

# Utjecaj ozračavanja površine na trajnost lijepljenog spoja

---

**Knezović, Zvonimir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:370880>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ**

**DRVNA TEHNOLOGIJA**

**ZVONIMIR KNEZOVIĆ**

**UTJECAJ OZRAČAVANJA POVRŠINE NA TRAJNOST**  
**LIJEPLJENOG SPOJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, RUJAN, 2023.**



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**  
**ZAVOD ZA NAMJEŠTAJ I DRVO U GRADITELJSTVU**

**UTJECAJ OZRAČAVANJA POVRŠINE NA TRAJNOST  
LIJEPLJENOG SPOJA**

**ZAVRŠNI RAD**

Prediplomski studij:	Drvena tehnologija
Predmet:	Ljepila i lijepljenje drva
Mentor	Izv.prof.dr.sc. Goran Mihulja
Student:	Zvonimir Knezović
JMBAG:	0178099117
Datum odobrenja teme:	4. 5. 2023.
Datum predaje rada:	23. 9. 2023.
Datum obrane rada:	27. 9. 2023.


**Zagreb, rujan, 2023.**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Utjecaj ozračavanja površine na trajnost lijepljenog spoja
Autor:	Zvonimir Knezović
Adresa autora:	Zrnetićeva ulica 16
Mjesto izradbe:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Završni rad
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Goran Mihulja
Izradu rada pomogao:	Tomislav Gržan, mag. ing. techn. lign.
Godina objave:	2023.
Opseg:	I-VII + 23 str., 10 slika, 1 tablica i 20 navoda literature
Ključne riječi:	Lijepljeni spoj, ozračavanje površine drva, trajnost spoja
Sažetak:	<p>Izrada proizvoda od lijepljenog drva složen je i kompliciran postupak, a na njega značajno utječu vrsta drva, vrsta ljepila, priprema površine i tehnika lijepljenja. Kvalitetu lijepljenog spoja određuje više faktora poput čvrstoće i trajnosti. U ovom radu pregledana su istraživanja na temu utjecaja ozračivanja površina na kvalitetu i trajnost lijepljenog spoja pri čemu UV zračenje ima najveći značaj. Istraživanja pokazuju značajna povećanja kvalitete lijepljenog spoja ukoliko površina drva ozračena UV zrakama, bez obzira na dosadašnje negativne konotacije u svezi UV zračenja i fotodegradacije drva.</p>

## BASIC DOCUMENTATION CARD

Title:	Influence of surface irradiation on glued joint durability
Author:	Zvonimir Knezović
Adress of Author:	Zrnetičeva ulica 16
Thesis performed at:	Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb
Publication Type:	Undergraduate thesis
Supervisor:	Izv. prof. dr. sc. Goran Mihulja
Preparation Assistant:	Tomislav Gržan, mag. ing. techn. lign.
Publication year:	2023.
Volume:	I-VII + 23 pages, 1 tables, 10 figures and 20 references
Key words:	glued joint, wood surface irradiation, joint durability
Abstract:	<p>The production of products made of glued wood is a complex and intricate process, significantly influenced by factors such as the type of wood, the type of adhesive, surface preparation, and the bonding technique. The quality of the glued joint is determined by multiple factors, including strength and durability. This paper reviews research on the impact of surface irradiation on the quality and durability of glued joints, with UV radiation being of utmost significance. Research indicates significant improvements in the quality of glued joints when wood surfaces are irradiated with UV rays, regardless of previous negative associations with UV radiation and wood photodegradation.</p>

	<b>IZJAVA O AKADEMskoj ČESTITOSTI</b>	<b>OB ŠF 05 07</b>
		Revizija: 2
		Datum: 2.2.2021.

