

Vakuumsko sušenje piljenog drva

Sabljak, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:247569>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ
DRVNA TEHNOLOGIJA**

MARIN SABLJAK

VAKUUMSKO SUŠENJE DRVA

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, RUJAN 2020.

Podaci o završnom radu

Autor	Marin Sabljak 3.5.1997. Sisak JMBAG: 0068229413
Naslov	Vakuumsko sušenje drva
Predmet	Sušenje drva i drvnih materijala
Mentor	doc. dr. sc. Miljenko Klarić
Komentor	prof. dr. sc. Stjepan Pervan
Rad je izrađen	Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zavod za tehnologije materijala
Akad. god.	2019./2020.
Datum obrane	25.9.2020.
Rad sadrži	Stranica: I – VI + 23 Slika: 13 Tablica: 3 Navoda literature: 9
Sažetak	Sušenje drva je iznimno važan proces u drvnoj industriji, a koji se obavezno provodi prilikom proizvodnje drvenih proizvoda. Postoje različite tehnologije sušenja drva, dok se u novije vrijeme ističe vakuumsko sušenje. Vakuumsko sušenje drva ima brojne prednosti u usporedbi s ostalim tehnologijama sušenja, unatoč velikoj potrošnji energije i visokim troškovima investicije u postrojenje. U ovome završnom radu je obrađena tehnologija vakuumskog sušenja drva.

	Izjava o izvornosti rada	OB ŠF 05 07
		Revizija: 1
		Datum: 28.6.2017.

„Izjavljujem da je moj *završni rad* izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam *koristio* drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

vlastoručni potpis

Marin Sabljak

U Zagrebu, 25. rujna 2020.

Sadržaj

Podaci o završnom radu	I
Izjava o izvornosti rada	II
Sadržaj.....	III
Popis slika.....	IV
Popis tablica	V
Predgovor	VI
1. UVOD	1
1.1. Sušenje drva	1
1.2. Tehnologije sušenja drva	2
1.2.1. Tehnologija evaporacijskog sušenja	2
1.2.2. Tehnologija kondenzacijskog sušenja	3
1.2.3. Tehnologija visokotemperaturnog sušenja	5
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	6
3. TEHNOLOGIJA VAKUUMSKOG SUŠENJA	7
3.1. Vakuumsko sušenje drva	7
3.2. Zagrijavanje i grijanje	10
3.2.1. Zagrijavanje grijaćim pločama	10
3.2.2. Zagrijavanje bez grijaćih ploča.....	13
3.3. Komora za sušenje.....	15
3.4. Brzina sušenja.....	18
3.5. Kvaliteta sušenja	19
4. ZAKLJUČAK	22
5. POPIS LITERATURE.....	23

Popis slika

Slika 1. *Evaporacijska sušionica (izvor: <https://peskiadmin.ru/hr/sushilnaya-kamera-dlya-pilomaterialov-svoimi-rukami-izgotovlenie-sushilki.html>, 20.5.2020.)*

Slika 2. *Kondenzacijska sušionica*

(izvor: https://www.nigos.rs/kondenzacione_susare_za_drvo.html, 14.9. 2020.)

Slika 3. *Ovisnost vrelišta vode o atmosferskom tlaku (izvor: Pervan, 2000: Priručnik za tehničko sušenje drva. SAND)*

Slika 4. *Vakuumska sušionica s grijaćim pločama (izvor: Pervan, S., Specijalne metode sušenja)*

Slika 5. *Jednostavniji prikaz vakuumske sušionice sa grijaćim pločama (izvor: Parker, Jim: Vacuum lumber drying)*

Slika 6. *Prikaz grijaćih ploča (izvor: <https://idrywood.com/>, 15.8.2020.)*

Slika 7. *Manipulacija grijaćih ploča (izvor: VacDryKilns, 15.8.2020.)*

Slika 8. *Sušenje cirkulacijom zagrijanog zraka (izvor: <https://idrywood.com/idry-standard>, 15.8.2020.)*

Slika 9. *Izgled i shema poprečnog presjeka vakuumske sušionice (izvor: Pervan, S., Specijalne metode sušenja)*

Slika 10. *Izolacija komore za sušenje (izvor: Parker, J., Vacuum lumber drying)*

Slika 11. *Punjenje komore (izvor: <https://www.vacutherm.com/>, 20.7.2020.)*

Slika 12. *Uzorak nakon sušenja (izvor: VacDryKilns, 15.8.2020.)*

Slika 13. *Uzorak Južne bukve nakon sušenja (izvor: VacDryKilns, 15.8.2020.)*

Popis tablica

Tablica 1. Koeficijenti difuzije u ovisnosti o tlaku (izvor: Specijalne metode sušenja, Pervan)

Tablica 2. Odnosi trajanja sušenja kod sušenja bukove piljene građe različitih debljina (izvor: Specijalne metode sušenja, Pervan)

Tablica 3. *Prosječna vrijednost stope sušenja u vakuumu (izvor: A vacuum drying system for green hardwood parts, Zhangjing C., Fred M. Lamb, 2004.)*

Predgovor

Završni rad shvaćam kao priliku da u obliku istraživanja, prikupljanja informacija i proučavanje istih te donošenju zaključaka pokažem odrađenu razinu znanja i zrelosti u izražavanju dosljednu zvanja stečenog u trogodišnjem fakultetskom obrazovanju. U ovom radu provedeno je istraživanje literature vezane uz tehnologiju vakuumskog sušenja drva. Uvjeren sam da će čitatelju rada biti zanimljivo i od koristi proći kroz ovo istraživanje.

U ostvarenju završnog rada pomogli su mi ljudi kojima želim iskazati zahvalnost.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Miljenku Klariću i prof. dr. sc. Stjepanu Pervanu koji su mi svojim strpljenjem, stručnom pomoći, savjetima i literaturom pripomogli u izradi ovog završnog rada.

Posebnu zahvalnost iskazujem cijeloj svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržavali.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili uz mene bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam dosada postigao ne bi bilo moguće.

Velika hvala svima!

1. UVOD

1.1. Sušenje drva

Drvo kao prirodni obnovljivi materijal široke i raznolike primjene, pristupačan je u velikim količinama uglavnom u sirovom stanju i s prevelikim sadržajem vode za finalnu uporabu. Drvo u prirodi je vlažno, jedno od fizičkih svojstava drva je higroskopnost, što znači da se prilagođuje uvjetima okoline te s promjenom neposrednih klimatskih uvjeta sadržaj vode u drvu pada ili raste. Pravilno sušenje drva usmjereno je na postizanje najviše moguće kvalitete drva (Denig, 2000). Sušenje drva je postupak odstranjivanja najčešće jednog dijela ili sve vode iz drva na način da mu se ne umanjuje kvaliteta (Krpan, 1965). U drvu se voda nalazi u tri osnovna oblika: kao slobodna voda, vezana voda i kemijski vezana voda. Slobodna je voda sadržana u lumenima, i to uglavnom prozenhimatskog staničja drva (u trahejama, traheidama), a s fiziološkog je gledišta važna za živo stablo jer je nosilac rastopljenih hranjivih tvari u drvu. Vezana se voda nalazi u staničnim stjenkama. Kemijski vezanu vodu sadržavaju spojevi od kojih je izgrađeno drvo, o njoj se ne vodi briga jer se njezin sadržaj tijekom sušenja ne mijenja, zato što je sušenje fizikalni, a ne kemijski proces. Prilikom sušenja drva mijenjaju se samo količine slobodne i vezane vode te je podjela na slobodnu i vezanu vodu općenito prihvaćena (Krpan, 1965). S tehnološkoga gledišta, u procesima obrade i prerade drva vezana je voda važnija od slobodne, kao i tijekom finalne uporabe drva. U procesima sušenja slobodna voda ispari, kao i dio vezane vode, dok u drvu uvijek ostane određena količina vezane vode koju nazivamo konačnim sadržajem vode u drvu i koji ciljano nastojimo postići procesima sušenja. Konačni sadržaj vode u drvu važan je zato što se finalni drvni proizvod prilagođava mikroklimatskim uvjetima okoline u kojoj se nalazi (temperaturi i relativnoj vlazi zraka) (Pervan i sur. 2013).

