

Miljenko Primorac, Stjepan Risović

Utvrđivanje specifične energije sušenja hrastovih popruga i termodinamični model sušenja

Establishment of specific drying energy of oak-wood flooring deal and thermodynamic model of drying

Izvorni znanstveni rad - Original scientific paper

Prispjelo - Received: 12. 03. 1997. • Prohvaćeno - accepted: 17. 04. 1997.

*UDK 630*812.145 i 630*847*

SAŽETAK • Mjerenjima utroška topline i električne energije u četiri ciklusa sušenja hrastovih popruga debljine 25 mm u velikoj komornoj sušionici (166,685 m³ vlažne piljene drvene građe) proračunom su utvrđeni: ukupni utrošak topline po jedinici isušene vlage u proljetnom razdoblju $\bar{C}_u = 11,9$ MJ/kg; utrošak energije po jedinici isušene vlage bez disipacije jest specifična energija sušenja hrastovih poruga $\bar{C} = 8,6$ MJ/kg i utrošena specifična električna energija sušenja $\bar{C}_{el} = 0,355$ MJ/kg. To su srednje vrijednosti tijekom cijeloga ciklusa sušenja, kada je srednja početna vlaga bila manja od 30 %, a srednja konačna vlaga prosušene građe 6,5 %. Mjerna pogreška navedenih rezultata srednjih vrijednosti iznosi oko 12 %. Ciklusi su vođeni uobičajenim pogonskim režimom sušenja. Utvrđena specifična energija je oko 3,5 puta veća od topline ispravanja slobodne čiste vode pa je za objašnjenje mjernih rezultata uveden opći teorijski model. Prema svojoj funkciji u termodinamičnom smislu taj model je ireverzibilni toplinski stroj na vlažan zrak. Rezultati tako uvedenoga stroja navedeni su kao pokazni primjer u dvjema tablicama. Ti rezultati pokazuju da takav model može služiti za simulaciju procesa sušenja drva na osnovi koje se može zaključivati o optimalnim režimima u tehnološkom, energetsom i vremenskom smislu. Parametar dovođenja topline može biti važan pokazatelj u vođenju procesa sušenja. Specifična energija sušenja pri određenoj klimi sušenja funkcija je vlažnosti drva, odnosno veličine strukturnih otvora iz kojih se isparava vlaga. Uvedeni model povezuje te dvije veličine.

Autori su izvanredni profesor i asistent na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Authors are associated professor and research assistant, respectively, at the Faculty of Forestry of the University of Zagreb.

Rad je izložen na Simpoziju povodom 150-e obljetnice Hrvatskog šumarskog društva u studenom 1996. U Zagrebu. The paper was presented at the Symposium on the occasion of 150th Anniversary of the Croatian Forestry Society in Zagreb in November 1996.

Ključne riječi: sušenje drva, energija specifična za sušenje drva, ireverzibilni toplinski stroj, termodinamični model procesa u drvu, kapilarni promjeri, strukture drva, vlažnost drva i strukturni otvori, toplina ispravanja.

ABSTRACT • Total heat consumption per unit of drying evaporation in spring season $\bar{C}_u = 119$ MJ/kg has been established by measurement of heat consumption and computation for oak-wood (*Quercus robur & petraea*) flooring deal 25 mm thick in kiln drying chamber (166.685 m³ of green lumber). The energy consumption per unit of drying evaporation without dissipation is the specific energy of oak-wood flooring deal that for this case amounts to $\bar{C} = 8.6$ MJ/kg. That total electrical power consumption per unit of drying evaporation has been established in the amount of $\bar{C}_{el} = 0.355$ kWh/kg. The above mentioned values are average values through the whole drying cycles. The average initial value of the moisture content was 30 % and the final average value of the moisture content was 6.5 %. The measurement error of the average result values was around 12 %. The cycles were managed by the usual drying proces. The estlibhsed specific drying energy is about 3.5 times greater than the evaporation heat of pure water. Therefore, the general theoretic model has been introduced for explanation of measuring results. This model is a wet air irreversible heat engine considering its thermodynamic sense. The results of such an introduced model are shown as examples in two tables. These results indicate that such a model can be used for a wood drying simulation process with the optional regimes in a technological, energetic and timing sense. The parameter of heat consumption can be an important indication in managing the drying process. Specific drying energy is a function of wood moisture in a determined climate as well as a function of the structural openings from which the water evaporates. The introduced model connects those two parameters.

