968) za raspone gustoće od 200 do 800 kg/m^3 i pri sadržaju vode od 12 %, što je kasnije primijenjeno za izračunavanje toplinske vodljivosti drva u rasponu od 5 do 35 % sadržaja vode. Ustanovljeno je da suho drvo u smjeru vlakancu provodi toplinu 2,5 puta brže nego okomito na vlakanca. Taj omjer za vlažno drvo iznosi samo 1,5 jer voda u drvu smanjuje tu razliku. Promatramo li samo smjer okomito na vlakanca, drvo zbog sržnih trakova nešto brže provodi toplinu u radijalnome nego u tangencijalnom smjeru, no slojevi gustoga kasnog drva mogu smanjiti ili naglasiti utjecaj sržnih trakova. Odnos radijalne prema tangencijalnoj vodljivosti iznosi od 0,9 do 1,3, ovisno o veličini i gustoći sržnih trakova te o međusobnom odnosu ranoga i kasnog drva.

Širenje topline u drvu ovisi o difuzivnosti materijala (što je manja volumna masa drva i niži sadržaj vode u njemu, to je veća difuzivnost), stvarnoj promatranom geometriji te početnim i rubnim uvjetima (Kollmann i Cote, 1968).

Analiza utjecaja površinske temperature i gustoće na termografska mjerenja pokazuje da je složenost rješenja (Kollmann i Cote, 1968) vrlo velika, pogotovo ako se uzmu u obzir stvarni rubni uvjeti pri navedenom istraživanju. Temeljeći ga na proračunima koje je obavio Heisler (1947), Gebhart je (1993) dao grafičko rješenje, za ravni površinski sloj drva. Istaknuo je da površinska temperatura drva ne ovisi samo o trajanju zagrijavanja, početnoj temperaturi drva i zraka nego i o toplinskoj vodljivosti drva. Navodi se da toplinska vodljivost i površinska temperatura drva ovise i o gustoći, pogotovo u području dodira drva sa zrakom. Radi potvrde rezultata navedenih razmatranja u vezi s površinskom temperaturom, Tanaka i Divos (2001) proveli su eksperiment na šest skupina uzoraka (šest različitih

vrsta drva), sadržaja vode 12 %, kao predstavnika šest različitih razina gustoće između 265 i 948 kg/m³, pri čemu su uzorci grijani do temperature od 60 °C, a naknadno je termokamerom ispitivan proces njihova hlađenja.

Utvrđeno je da je površinska temperatura funkcija gustoće drva te je taj eksperimentalni rezultat bio u skladu s Heislerovim proračunima. Utvrđen je linearan odnos između gustoće i površinske temperature, pri čemu je vrijeme hlađenja iznosilo više od 20 minuta. Na temelju rezultata ustanovljeno je da je termografijom moguće otkriti postojanje kvrgve u drvu četinjača jer je gustoća kvrgve veća od gustoće okolnog materijala. Osim toga, primjenom termografije moguće je ustanoviti trulež na površini drva s obzirom na to da zaraženo drvo ima manju gustoću od nezaraženoga. Kvrgva u drvu listača također se može otkriti, iako nema razlike u gustoći kvrgve i drva, ali je različit smjer njihovih vlaknaca, a time i toplinska difuzivnost.

