

# Promjene temperature i sadržaja vode za vrijeme prešanja iverice

## HEAT AND MOISTURE CONTENT TRANSFER IN THE MAT DURING PARTICLEBOARD PRESSING

Prof. dr. **Vilko Rajman**, dipl. ing.  
 mr. **Jadranko Jahić**, dipl. ing.  
 mr. **Izet Horman**, dipl. ing.  
 Mašinski fakultet Sarajevo

UDK 630\*862.2

Prispjelo: 30. travnja 1991.  
 Prihvaćeno: 25. svibnja 1991.

Izvorni znanstveni rad

### Sažetak

U radu su data mjerenja temperature i sadržaja vode u ploči iverici bez ljepila za vrijeme vrućeg prešanja. Podaci su dati u odnosu na početni sadržaj vode sirove ploče. Brzine promjene temperature i sadržaja vode u vanjskim slojevima ploče iverice su različite, ali se za kratko vrijeme izjednače. U unutrašnjim slojevima, promjene temperature i sadržaja vode su različite za cijelo vrijeme trajanja ciklusa prešanja. Veći početni sadržaj vode ploče znači i brži porast temperature u vanjskim slojevima. Vruće prešanje iverica predstavlja nestacionarni proces promjene temperature i sadržaja vode, a za matematsko rješenje potrebna je numerička analiza.

Ključne riječi: ploča iverica, temperatura, sadržaj vode, nestacionarne promjene temperature i sadržaja vode.

### Summary

Article presented measurements of temperature and moisture content in the particleboard made without resin during hot pressing. Data is presented to illustrate effects of initial mat moisture content on measured temperature and moisture content at the face and core layers. Face temperature and moisture content are changing at different rates, but it quickly be equalized. In core layers, these different rates takes constant from start to the end press cycle. High initial mat moisture content means temperature increase on faster rate at face layers. Hot pressing of particleboard is transient process of heat and mass transfer. This is task that requires mathematical modeling using numerical techniques.

Key words: Particleboard, temperature, moisture content, transient heat and moisture content transfer.

## 1. UVOD

### 1. INTRODUCTION

S termodinamičkog stanovišta, prešanje ploča iverica predstavlja proces intenzivne promjene temperature, vlažnosti i pritiska u sirovoj ploči.

Termo-otvrdnjavajuća ljepila, koja se koriste danas u komercijalnim uvjetima proizvodnje ploča iverica, zahtijevaju temperature preko 100 °C da bi došlo do njihovog ubrzanog otvrdnjavanja. Tu temperaturu je potrebno postići u svim dijelovima sirove ploče što je moguće brže. Povećanje toplinske energije u sirovoj ploči prouzrokuje promjenu stanja vode sadržane u drvu i ljepilu. Te promjene se odlikuju stalnim ponavljanjem procesa isparavanja i kondenzacije po poprečnom presjeku. S druge strane, kretanje vode od površne k unutrašnjim dijelovima ploče ubrzava prijenos topline u tom pravcu.

Pritisak unutar sirove ploče u početku presovanja se ne mijenja značajno, ali kada se tempe-

ratura u centru ploče približi 100 °C, pritisak počinje brzo rasti. Dostigavši maksimalnu vrijednost, pritisak izvjesno vrijeme ostaje konstantan, a zatim opada postepeno u skladu s isušivanjem sirove ploče.

Pod djelovanjem temperature i pritiska formira se gotova ploča iverica s određenim gradijentom gustoće i vlažnosti. Proizvodnja ploča iverica je složen proces s istovremenim prijenosom količine kretanja, topline i sadržaja, unutrašnjom kemijskom reakcijom i promjenama faze vode.

## 2. OSNOVE PRIJENOSA TOPLINE I SADRŽAJA VODE POROZNIH MATERIJALA

### 2. BASIS OF HEAT AND MOISTURE CONTENT TRANSFER IN POROUS BODIES

Vruće prešanje ploča iverica može se promatrati kao konduktivno sušenje vlažnog poroznog materijala. Teorija sušenja na zagrijanim površinama zasniva se na nauci prijenosa topline i sa-

držaja vode pri faznim promjenama vode i na učenju o oblicima vezane vode s koloidnim kapilarnoporoznim materijalima.