Key words: drying energy of wood, specific energy of wood drying, irreversible heat engine, thermodynamic model of wood proceses, capillary diameters of wood structure, moisture of wood and structural openings, heat of evaporation.

1. UVOD 1. INTRODUCTION

Istraživanje potrošnje energije pri sušenju drva povezano je s operacijskim parametrima sušenja i neistraženo je područje (James, 1988). Ukupna potrošnja topline pri sušenju drva ovisi o nizu činitelja termodinamičnih načela vezanih za konstrukciju prostora i uređaja za sušenje, o načinu i režimima sušenja, o piljenoj drvnoj građi (sortimentu i vrsti drva) i njezinu stupnju početne i konačne mokrine (Primorac, 1988). Mjera potrošnje topline uobičajeno se uzima kao energija potrebna za istiskivanje jedinice mase vode iz drva, a to je specifična energija.

U radu su prikazana određena eksperimentalna istraživanja topline potrebne za sušenje hrastovine. Istraživanje je ograničeno na utvrđivanje energije za izvlačenje mokrine iz hrastovih popruga debljine 25 mm, kakve se najčešće upotrebljavaju za izradbu parketa u drvnoindustrijskim pogonima. Za tu svrhu mjerenja su obavljena u prostorno relativno velikoj komornoj sušionici, nakon što su

postavljeni mjerni uređaji za stalno praćenje procesa sušenja - mjerilo toplinske energije i mjerila potrošnje energije zbog odsisavanja i navlaživanja vlažnog zraka te mjerila električne energije. Dobiveni rezultati mjerenja mogu se objasniti ovdje uvedenim termodinamičnim modelom ireverzibilnog toplinskog stroja.

2. REZULTATI MJERENJA 2. MEASUREMENT RESULTS

Za utvrđivanje realnog utroška efektivne energije obavljena su mjerenja u komornoj sušionici dimenzija 13,2 x 19,0 x 5,3 m, u kojoj je za vrijeme mjerenja bilo 166, 685 m³ vlažne drvne tvari hrastovih popruga debljine 25 mm. Praćena su četiri procesa sušenja s početnom mokrinom 32,76 %; 23,64 %; 19,2 % i 15,52 % prema uobičajenom režimu pogona, do konačne mokrine 6,5 %. Mokrina uzoraka mjerena je uobičajenim načinom u tom pogonu (metodom uzoraka). Kontinuirano je mjerena cjelokupna potrošnja topline u navedenoj komori, energije utrošena za odsis-

$u_p/\%$	32,76	23,64	19,2	15,52
Q_u/GJ	278,238	245,632	174,837	129,027
Q_g/GJ	49,504	42,490	28,622	25,447
Q_z/GJ	18,939	20,027	18,108	14,674
Q_k/GJ	1,350	2,080	2,958	1,915
Q_{el}/GJ	29,478	24,592	17,553	13,827
Q_{el}/MWh	8,597	7,104	5,047	3,956
m/kg	29 146	19 024	14 096	10 012
C_u/MJkg^{-1}	9,546	12,912	12,406	12,887
C/MJkg^{-1}	7,152	9,516	8,881	8,689
C_{el}/kWhkg^{-1}	0,295	0,373	0,358	0,395

$\bar{C}_u = (11,9 \pm 1,6) \text{ MJ/kg}$
 $\bar{C} = (8,6 \pm 1,0) \text{ MJ/kg}$
 $\bar{C}_{el} = (0,355 \pm 0,043) \text{ kWh/kg}$,

pri čemu je:

