

## HEAT TRANSFER COEFFICIENT AND ITS SURFACE FLUX DURING BEECH WOOD DRYING

*In this paper the experimental values of the heat transfer coefficient of beech wood and its relations with surface moisture content were defined. The heat flux was determined by the integral expression of total enthalpy obtained by the temperature and moisture profiles. The determination of the total enthalpy of samples required the consideration of each component of the wood–air–water system.*

*The obtained values of the heat transfer coefficient were: 23 W/(m<sup>2</sup>K); 30 W/(m<sup>2</sup>K) and 34 W/(m<sup>2</sup>K), having in mind the air velocity of: 1 m/s, 2 m/s, and 3 m/s, respectively. Experimentally obtained values were slightly higher than the values obtained by theory of similarity and analogy between heat and mass transfer. The values show agreement with the values of the heat transfer coefficient given in the literature.*

**Key words:** moisture content on wood surface; integral expression; non-dimensional criteria; air velocities

### 1. Uvod

Koeficijent prelaženja toplote i toplotni fluks su značajni pokazatelji intenziteta prenošenja toplote između tela i fluida koji ga opstrujava. Koeficijent prelaženja toplote ne zavisi samo od fizičkih svojstava tela i okoline kako je to smatrao Njutn, već zavisi od čitavog niza faktora kao što su: uzrok i režim strujanja (laminarni ili turbulentni), temperature fluida i njegovih svojstava, oblika i dimenzija opstrujavanog tela.

Koeficijent prelaženja toplote određuje se primenom teorije sličnosti procesa koja sadrži analitičke i eksperimentalne metode istraživanja, a jedna od tih metoda korišćena je u ovom radu.

### 2. Rezultati merenja sa analizom

Za određivanje koeficijenta prelaženja toplote poslužila je relacija data u literaturi (Tremblay et al., 2000):

$$q = \alpha (\bar{T}_s - T_\infty) + (1 - \varepsilon) (r + \gamma \Delta h_s) j, \quad (1)$$

pri čemu je:  $\gamma = 0$  za vlažnost veću od granice higroskopnosti, a  $\gamma = 1$  za vlažnost manju ili jednaku granici higroskopnosti.

Za latentnu toplotu isparavanja  $r$  usvojena je konstantna vrednost od 2500 kJ/kg<sub>v1</sub>. Razlika u specifičnoj entalpiji sorpcije  $\Delta h_s$  uvedena je radi promena faze od čvrstog ka tečnom stanju. Pri vlažnosti većoj od tačke zasićenja vlaknaca  $\gamma = 0$ , zbog hipoteze da se fazni prelazi javljaju samo između tečne i parne faze. S druge strane, za  $\gamma = 1$  za vlažnost manju ili jednaku tački zasićenja vlaknaca i  $\Delta h_s$  povećava se sa smanjenjem vlažnosti.

Korišćenjem formule (1), dobija se izraz za određivanje koeficijenta prelaženja toplote kao:

$$\alpha = q / (\bar{T}_s - T_\infty) - [(1 - \varepsilon) (r + \gamma \Delta h_s) j] / (\bar{T}_s - T_\infty). \quad (2)$$

Za određivanje toplotnog fluksa  $q$ , određivana je entalpija preko profila vlažnosti i temperature. Za profile entalpi-

je dobijene za različite vremenske trenutke, toplotni fluks  $q$  određivan je preko formule:

$$H = \rho_{sd} \Phi_{sd} h_{sd} + \rho_g \Phi_g h_g + \rho_{vlt} \Phi_{vlt} h_{vlt} + \rho_{vv} \Phi_{vv} h_{vv} \quad (3)$$

gde je integral:

dobijen grafičkim integraljenjem na domenu koji odgovara dimenziji uzorka u radijalnom pravcu.

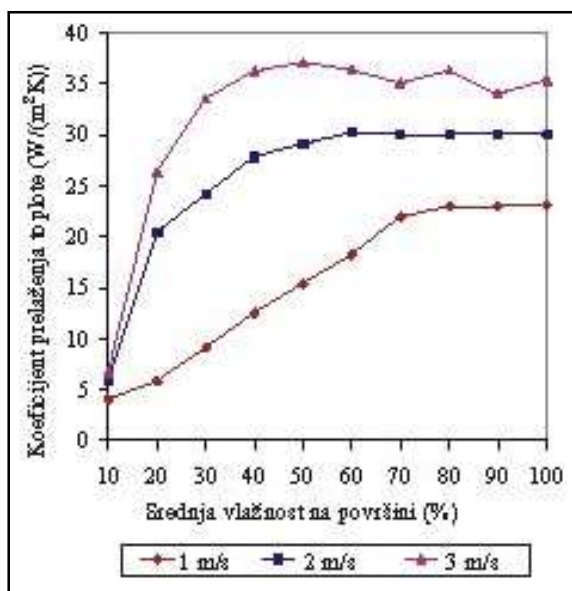
Određivanje entalpije uzoraka zahtevalo je uzimanje u razmatranje svake od komponenata sistema drvo–vazduh–voda:

$$H = \rho_{sd} \Phi_{sd} h_{sd} + \rho_g \Phi_g h_g + \rho_{vlt} \Phi_{vlt} h_{vlt} + \rho_{vv} \Phi_{vv} h_{vv} \quad (4)$$

gde je:

$$\rho_g \Phi_g h_g + \rho_v \Phi_v h_v + \rho_p \Phi_p h_p \quad (5)$$

Rezultati dobijeni za vrednosti koeficijenta prelaženja toplote ( $\alpha$ ) pri različitim brzinama strujanja prikazani su na dijagramu (slika 1). Vrednosti su predstavljene u funkciji srednje vlažnosti na površini uzorka. Pri brzinama strujanja od 1 m/s i 2 m/s ujednačavanje koeficijenta prelaženja toplote ( $\alpha$ ) postignuto je tek pri relativno velikim vrednostima površinske vlažnosti. Ove vrednosti odgovaraju periodu konstatne brzine sušenja. Vrednosti koje se pri tome dobijaju za koeficijent prelaženja toplote su 23 W/(m<sup>2</sup>K) i 30 W/(m<sup>2</sup>K). Blage varijacije koeficijenta prelaženja toplote u ovom periodu, a pri brzinama od 1 m/s i 2 m/s mogu se objasniti malim razlikama temperature na površi drveta od temperature vlažnog termometra. Pri brzini strujanja od 3 m/s, ova razlika postaje značajna i



Slika 1. Koeficijent prelaženja toplote u funkciji površinske srednje vlažnosti pri različitim brzinama strujanja

Tabela 1. Literaturne vrednosti koeficijenta prelaznja toplote

Izvor	Pokretačka sila	Koef. prelaznja [W/(m <sup>2</sup> K)]	Uslovi
Perre et al. (1986)	Sustina para	23	t = 80°C, v = 2 m/s
Kudava et al. (1990)	Potencijal vlage	22,5	t = 60°C
Sutherland et al. (1992)	Sustina para	17	t = 90°C, v = 3 m/s
Stanišić et al. (1986)	–	32	t = 122°C, v = 8 m/s
Bonneau et al. (1993)	Koncentracijska para	33	t = 49°C

zato se postiže samo približno konstantna vrednost koeficijenta prelaznja toplote ( $\alpha$ ). Srednja vrednost toplotnog površinskog fluksa u ovom slučaju iznosi 34 W/(m<sup>2</sup>K). Te vrednosti približno odgovaraju literaturnim vrednostima dobijenim za konstantan period sušenja, iznesenim u tabeli 1.

Koeficijent prelaznja toplote ( $\alpha$ ) povećavao se sa porastom brzine strujanja, što je i logično očekivati. Posle konstantnog perioda sušenja,  $\alpha$  varira u zavisnosti od smanjenja toplotnog fluksa  $q$  i temperature razlike ( $T_s - T_\infty$ ). Koeficijent prelaznja toplote pokazuje tendenciju blagopada sa smanjenjem vlažnosti na površi.

Srednji koeficijent prelaznja toplote ( $\bar{\alpha}$ ) može se odrediti preko formule (Tremblay et al., 2000):

$$Nu = (\bar{\alpha} \cdot d_{ek}) / \lambda_v = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \quad (6)$$

Za koeficijent prelaznja toplote sračunat preko formule (6) dobijaju se vrednosti od 16,8; 25,3 i 30,9 W/(m<sup>2</sup>K), pri brzinama strujanja od 1; 2 i 3 m/s. Ove vrednosti su manje od vrednosti dobijenih eksperimentalnim putem koje su pri istim brzinama strujanja iznosile 23; 30 i 34 W/(m<sup>2</sup>K).

Srednji koeficijent prelaznja toplote ( $\bar{\alpha}$ ), može se dobiti korišćenjem analogije između konvektivnog prenosa toplote i vlage. Uvodeci Luisov (Lewis) broj ( $Le$ ), za vezu između koeficijenta prelaznja toplote ( $\bar{\alpha}$ ) i vlage  $\beta_p$ , dobija se (Incropera et al., 1990):