Likov [2] je predstavio sistem parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju kretanje vode i topline u vlažnom tijelu. Generalizirani oblik ovih jednadžbi može se napisati kao:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k_{11} \nabla^2 u + k_{12} \nabla^2 t + k_{13} \nabla^2 p \quad [1]$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = k_{21} \nabla^2 u + k_{22} \nabla^2 t + k_{23} \nabla^2 p \quad [2]$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = k_{31} \nabla^2 u + k_{32} \nabla^2 t + k_{33} \nabla^2 p \quad [3]$$

gdje su:  $u$  — sadržaj vode,  $t$  — temperatura,  $p$  — pritisak,  $\tau$  — vrijeme,  $\Delta$  — matematički operator,  $k_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) — koeficijenti koji daju međusoban odnos termodinamičkih svojstava materijala koji se suši i koeficijenta prijenosa topline i sadržaja vlage.

Jednadžbe 1—3 predstavljaju opći oblik jednadžbi prijenosa topline i sadržaja vode u vlažnim materijalima. Uvođenjem odgovarajućih koeficijenata  $k_{ij}$ , sistem jednadžbi dobiva slijedeći oblik:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_m \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_m \delta \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_m \delta_p \frac{\partial p}{\partial x}) \quad [4]$$

$$c_s \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial t}{\partial x}) + r \varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad [5]$$

$$c_p \rho_0 \frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_p \frac{\partial p}{\partial x}) - \varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad [6]$$

gdje su:

$\lambda, \lambda_p, \lambda_m, \delta, \delta_p$  — termodinamički koeficijenti prijenosa topline i sadržaja vode

$c, c_p, c_m, \rho_0, r, \varepsilon$  — termodinamičke karakteristike materijala koji se suši

$x$  — os koordinatnog sistema u kom pravcu se vrši prijenos topline i sadržaja vode

Jednadžbe 4—6 opisuju nestacionarni proces prijenosa topline i sadržaja vode u toku sušenja vlažnih materijala za neograničenu ploču (jednodimenzionalni zadatak) uz uvjet postojanja gradijenta općeg pritiska. Rješenja ovih jednadžbi su moguća ako su poznati gore navedeni termodinamički koeficijenti prijenosa topline i sadržaja vode i karakteristike materijala koji se suši.

Dugo godina analitička rješenja sistema linearnih jednadžbi pretstavljaju izazov za istraživače iz područja sušenja drva. Likov i Mihajlov,

koristeći Laplasove transformacije, odredili su rješenja za pojednostavljene slučajeve ploča, cilindra i sfere. Ista rješenja dobili su i Mihajlov i Ozisik [3] koristeći transformacije konačnog integrala. Za razliku od prethodnih autora, Liu i Čeng, uzimajući u obzir kompleksne vlastite vrijednosti pomoću metode najmanjih kvadrata, dobili su rezultate koji su najkompleksniji i fizički najrazumniji [3].

Sva ova rješenja imaju nedostatak u odnosu na proces vrućeg prešanja ploča iverica, što su dobivena uz uvjet poznavanja gore navedenih koeficijenata i karakteristika. Za vrijeme vrućeg prešanja ploča iverica dolazi do stalnih promjena toplinsko-fizičkih svojstava sirove ploče uzrokovanih promjenama stupnja otvrdnutosti ljepila, povećanjem zapreminske mase sirove ploče, smanjenjem poroznosti i sličnih pojava koje se dešavaju do kraja ciklusa prešanja, a neke i kasnije. Iz tog razloga data rješenja nisu prihvatljiva za slučaj vrućeg prešanja iverica.

Zbog specifičnosti prijenosa topline i sadržaja vlage u toku vrućeg prešanja ploča iverica, sve više se nameće potreba za numeričkim metodama koje uzimaju u obzir promjenjive koeficijente prijenosa topline i sadržaja vlage uz neizbježnu podršku računara.

### 3. MATERIJALI I METODE

#### 3. MATERIALS AND METHODS

Kretanje i raspored vlažnosti i temperature u toku prešanja određeni su eksperimentalno na jednoslojnim bukovim sirovim pločama bez ljepila.

Karakteristike sirove ploče bile su slijedeće:

— dimenzije ploča	340 × 400 mm
— debljina ploče	20 mm
— debljina iverja	0,18—0,31—0,49 mm
— širina iverja	1,15—3,02—4,38 mm
— dužina iverja	15,10—19,57—20,22 mm
— zapreminska masa ploče	725 kg/m <sup>3</sup>
— temperatura zagrijevnih ploča	150 °C
— specifični tlak prešanja	3 MPa
— početna vlažnost sirove ploče	10; 15; 22%

S pet sitastih traka ukupna debljina sirove ploče podijeljena je na šest slojeva, od kojih su pet slojeva imali debljinu  $h/10$  ( $S_1$ — $S_5$ ) tj. nakon

prešanja 2 mm, a šesti sloj  $h/2$ , tj. nakon prešanja 10 mm. Mjerenja temperature i sadržaja vode vršena su samo na slojevima debljine  $h/10$ , tj. na gornjoj polovini sirove ploče. Sitaste trake su onemogućavale prolaz iverja iz sloja u sloj, a dozvoljavale kretanje topline i sadržaja vode.