- Q_u - ukupna toplina za sušenje od u_p do 6,5 % mokrine
- Q_u - total drying heat from u_p to 6.5 % of moisture
- Q_g - gubici topline kroz stijenke komore i zbog nedovoljne zatvorenosti komore
- Q_g - heat losses through the chamber walls and due to the inadequate chamber closure
- Q_z - toplina utrošena za zagrijavanje
- Q_z - heat consumed for increase of drying temperature
- Q_k - toplina utrošena za održavanje postavljene klime - odsisavanje i navlaživanje
- Q_k - heat consumed for establishment of proper, wetting and ventilating
- Q'_{el} - dio električne energije koji je uključen u Q_u .
- Q'_{el} - part of electrical power included in Q_u
- Q_{el} - utrošak električne energije
- Q_{el} - electrical power consumption
- m - masa istisnute vode
- m - mass of evaporated water by drying
- $C_u = Q_u/m$ - ukupno utrošena toplina po jedinici istisnute mokrine
- $C_u = Q_u/m$ - total consumed heat per unit of evaporated water
- $C = (Q_u - Q_g - Q_z - Q_k)/m$ - specifična energija sušenja
- $C = (Q_u - Q_g - Q_z - Q_k)/m$ - specific drying energy
- $C_{el} = Q_{el}/m$ - utrošena električna energija po jedinici istisnute vlage
- $C_{el} = Q_{el}/m$ - total consumed electrical power per unit of evaporated water.

avanje radi postizanja zadane klime zahtijevane u pojedinim fazama sušenja i energije utrošene za navlaživanje. Toplinski gubici i toplina zagrijavanja obrađeni su računski, na osnovi praćenja potrebnih temperatura unutrašnjosti i okoline (proljetno razdoblje). Zbog velikoga sadržaja drvene mase u komori sušionice efektivna vrijednost energije vrlo je značajna u odnosu prema jalovim efektima. Ti su rezultati za pojedine početne vlažnosti prikazani u tablici 1.

U sva četiri slučaja sušen je jednak broj složaja. Prema našim mjerenjima, srednja je gustoća suhe drvene tvari $(721 \pm 68) \text{ kg/m}^3$, a srednje volumno utezanje 14%.

Mjereni utrošak električne energije uključen je u ukupnu toplinu za sušenje, zato što se sva električna energija utrošena u komori pretvara se u toplinu. Elektromotori ventilatora za strujanje zraka trošili su ukupno 23 kW ili 0,14 kW po m^3 sušenih

piljenica. Radi usporedbe, navedimo da je potrošnja u automatski vođenim malim komornim sušionicama $1,4 \text{ kW/m}^3$, dok u komorama s tračnicama ta izmjerena veličina odgovara $0,8 \text{ kW/m}^3$ grade.

Uz tablicu 1. navedene su srednje vrijednosti ukupno utrošene topline C_u po jedinici isparene mokrine u navedenim uvjetima sušenja. Vrijednost od $11,9 \text{ MJ/kg}$ s 13 % mjerne nesigurnosti može biti orijentacijski normativ za takve komore u proljetnom razdoblju. To je ekvivalent utroška od $5,53 \text{ kg}$ zasićene pare (tehnološka para) pri pretlaku 2,5 bara za ispravljanje jednog kilograma vode iz hrastovih popruga debljine 25 mm. Za uobičajeni pogonski režim vrijednost $\bar{C} = 8,6 \text{ MJ/kg}$ srednja je vrijednost potrebne topline bez gubitaka, topline za zagrijavanje i klimatizaciju svedena na jedinicu isparene vlage, tj. na specifičnu energiju sušenja. Standardna devijacija rezultata je 12 %. Vri-

Tablica 1.

Rezultati mjerenja energetskih vrijednosti za četiri ciklusa sušenja hrastovih popruga debljine 25 mm, ukupnog obujma $166,685 \text{ m}^3$ drva u vlažnom stanju po svakom ciklusu, od srednje početne vlažnosti u_p do srednje konačne vlažnosti 6,5 %. •
Results of energetic measurements for four drying cycles of oak-wood flooring deal 25 mm thick in kiln drying chamber total volume $166,685 \text{ m}^3$ of wet lumber, from average initial moisture u_p to final average moisture of 6,5 %

jednost \bar{C} može se orijentacijski smatrati normativnom za taj sortiment kada je početna mokrina manja od 30 %. Ta specifična energija odgovara utroška 4 kg zasićene pare pretlaka 2,5 bara, kakva se najčešće rabi u pogonima drvene industrije kao tehnološka para. Treća srednja vrijednost \bar{C}_{el} jest specifična električna energija kao utrošena električna energija za ispravljanje jedinice mase vlage. Ta vrijednost od 0,35 kWh/kg odnosno 1,278 MJ/kg čini 15 % u odnosu \bar{C} i 11 % u odnosu prema \bar{C}_u a cijenom višestruko prelazi te postotke.