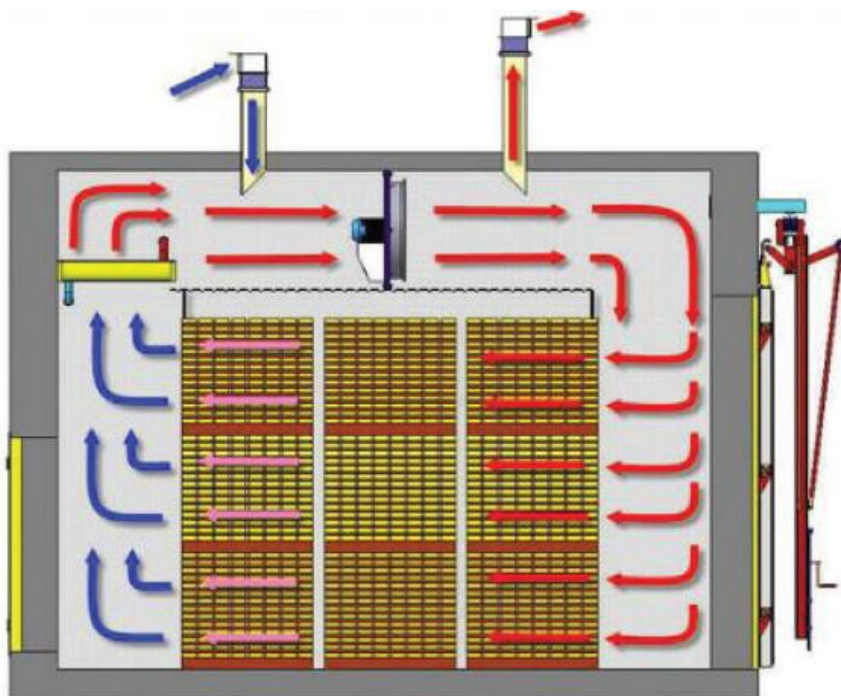
1.2. Tehnologije sušenja drva

Uobičajeno je dijeliti sušenje drva na prirodno sušenje i sušenje u sušionici (umjetno, tehničko) iako su za oba načina sušenja mjerodavni isti faktori: temperatura, relativna vlaga i brzina strujanja zraka. U sušionici se ti faktori mogu po potrebi mijenjati i kontrolirati, a pri prirodnom sušenju to nije moguće. Sušenjem se drvo uteže, smanjuje mu se masa, štiti se od gljiva i insekata, povećava mu se čvrstoća i tvrdoća, osposobljava se za površinsku obradu i lijepljenje, poboljšavaju mu se toplinska i električna svojstva te postaje podobnije i daje više topline ako je namijenjeno za gorenje (Krpan, 1985). Činitelji koji još utječu na trajanje umjetnog sušenja drva su debljina drva, volumna težina i struktura drva te početni i konačni sadržaj vode.

1.2.1. Tehnologija evaporacijskog sušenja

U većini slučajeva postupak poznat kao evaporacijsko sušenje primjenjuje se u umjetnom sušenju drva. Okolina u kojoj se drvo suši sastoji se od mješavine zraka i vodene pare i zato se ovaj univerzalni postupak sušenja drva ispod 100 °C naziva evaporacijsko sušenje drva (evaporacija = isparavanje) (Pervan, 2000). Za početno sušenje drva obično se koriste temperature od 38 °C do 54 °C, dok se za postizanje konačnog sadržaja vode manjeg od 15 % često koriste temperature od 66 °C do 93 °C. Više temperature i brži protok zraka glavni su uvjeti ubrzanog sušenja drva. Nadzor relativne vlažnosti ili vlage ravnoteže tijekom sušenja u sušionici potreban je kako bi se izbjegle moguće pojave grešaka kao posljedica nepravilnog sušenja. Sušionice su opremljene odgovarajućim ventilatorima koji osiguravaju potrebno strujanje zraka te zrak prolazi kroz ugrađene izmjenjivače topline (grijače). Cilj je konstantno mijenjanje uvjeta zraka, osiguranje konstantne topline drva i istodobno odvođenje vlage s površine drva. Potrebni uvjeti sušenja podešavaju se ručno ili automatskim kontrolnim sistemom, tako da se sušenje provede na najbolji način za zahtijevanu kvalitetu drva. Tijekom sušenja određeni udio zraka, koji je zasićen vlagom što se isparila s površine drva, izbacuje se kroz odvode zraka. U isto vrijeme jednaka količina zraka dodaje se sistemu u obliku svježeg zraka. Svježi je zrak uvijek sušiji nego zrak unutar sušionice. Time se

osigurava da zrak u sušionici može prilikom procesa sušenja apsorbirati još vlage s površine drva. Kada uvjeti u sušionici postanu presuhi, tako da može doći do grešaka kod drva, preko navlaživača dodaje se nužna voda zraku. Ovaj dodatak vode osigurava se u obliku raspršene magle ili u obliku vodene pare. Odgovarajući ugrađeni mjerni instrumenti, kao što su psihrometar ili mjerac ravnotežnog sadržaja vode sa temperaturnom probom, uređaji su kojima nadziremo uvjete u sušionici. Za kontrolu uvjeta sušenja i ravnotežnog sadržaja vode rabe se podaci dani higroskopnom ravnotežom drva. Ako se primjenjuju moderne tehnike, postupkom sušenja mogu se postići svi željeni rezultati kvalitete i kvantitete s odgovarajućom razinom ekonomičnosti (Pervan, 2000).

