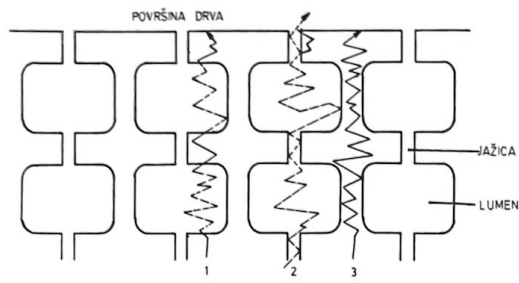


— neprekinutim kretanjem kroz stanične stijenke. Molekule vode kreću se kroz stanične stijenke skokovito s jednog na drugo sorpcijsko mjesto (sl. 3).



Slika 3. Načini kretanja vode u drvu ispod točke zasićenosti vlakancima

Molekula vodene pare može se za vrijeme prolaza kroz otvor jažične membrane kretati mehanizmom nazvanim otežana ili usporena difuzija. Molekula pare sudara se s jažičnom membranom. Prilikom sudara može biti adsorbirana u membrani, gdje se jedno vrijeme kreće kao vezana voda. Nakon toga ponovno isparuje i nastavlja kretanje kao molekula pare. Difuzija vodene pare odvija se kroz stanične lumene i jažične komore u neisprekidanom, dok se kroz stanične stijenke i jažične membrane vrši u isprekidanom obliku.

Molekule vode skokovito prelaze iz jednog sorpcijskog mjesta na drugo u prihvatajućim regijama stanične stijenke. Molekule su pridržavane na sorpcijskom mjestu vodikovim vezama. Čim postignu dovoljnu količinu kinetičke energije, iznad energije veze sa sorpcijskim mjestom da mogu preći na sljedeće sorpcijsko mjesto, postaju aktivirane molekule. Te aktivirane molekule s visokom energijom prelaze u područje susjednih sorpcijskih mjesta, gdje su ponovo prihvaćene, predaju dodatnu energiju drugoj molekuli, i proces se ponavlja. Potrebna energija za difuziju vode u obliku tekućine u drvu suma je energija potrebnih za te skokove molekula. Kretanje vode odvija se prema šupljim dijelovima drva gdje ima više slobodnih sorpcijskih mjesta.

Sorpcijsko mjesto u drvu može u prosjeku zadržati 6 molekula vode. Kod točke zasićenosti vlakancima neka sorpcijska mjesta vežu 3 do 4 molekule, druga čak 10 molekula vode. Svaka sljedeća molekula vode bit će zadržana na sve većoj udaljenosti i s eksponencijalno smanjenom privlačnošću. Mnogo će lakše biti otpuštena peta molekula i ponovno pridržana kao četvrta molekula na drugom sorpcijskom mjestu od npr. treće molekule koja prelazi na novo sorpcijsko mjesto kao druga molekula. Molekule koje posjeduju dovoljno visoku energiju, a nalaze se blizu površine stanične stijenke (vanjski sloj vode), isparavaju u stanične lumene i postaju molekule vodene pare. Te molekule vodene pare visoke ener-

gije u stalnom su pokretu i sudaraju se s drugim molekulama. Ti su sudari elastični. Rezultanta smjera ovih kretanja je stanična stijenka s nižim sadržajem vode. Dosegnuvši ovu staničnu stijenku, molekule pare mogu predati dio svoje energije i biti adsorbirane u njoj. One se dalje kreću mehanizmom kretanja vezane vode. Kada je stanična stijenka zasićena vodom, povećana je učestalost skokova molekula. Za čitavo vrijeme dok molekula vode ne primi dovoljno energije za prijelaz, ona ostaje na svom sorpcijskom mjestu. Nakon toga prelazi na sljedeće sorpcijsko mjesto. Ova učestalost prijelaza molekula vode postepeno se smanjuje, i kretanje vode difuzijom kroz staničnu stijenku postaje zanemarljivo. Iz istog razloga nastavkom sušenja smanjuje se koncentracija molekula vodene pare u staničnim volumenima. Voda se u drvu pri niskom sadržaju vode vrlo teško pokreće. U tom stadiju povećava se učešće kretanja vode u obliku vodene pare. Pri dovoljno niskom sadržaju vode, difuzija prelazi u čistu difuziju vodene pare,