3. TERMODINAMIČNI MODEL SUŠENJA 3. THERMODYNAMIC DRYLING MODEL

Samo gibanje vlage kroz strukturu drva složen je i zamršen proces koji nije jednoznačno određen, niti dovoljno objašnjen, pa zato ne možemo pouzdano objasniti ni potrebnu energiju (Kranj, 1965). Ta je energija svakako veća od energije potrebne za samo isparavanje slobodne vode. Toplinu potrebnu za isparavanje vode možemo najjednostavnije objasniti kao toplinu potrošenu za svladavanje ravnoteže interakcije između molekula kapljevine; svladavane površinske napetosti kao polja sila; rad ekspanzije zbog promjene obujma pri određenom tlaku i stvaranje unutarnje energije vodene pare.

Energija međudjelovanja između dviju molekula vode izračunatu u blizini optimuma energije iznosi -25,31 kJ/mol (Dirksen i dr., 1975), što znači da je potrebno 1,406 MJ/kg za svladavanje te interakcije. Toplina hidratacije ionima, tj. $X^{\pm} - H_2O$ tip interakcije, veća je od 2 do 6 puta, npr. $Li^+ - H_2O$ iznosi -142 kJ/mol (Kaberle, 1977);

Rad potreban za izotermno svladavanje slobodne energije površine jednaka je površini pomnoženoj površinskom napetosti. Polazeći od gustoće vode 1 000 kg/m³ i Avogadrova broja može se izračunati energija potrebna za taj rad. Primjerice, površinska napetost između vode i zraka kod 50 °C iznosi 67,91 x 10⁻³ J/m² (Weast, 1972), te je potrebna energija 0,219 MJ/kg. To vrijedi uz uvjet jednakosti tlakova dviju dodirnih faza;

Rad ekspanzije pri izobarnoj promjeni od volumena kapljevine do volumena vodene pare, npr. pri temperaturi zasićenja 50 °C iznosi 0,149 MJ/kg;

Slobodna energija vodene pare u vlažnom zraku shvaćenom kao idealni plin sa šest stupnjeva slobode prema klasičnoj fizici kod 50 °C jest 0,448 MJ/kg.

Pri 50 °C toplina isparavanja vode je 2,383 MJ/kg, dok je zbroj prethodno dobivenih energija 2,221 MJ/kg, što znači da nedostaje još 6 % energije dobivene takvim

načinom. Kinetička energija molekula vode pomaže isparavanju. Ta energija u opisanom primjeru ipak nije potpuno dovoljna za svladavanje unutarnjeg polja u tekućini.

Svaka od navedenih energija sadržana je pri isparavanju vode u procesu sušenja drva. Osim te energije, za isparavanje s ravne plohe čiste vode potrebna je dodatna energija, zbog gibanja vlage kroz zakrivljenost u strukturi drva. Površinska napetost između vode i drva koja iznosi 52,8 mJ/m² (Nquyen, 1978), ne može imati veći značaj, osim za monomolekularne slojeve i ima manju vrijednost nego voda-zrak. Ona utječe na okrajni kut kapiranih meniska. Taj kut između vode i drva približno je jednak ničtici (Nquyen, 1978; Bogner, 1995). Tok vode kroz kapilare ne može uzrokovati relativno značajniju vrijednost energije sve do veličine promjera kapilare od desetak nanometara, a to odgovara veličinama elementarnih fibrila (Sian 1971).

Promatramo li samo energiju potrebnu za istiskivanje vode iz prostora kroz kapilare i kapilarne otvore određenih promjera $2r$ u kojima postoji kapilarni tlak, tada se za samo isparavanje troši dio energije kao i za ravnu površinu vode, jer tlak zasićenja vodene pare isključivo ovisi o temperaturi i praktično se zanemarivo mijenja pod utjecajem vanjskoga tlaka. Kada je čista kapljevinna pod nekim ukupnim tlakom u ravnoteži sa svojom parom određenoga parcijalnoga tlaka zasićenja, tada je funkcija slobodne energije (Gibsova funkcija) u obje faze jednaka. Iz toga proističe da se tlak zasićenja s vanjskim tlakom neznatno mijenja (oko 0,1 % za povećanje nametnutog tlaka za 1 bar) (Gleason, 1946). Ta promjena nemože znatno utjecati na navedeni ekspanzijski rad. Tako preostaje rad ekspanzije isparene vodene pare od kapilarnoga tlaka na tlak okoline.