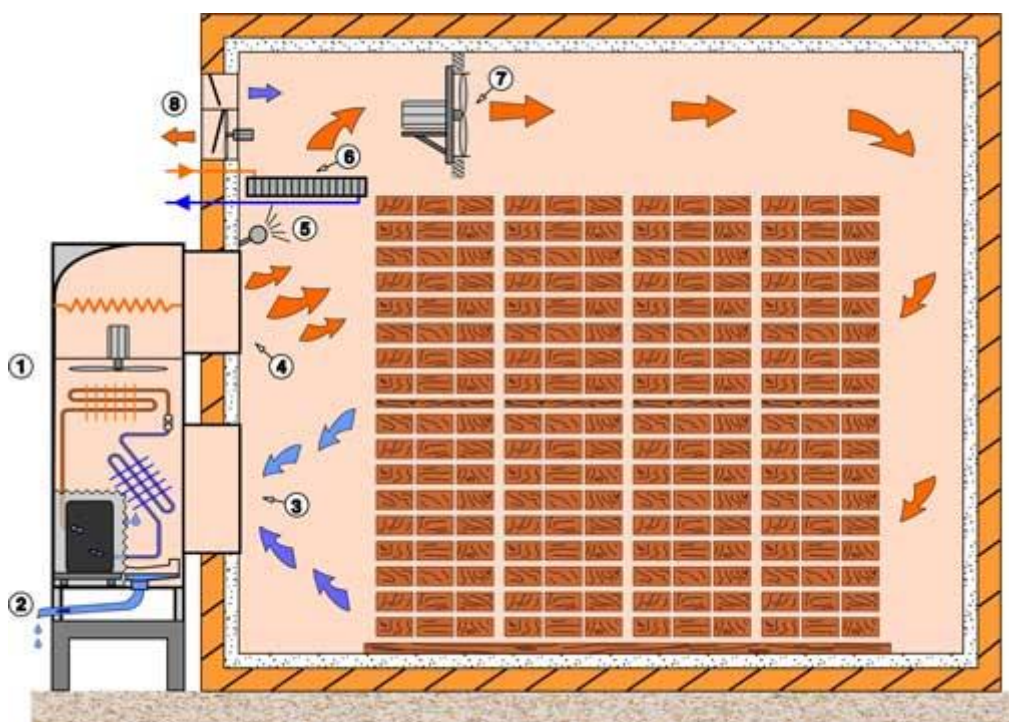


Slika 1. Prikaz evaporacijske sušionice (izvor: peskiadmin.ru)

1.2.2. Tehnologija kondenzacijskog sušenja

Karakteristična obilježja kondenzacijskih sušionica je da se drvo suši na nižim temperaturama koje se kreću između 25 °C do 45 °C. Zbog niže temperature sušenja, brzina sušenja je manja, ali je sušenje kvalitetnije, i uglavnom se koristi za zahtjevnije vrste drva i veće sortimente (Novak, 2008.) Izmjenjivači topline (grijači zraka) u kondenzacijskoj sušionici ili pomoćni grijači

zraka izvan kondenzacijske sušionice proizvode toplinu potrebnu za isparavanje. U suprotnosti s prethodno opisanim sušionicama, gdje se usisava svjež zrak i ispušta djelomice zasićen zrak, višak se vlage pri kondenzacijskom sušenju kondenzira na rashladnoj površini i odvodi iz sušionice u obliku tekućine. Po tome je ovaj način sušenja dobio ime kondenzacijsko sušenje. Može se vidjeti da se kondenzacijske sušionice, kao sve klasične sušionice, koriste mješavinom zraka i vodene pare, a sadrže grijače zraka i ventilatore.



Slika 2. Prikaz kondenzacijske sušionice (izvor: NIGOS, 2020.).

U ovoj vrsti sušionica nisu potrebni otvori za izmjenu zraka. U suprotnosti s uređajima za izmjenu zraka, ovdje postoji dodatni uređaj, rashlađivač (s rashladnom površinom) i kompresorski uređaj s vrlo visokim utroškom električne energije. Odgovarajući mjerni instrumenti za nadzor i regulaciju, kao što su psihrometri ili mjeraci sadržaja vode u drvu, u ovoj vrsti sušionica također moraju biti ugrađeni. Ako se uzmu u obzir sve činjenice, može se reći da kondenzacijske sušionice, kada se koriste najnovijom mogućom tehnikom i opremom, mogu također ekonomično sušiti drvo, sve do sadržaja vode ne nižeg od 15 do 12 %. Preduvjet je da nema na raspolaganju drugačije vrste energije nego električne (Pervan, 2000).

1.2.3. Tehnologija visokotemperaturnog sušenja

Visokotemperaturno sušenje danas se primjenjuje vrlo rijetko. U ovom postupku koristi se ili samo pregrijana para ili mješavina zraka i pregrijane pare. U slučaju sušenja pregrijanom parom, temperature vlažnog termometra u sušionici kreću se između 98 i 100 °C, dok se u slučaju mješavine pregrijane pare i zraka mnogo niže temperature vlažnog termometra. Usprkos mnogo višoj temperaturi isparavanja, sušenje pregrijanom parom je blaže, ali i polaganije nego sušenje u mješavini zraka i pregrijane pare. Prilikom sušenja na temperaturama suhog termometra iznad 100 °C i temperature isparavanja ispod 100 °C (od 75 do 95°C) ovaj tip sušenja zahtijeva mnogo kraća vremena sušenja, ali zbog oštine rezultira velikim gubicima. Razlika između ovih dvaju procesa jest u tome što je pri sušenju u pregrijanoj pari psihometrijska razlika mnogo manja nego pri sušenju u mješavini pregrijane pare i zraka. U mješavini pregrijane pare i zraka ove su razlike mnogo veće i rezultiraju mnogo većim naprezanjima u drvu, po kojima je ovaj način sušenja poznat. Sušenje u mješavini pregrijane pare i zraka, s odgovarajućim porastom tlaka unutar sušionice, rezultirat će bržim sušenjem, ali će se to uravnotežiti neekonomičnom, kompliciranom konstrukcijom sušionice. Takva konstrukcija treba podnijeti tlak od 3 bara. Za ovakvu vrstu sušenja utvrđeno je da nije ekonomično i rijetko se koristi. Kao rezultat zahtjeva za velikom količinom topline i značajnim kretanjem vode u drvu, moraju se ugraditi ventilatori s vrlo snažnim elektromotorima. Grijači su većih ogrjevnih površina nego grijači u klasičnim komornim sušionicama. Za početno navlaživanje i brže zagrijavanje rabi se vodena para, a višak vodene pare odstranjuje se kroz otvor za ispuštanje pare. Parametri stanja zraka mjere se psihrometrom i reguliraju prema trenutačnim zahtijevanim vrijednostima automatskom kontrolom. Visokotemperaturno sušenje pogodno je za sušenje četinjača ali i za topolu, obeche, sambu i wawu. Ne može se upotrebljavati za sirovo drvo većine listača. Ovaj postupak se primjenjuje kada su prihvatljivi promjena boje, curenje smole i manja uniformnost konačnog sadržaja vode. Važan preduvjet za primjenu ovog načina sušenja jest taj da se može proizvesti dovoljno visoka temperatura u sustavu za zagrijavanje (Pervan, 2000).

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Vakuumsko sušenje drva u drvnoj industriji u usporedbi s najraširenijim klasičnim konvekcijsko – komornim sušenjem uz djelomičnu izmjenu zraka, ima dvije značajne prednosti. Prva je ta da se sušenje odvija na nižim i znatno blažim temperaturama (kao u kondenzacijskom sušenju) što je posebno važno za vrste drva koje su osjetljive na višu temperaturu i promjenu boje te podtlak koji dobro utječe na protok vode u drvu zbog razlika u tlaku između unutarnjih slojeva i površine drva što rezultira blagom a istodobno velikom brzinom sušenja (kao u visokotemperaturnom sušenju). Cilj istraživanja je opisati tehnologiju sušenja drva u vakuumu na temelju proučavanja literature.

3. TEHNOLOGIJA VAKUUMSKOG SUŠENJA

3.1. Vakuumsko sušenje drva

Kao i kod konvencionalnog sušenja i vakuumsko sušenje se sastoji iz nekoliko tehnoloških faza i to: zagrijavanja drva, prve faze sušenja, druge faze sušenja, treće faze sušenja i kondicioniranja.

a) *Zagrijavanje* - U ovoj fazi moraju se zagrijati i sušionica i materijal (drvo) do temperature koja je optimalna za sušenje. Prijenos topline vrši se kretanjem pare koja se na drvu kondenzira i predaje mu latentnu toplinu isparavanja. Faza zagrijavanja se završava kada temperatura drva dostigne temperaturu isparavanja. Uslijed visoke toplinske vodljivosti vlažnog drva, ono brzo dostiže potrebnu temperaturu i u unutrašnjosti.