Kretanje vode odvija se prema sušnim dijelovima drva. Povišena temperatura povećava kinetičku energiju molekula, učestalost skokova molekula raste i povećava difuziju u staničnoj stijenci. Porastom temperature povećava se i broj molekula vodene pare u staničnim lumenima. Brzina kretanja molekula pare raste s povećanom temperaturom. Broj aktiviranih molekula proporcionalan je tlaku vodene pare u drvu pri određenom sadržaju vode i temperaturi. S porastom temperature veći broj molekula vode postiže dovoljnu kinetičku energiju za svladavanje veza kojima su pridržavane s ostalim molekulama u tekućem stanju ili vezane na odgovarajuća sorpcijska mjesta. S napredovanjem procesa sušenja drva potrebno je sve više energije za svladavanje ovih veza.

Molekule slobodne vode u staničnim lumenima imaju nešto niži energetske nivo od obične vode. Razlika je vrlo mala. Nastaje zbog privlačnih kapilarnih sila. Molekule vodene pare u staničnim lumenima imaju najviši energetske nivo (isti kao i molekule vodene pare izvan strukture drva). Potencijalni nivo vezane vode u staničnim stijenka najniži je i predstavlja najstabilnije stanje.

Energetske nivo vezane vode najniži je neposredno kod apsolutno suhog stanja, a najviši u području zasićenosti stanične stijenke. Razliku nazivamo diferencijalna sorpcijska toplina. To je energija koju je potrebno dodati za isparivanje vode iz stanične membrane. Toplina vlaženja ovisi o sadržaju vode u drvu. Ukupna integralna toplina vlaženja je toplina koja se razvija od apsolutno suhog stanja do točke zasićenosti vlakancima. Diferencijalna toplina sorpcije je mjera za toplinsku energiju koju moramo dovesti molekulama vode za raskidanje veze između drva i vode. To je energija što je u procesu sušenja treba dodati latentnoj toplini isparivanja.

Razlike u brzini sušenja među vrstama drva kao i između srčevine i bjeljike iste vrste poslje-



dice su razlika u permeabilnosti i mogućnosti difuzije. Kretanje vode kroz staničnu stijenku sporije je od kretanja pare kroz stanične lumene. Zbog toga broj i debljina staničnih stijenki određuje brzinu kretanja vode. Kretanje vode okomito na smjer vlaknaca, kroz tanke stanične stijenke ranog drva, brže je od kretanja kroz odeblijale stanične stijenke kasnog drva. Prisutnost brojnih jažica u stanicama ranog drva pospješuje kretanje vode. Drvni traci s radijalno izduženim stanicama pospješuju kretanje vode u radijalnom smjeru. Prilikom kretanja vode u smjeru vlaknaca, manji je broj membrana na putu vodi, i kretanje vode je preko 10 puta veće od kretanja okomito na vlaknaca. To dokazuje intenzivno sušenje piljenica na čelima. Pretparenje drva kao i napad uzročnika plijesni (*Trichoderma*) povećava permeabilnost bjeljike.

Slobodna se voda kreće prema površini zbog kapilarnih sila. U vodi mora postojati mjehurić zraka, veći od pora u jažičnim membranama. Mora postojati veza između stanica (drvo mora biti permeabilno). Tlak u mjehuriću je negativan ili pozitivan, što se održava u vlačnoj ili tlačnoj sili, ovisno o tome da li je veća kapilarna napetost ili zajednički tlak zraka i vode. Ukoliko su jednaki, mjehurić je u statičkoj ravnoteži. Kada drvo zagrijemo, brzo se poveća tlak zraka i pare. Mjehurić će se širiti i, ukoliko je na drugoj strani tlak smanjen i jažice su permeabilne, mjehurić će kroz njih potisnuti vodu. Kod zagrijavanja jako permeabilnog drva (do vrenja), tlak u mjehuriću prerast će atmosferski i prema površini drva kretat će se znatne količine vode.