Mjerenjem je utvrđena točna težina svakog sloja prije početka prešanja. Po prekidu prešanja mjerena je težina svakog sloja u momentu prekida, što je omogućavalo izračunavanje sadržaja vode svakog sloja posebno. U svakom sloju bili su fiksirani termoparovi pomoću kojih je bio praćen tok temperature u slojevima. Ciklus prešanja prekidan je nakon 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11 i 13 minuta, a kod početne vlažnosti 22% i nakon 17, 18, 19, 21 i 25 minuta.

U rezultatima rada na slici 1 i 3 spominju se mjerenja temperature i sadržaja vode za mjerna

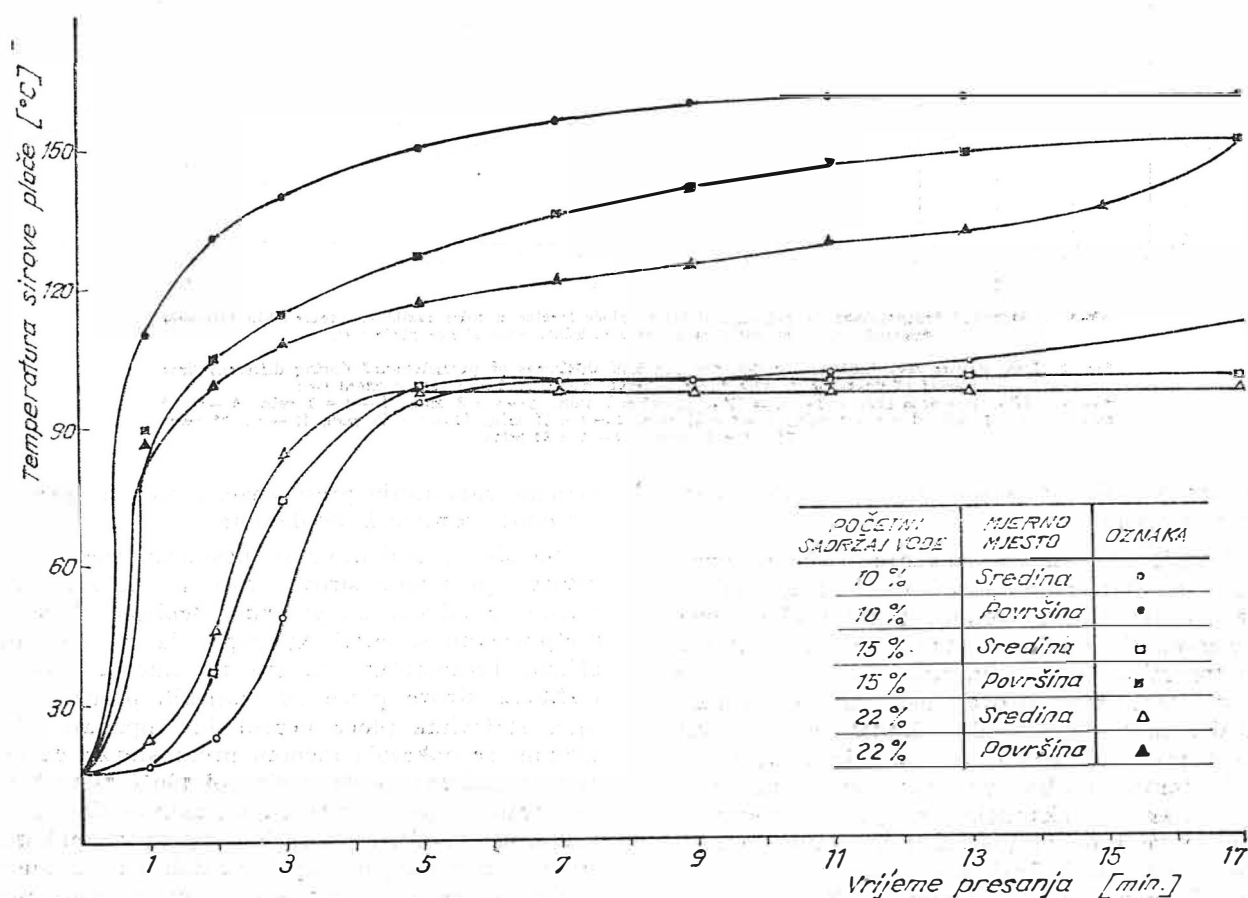
#### 4. REZULTATI I DISKUSIJA

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