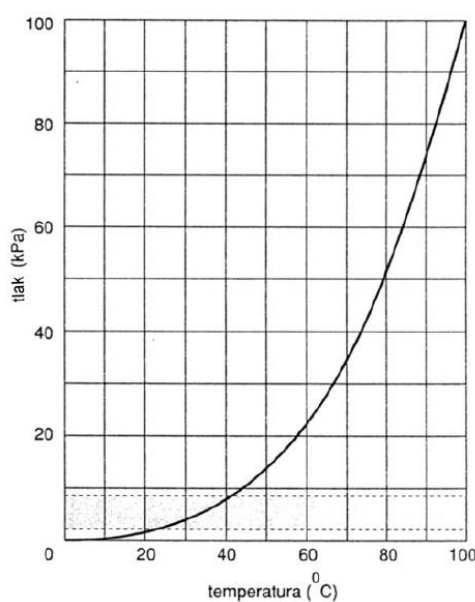
b) *Prva faza sušenja* - Brzina sušenja u prvoj fazi je konstantna. Temperatura površine drva jednaka je temperaturi vrenja, a brzina isparavanja ograničena je količinom topline koju pregrijana para predaje površini drva. Trajanje prve faze ovisi, prije svega, o intenzivnosti kapilarnog kretanja slobodne vode i završava se kada je dotok slobodne vode manji od ekvivalentne količine topline potrebne za prelazak vode u paru. Višak topline povisuje temperaturu površine drva.

c) *Druga faza sušenja* - počinje kada se površina drva osuši ispod granice higroskopnosti, a "mokra" linija na kojoj je uspostavljena temperatura vrenja pomiče se u unutrašnjost drva. Brzina sušenja ovisi o difuznosti (od "moke" linije prema površini) i o toplinskoj vodljivosti drva (od površine prema "mokroj" liniji). Druga faza se završava kada je drvo po cijelom presjeku (debljini) osušeno ispod granice higroskopnosti. Zbog osjetljivosti nekih vrsta drva na visoke temperature potrebno je voditi računa o stupnju pregrijavanja pare.

d) *Treća faza sušenja* - Uloga ove faze je da se drvo ravnomjerno osuši do konačne vlažnosti po cijeloj svojoj debljini. Vlažnost unutrašnjih slojeva se mora što više približiti ravnotežnoj vlažnosti do koje je osušena i površina drva.

e) *Kondicioniranje* - Vakuumsko sušenje se završava kondicioniranjem. U toku ove faze površina drva sa navlažuje i vlažnost joj se izjednačava sa vlažnošću unutrašnjih slojeva. U fazi kondicioniranja klima se podešava stupnjem pregrijavanja pare. (Pervan, S).

U drvnoj industriji se vakuumska tehnika ne koristi samo kod sušenja drva, već i kod oplemenjivanja, dubinskog bojenja, impregnacije i dimenzijske stabilizacije drva. Svrha vakuumskog načina sušenja jest kombinacija dviju važnih prednosti do sada opisanih postupaka sušenja: sušenja na niskim, blažim temperaturama (kao u kondenzacijskom sušenju) i s velikom brzinom sušenja (kao u visokotemperaturnom sušenju). Sušenje vakuumom temelji se na snižavanju točke ključanja vode u vakuumu, jer povećanjem vakuuma smanjuje se točka ključanja i povećava koeficijent difuzije nekoliko puta. Tlak sušenja je između 5 i 20 kPa, a točka ključanja vode pri tlaku od 5,32 kPa je 30 °C (Novak, 2008). Ova metoda sušenja koristi se činjenicom da vrelište vode ovisi o atmosferskom tlaku. Kao što je poznato, voda pri normalnom atmosferskom tlaku od približno 1 bara vrije na približno 100 °C. Ako atmosferski tlak pada, temperatura pri kojoj voda isparava snižava se. Glavni faktor koji se suprotstavlja bijegu vode iz drva jest vanjski atmosferski tlak. U već opisanim postupcima sušenja ovaj se otpor prevladava povišenjem temperature na razinu blizu vrelišta vode. U vakuumskim sušionicama ostvaruje se sniženje okolnog atmosferskog tlaka. To ubrzava kretanje vode u kapilarama drva teoretski 4 do 5 puta. U svezi s tim, drvo se zagrijava (posebno deblje drvo) da se postigne optimalan učinak sušenja i u unutrašnjima slojevima drva.



Slika 3. Ovisnost vrelišta vode o atmosferskom tlaku (izvor: Specijalne metode sušenja drva).

Kada voda doprije do površine drva, trenutačno se isparava zato što je već dosegla temperaturu isparavanja. Prije opisani postupci sušenja zahtijevali su 100 °C da bi postigli jednak učinak. Pri tlaku od 0,1 bara, dovoljne su temperature od 40 do 50 °C.

Niži tlakovi (vakuum) pospješuju kretanje vode u drvu, tako da je koeficijent difuzije vlage kroz drvo za nekoliko puta veći nego pri normalnom (atmosferskom) tlaku, što je prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Koeficijenti difuzije u ovisnosti o tlaku (izvor: Specijalne metode sušenja, Pervan).

Tlak (kPa)	Koeficijent difuzije ($\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-7}$)	Odnos (100kPa = 1)
100	0,38	1,0
64	0,41	1,1
32	0,60	1,6
16	0,83	2,2
8	1,78	4,7