Kod manje permeabilnih vrsta, sadržaj vode na površini relativno brzo padne ispod točke zasićenosti vlaknaca, i voda počinje isparivati u unutrašnjosti drva. Brzina sušenja se smanjuje, a sadržaj vode na površini drva približi se ravnotežnom sadržaju vode.

Količina vode koja se kreće kroz različite veličine kapilara zavisi o njihovim polumjerima. Povremene kapilare, iako brojnije od pora jažičnih membrana, učestvuju svega s 0,01 do 0,02% ukupne količine, zbog svojih malih polumjera. Voda koja se kreće u ili kroz kapilarnu strukturu prolazi kroz sitne submikroskopske otvore, ili kroz staničnu stijenku u obliku tekućine.

Kapilarna kondenzacija osniva se na pojavi depresije tlaka pare u kapilarama. Kelvinova jednadžba daje odnose tlaka pare ( $p/p_0$ ) i polumjera kapilare ( $r$ ):

$$r = \frac{-2\sigma M}{\rho RT \ln(p/p_0)}$$

gdje je  $\sigma$  površinska napetost,  $M$  molekularna masa,  $\rho$  gustoća tekućina,  $R$  plinska konstanta,  $T$  apsolutna temperatura.

Kapilarna kondenzacija može nastati samo kod visokog sadržaja vode u higroskopskom području,

i to kod većih polumjera kapilara (obzirom na dimenzije molekula vode).

Prilikom sušenja sirovog drva, količina topline potrebna za isparivanje slobodne vode proporcionalna je gubitku vode do točke zasićenosti. Za sušenje drva ispod točke zasićenosti, potrebna je dodatna toplina, zbog svladavanja jakih privlačnih sila između drvene tvari i vode. Ova se dodatna toplina, iznad količine topline potrebne za isparivanje slobodne vode, zove integralna toplina vlaženja. Ona se može prikazati dodavanjem suhog drvnog brašna u posudu s dovoljno vode, u kojoj se nalazi termopar. Drvno brašno upija vodu, pri čemu se oslobađa toplina, koja nastaje zbog velike privlačnosti između drvene tvari i vode. Oslobodena toplina zagrijava vodu u posudi, što registriira instrument spojen s termoparom.

Molekule pare imaju u prosjeku veću potencijalnu energiju od molekula tekućine (koja je u ravnoteži s parom). Proces isparivanja mora stoga biti praćen dodavanjem, a kondenzacija oslobađanjem energije.

Energija adsorpcije vode u drvu uključuje: oslobodenu energiju prilikom adsorpcije vode u staničnim stijenkama drva i oslobodenu energiju pri kondenzaciji vodene pare. Razlika između navedenih energija je diferencijalna toplina vlaženja. To je dodatna oslobodena toplina iznad topline isparivanja vode kad drvo adsorbira vodu, ili dodatna energija iznad topline isparivanja potrebne za evaporaciju vode iz drva. Postoje metode za određivanje ove razlike: korišćenjem *Clausius-Clapeyronove* jednadžbe i temperature ovisno o sorpcijskoj izotermi drva, kao i mjerenjem oslobodene topline koja se razvija za vrijeme adsorpcije vode u drvu. Ukupna toplina adsorpcije jednaka je toplini vlaženja i toplini isparivanja.