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

Zagreb, 23. 9. 2023. godine

---

*vlastoručni potpis*

Zvonimir Knezović

## SADRŽAJ

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA.....	I
BASIC DOCUMENTATION CARD .....	II
SADRŽAJ.....	IV
POPIS SLIKA.....	V
POPIS TABLICA.....	VI
PREDGOVOR .....	VII
1 UVOD.....	1
2 OPĆENITO O LIJEPLJENJU DRVA.....	1
3 VRSTE OZRAČAVANJA POVRŠINE DRVA .....	4
3.1 Gama zračenje .....	4
3.2 UV zračenje .....	4
3.3 Zračenje elektronskim snopom.....	5
4 UTJECAJ UV SVJETLA NA DRVO.....	7
5 UTJECAJ UV OZRAČAVANJA POVRŠINE DRVA NA LIJEPLJENI SPOJ ...	10
6 ISPITIVANJA TRAJNOSTI LIJEPLJENOG SPOJA .....	16
6.1 Ispitivanje čvrstoće lijepljenog spoja.....	18
7 ZAKLJUČAK .....	21
LITERATURA.....	22



## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Kut kvašenja i sile površinskih napetosti između faza zrak G, tekućina L i krutina S. (Boger i sur., 2003)..	2
<b>Slika 2.</b> Spektar UV zračenja (Ljekarna Lipa, 2023) .....	5
<b>Slika 3.</b> Različite intermolekularne veze u ligninu (Cogulet i sur., 2016).....	7
<b>Slika 4.</b> Učinak mokrog ispitivanja smrekovine (CS) na karakter vlačnih promjena tijekom izlaganja u uvjetima visoke vlažnosti (QUV-3). Probni su uzorci kidani u suhom stanju (pri 20±1 °C i 60±5 % r.v.z.) ili u mokrom stanju, tj. nakon potapanja u vodi (Turkuljin i Živković, 2018).....	11
<b>Slika 5.</b> Dijagram eksperimentalnih postavka za UV ozračavanje materijala.....	13
<b>Slika 6.</b> Stroj za sušenje premaza Trivec. ....	15
<b>Slika 7.</b> Hijerarhijski prikaz građe drva (Jakopec, 2022).....	16
<b>Slika 8.</b> Prikaz poprečnog i uzdužnog presjeka pojedinačnog mikrovlakna drva te njegovog sastava (Jakopec, 2022) .....	16
<b>Slika 9.</b> Prikaz uređaja za ubrzano umjetno izlaganje simulacijom stvarnih uvjeta: QUV uređaj (lijevo) i Xenon Test komora (desno) (Izvor: <a href="https://www.q-lab.com/products/">https://www.q-lab.com/products/</a> (Pristupljeno: 23. 9. 2023.)).....	17
<b>Slika 10.</b> Prikaz probe za ispitivanje smične čvrstoće lijepljenog spoja tlačnim pokusom prema ISO 6238 (Gržan i sur., 2023) .....	18

## POPIS TABLICA

*Tablica 1. Kut kvašenja za destiliranu vodu i neke vrste drva ta različito obrađene površine (Bogner, 1991)..... 2*

## PREDGOVOR

Prvenstveno, zahvaljujem se svome mentoru izv. prof. dr. sc. Goranu Mihulji te Tomislavu Gržanu mag. ing. tech. lign na svoj pomoći, trudu, mentorstvu i prenesenom znanju koje me dovelo do pisanja ovog rada.

Također, želio bih se zahvaliti svojoj supruzi, roditeljima, prijateljima i kolegama na velikoj podršci i ljubavi koju su mi pružali tijekom svih ovih godina studija.

Najveća hvala dragom Bogu koji je cijeli život uz mene i prati me na mom putu.