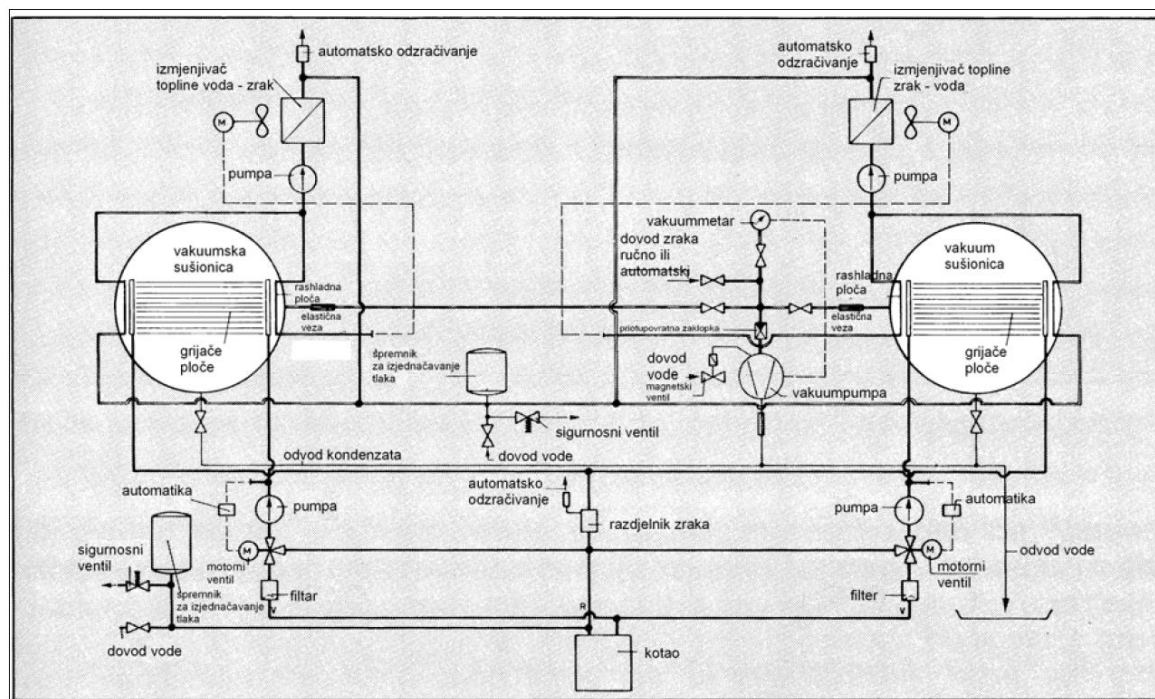
Osnovni problem sušenja drva u vakuumu je slaba razmjena topline između zraka i drva (razmjena topline u mediju je smanjena, jer je u razrijeđenom zraku smanjen broj molekula plina, odnosno povećan je njihov međusoban razmak, čime se smanjuje mogućnost njihovog sudara, tj. prenošenja kinetičke energije što rezultira smanjenjem razmjene topline) te zbog toga dolazi do otežanog zagrijavanja materijala za sušenje. Smanjeni koeficijent prijelaza topline lako se nadomješta povećanjem brzine kretanja zraka za sušenje: sniženjem zraka za petinu, brzina kretanja zraka morala bi se povećati pet puta, ako želimo održati isti učinak. Međutim, ovakvim načinom bi se povećali troškovi električne energije uslijed povećanog potrebnog kapaciteta ventilatora. Vakuumsko sušenje se sastoji od 4 tehnoloških faza i to su: zagrijavanje i grijanje, vakuumiranje, kondenzacija i odstranjivanje kondenzata (Pervan, 2000).

3.2. Zagrijavanje i grijanje

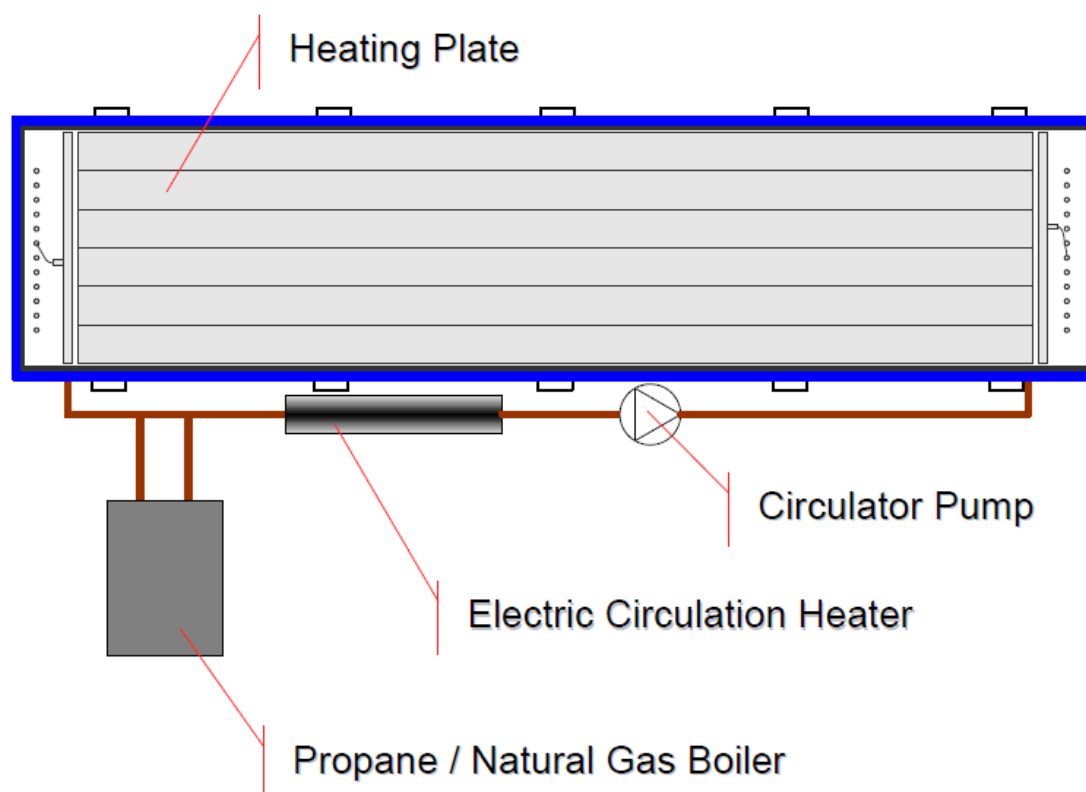
Da bi započelo sušenje drva pod vakuumom, drvo je potrebno zagrijati na temperaturu najmanje od 40 do 50 °C. Zbog smanjenog atmosferskog tlaka tada će se dosegnuti krivulja vrelišta vode. U svezi s tim količina topline koja se drvu oduzima s isparenom vodom mora se stalno nadomještati. U klasičnom načinu sušenja toplinu prenosi cirkulirajuća mješavina zagrijanog zraka koja osigurava drvu nužnu količinu topline. Prilikom čistog vakuumskeg sušenja ova mogućnost ne postoji, s obzirom na to da je u vakuumskoj sušionici preostala vrlo mala količina zraka. Zato kada se primjenjuje neprekinuti vakuum, tražena količina topline može biti prenesena samo direktnim kontaktom s grijaćim površinama ili grijaćim medijem. Ako se postupak vakuumom prekida u pravilnim intervalima, drvo se može zagrijati konvekcijski kao kod klasičnog postupka sušenja uz pomoć ventilatora i grijača zraka. Ove različite metode zagrijavanja i grijanja dovele su do industrijske uporabe slijedećih postupaka: zagrijavanje grijaćim pločama, zagrijavanje tekućim grijaćim medijem, zagrijavanje cirkulacijom zagrijanog zraka i zagrijavanje zračenjem. U privredi se najčešće koriste metoda zagrijavanja direktno grijaćim pločama.

3.2.1. Zagrijavanje grijaćim pločama

Kod ove metode toplina se na drvo prenosi sa grijaćih ploča, koje se sa sortimentima drva naizmjenično slažu – red po red. Grijaće ploče su preko razdjeljivača povezane sa grijaćim agregatom putem fleksibilnih cijevi. S obzirom na to da se grijaćim pločama mora rukovati zajedno s drvom tijekom punjenja i pražnjenja, kontakti s izvorom topline moraju biti odvojivi. Zagrijavanje ploča vrši se najčešće toplom vodom temperature od 50 do 90 °C ili električnom energijom. Zato su cijevi ili vodiči spojeni s razvodnikom vrele vode ili distributerom električne energije preko brzo namjestivih spojeva. Ploče su u potpunosti izrađene od aluminijske čistoće 99,5 %, a u njihovoj unutrašnjosti je sustav cijevi kroz koji cirkulira grijaći medij. Izgled vakuumske sušionice sa pločama s kontaktnim postupkom razmjene topline prikazan je na slici 4.