Ranije se smatralo da kretanje vode u drvu ispod točke zasićenosti slijedi *Fickov* zakon difuzije, koji je dan jednadžbom:

$$W = D \frac{\Delta c t A}{L}$$

gdje je  $W$  masa vode koja se kreće kroz jedinicu površine drva u vremenu  $t$ , u promatranom smjeru  $x$  [ $g$ ];  $D$  konstanta proporcionalnosti nazvana koeficijent difuzije vode kroz drvo u smjeru  $x$  [ $cm^2/s$ ];  $\Delta c$  razlika u koncentraciji [ $g/cm^3$ ];  $t$  vrijeme [ $s$ ];  $A$  površina poprečnog presjeka uzorka [ $cm^2$ ];  $L$  dužina u smjeru toka [ $cm$ ]. Ustajljena difuzija može se izraziti u diferencijalnom obliku  $dm/dt = -D (dc/dx) dy dz$ , gdje je  $dm/dt$  promjena toka mase u jedinici vremena proporcionalna promjeni koncentracije ( $dc/dx$ ) po jedinici udajenosti u smjeru difuzije, s razlikom površine ( $dy dz$ ). Koeficijent difuzije ( $D$ ) je negativan, jer se kretanje mase javlja u smjeru smanjenja koncentracije. U integralnom obliku jednadžba glasi:  $m/t = DA (c_1 - c_2) / a$ , u kojoj je ( $A$ ) aktivna površina, ( $a$ ) debljina, ( $c_1 - c_2$ ) promjena koncentracije.



Fickov zakon pojednostavljen je matematički izraz postojećeg toka prema gradijentu koncentracije molekula koje se kreću. Jednadžba tvrdi da je iznos difuzije upravno proporcionalan pogonskoj sili sušenja, a obrnuto proporcionalan otporu. Proces difuzije u drvu kompleksna je pojava, i ne može se zadovoljavajuće izraziti Fickovim zakonom, no unatoč tome, često je korišćen Fickov zakon, s eksperimentalno određenim koeficijentom difuzije. Postoje indicije da ti odnosi ne mogu zadovoljavajuće izraziti fizikalni proces. Premještanje vode u kompleksnom materijalu kao što je drvo nije lako izraziti. Fickova jednadžba ne može se primijeniti za objašnjenje difuzije vezane vode iz slijedećih razloga: primjenjiva je samo za idealne sisteme (idealni plinovi, idealne otopine), a i ograničena je za izotermno stanje. Voda može istovremeno postojati unutar drva u različitim oblicima (vodena para, tekuća i adsorbirana voda), pa stoga nije moguće postaviti zadovoljavajuću jednadžbu za difuziju. Fickov zakon ne odgovora potpuno, no ipak daje podatke o važnim pojavama u drvu.

Fiziolog *Adolf Fick* je 1855. godine predložio zakon u pojednostavljenom obliku, s pretpostavkom da difuzija vode u drvu slijedi isti oblik koji je *Fourier* predložio za kretanje topline, a *Ohm* za vođenje električne struje.

Fickov su zakon u literaturi objašnjavali mnogi autori: *Tuttle*, 1925; *Ludwig*, 1933, *Egner*, 1934; *Voigt*, *Krischer* i *Schauss*, 1940; *Barrer*, 1941; *Jost*, 1952; *Skaar*, 1954; *Crank*, 1956; *Kúbler*, 1957; *Likov*, 1968; *Bramhall*, 1976; *Rosen*, 1976; *Wengert*, 1977; *Banks*, 1981; *Palin* i *Petty*, 1981.

Kretanje vode kroz drvo ovisi o pogonskoj sili sušenja, kao i o varijacijama u strukturi. Proračun izoternog kretanja vode u drvu može se izraziti pomoću koncentracije, sadržaja vode, gradijenta parcijalnog tlaka pare, relativne vlage, kemijskog potencijala, potencijala vode i ekspanzionog tlaka.

Difuzija u slobodnim prostorima u drvu je 100 do 1000 puta brža od difuzije u staničnoj stijenci. Kroz sitne se pore u jažičnim membranama lako kreće voda kao tekućina. Ovi su otvori premali da omoguće znatniju difuziju pare. Koeficijent difuzije vode u drvu kombinacija je koeficijenata difuzije vodene pare, difuzije tekućine kroz stanične stijenke i difuzije kroz otvore jažičnih membrana. Koeficijent difuzije vodene pare može se izraziti pomoću gradijenta sadržaja vode, parcijalnog tlaka pare ili kemijskog potencijala.