##### 4.1. Temperatura sirove ploče

##### 4.1. Mat temperature

Brzina porasta temperature u vanjskim slojevima očekivano je veća nego u srednjim slojevima. U prvom periodu ciklusa prešanja temperaturne krivulje za vanjski sloj skoro su identične za sva tri početna sadržaja vode sirove ploče. Kasnije, oblik krivulje se mijenja, a najveća temperatura sirove ploče dobije se za najniži početni sadržaj vode. U srednjem sloju situacija je nešto drugačija. U prvom periodu ciklusa prešanja, temperaturne krivulje se razlikuju po svom obliku, tako da se veće temperature postižu za sirovu ploču s najvećim početnim sadržajem vode. U drugoj



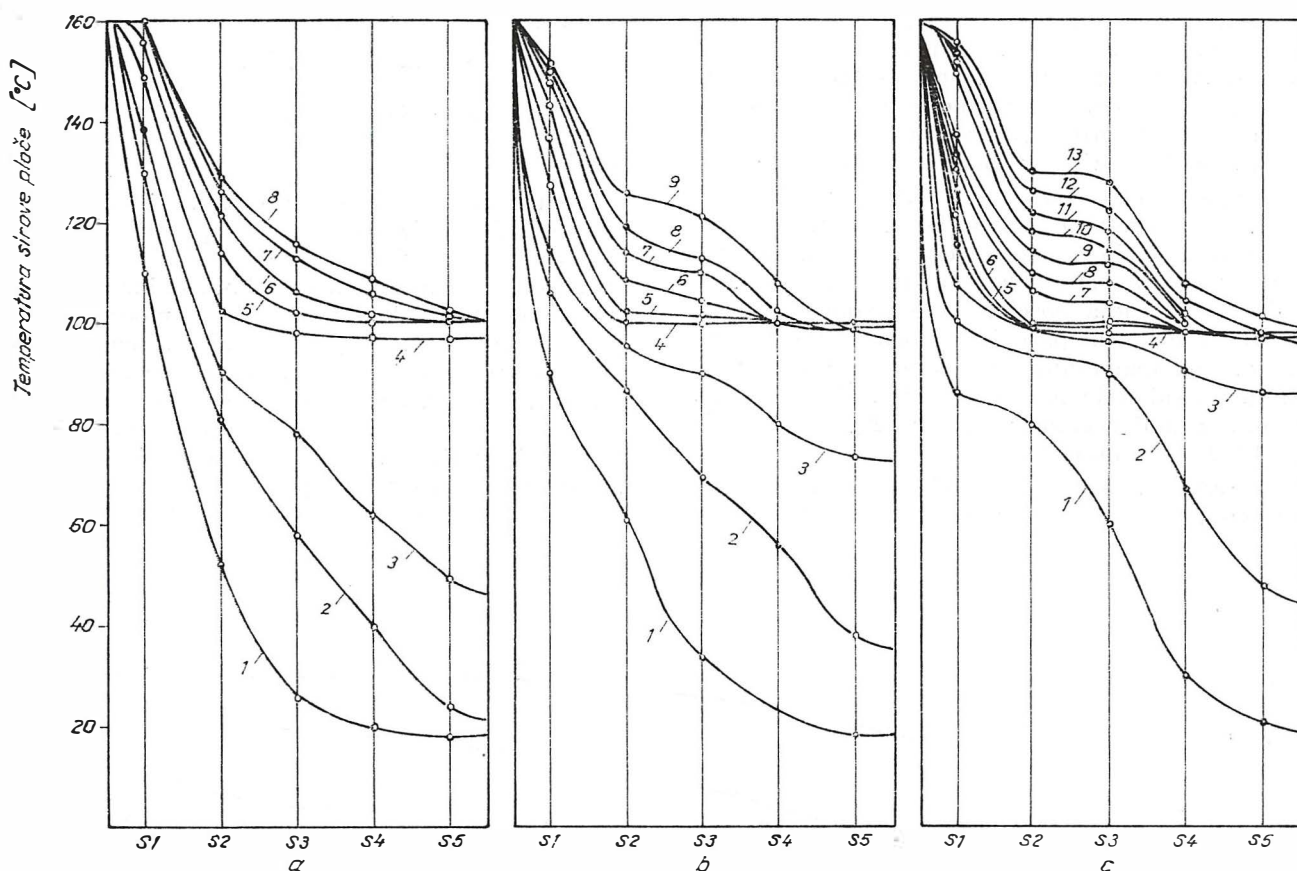
Slika 1. Temperatura u površinskim i unutrašnjim slojevima ploče iverice u toke prešanja u zavisnosti od početka sadržaja vode sirove ploče