2.2. Otkrivanje grešaka drva

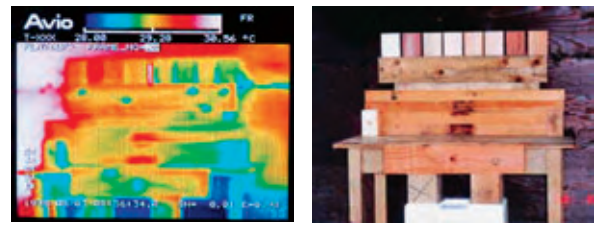
2.2 Detection of wood defects

Primjena IC metode za ispitivanje svojstava drva te za otkrivanje grešaka na drvu ili u njemu vrlo je korisna te je na tim područjima istraživanja ostvaren velik napredak primijenjene IC termografije u drvnoj industriji. Obavljeno je snimanje procesa isušivanja površinskih elemenata različite hrapavosti (Aoi i sur., 1998) te je praćen nastanak određenih vrsta pukotina i raspodjela naprezanja u drvu. Pri tim pokusima u analizi je korišten koeficijent varijacije temperature pri kojemu počinje proces sušenja drva. Rezultati su pokazali da suha mjesta koja su se pojavljivala na površini drvnih elemenata uzrokuju pojavu temperaturnih varijacija na cijeloj površini drvnih elemenata. Na temelju toga zaključeno je da površine kao što je drvo, koje pripadaju grubim površinama, bilježe znatan porast koeficijenta varijacije temperature tijekom sušenja.

Mnoge toplinom uzrokovane greške nastale u preradi drva ne mogu se detektirati ni objasniti termalnom analizom zbog prevelike složenosti, nedostatka vremena ili zbog previsoke cijene. Pri ispitivanju postupka ili materijala IC uređajem promatraju se svojstva materijala s kojim se radi, no zbog slabe definiranosti svojstava drva potrebnih za taj tip mjerenja nastaju poteškoće pri rješavanju problema. Većina proizvođača IC mjernih uređaja svrstava drvo u određenu kategoriju s obzirom na koeficijent emisivnosti, pri čemu se ne provodi razvrstavanje prema vrsti drva, gustoći, površinskoj obradi, sadržaju vode i teksturi. Takvim načinom pojednostavnjivanja u potpunosti se zanemaruje varijabilnost i anizotropnost drva te se drvo mjeri kao homogeni materijal.

U prije spomenutim istraživanjima uzorci drva grijani su na relativno visoku temperaturu (60 °C) te je zatim IC kamerom promatrana prijelazna površinska zona. Tim se načinom drvo izlaze velikim količinama topline, što je vrlo teško primjenjivo na već gotovim građevinskim drvnim konstrukcijama.

Praktičniji način utvrđivanja svojstava drva prikazao je Tanaka (2001) praćenjem dnevnih temperatur-



Slika 4. Termografska (a) i stvarna (b) slika testnih uzoraka postavljenih u vanjskim uvjetima (Tanaka i Divos, 2001)
Figure 4 Thermographic image (a) and real picture (b) of experimental setup (Tanaka and Divos, 2001)

nih razlika kao toplinskim pobuđivačem za utvrđivanje svojstava drva.

Provedeno je cjelodnevno istraživanje promjena i utjecaja dnevnih temperatura na toplinska svojstva drva da bi se ustanovilo nabolje vrijeme za termografsko snimanje. Upotrijebljeno je šest uzoraka drva različite gustoće, uzorak s truleži i uzorak s kvrgom, koji su smješteni na otvorenome. Svakih deset minuta mjerene su temperature zraka i temperature na površini uzorka. Uzorci su smješteni u sjenu, pod krov bez bočnih zidova. Takav način izmjere zahtijeva izuzetno veliku preciznost zbog vrlo malih razlika u temperaturi uzorka i okolnog zraka. Autori su naveli da je osnovna prednost te metode jednostavnost i mogućnost vrlo kvalitetnog prikazivanja i analiziranja svojstava drva.

Osim navedene namjene, termografija se uvelike koristi i u nedestruktivnom testiranju različitih materijala, pri čemu je debljina materijala manja od 10 mm. Osjetljivost tehnike ovisi o debljini uzorka koja se određuje u ovisnosti o mogućnosti propaljivanja materijala i toplinskoj vodljivosti drva. Zbog relativno velikih debljina drva, koje je poznato kao dobar izolator (u istraživanju Tanake i Divosa (2001) drvo bilo debljine 45 mm), i zbog slabe toplinske vodljivosti drva otkrivanje rupa bilo je izrazito zahtjevno.