# 1 UVOD

Drvo, jedan od najstarijih i najizdržljivijih materijala koje čovječanstvo koristi, ima duboko ukorijenjeno mjesto u povijesti i suvremenoj kulturi. Od prvih početaka naše civilizacije, drvo je bilo prisutno na različite načine u životima ljudi oblikujući način na koji gradimo, stvaramo i živimo. Koristilo se kao materijal za izradu oruđa, raznih pomagala, ukrasa, namještaja, građevina i slično. Ovaj izuzetno svestran i ekološki održiv materijal i danas igra veliku ulogu u životu ljudi te je moderno društvo gotovo nezamislivo bez njegove uporabe. Modernizacijom strojeva, tehnika i znanosti čovjek je naučio koristiti drvo u maksimalnom potencijalu, te je današnja drvna industrija i gotovo svaki drvni proizvod nezamisliv bez uporabe ljepila.

Danas se velika većina drvnih proizvoda lijepi i gotovo je nemoguće zamisliti takvu proizvodnju bez uporabe ljepila. Tome pridonosi smanjenje dostupnosti drva, kontinuirani rast cijena u kombinaciji sa povećanjem interesa za proizvodima od masivnog drva te istovremena želja za racionalnom uporabom sirovine. Iz svega navedenog jasno je kako su lijepljenje i ljepila od ogromne važnosti za sve sfere novih tehnologija koje za cilj imaju racionalizaciju korištenja sirovine. Međutim kompleksna atomska struktura drva, koja je pogotovo naglašena kod difuzno poroznih vrsta predstavlja izazov za učinkovito lijepljenje. Postizanje visokokvalitetnih i trajnih proizvoda, posebno za vanjsku upotrebu, ovisi o svojstvima i kvaliteti spoja. Nedovoljna trajnost i čvrstoća lijepljenih drvnih spojeva u vanjskim uvjetima uzrokovala je razvoj i primjenu skupih, visokokvalitetnih ljepila te složenih tehnika obrade, što dovodi do visokih cijena proizvoda. Dodatno, strogi zahtjevi za očuvanje okoliša stvaraju pritisak na tradicionalne proizvode i povećavaju troškove proizvodnje zbog upotrebe ekološki prihvatljivih komponenti otpornih na vanjske uvjete.

Osim razvoja i istraživanja ljepila, poboljšanje svojstava spojeva i lijepljenih površina može se postići predobradom ili aktiviranjem površine. Neki autori su ustanovili da kratkotrajno elektromagnetsko zračenje može aktivirati površinu, poboljšati svojstva kvašenja, povećati mikrovlačnu čvrstoću drva te povećati čvrstoću lijepljenog spoja. Obzirom da svojstva lijepljenog spoja ovise o njegovoj krajnjoj uporabi te da lijepljeni spoj gubi na adhezivnoj čvrstoći s vremenom, trajnost lijepljenog spoja je vrlo bitna za određivanje njegove kvalitete. Stoga, je cilj ovoga rada dati pregled dostupnih istraživanja vezanih za aktivaciju površine drva ozračavanjem, svojstva tako pripremljenih lijepljenih spojeva te način ispitivanja trajnosti.

## 2 OPĆENITO O LIJEPLJENJU DRVA

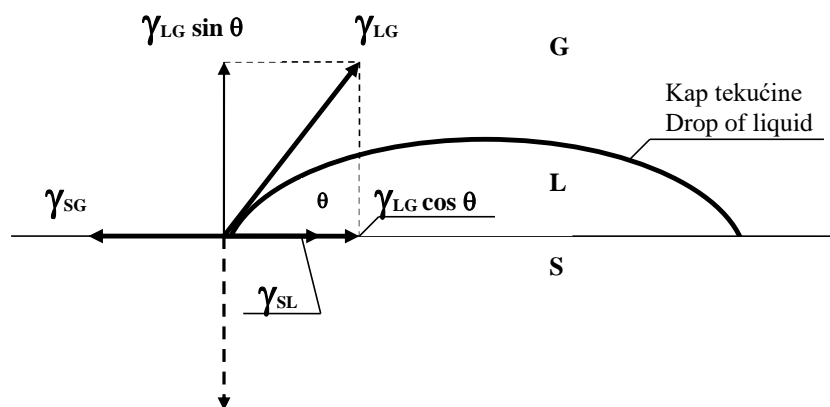
Lijepljenje zahtijeva duboko razumijevanje procesa i potrebno je posjedovati znanje iz različitih znanstvenih područja, uključujući kemiju, fiziku, reologiju, čvrstoću materijala, znanost o površinama i termodinamiku. U međusobnoj interakciji drva i ljepila nastaje spoj kao složeni sustav više materijala. Zbog načina nastajanja on nema jasno definirane granice ni svojstva, te je potpuno jasna činjenica da svaku fazu procesa lijepljenja moramo pomno provoditi, počevši od izbora drva i ljepila, pripreme drva za lijepljenje, provođenja procesa, nanošenja i priljublivanja, pa sve do otvrdnjavanja ljepila.