Taj proces nije moguć bez sudjelovanja vanjskoga vlažnoga zraka, osim ako to ne odgovara temperaturi zasićenja (vrelišta). Vanjski vlažni zrak temperature t , relativne vlažnosti φ ili temperature vlažnoga termometra t_v i određenoga vanjskog tlaka komprimira se do kapilarnoga tlaka. Taj vlažni zrak preuzima dio vodene pare izobarno, a najviše do parcijalnoga tlaka zasićenja, i tada je proces maksimalno iskorišten. Nakon toga nastaje ekspanzija na tlak okoline. To je, termodinamični promatranje, toplinski stroj na vlažni zrak. Promatranje je model savršenoga ireverzibilnoga toplinskoga stroja (Bošnjaković, 1978), pri čemu je ponašanje vlažnoga zraka promatranje kao idealni plin i njegovo potpuno zasićenje (Bošnjaković, 1976). Ako takav

2r, μm	t = 40 °C W _r = 2,309 MJ/kg			
	φ = 90 %; t _v = 38,3 °C; 2r _g = 25,05 μm; u _r = 19 %		φ = 20 %; t _v = 22,2 °C; 2r _g = 0,70 μm; u _r = 4,2 %	
	W _r /MJkg ⁻¹	\bar{W}_r /MJkg ⁻¹	W _r /MJkg ⁻¹	\bar{W}_r /MJkg ⁻¹
500	2,513	2,940	2,419	2,492
100	3,094	5,634	2,474	2,878
50	4,501	11,398	2,545	3,370
40	5,925	16,700	2,583	3,616
30	13,134	40,537	2,645	4,134
26	58,264	154,643	2,685	4,278
4	-	-	5,021	15,339
3	-	-	6,380	20,339
2	-	-	10,120	32,467
1,5	-	-	15,884	48,525
1	-	-	42,300	108,510

stroj ne bi bio savršen, trošio bi više topline iz okolnoga spremnika za crpljenje isparene vlage. Računski rezultati tako uvedenoga modela savršenog ireverzibilnoga toplinskoga stroja navedeni su u tablici 2. i 3. za temperature 40 °C i 72 °C za po dva slučaja relativne vlage. Pri svakoj promatranoj temperaturi kapilarni se otvor mijenjao od 2r do 2r_g, dok je vanjski tlak bio 0,1 MPa.

U tablicama 2 i 3. W_r označava vrijednost specifične energije (tj. topline potrebne samo za ispravljanje - izvlačenje jedinice mase vlage), kada se izvlači vlaga iz kapilarna radijusa r, tj. kroz otvore 2r. Tim načinom pri klimatskim okolnostima određenim temperaturom i relativnom vlagom moguće je crpsti vlagu za otvore 2r > 2r_g. Pri otvoru 2r_g prestaje korisni učinak (u smislu sušenja) toga stroja. Za tu klimu vodom su ispunjeni svi prostori čiji izlazi imaju otvore manje od 2r_g. To je, zapravo, stanje vlage ravnoteže u_r, čije su odgovarajuće vrijednosti navedene prema Krpanu (1965). Na osnovi takvih usporedbi moguće je uspostaviti korelaciju

(kvadratnu) između mokrine drva u i kapilarnih promjera 2r. Vrijednost W_r topline su ispravljanja slobodne vode pri određenoj temperaturi zasićenja (Ražnjević, 1975). U tablicama 2. i 3. također su navedene vrijednosti specifične energije \bar{W}_r . Ovdje se polazi od postavke da se istodobno zbiva proces od kapilara otvora 2r do otvora blizu 2r_g prema funkcijskoj usklađenosti W_r. Znači pretpostavlja se da proces ne miruje za manje otvora od 2r sve dok se ne dovrši proces za taj veći otvor. Ta je postavka realnija osobito za masivnije komade drva, od načina W_r, ali i ona može trpjeti prigovor o težini sudjelovanja pojedinih otvora u istodobnom procesu. Vrijednost pojedinačnih težinskih faktora mogu dati eksperimenti.