Fig. 1. Temperature at face and core layers during particleboard pressing as a function of initial mat moisture content

mjesta »površine« i »sredine« sirove ploče. Pod mjernim mjestom »površina« smatra se prvi sloj od gornje površine sirove ploče debljine  $h/10$  ( $S_1$ ), a »sredina« je posljednji sloj iste debljine, tj. sloj u sredini sirove ploče ( $S_5$ ).

polovini ciklusa prešanja (5 minuta nakon početka prešanja) temperature se izjednače i do kraja ciklusa prešanja ostaju iste. Veći početni sadržaj vode sirove ploče povećava brzinu porasta temperature u srednjem sloju, ali maksimalna tem-





Slika 2. Raspored temperatura za polovinu debljine ploče iverice u toku različitih vremenskih intervala prešanja (t) za tri različita početna sadržaja vode sirove ploče (w):

Fig. 2. Temperature distributions through the one half thickness of particleboard during different time period of pressing (t) with three different initial mat moisture content (w):  
 a - w = 10%, b - w = 15% i c - w = 22%. (1 - t = 1 min, 2 - t = 2 min, 3 - t = 3 min, 4 - t = 5 min, 5 - t = 7 min, 6 - t = 9 min, 7 - t = 11 min, 8 - t = 17 min, 10 - t = 18 min, 11 - t = 19 min, 12 - t = 21 min i 13 - t = 25 min).

peratura se još uvijek postiže s najnižim početnim sadržajem vode.

U početnim fazama zatvaranja preše, sirova ploča je ekstremno porozna, te zbog toga ne stvara velike otpore kretanju plinova oko iverja. Zapremina slobodnih prostora u sirovoj ploči u tom trenutku može da zauzima i više od 90% od ukupne zapremine sirove ploče. Mješavina pare i zraka može se slobodno kretati od vanjskih slojeva prema unutrašnjim kao i kroz ivice ploče. U takvoj sredini ne može se postići značajniji tlak, a maksimalno moguća temperatura je nešto veća od temperature ključanja vode (i vezane i slobodne). Zrak koji se nalazi u unutrašnjim slojevima ploče usporava prijenos topline konvekcijom, te je ona u ovim slojevima neznatna. Postizanjem konačne debljine ploče, slobodni prostor se smanjuje, otpor kretanja plinovima se povećava, tlak pare u vanjskim slojevima raste, a toplina nošena parom se premješta u unutrašnje slojeve uz pomoć tlaka. Povećanjem zapremine sirove ploče, prijenos topline kondukcijom postaje značajniji, a važnost konvektivnog prijenosa topline se umanjuje. Iz ovoga proizilazi važnost vremena zatvaranja preše. Kraće