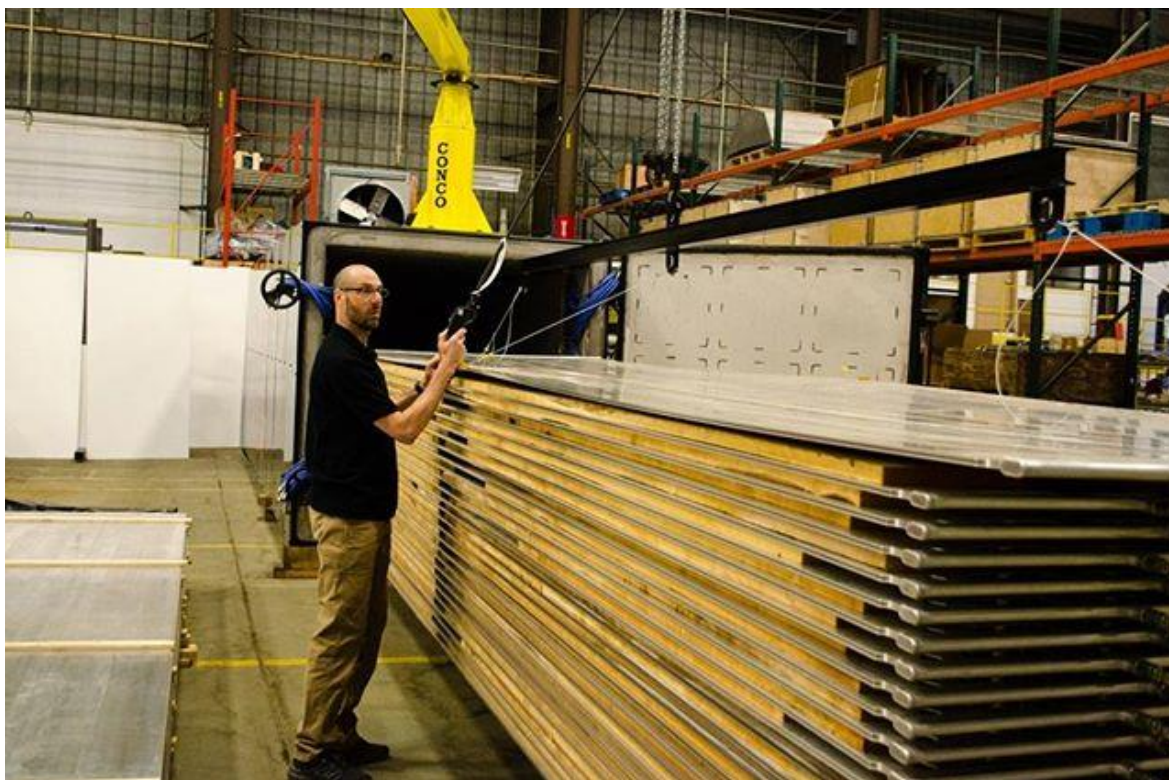


Slika 4. Vakuumska sušionica s grijaćim pločama (izvor: Pervan, S., *Specijalne metode sušenja*).



Slika 5. Jednostavniji prikaz vakuumske sušionice sa grijaćim pločama (izvor: Parker, Jim: *Vacuum lumber drying*).

Metoda grijanja grijaćim pločama prikazana je na slici 6.



Slika 6. Prikaz grijaćih ploča (izvor: <https://idrywood.com/>, 15.8.2020.).

Kada su u pitanju zračni zazori između grijaće ploče i drva može se reći da se koeficijent λ_v (toplinska vodljivost zraka) značajno smanjuje u vakuumu. Uzrok leži u smanjenom broju molekula u jedinici volumena plina te smanjenom mogućnošću međusobnih sudara, a time i smanjenim prijenosom energije. Ukupno gledajući, količina prenesene toplinske energije se značajno smanjuje, što se mora odraziti i na brzinu zagrijavanja i temperaturno polje u drvu.

Manipulacija grijaćih ploča koje su izrađene od aluminija moguće je izvesti vakumskim papučama prikazano na slici 7.



Slika 7. Manipulacija grijaćih ploča (izvor: <https://idrywood.com/idry-standard>, 15.8.2020.).

3.2.2. Zagrijavanje bez grijaćih ploča

U slučaju zagrijavanja cirkulacijom zagrijanog zraka primjenjuje se, osim čistog vakuumskog procesa, u pravilnim intervalima zagrijavanje i cirkulacija zraka grijaćima i ventilatorima pri atmosferskom tlaku, takav način zagrijavanja je

prikazan na slici 8. Ovaj "miješani postupak" zahtijeva odgovarajuću opremu i konstrukcijske napore, s obzirom na to da se zapravo moraju iskoristiti sve komponente klasične komorne i vakuumske sušionice (Pervan, 2000).



*Slika 8. Sušenje cirkulacijom zagrijanog zraka (izvor:
<https://idrywood.com/idry-standard>, 15.8.2020.)*

Kod zagrijavanja zračenjem drvo koje treba osušiti izlaže se polju mikrovalnog zračenja, čime se dodatno ubrzava postupak sušenja u vakuumu. Obilježje je ovog procesa da zagrijavanje drva kreće od unutrašnjih slojeva prema vanjskim. Bez opasnosti od nastanka grešaka, mogu se postići skraćena vremena sušenja od 90 % u odnosu na klasični način sušenja. Troškovi opreme vrlo su visoki, tako da ovaj postupak nema primjene u praksi (Pervan, 2000).

Sušenje vakuumom bez grijaćih ploča znači da se drvo zagrijava direktno tekućim medijem, cirkulacijom zagrijanog zraka ili zračenjem. U postupku zagrijavanja tekućim medijem sušionica se puni tekućinom (najčešće je to prirodno ulje ili parafinski proizvod) koja se ne miješa s vodom i koja ima vrelište od oko 150 do

180 °C, a zagrijava se na 80 °C uz istodobno vakuumiranje. Tekućina zagrijava drvo i izaziva vrenje vode u drvu. Danas se taj postupak zagrijavanja uljem vrlo rijetko koristi (Pervan, 2000).