Cilj je postići uspješno povezivanje materijala i osigurati trajnost spoja. Lijepljenje drva znatno se razlikuje od lijepljenja drugih materijala. Složenost strukture drva predstavlja ključni izazov, jer je ta kompleksnost dodatno povećana nizom faktora. Svi ti faktori su međusobno povezani, slično kao karike u lancu čvrstoće spoja, pri čemu će lom nastati na najslabijoj karici (Mihulja i Bogner, 2005).

Adhezija ovisi o mnogo faktora, o karakteristikama adherenda (drva), karakteristikama adheziva (ljepila), obradi površine drva i mnogim drugim, a to pokazuje da je važno dobro obraditi površinu drva za lijepljenje kako bi ona imala što veću energiju za adheziju s ljepilom, ali i odabrati ljepilo s odgovarajućim karakteristikama. No i pored najboljeg organiziranja i planiranja procesa, nikad se ne postiže teoretski maksimalna adhezija zbog pasivnih sila kao što su nepotpuno povezivanje svih mogućih mjesta za vezu, ili zaostalih naprezanja u spoju koja mogu izazvati mikropukotine i slično. Sposobnost površine drva za stvaranje adhezivnih veza ovisi o površinskoj energiji drva koja je različita za različite vrste drva, a postoje i razlike unutar iste vrste s obzirom na presjek, dijelove goda, položaj drva unutar stabla i drugo. Ona ovisi i o sadržaju vode u drvu i o temperaturi površine drva. Dužim stajanjem obrađene površine drva na zraku površinska energija se smanjuje što je u konačnici nepovoljno za lijepljenje.

Osnovni parametar za određivanje površinske energije je kut kvašenja. On se definira kao dodirni kut u trenutku izjednačavanja površinskih napetosti što je najbolje vidljivo na slici 3. Kap tekućine širit će se na krutoj podlozi dok ne poprimi ravnotežni oblik, a suma energija na graničnim površinama kruto-tekuće ( $\gamma_{S-L}$ ), tekuće-zrak ( $\gamma_{L-G}$ ) i kruto-zrak ( $\gamma_{S-G}$ ) će pri tome biti jednaka 0. Ako iz točke u kojoj se sastaju sve tri navedene faze povučemo tangentu sa rubom kapi tada će tangenta sa površinom krutine zatvarati kut  $\theta$  koji nazivamo kutom kvašenja ili okrajnim kutom.

## 2. OPĆENITO O LIJEPLJENJU DRVA



**Slika 1.** Kut kvašenja i sile površinskih napetosti između faza zrak G, tekućina L i krutina S. (Boger i sur., 2003)

Ako je kut kvašenja  $\theta$  manji od  $90^\circ$  smatra se da tekućina dobro kvasi krutinu, a ako je kut kvašenja veći od  $90^\circ$  smatra se da tekućina loše ili nikako ne kvasi krutinu. Kut kvašenja različit je za razne vrste drva i različite vrste obrade (Tablica 1).