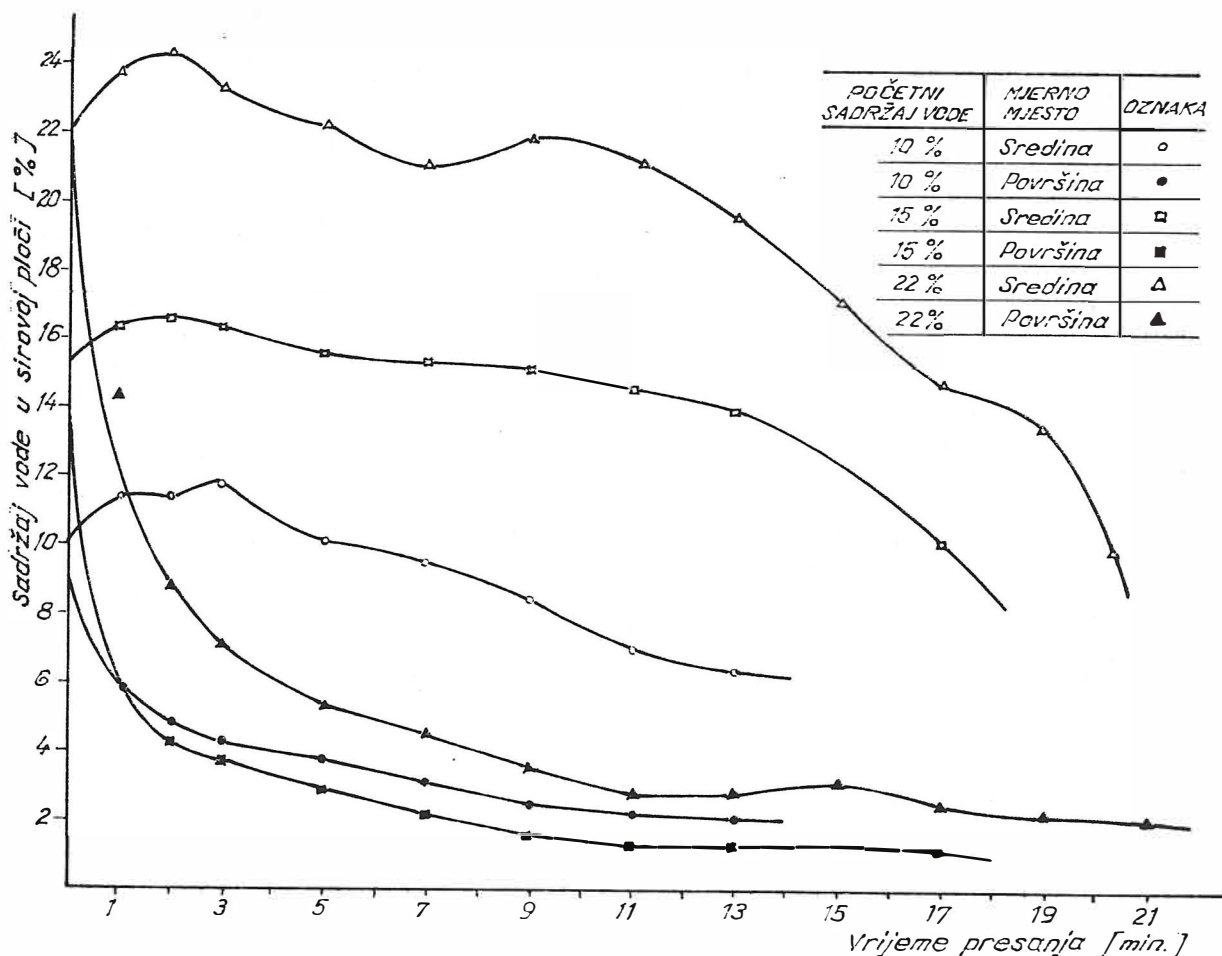
vrijeme zatvaranja preše znači i veću mogućnost prijenosa topline kondukcijom.

Na slici 2 prikazane su nestacionarne temperaturne promjene sirove ploče po debljini. Rezultati se odnose na polovinu debljine ploče uz pretpostavku simetričnog rasporeda za cijelu debljinu. Temperature za sva tri slučaja početne vlažnosti sirove ploče od vanjskih prema srednjim slojevima ploče neprekidno opadaju. Još jednom se pokazala točnom pretpostavka da porastom sadržaja vode u sirovoj ploči raste brzina porasta temperature u unutrašnjim slojevima. Karakter krivulja raspodjele temperature pokazuje da u unutrašnjim slojevima dolazi do kondenzacije vodene pare nastale u slojevima neposredno uz zagrijevnu ploču. Granica faznog prijelaza ključanje-kondenzacija izražena je u vidu fronta koji se pomiče tokom vremena u dubinu ploče.

#### 4.2. Sadržaj vode sirove ploče

##### 4.2. Mat moisture content

Voda u sirovoj ploči potiče iz tri izvora. Prvi, to je voda sadržana u osušenom iverju prije nanošenja ljepila. Drugi izvor je voda koja se uno-



Slika 3. Sadržaj vode u površinskim i unutrašnjim slojevima ploče iverice u toku prešanja u zavisnosti od početnog sadržaja vode sirove ploče

Fig. 3. Moisture content at face and core layers during particleboard pressing as a function of initial moisture content

si u sirovu ploču s ljepilom, i konačno voda u obliku pare koja nastaje kao rezultat kondenzacije u toku otvrdnjavanja ljepila.