Koeficijent difuzije ovisi o temperaturi, sadržaju vode i gradijentu koncentracije (kao pogonskoj sili sušenja). Obrnuto je proporcionalan s drugim korjenom volumne mase drva. Kod niskog sadržaja, kretanje vode u drvu isključivo se odvija u obliku vodene pare. Razlike u strukturi drva imaju malen utjecaj na koeficijent difuzije.

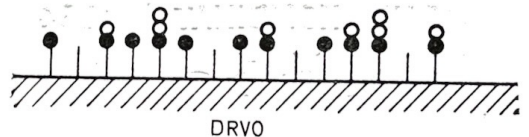
U prvom odsječku sušenja s konstantnom brzinom, voda isparava s površine, a slobodna se

voda kreće zbog kapilarnih sila prema površini. Vanjski uvjeti kontroliraju brzinu sušenja u ovom odsječku. Kad sadržaj vode na površini drva padne ispod kritične točke, počinje drugi odsječak. Granica isparivanja slobodne vode povlači se u drvo. Otpori kretanju pare prema površini drva povećavaju se, i unutarnji otpori postaju sve presudniji u kontroli iznosa sušenja. Završni odsječak sušenja počinje kad se granica isparivanja slobodne vode povuče u centar, tako da nema slobodne vode u drvu. Sušenje se nastavlja sve dok se ne postigne ravnotežni sadržaj vode.

Isparivanja u jažičnim otvorima mogu uzrokovati unutarnja naprezanja, ovisno o veličini otvora u jažici, čak i preko 100 bara. Javlja se difuzija i vanjski uvjeti utječu na sušenje. Kad je sva slobodna voda odstranjena iz drva, difuzija je kontrolni mehanizam sušenja drva.

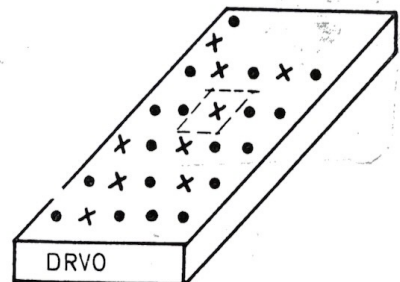
Sušenje drva odvija se u tri različite brzine. Konstantni iznos sušenja slijede razdoblja smanjenih iznosa. Drvo je podijeljeno u »vlažni« i »suhi« sloj, odvojeno granicom isparivanja, koja se pomiče od površine u unutrašnjost drva, kako napreduje sušenje.

*Babbitt* (1950) u svom modelu kretanja vode pretpostavlja da se sorpcija vode vrši u dva oblika. Primarni, molekule vode prihvaćaju se direktno na primarna sorpcijska mjesta, i sekundarni, molekule vode prihvaćaju se na sekundarna mjesta. Primarna su mjesta prihvatajuća mjesta visoke energije veze, kao što su hidroksilne grupe. Sekundarna su mjesta prihvatajuća mjesta niske energije veze i razmatrana su kao mjesta nadovezana na primarna ili ostala sekundarna mjesta (sl. 4).



Slika 4. Prikaz primarnih sorpcijskih mjesta (vertikalne linije) u stan. stijenci.

U modelu predloženom po *Babbitt-u*, sorbirana voda stvara film na unutrašnjim površinama stanične stijenke, gdje se kondenzira u jedan ili više slojeva. Kondenzirana voda, označena ovdje kao vezana voda, migrira u obliku individualne molekule vode u vodeni film (sl. 5).



Slika 5. Prikaz sorpcijskih mjesta zaposjednutih (•) i slobodnih (x), na unutarnjoj površini drva.