**Tablica 1.** Kut kvašenja za destiliranu vodu i neke vrste drva ta različito obrađene površine (Bogner, 1991)

Vrsta drva*	Obrada površine	Kut kvašenja $\theta$ (°)
Bukovina	Blanžano	48,0
Bukovina	Blanžano i tretirano 10 %-tnom otopinom $\text{NH}_4\text{OH}$	20,8
Bukovina	Fino piljeno	33,9
Bukovina	Fino piljeno i tretirano 10 %-tnom otopinom $\text{NH}_4\text{OH}$	25,8
Smrekovina	Blanžano	43,9
Smrekovina	Blanžano i tretirano 10 %-tnom otopinom $\text{NH}_4\text{OH}$	38,7
Smrekovina	Fino piljeno	18,2
Smrekovina	Blanžano i tretirano 10% otopinom $\text{NH}_4\text{OH}$	18,2

\*U svim navedenim primjerima kut kvašenja mjereno je na radijalnom presjeku

Iz tablice 1 vidljivo je da na kut kvašenja utječe i vrsta obrade površine, dakle hrapavost. Hrapavost multiplicira kvašenje, a time i površinsku energiju drva, pa se na taj način povećava i rad adhezije. Rad adhezije je vrlo koristan parametar jer pomoću njega možemo izračunati optimalnu površinsku napetost ljepljivosti za površinu drva koju želimo lijepiti i koja ima određene karakteristike.

## 2. OPĆENITO O LIJEPLJENJU DRVA

---

Kako je obrazloženo u uvodu, aktiviranje površine odnosno povećanje površinske energija drva jedna je od opcija koja se može primijeniti za izradu lijepljenih drvnih spojeva zadovoljavajuće kvalitete, uporabom komercijalnih, lako dostupnih ljepila. Dakle, površinu treba pravilno pripremiti kako bi se postigao spoj s odgovarajućim svojstvima, a to se može postići mehaničkim metodama, kemijskim tretmanima ili ozračavanjem. U daljnjem tekstu opisane su najčešće vrste zračenja koje se koriste za ozračavanje u svrhu aktivacije površine drva.

## 3 VRSTE OZRAČAVANJA POVRŠINE DRVA

### 3.1 Gama zračenje

Gama-zračenje ( $\gamma$ -zrake), elektromagnetski valovi vrlo visoke frekvencije i energije, valnih duljina kraćih od  $10^{-13}$  m, koji nastaju prilikom kvantnih prijelaza atomskih jezgri s pobuđenih stanja, u procesu kočnoga zračenja brzih elektrona prilikom sudara s atomskim jezgrama, pri nuklearnim procesima u zvijezdama i u procesima pretvorbi subatomske čestice. Otkrili su ga 1898. Maria Curie-Sklodowska i Pierre Curie, proučavajući prirodnu radioaktivnost. Pri radioaktivnom raspadanju, npr. nakon alfa-zračenja ili beta-zračenja, atomske jezgre često emitiraju gama-zračenje, koje se može znatno razlikovati po energiji. Najčešće je gama-zračenje s energijama između 0,1 i 1 MeV. Za određivanje energije niskoenergetskog gama-zračenja koriste se valna svojstva difrakcije u kristalima, a energija visokoenergetskog gama-zračenja određuje se s pomoću međudjelovanja s elektronima.“ (Hrvatska enciklopedija, 2021)

Drvo kao prirodni materijal, točnije materijal organskog porijekla, podložno je biodegradaciji insektima, gljivama i bakterijama. Zbog navedenih razloga javlja se potreba za zaštitom drva i njegovom sterilizacijom kako bi se zaustavio utjecaj bioloških štetnika. Gama zračenje, kao visokoenergetsko, elektromagnetsko ionizirajuće zračenje zbog svoga svojstva lakog prodiranja kroz strukture drva počinje se koristiti za sterilizaciju drva.

Također, zanimljiva primjena gama zračenja je nedestruktivna analiza gustoće i sadržaja vode te njihova raspodjela u masivnom drvu i na bazi drva, drvnih materijala, tj. drvnih ploča. Mnogi autori koriste tu vrstu zračenja za otkrivanje grešaka i nedostataka u trupcima prije njihove mehaničke obrade kako bi se maksimalno kvalitativno i kvantitativno iskoristio dostupni materijal. (Despot i sur., 2012.)