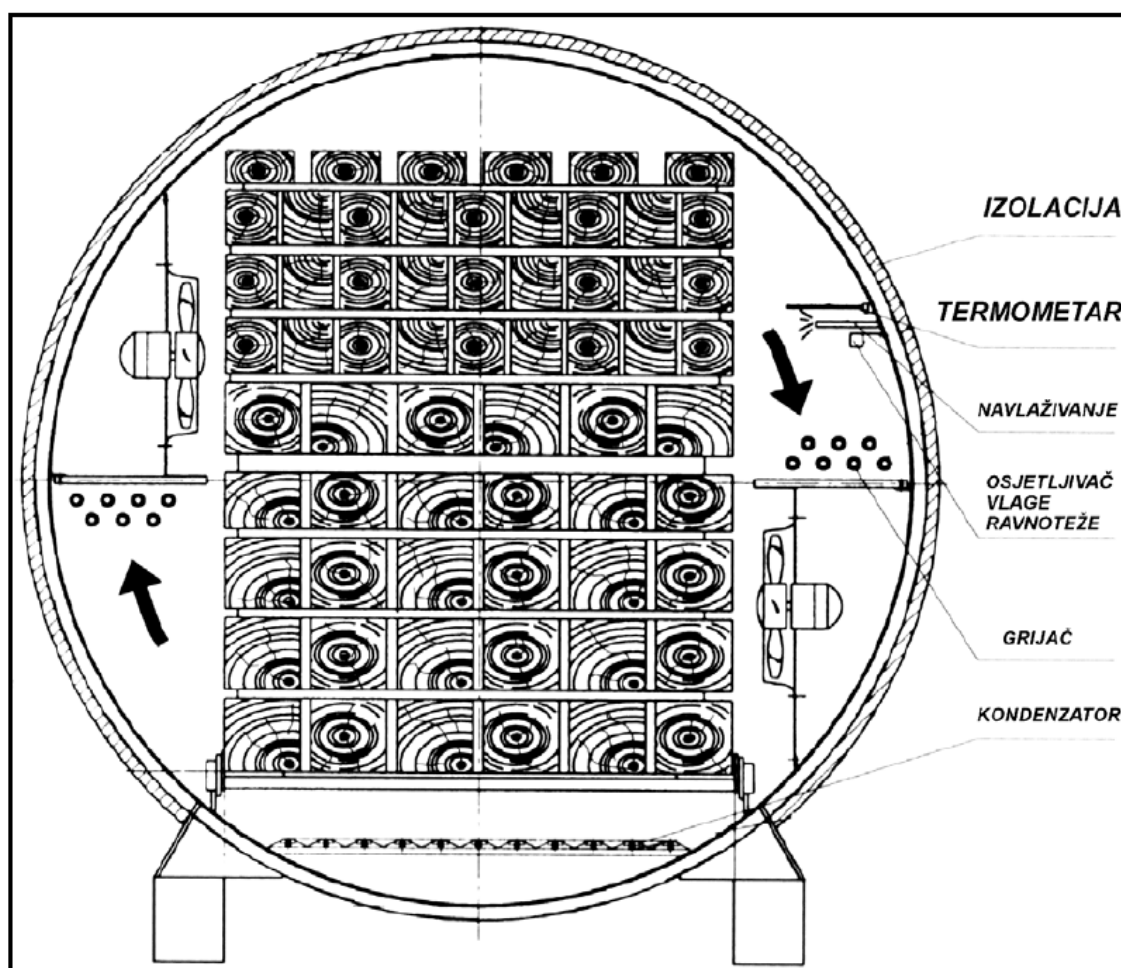
3.3. Komora za sušenje

Da bi se postigao vakuum, potrebna je vakuumska pumpa. Kod često korištenih zabrtvljenih (membranskih) pumpi, vakuumska pumpa je spojena na sistem opskrbe vodom koji se kontrolira automatskim kontrolnim ventilom. Vakuum se kontrolira vakuumskim prekidačem.

Voda isparena iz drva smanjuje vakuum u sušionici. U načelu, vodena para može se odstraniti vakuumskom pumpom. Ovo rješenje vrlo je nepovoljno, s obzirom na to da vodena para zauzima mnogo veći volumen nego ista količina kondenzata. Vakuumska pumpa morala bi tada biti predimenzionirana i u skladu s tim prevelike snage. S toga se vodena para kondenzira na kondenzacijskim rashladnim pločama. Površinska temperatura ovih ploča mora se održavati na temperaturi koja je niža nego temperatura vrelišta u sušionici. Na slici 9. u poprečnom presjeku prikazana je oprema vakuumske sušionice koja se koristi za diskontinuirano vakuumsko sušenje gdje se koristi i zrak za zagrijavanje. Komore za vakuumsko sušenje imaju ograničeni kapacitet punjenja (maksimalno 20 m³). I pored toga, godišnji korisni kapacitet ovakvih instalacija znatno je veći u usporedbi sa komorama istog korisnog kapaciteta punjenja kod konvencionalnih metoda (konvektivne sušionice). Rezultati ispitivanja pokazuju da je vrijeme sušenja piljene građe u vakuumskim sušionicama nekoliko puta manje u usporedbi sa trajanjem sušenja u konvektivnim sušionicama za građu približno istih karakteristika, što najbolje ilustriraju podaci prikazani u tablici 2. (Pervan, 2000).

Tablica 2. Odnosi trajanja sušenja kod sušenja bukove piljene građe različitih debljina (izvor: Specijalne metode sušenja, Pervan)

Debljina građe (mm)	Indeks trajanja sušenja	
	Vakuum	Konvencionalno
55...65	1	3,9
70...85	1	6,8
90...100	1	8,0



Slika 9. Izgled i shema poprečnog presjeka vakuumske sušionice (izvor: Pervan, S., *Specijalne metode sušenja*).

Kondenzat se skuplja na dnu sušionice i može se odstranjivati ručno ili automatskim putem. Kod ručnog odstranjivanja kondenzata, kada je dosegnuta najviša razina kondenzata uključuje se svjetlosni ili zvučni signal, vakuum se prekida i ulaznim ventilom u sušionicu se ručno pušta zrak, dok se kondenzat ispušta odvodnim ventilom ili otvaranjem vrata sušionice. Zatim se ponovno provodi vakuumiranje. Ovom metodom potrebno je prekidati vakuumsko sušenje. Kod automatskog uklanjanja kondenzata uređaji su opremljeni odvojenim sustavom za odstranjenje kondenzata koji automatski ispumpava kondenzat, bez potrebe za ručnom intervencijom. Ovim putem vakuumiranje se nastavlja bez prekida u sušenju (Pervan, 2000).

Kao izolacija koristi se poliuretanska pjena ili mineralna vuna. Oba materijala imaju niske koeficijente toplinske vodljivosti 0,025 – 0,035; dok je za mineralnu vunu

nešto viši koeficijent. Mjerna je jedinica W/mK. Primjer izolacije komore za sušenje je prikazano na slici 10.



Slika 10. Izolacija komore (izvor: Parker, J., Vacuum lumber drying).

Temperatura se mjeri uz pomoć otpornika koji mijenjaju vrijednost otpora s promjenom temperature. Otporni termometri na bazi platine općenito se najčešće upotrebljavaju kao visokokvalitetni osjetljivači koji daju vrlo točna očitavanja.

Sušionica se najbolje puni kolicima na tračnicama prikazano na slici 11. U praksi se pokazalo praktičnim imati u rezervi drugi komplet grijaćih ploča. Tada se može pripremiti drugi složaj, dok se prvi još suši. Na taj se način postupak sušenja ne prekida dugotrajnim preslagivanjem složaja osušene građe i slaganjem mokre građe. Ako se instalira nekoliko vakuumske sušionice jedna pokraj druge, upotrebljava se posebna prijenosna platforma za lakše punjenje i pražnjenje sušionica.



Slika 11. Punjenje komore (izvor: <https://www.vacutherm.com/>, 20.7.2020.)

Automatska regulacija zagrijavanja drva, vakuumiranja, kondenzacije i odvodnje kondenzata može se postići kontrolnim sustavom. Njime se nadziru temperaturni osjetljivači, smješteni u složajevе, koji nadziru zagrijavanje, i mjerači smanjenja sadržaja vode u drvu te sukladno tome odgovarajućeg napretka u postupku sušenja (Pervan, 2000).

Veliki nedostatak komora za sušenje, smijemo li to tako nazvati je mali kapacitet (od 3 do 20 kubnih metara). Novijom tehnologijom pokušava se ukloniti ova mana.

3.4. Brzina sušenja

Sušenje u vakuumu putem grijaćih ploča je brzo u odnosu na konvencionalno sušenje. Za 25 mm debljine elementa crvenog hrasta sigurna stopa sušenja iznositi će 3,5 % gubitka vode dnevno. Iz tablice 3. crveni hrast može se sušiti s 64 % sadržaja vode na 5,4 % unutar 27 h pri temperaturi od 50 °C. U toj situaciji stopa sušenja iznosi 2,16 % sadržaja vode po satu.