$$\bar{\alpha} / \beta_p = \rho_v \cdot c_v \cdot Le^{2/3} \quad (7)$$

Za vrednosti koeficijenta prelaznja toplote ( $\bar{\alpha}$ ) iz eksperimenta za vreme konstantnog perioda sušenja, primenom jednačine (7) za  $\beta_p$  dobijaju se vrednosti 0,025; 0,033 i 0,038 m/s pri brzinama strujanja od 1; 2 i 3 m/s. Ove vrednosti su oko 2,5 puta veće od vrednosti dobijenih ekperimentom za  $\beta_p$ : 0,01; 0,013 i 0,016 m/s. Za vrednosti koeficijenta prelaznja toplote ( $\alpha$ ) sračunatih preko Nusseltovog broja (jednačina 6), vrednosti za srednje  $\beta_p$  iz jednačine (7) sračunate preko Šervudovog (Sherwood) broja su: 0,006; 0,013 i 0,022 m/s. Na ovaj način postignuta je približno dobra korelacija između sračunatih i ekperimentalno dobijenih vrednosti koeficijenta prelaznja vlage, a kako ovi računski koriste koeficijent prelaznja toplote prethodno eksperimentalno određen to je još potvrda njegove validnosti. Takođe, prema literaturi (Salin, 1996a, 1996b), primena Luisove analogije nije validna na površini drveta. Salin spominje da je ekperimentalno dobijen koeficijent prelaznja vlage često mnogo manji nego što se to računski korišćenjem analogije može dobiti. Rezultati u ovom radu ne pokazuju veliku razliku između izračunatog i ekperimentalno dobijenog koeficijenta prelaznja vlage. Ako se upotreba bezdimenzionalnih kriterijuma primeni na transport vlage koja ispa-

rava sa slobodne površine, Luisova analogija se može primeniti u periodu konstantne brzine sušenja. Plumb et al. (1984) spominju da se Luisova analogija može koristiti kad je površina vlažna, kao u slučaju isparavanja sa slobodne površine.

Određivanje  $\beta_p$  računskim putem u higroskopnom području primenom Luisove analogije, zahteva upotrebu korekcionih faktora, kako bi se dobijene vrednosti za  $\beta_p$  smanjile.

### 3. Zaključak

Dobijeni koeficijenti prelaznja toplote za različite brzine strujanja agensa sušenja predstavljaju polaznu osnovu zajedno sa već određenim profilima vlažnosti i temperature za simulaciju procesa sušenja. Ove vrednosti kao i vrednosti za koeficijent prelaznja vlage, omogućavaju kvantitativno opisivanje prenosa toplote i vlage na kontaktnoj površini materijala i agensa sušenja, i sastavni su deo matematičkog modela predstavljenog u vidu bilansnih jednačina održanja energije i količine kretanja, kao i graničnih uslova. Rešavanje postavljenog modela u numeričkom obliku omogućava dobijanje raspodele vlažnosti i temperature u sušenom drvetu, a u funkciji parametara agensa sušenja. Na ovaj način mogu se sračunati vlažnosna naprezanja i naponska stanja u sušenom drvetu, tako da se predvidi prelazak na blaži režim prepućanja drveta, pojave skorelosti i koritavosti. To je od posebnog značaja prilikom lepljenja laminata od masivnog drveta u ploče, kako bi se obezbedila hidrotermička stabilnost lepljenih elemenata i na taj način ostvario željeni kvalitet ploče.

Planirano je da se naredna istraživanja sprovedu na: hlastu i belom boru, koji su zajedno sa bukvom najzastupljenije vrste u domaćoj industriji prerade drveta.

#### Oznake

- $c$  (J/(kgK)) – specifičan toplotni kapacitet
- $d_{ek}$  (m) – ekvivalentni prečnik
- $H$  (J/m<sup>3</sup><sub>vd</sub>) – entalpija po jedinici zapremine uzorka drveta
- $h$  (J/kg<sub>vy</sub>) – specifična entalpija sorpcije
- $j$  (kg/(m<sup>2</sup>s)) – površinski protok vlage
- $Nu$  (–) – Nusseltov broj
- $Pr$  (–) – Prandtlov broj
- $Re$  (–) – Reynoldsov broj
- $q$  (W/m<sup>2</sup>) – površinski toplotni fluks
- $r$  (J/kg) – latentna toplota isparavanja
- $T$  (K) – termodinamička temperatura
- $\alpha$  (W/(m<sup>2</sup>K)) – koeficijent prelaznja toplote
- $\beta_p$  (m/s) – koeficijent prelaznja materije (pokretačka sila, masena koncentracija vlage  $\rho_{v1}$ )
- $\varepsilon$  (–) – koeficijent faznog prelaza (odnos difuzivnosti pare prema ukupnoj difuzivnosti vlage)
- $\varphi$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup><sub>vd</sub>) – zapremiski udeo svake komponente
- $\lambda$  (W/(mK)) – toplotna provodnost
- $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) – gustina
- $\tau$  (s) – vreme

## Indeksi

- sd – drveta (suve osnove)  
g – gasovito stanje  
s – na površini  
t – tečno stanje  
v – vazduha  
vl – vlage  
vv – vezane vlage  
∞ – u neporemećenoj struji vlažnog vazduha (agena sušenja).