Eksperimentalni rezultati u tablici 1. dobiveni su pri procesima sušenja u nizu uvjeta klimatskih parametara odabranoga režima, ali rezultati iz tablica 2. i 3. sigurno upućuju na mogućnost pokrivanja dobivenih vrijednosti specifične energije označene sa C odnosno C.

Tablica 2.

Vrijednosti specifične energije W_r, pri sušenju na 40 °C i promjeru kapilara 2r te njezine srednje vrijednosti \bar{W}_r , u području od 2r do 2r_g, pri relativnoj vlažnosti φ i atmosferskom tlaku 1 bar • Specific energy values W_r, with a drying temperature of 40 °C when the capillary diameter is 2r and a corresponding average value of specific energy \bar{W}_r , when the capillary diameter is in a range from 2r to 2r_g. Relative air humidity is φ and ambient pressure is 1 bar

Tablica 3.

Vrijednosti specifične energije W_r pri sušenju na 72 °C i promjeru kapilara 2r te njezine srednje vrijednosti \bar{W}_r u području od 2r do 2r_g, pri relativnoj vlažnosti φ i atmosferskom tlaku 1 bar • Specific energy values W_r with a drying temperature of 72 °C when the capillary diameter is 2r and corresponding average value of specific energy \bar{W}_r , when the capillary diameter is in a range from 2r to 2r_g. Relative air humidity is φ and ambient pressure is 1 bar

2r, μm	t = 72 °C W _r = 2,309 MJ/kg			
	φ = 32 %; t _v = 50,0 °C; 2r _g = 1,21 μm; u _r = 4,6 %		φ = 21 %; t _v = 45,0 °C; 2r _g = 0,681 μm; u _r = 3,2 %	
	W _r /MJkg ⁻¹	\bar{W}_r /MJkg ⁻¹	W _r /MJkg ⁻¹	\bar{W}_r /MJkg ⁻¹
30	2,386	2,775	2,329	2,717
20	2,418	3,003	2,407	2,946
8	2,594	4,105	2,550	4,385
5	2,836	5,393	2,728	5,116
3	3,505	8,452	3,145	7,615
2	5,239	15,163	3,901	11,689
1,5	10,774	33,344	5,052	17,361
1,3	29,669	82,915	6,073	22,096
1	-	-	10,146	39,631
0,8	-	-	24,676	94,988

Taj način izvrsno pokazuje kako se mi- jenja specifična energija jednoga te istoga učinka pri različitim temperaturama i rela- tivnim vlagama. Pogledajmo npr. rezultate za $2r = 30,3$ i $1,5 \mu\text{m}$ u obje tablice. Za $2r = 30 \mu\text{m}$ ili oko 21 % vlažnosti drva nije energetska po- voljno sušenje s $t = 40^\circ\text{C}$ i $\varphi = 90\%$, a i dugo traje. S obzirom na specifičnu energiju sušenja najpovoljniji je režim od navedena četiri onaj pri 72°C i 21 %. Tada bi proces bio brz a snaga stroja velika. Međutim takav je tehnološki režim potpuno nepovoljan. To znači da je niska specifična energija za vlažnost drva u području nezasićenosti tehnološki zabranjeno područje. Previsoka bi pak specifična energija bila tehnološki povoljna, ali energetska i vremenska nepovoljan proces, osim ako nije prirodno sušenje. Taj primjer pokazuje kako model ire- verzibilnoga toplinskog stroja, uz iskustvene spoznaje, može biti od velike koristi, za opti- malno postavljanje režima u tehnološkome i energetskom smislu kao i u smislu duljine tra- janja procesa. Osim toga energija trošena po zakonu takvoga stroja može se smatrati važnim parametrom za ispravno vođenje procesa sušenja drva.