Tablica 3. Prosječna vrijednost stope sušenja u vakuumu (izvor: A vacuum drying system for green hardwood parts, Zhangjing C., Fred M. Lamb, 2004.)

Temperatura (°C)	30	35	40	45	50
Početni sadržaj vode (%)	74.08	67,32	68,59	67,34	64,05
Konačni sadržaj vode (%)	8,12	5,49	4,82	4,38	5,43
Prosječna stopa sušenja (%/h)	1,074	1,383	1,521	2,058	2,163

Brzo sušenje pripisuje se i efektivnoj metodi prijenosa topline. Voda koja se koristi kao medij za grijanje ima veliki kapacitet grijanja tako da se toplina učinkovito može prenijeti na drvo preko grijaćih ploča. Stope sušenja bile su povezane s temperaturom vode i tlakom unutar komore. Isto tako, što je viša temperatura vode koja cirkulira kroz grijaće ploče, sušenje je brže. Temperatura vode ne treba prelaziti 60 °C, time je eliminiran potrební kotao koji se koristi u konvencionalnom sušenju (Fred M. Lamb, 2004). Vremena sušenja su kratka što omogućava prilagodljivu proizvodnju posebno zato jer je vakuumsko sušenje prikladno za sve vrste drva. U vakuumu se ne može preporučiti sušenje vrlo vlažnog drva, jer iznad 50 % sadržaja vode kod većine vrsta drva postoji velika opasnost od kolapsa sistema (Hasan, Karbegović).

Slični podaci navode se i za sušenje piljene građe hrastovine debljine 50 mm. Trajanje vakuumskog sušenja od početne vlažnosti 57 % do konačne vlažnosti od 7 % iznosilo je 88 sati (3,7 dana) pri srednjoj brzini sušenja od 0,7 %/h. Kod konvektivnog sušenja istog materijala od početne vlažnosti 57 % do konačne vlažnosti 8 % trajanje je bilo 63 dana pri srednjoj brzini sušenja 0,78 %/dan. Znači da je brzina vakuumskog sušenja bila čak za oko 17 puta veća u odnosu na konvektivnu metodu.

3.5. Kvaliteta sušenja

Niži stupanj temperature sušenja omogućava manju uporabu energije za zagrijavanje i pregrijavanje drva i svih naprava, kao i manje gubitke topline u okolinu. Važno je reći i to, da se sušenje odvija uz znatno smanjenu prisutnost kisika, što smanjuje mogućnost promjene boje. Veliku ulogu u promjeni boje drva

ima kemijski sastav drva. Drvo zbog povišenih temperatura mijenja boju uz prisutnost kisika zbog ekstraktivnih tvari. U vakuumu se izlučuju i isparivi dijelovi smole te se kristaliziraju, a to sprječava kasnije istjecanje smola. Vakuumska metoda preporučuje se za sušenje obradaka svih dimenzija. Ovaj se sustav primjenjuje na sušenje velikih dimenzija i vrste drva i materijala koje je teško sušiti, kao što je crveni hrast (Zhangjing, 2004).

Na slici 12. i 13. prikazani su uzorci pravilno osušeni vakuumskom metodom, gdje su pri tome izbjegnute greške koje se lako mogu pojaviti kod konvencionalnog sušenja drva.

Na slici 12. prikazan je uzorak nakon vakuumskog sušenja (na slici gore), te uzorak iz iste piljenice nakon sušenja klasičnom metodom (na slici dolje). Unutarnje se pukotine javljaju prema kraju postupka sušenja, na stupnju nakon kojeg drvo postaje skorjelo zbog oštih uvjeta sušenja na početku procesa. Tijekom kasnijih faza procesa sušenja, kada se središte piljenice osušilo ispod točke zasićenosti vlakanaca te se blizu površine razvijaju tlačna naprezanja, dok se u središtu javljaju vlačna naprezanja. Kada vlačna naprezanja prijeđu čvrstoću drva javljaju se unutarnje pukotine.



Slika 12. Uzorak nakon sušenja (izvor: VacDryKilns, 15.8.2020.)

Na slici 13. prikazan je uzorak južne bukve (lat. *Nothofagaceae*). Naziva se još sjajna ili antarktička bukva i raste u Južnoj Americi i Australiji. Za tu vrstu drva važi da je jedna od najtežih vrsta u svijetu za sušenje. Kod klasičnog komornog sušenja ovu vrstu drva je teško pravilno osušiti zbog karakteristične teksture i boje, te je osjetljiva na promjenu boje zbog visokih temperatura sušenja, dok je uzorak na slici osušen vakuumskim putem bez grešaka.



Slika 13. Uzorak južne bukve nakon sušenja (izvor: VacDryKilns, 15.8.2020.)

4. ZAKLJUČAK

Cilj vakuumskog sušenja drva jest osušiti drvo na vlažnost koja odgovara za ugradnju ili finalnoj upotrebi, odnosno preradi ili obradi. Vakuumske sušionice zbog male korisne zapremnine dolaze u obzir kao korisna i prilagodljiva nadopuna kapaciteta konvencionalnim sušionicama. Vakuumska metoda se preporučuje za visokokvalitetno sušenje raznih vrsta te obradaka svih dimenzija početnog sadržaja vode manjeg od 50 %. Jedna od prednosti vakuumskog sušenja je sušenje na nižim i blažim temperaturama, zbog toga je vjerojatnost promjene boje drva vrlo mala te samim time pojava grešaka je svedena na minimum. Velika brzina sušenja ima značajnu ulogu na tržištu zato što se može vrlo brzo reagirati i osušiti elemente drva za krajnjeg korisnika, i sve to u roku od nekoliko dana u nekim slučajevima. Mana vakuumskih sušionica je povećana potrošnja električne energije, ali je kvaliteta osušene građe dosta veća. Zbog nižih temperatura sušenja smanjena je mogućnost pojave grešaka i gubitaka. U posljednje se vrijeme sve više radi na ispitivanju i istraživanju metode vakuumskog sušenja drva kao i pratećih uređaja i opreme za tu svrhu.

5. POPIS LITERATURE

1. Denig, J., Eugene M. Wengert, William T. Simpson, 2000: Drying Hardwood Lumber, United States Department of Agriculture.
2. Hasan, T., Karbegović, M.; Vakuumsko sušenje drva.
3. Krpan, J., 1965: Sušenje i parenje drva (drugo prerađeno i prošireno izdanje). Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska.
4. Novak, M., 2008: Sušenje lesa, Maribor: Drvodjelska škola Maribor, Viša strukovna škola.
5. Pervan, S., 2000: Priručnik za tehničko sušenje drva. SAND, Zagreb, Hrvatska.
6. Pervan, S.; Klarić, M, Slivar, M., 2013: Normirane metode određivanja i procjenjivanja sadržaja vode u drvu u Republici Hrvatskoj. Drvna industrija.
7. Pervan, S.; Specijalne metode sušenja drva. Skripta. Šumarski fakultet.
8. Petrić, B., Špoljarić, Z., Opačić, I., Horvat, I., Krpan, J., 1985: Osnove nauke o drvu i izrada proizvoda iz masivnog i usitnjenog drva.
9. Zhangjing, C., Fred M, Lamb. 2004: A Vacuum Drying System for Green Hardwood Parts. Drying technology Vol. 22, No. 3, pp. 577–595.