3. ZAKLJUČAK

3 CONCLUSION

IC termografija korisna je potencijalna metoda za energetska ispitivanja hidrotermičkih procesa, kao i za nedestruktivno ispitivanje drva. Pregledom dijela dosadašnjih istraživanja postavljen je temelj za buduća istraživanja i praktičnu primjenu metode pri karakterizaciji različitih vrsta i svojstava drva. Prikazani su i eksperimentalni rezultati prolaska topline kroz drvo pod utjecajima raznih činitelja kao što su gustoća (s utjecajem na površinsku temperaturu) te vodljivost topline koja je različita u različitim anatomskim smjerovima drvnih vlaknaca. Korištenjem IC termografije omogućeno je otkrivanje grešaka u strukturi materijala poput udubina, truleži i za proces sušenja najvažnijih, pukotina. Drugo moguće područje intenzivne primjene navedene mjerne tehnike jesu energetska ispitivanja u daljnjem laboratorijskom i industrijskom praćenju hidrotermičkih procesa. Jedan od važnijih zadataka jest usmjeravanje budućih istraživanja u karakterizaciji svojstava domaćih vrsta drva prema ovim utjecajnim vrijednostima:

- određivanju točnih koeficijenata emisivnosti drva s obzirom na vrstu, sadržaj vode, gustoću i teksturu,
- određivanju vremena hlađenja (površinske temperature drva) u odnosu na gustoću,
- određivanju koeficijenata prolaska topline u odnosu prema sadržaju vode,
- otkrivanju grešaka sušenja (pukotina) tijekom postupka sušenja,
- otkrivanju devijacija strukture drva i postojanja truleži.

4. LITERATURA 4 REFERENCES

1. Andrassy, M.; Boras, I.; Švaić, S., 2008: Osnove termografije s primjenom. Kigen, Zagreb, 164 str.
2. Aoi, H.; Tsuchimoto, T., Nakajima, S.; Arima, T. 1998: Estimation of the fracture type and observation of strain distribution on knotted wood by infrared image system. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 44(5) pp. 313-319.
3. Ganne-Chédeville, C.; Duchanois, G.; Pizzi, A.; Leban, J. M.; Pichelin, F., 2008: Predicting the Thermal Behaviour of Wood During Linear Welding Using the Finite Element Method. *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 22, no. 12, pp. 1209-1221 <http://dx.doi.org/10.1163/156856108X323688>.
4. Gebhart, B., 1993: *Heat Conduction and Mass Diffusion*, McGraw-Hill, Inc, New York, 634 p.
5. Heisler, M. R., 1947: *Trans. ASME*, 69, 227 p.
6. Meola, C.; Carlomagno, G. M., Giorleo, L., 2004: The use of infrared thermography for materials characterization. *Journal of Materials Processing Technology*. Volumes 155-156, pp. 1132-1137 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.268>.
7. Pervan, S., 2009: Tehnologija obrade drva vodenom parom. Šumarski fakultet, 2009. 166 str.
8. Tanaka, T., 1994: Preparatory Investigation for Thermographic Detection of Biodeteriorated Location in Wood, *Proc. of the Pacific Timber Engineering Conference*, pp. 442-430.
9. Tanaka, T; Divós, F., 2001: Wood inspection by thermography. 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, NDT.net - March, vol. 6. <http://www.ndt.net/article/v06n03/tanaka/tanaka.htm> (Accessed 07.09.2012.)
10. *** 1987: *Non-destructive Testing of Fibre-reinforced Plastics Composites*, Thermal NDT Methods, pp. 105-151, Elsevier Applied Sciences, London.
11. *** 1989: *Concise Encyclopedia of Wood and Wood based Materials*, Thermal properties. Pergamon Press, Oxford. pp. 273-278.

Corresponding address:

Associate Professor STJEPAN PERVAN, Ph.D.

Department for Material Technologies
Faculty of Forestry
University of Zagreb
Svetošimunska 25, p.p. 422
HR-10002 Zagreb, CROATIA
e-mail: pervan@sumfak.hr