Posebno je potrebno istaknuti da uvedena veličina W_r nije ekvivalentna veličini C iz tablice 1. Veličina C sadrži svu energiju, osim energije disipacije, svedene na jedinicu isparene vlage. To nije samo en- ergija za istjerivanje vlage. Izlazak vlage iz drva remeti unutarnju ravnotežu, te entropija drvene tvari raste. Model toplinskoga stroja ne obuhvaća unutarnje interakcije. Taj stroj može raditi reverzibilno u smislu kružnoga procesa ako postoji "rashladni spremnik", tj. vlažni zrak drugih klimatskih vrijednosti. Tada nastaje navlažavanje i toplina kondenzacije predaje se rashladnom spremniku. U takvome kružnom procesu zaostane me- hanički rad utrošen na mehaničke promjene u unutrašnjosti i na površini drva.

4. ZAKLJUČAK 4. CONCLUSION

Teorijska analiza i praktični pokazatelji upozoravaju da specifična en- ergija može biti mjerodavan parametar za tehnološko praćenje procesa sušenja drva. Utvrđivanjem zakonitosti za svaku vrstu, sortiment i pogonsku sušionicu može se pronaći optimalni režim sušenja radi:

1. tehnološki povoljnog i pouzdanog sušenja, da pritom ne nastaju neželjene pogreške;
2. optimalnog ubrzavanja procesa sušenja uz "oslušivanje" specifične energije;
3. pouzdano utvrđivanje prosječne

mokrine drva u komori poznavanjem spe- cifične energije;

4. uštede toplinske i električne ener- gije postavljanjem optimalnoga režima sušenja i uklanjanjem konstruktivnih i izved- benih nedostataka komora.

Prema našim mjerenjima, velike ko- morne sušionice sa stajališta utroška električne energije od $0,14 \text{ kW/m}^3$ sušene građe mnogo su povoljnije od klasičnih malih kolosječnih komora koje zahtijevaju $0,8 \text{ kW/m}^3$ i od auto- matskih malih komora od $1,4 \text{ kW/m}^3$. Navedeni eksperimentalni rezultati mogu poslužiti i kao normativ energije pri sušenju hrastovih popruga debljine 25 mm.

Na osnovi dovoljno pouzdanih rezl- tata energije potrebne za isparavanje vode iz drva pri različito visokim vlažnostima moglo bi se na osnovi teorijske analize uvedenoga modela reverzibilnoga toplinskoga stroja zaključivati o prosječnim zakrivljenostima površine i promjerima kapilara. Takvo razmatranje može dovesti do različitih fun- damentalnih spoznaja o procesima u drvu.

5. LITERATURA 5. REFERENCES

1. Bošnjaković, F. 1976: Nauka o toplini, II dio. Tehnička knjiga, Zagreb, str. 315
2. Bošnjaković, F. 1978: Nauka o toplini, I dio. Tehnička knjiga, Zagreb, str. 68-71.
3. Bogner, A. 1995: Work of adhesion as a cri- terion for determination of optimum sur- face tension in adhesives, *Drva industrija* 46 (4), str. 187.
4. Dirksen, G.H.F.; Kraemer, W.P.; Roos, B.O. 1975: SCF - CI Studies of Correlation Effects on Hydrogen Bonding and Ion Hy- dration Theoret. *Chim. Acta*, 36, p. 249.
5. Glasstone, S. 1946: "Textbook of Physical Chemistry" (Nostrand Inc., New York) p. 342.
6. James, W.L. 1988: Research need in wood physics: a broad overview. *Wood and Fiber Science* 20(2), p. 227.
7. Kebarle, P. 1977: Ion Thermoschemistry and olvation from Gas Phase Ion Equilibria *Ann. Rev. Phys. Chem* 28, p. 445.
8. Krpan, J. 1965: Sušenje i parenje drva, Za- greb, 39-45.
9. Nquyen, T.; Johns, W.E. 1978: Polar and Dis- persion Force Contributions to the total Surface Free Energy of Wood Sci. *Technol.* 12, p. 63.
10. Primorac, M. 1988: Kontrola potrošnje topline u komornim sušionicama drva. *Strojarstvo* 30(I), p. 19.
11. Ražnjević, K. 1975: Termodinamičke tablice, Školska knjiga, Zagrb, str. 117. i 118.
12. Siau, J.F. 1971: Flow in wood, Syracuse University Press, Syracuse - New York, p. 12.
13. Weast, R.C. 1972 (editor): Handbook of Chemistry and Physics" (Chem. Rubber co., Cleveland, 1971-1972), ed. 52, p. F - 30.