Predloženi model osniva se na prijedlogu da pogonska sila za transport sorbiranih plinova kroz krutu tvar nastaje zbog prostornog gradijenta tlaka širenja, a ne koncentracije kao što se pretpostavlja primjenom Fickovog zakona.

### ZAKLJUČAK

Kretanje vode u drvu ovisi o pogonskoj sili sušenja, kao i o varijacijama u strukturi drva.

Slobodna se voda kreće prema površini drva zbog prisustva kapilarnih sila, dok se vezana voda kreće difuzijom. Molekule slobodne vode u staničnim lumenima imaju niži energetska nivo od obične vode. Molekule vodene pare u staničnim lumenima imaju najviši energetska nivo.

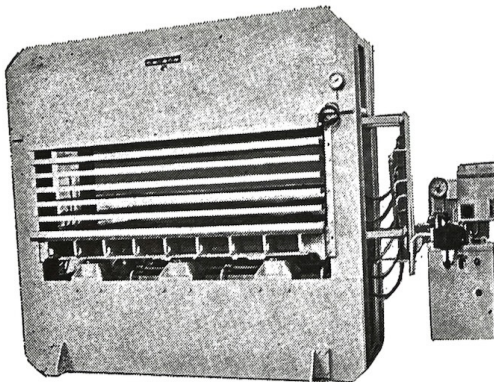
Potencijalni nivo vezane vode u staničnim stijenkama najniži je i predstavlja najslabije stanje.

### LITERATURA

- [1] Hawley, L. F., 1931: Wood-liquid relations. US Dep. Agr. Tech. Bull, 284, 34 pp.
- [2] Lykov, A. V., 1950: Teorija suški. Moskva-Lenjingrad 1950.
- [3] Krpan, J., 1953: Istraživanja higroskopske ravnoteže vlage zraka i drveta. Glasnik za šumske pokuse, br. 11., str. 5—51.
- [4] Jost, W., 1960: Diffusion in solids, liquids and gases. Academic Press New York, 558 pp.
- [5] Pavlin, Z., 1963: Sadržaj vode u drvu građevne stolarije. Drvna industrija, br. 1/2, 3—10.
- [6] Kinimonth, J. A., 1971: Permeability and fine structure of certain hardwoods and effects on drying. Holzforschung 25: 127—133.
- [7] Siau, J. F., 1971: Flow in wood. Syracuse Univ. Press, Syracuse, 131 pp.
- [8] Skaar, C., 1972: Water in wood. Syracuse Univ. Press, Syracuse, 218 pp.
- [9] Holman, J. P., 1976: Heat transfer, Mc Graw-Hill New York, 530 pp.
- [10] Siau, J. F., 1984: Transport processes in wood. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 236 pp.

Recenzent: prof. dr Božidar Petrić

SOUR KOMBINAT 1884  
belišće 



## Hidraulične preše za panel i furnir

- Tvrdi kromirani i fino brušeni klipovi omogućuju kvalitetno brtvljenje i dugu trajnost brtvila.
- Grijače ploče izrađene od čeličnih limenih ploča imaju izuzetno dug vijek trajanja.
- Kvalitetan hidraulični agregat garantira potpunu pouzdanost preša u eksploataciji.
- Osim standardnih preša za drvenu industriju izrađujemo i preše po narudžbi s različitim brojem etaža, dimenzijama ploča i drugim tehničkim karakteristikama prema zahtjevu kupca.
- Efikasno servisiranje preša i hidrauličnih agregata u garantnom i vangarantnom roku osigurano putem vlastite servisne službe.
- Imamo preko 20 godina tradicije u proizvodnji hidrauličnih preša za drvo, gumu, duroplaste, papir i specijalnih preša za razne namjene.

**TVORNIČA STROJEVA BELIŠĆE**  
54551 BELIŠĆE, YUGOSLAVIA, Telefon: centrala (054) 81-111  
kućni: Prodaja 293, 491, 251, Servis 290, 293, Telex 28-110