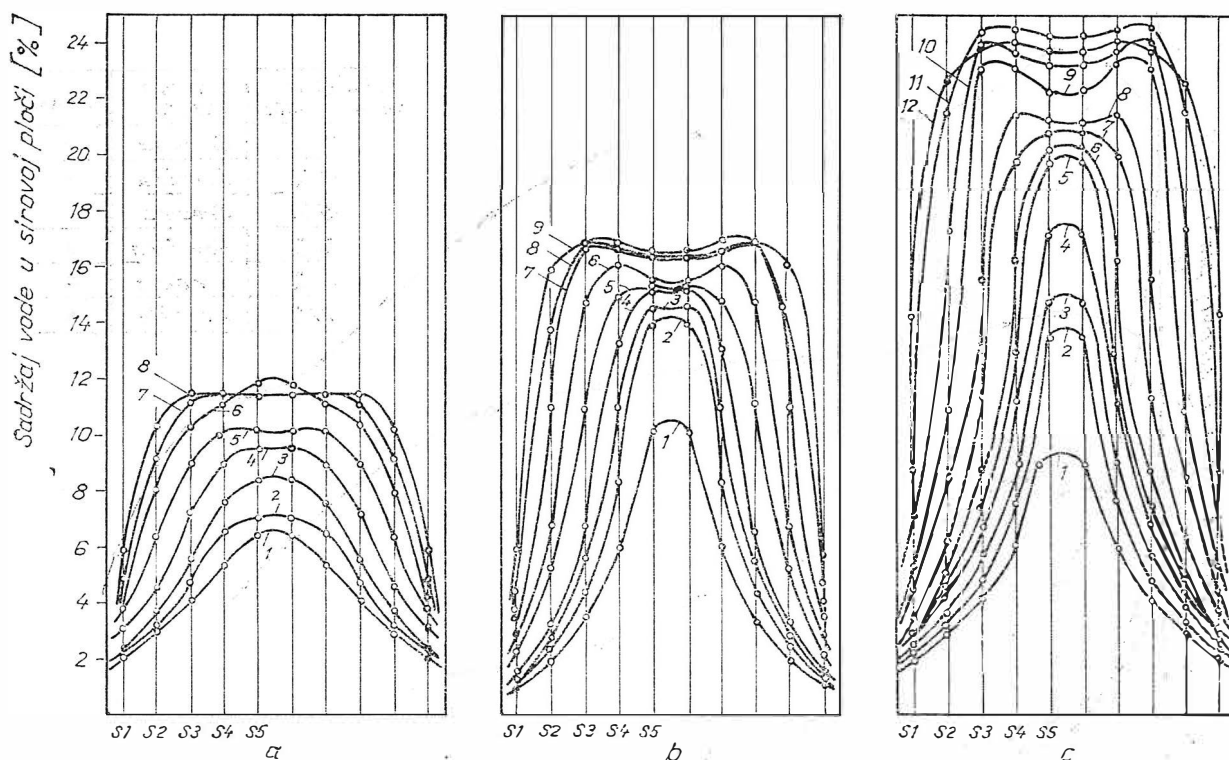
Sadržaj vode u toku ciklusa prešanja u vanjskim slojevima neprekidno opada. Zbog veće brzine prijenosa toline, i brzina prijenosa sadržaja vode je veća za ploče s većim početnim sadržajem vode sirove ploče. U unutrašnjim slojevima u početku procesa prešanja sadržaj vode raste, što je posljedica premještanja vodene pare u unutrašnjost ploče. Kasnije, sadržaj vode opada, što je također posljedica stvaranja vodene pare, koja nastaje različitim intenzitetom u zavisnosti od udaljenosti sloja od zagrijevne površine.

Na slici 4 se vidi da se kretanje vode također vrši od vanjskih prema unutrašnjim slojevima, a raspored po debljini je obrnuto proporcionalan od rasporeda temperature. Raspodjela sadržaja vode je ravnomjerna i simetrična. U slojevima uz zagrijevnu ploču sadržaj vode je najmanji, a idući prema unutrašnjosti ploče ravnomjerno raste. Takav karakter raspodjele vode u sirovom kolaču rezultira iz osobitosti mehanizma

prijenosa sadržaja vode pri kontaktnom zagrijavanju.