## Literatura

- [1] **Dedić, A.**, *Modeliranje spregnutog procesa prenosa toplote i materije prilikom konvektivnog sušenja drveta*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2001, 184 str.
- [2] **Incopra, F. P., D. P. De Witt**, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Third edition, John Wiley and Sons, New York, 1990, 919 str.
- [3] **Plumb, O., C. Brown, B. Olmstead**, *Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine*, Wood Science and Technology, br. 18, 1984, str. 187–204.
- [4] **Salin, J-G.**, *Prediction of the heat mass transfer coefficients for the individual boards and board surfaces*, Proceedings of the 5<sup>th</sup> IUFRO Wood Drying Symposium, August 13–17, Quebec City, Canada, 1996a, str. 49–58.
- [5] **Salin, J-G.**, *Mass transfer from wooden surfaces and internal moisture non equilibrium*, Drying Technology, god. 14, br. 10, 1996b, str. 2213–2224.

- [6] **Tremblay, C., A. Cloutier, Y. Fortin**, *Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying*, Wood Science and Technology, br. 34, 2000, str. 253–276.
- [7] **Bonneau, P., J-R. Puiggali**, *Influence of the hardwood-sapwood proportions on the drying kinetics of board*, Wood Sci. Technol., br. 28, 1993, str. 67–85.
- [8] **Irudayaraj, J., K. Haghghi, R. L. Stroshine**, *Non-linear finite element analysis of coupled heat and mass transfer problems with an application to timber drying*, Drying Technology, god. 8, br. 4, 1990, str. 731–749.
- [9] **Perre, P., D. Maillet**, *Drying of softwoods: The interest of a two-dimensional model to simulate anisotropy or to predict degrade*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IUFRO Wood Drying Symposium, July 23–28, Seattle, USA, 1986, str. 226–237.
- [10] **Stanish, M. A., G. S. Schajer, F. Kayihan**, *A mathematical model of drying for hygroscopic porous media*, AIChE J., br. 32, 1986, str. 1301–1311.
- [11] **Sutherland, J.W., I. W. Turner, R. L. Northway**, *A theoretical and experimental investigation of the convective drying of Australian Pinus radiata timber*, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IUFRO Wood Drying Symposium, August 18–21, Vienna, Austria, 1992, str. 49–58.

PROCESNA  
TEHNIKA

# HEMOSORPCIJA SA SPORIM, BRZIM I TRENUTNIM NEPOVRATNIM HEMIJSKIM REAKCIJAMA U TEČNOJ FAZI

Pavle Andrić, dipl. inž. maš.,  
Mašinski fakultet, Beograd

Hemosorpcija je proces prelaska komponenti iz gasne u tečnu fazu, pri čemu se od fizičke apsorpcije razlikuje povećanjem pogonske sile procesa (ili koeficijenta prelaza materije), usled postojanja hemijske reakcije između apsorptiva i hemijski aktivne komponente apsorbenta. U radu je izložen pregled osnovnih jednačina hemosorpcije vezanih za određivanje koeficijenta „ubrzanja”, kojim se uzima u obzir povećanje koeficijenta prelaza materije u odnosu na fizičku apsorpciju. Razmatran je uticaj sporih, brzih i trenutnih nepovratnih hemijskih reakcija u tečnoj fazi na koeficijent ubrzanja, pri čemu se može zaključiti da je pri hemosorpciji sa sporim reakcijama efekat transporta praktično isti kao i pri fizičkoj apsorpciji, dok se kod trenutnih reakcija efekat značajno povećava.

**Ključne reči:** apsorpcija; nepovratne hemijske reakcije; tečna faza

## CHEMISORPTION WITH SLOW, FAST AND INSTANTANEOUS IRREVERSIBLE CHEMICAL REACTIONS IN A LIQUID PHASE

Chemisorption is a process of converting components from gaseous into liquid phase (state), whereby it differs from the physical absorption by an increase of process force (or matter conversion coefficient) due to existence of a chemical reaction between an absorptive and chemically active absorbent's component. This paper reviews the basic equations of chemisorption related to the determination of „acceleration” coefficient, where the increase of the matter conversion coefficient in relation to the physical absorption is taken into consideration. The influence of slow, fast and instantaneous irreversible chemical reactions in a liquid phase on the acceleration coefficient was considered and it lead to the conclusion that in chemisorption with slow reactions, the transport effect was practically the same as with the physical absorption, while the instantaneous effect was significantly increased.

**Key words:** absorption; irreversible chemical reactions; liquid phase

## Uvod

Hemosorpcija predstavlja proces prelaska komponenti iz gasovite u tečnu fazu, uz prisustvo hemijskih reakcija koje se odigravaju između pojedinih komponenti, pri čemu se na površini kontakta faza stvaraju nova