Povećanjem temperature u sirovoj ploči brzina zagrijavanja i brzina prelaska vode u paru naglo se povećavaju, stvarajući gradijent pritiska, koji se smatra osnovnim pokretačem sile prijenosa sadržaja vode. Tlak unutar paketa u prvom momentu mijenja se neznatno, ali kada se temperatura u centru približi 100 °C, tlak naglo počinje rasti. Dostignuvši maksimalnu vrijednost, pritisak ostaje neko vrijeme konstantan, a zatim postepeno opada. Tlak vlažnog uzduha unutar sirove ploče veći je od atmosferskog pri temperaturama većim od 100 °C. Međutim, to važi u slučaju termodinamičke ravnoteže, kada je temperatura tijela jednaka u svim točkama i kada je jednaka temperaturi okruženja. U našem slučaju vrućeg prešanja ploča iverica, kod kojeg imamo fazne promjene vode i nestacionarni temperaturni tok, takva tvrdnja smatra se netočnom.

Značajan uticaj na kvalitetu ploča iverica imaju zaostala unutrašnja naprezanja. Maksimalna unutrašnja naprezanja nastaju u prvom periodu



Slika 4. Raspored sadržaja vode po debljini ploče iverice u toku različitih vremenskih intervala prešanja (t) za tri različita početna sadržaja vode sirove ploče (w):

Fig. 4. Moisture content distributions through the thickness of particleboard during different time period of pressing (t) with three different initial moisture content (w):

a —  $w = 10\%$ , b —  $w = 15\%$  i c —  $w = 22\%$ . (1 —  $t = 1$  min, 2 —  $t = 2$  min, 3 —  $t = 3$  min, 4 —  $t = 5$  min, 5 —  $t = 7$  min, 6 —  $t = 9$  min, 7 —  $t = 11$  min, 8 —  $t = 13$  min, 9 —  $t = 17$  min, 10 —  $t = 18$  min, 11 —  $t = 19$  min, 12 —  $t = 21$  min i 13 —  $t = 25$  min)

prešanja, tj. prilikom sabijanja sirove ploče, zatim, postepeno, zbog plastičnosti materijala, zaostala naprezanja se relaksiraju. Vrijeme prelaska elastičnih deformacija u plastična zavisi od specifičnog pritiska prešanja i gustoće sabijene sirove ploče. Završetak procesa prešanja određuje se stupnjem otvrdnutosti ljepila i veličinom nadtlaka (zaostalog tlaka) u ploči, koji je u direktnoj vezi s prisutnim sadržajem vode u ploči.

## 5. ZAKLJUČCI

### 5. CONCLUSIONS

Na osnovi naših istraživanja i istraživanja drugih autora nameću se slijedeći zaključci vezani za prijenos topline i sadržaja vode u toku vrućeg prešanja ploča iverica:

a) U prvom periodu ciklusa prešanja toplina u sirovoj ploči predaje se kondukcijom preko zagrijanih ploča preše.

b) Vezana voda u drvnjnoj substanci na površini sirove ploče pretvara se u vodenu paru, koja smanjuje sadržaj vode u tim slojevima ali povećava pritisak u slobodnim prostorima ploče.

c) Gradijent pritiska po debljini ploče nastaje uslijed kretanja vodene pare u unutrašnje slojeve ploče.

d) Određena količina vode se absorbira u drvnjnoj substanci u međuslojevima, u skladu s lokalnim unutrašnjim uvjetima kao što su temperatura, pritisak i sadržaj vode.

e) Osim kondukcijom, prijenos topline se vrši i konvekcijom, i to pomoću vodene pare koja se premješta u unutrašnje slojeve.

f) Reakcija polikondenzacije se pospješuje temperaturom, a ljepilo počinje otvrdnjavati u različito vrijeme u zavisnosti od udaljenosti sloja od zagrijevne površine.

g) Nakon završenog kretanja vode u pravcu debljine, gradijent pritiska pare počinje da se formira u lateralnom pravcu, a vodena para se također kreće u istom pravcu i izlazi iz ploče u atmosferu.

## LITERATURA

- [1] Kayihan, F., Johnson, J. A. (1983): Heat and moisture movement in wood composite materials during the pressing operation — a simplified model. In: Numerical Methods in Heat Transfer, New York, Vol. 2 str. 511—531.
- [2] Likov, A. V. (1968): Teorija suški »Energia«, Moskva.
- [3] Liu, J. Y., Cheng, S. (1989): Heat and moisture transfer in wood during drying. In: Mechanics of cellulosic and polymeric materials: Proceedings, 3d Joint ASCE/ASME Mechanics conference, New York, str. 79—85.

Recenzija: prof. dr. Vladimir Bručić i dr. Stjepan Petrović