Iz rada Despot i sur. (2012) možemo zaključiti kako gama zračenje ima veliki potencijal i značenje u drvnoj industriji i njenoj budućnosti no ono nije relevantno za kondicioniranje površine drva za poboljšanje adhezije lijepljenog spoja.

### 3.2 UV zračenje

Ultraljubičasto zračenje (ultraljubičasta svjetlost, ultravioletno zračenje) (UV), spada u područje manjih valnih duljina, točnije onih u rasponu od 100 do 400 nm, što znači da spadaju u oku nevidljivi svjetlosni spektar. Smanjivanjem valne duljine raste frekvencija titranja, čime se povećava i energija. Samo ultraljubičasto zračenje dijeli se u tri skupine koje se razlikuju po valnim duljinama, a to su UV-A, UV-B i UV-C zračenje (Slika 1) (Ryer, 1997).

UV-A zračenje je onaj dio spektra koji u najvećoj mjeri dopire do Zemlje, istovremeno ima najmanju energiju. Valna duljina ovog dijela spektra kreće se od 315 do 400 nm. U praksi ovaj dio spektra često se naziva i crno svjetlo, koristi se u obliku fluorescentnih svjetiljki koje služe za prolaženje fluorescentnih tvari ili materijala u mraku. Svoju uporabu takve svjetiljke našle su u forenzici i kriminalistici za

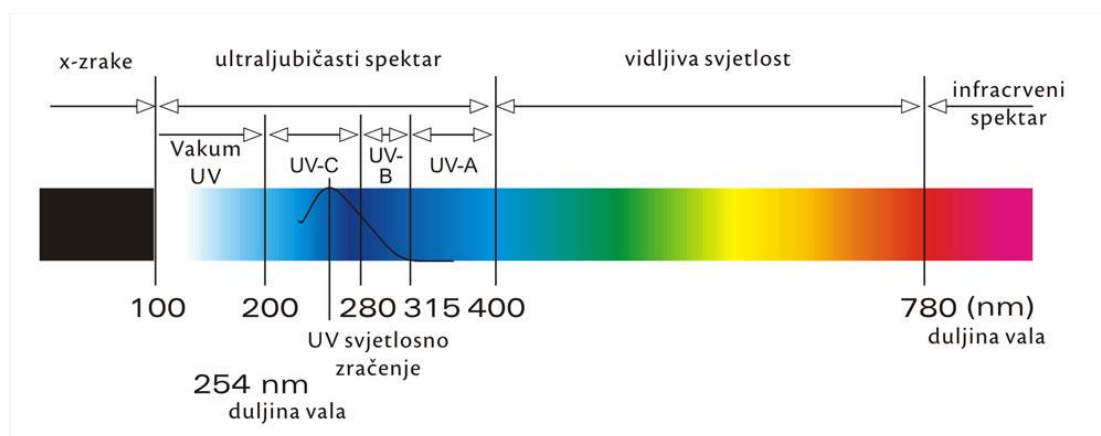


### 3. VRSTE OZRAČAVANJA POVRŠINE DRVA

pronalaženje ostataka krvi i tjelesnih izlučevina. Također ima svoju primjenu i u medicini (Ryer, 1997).

UV-B zračenje je ono koje je najopasnije za ljude jer dugo izlaganje ovom zračenju može dovesti do ozbiljnih posljedica po ljudsko zdravlje poput opekotina, pa sve do raka kože. Većina UV-B zraka na sreću bude apsorbirana u atmosferi, no pojave poput ozonskih rupa izrazito su opasne jer upravo te promjene dopuštaju prolazak većih količina zraka do Zemljine površine. Raspon valne duljine ovih zraka kreće se od 280 do 315 nm (Ryer, 1997).

UV-C zračenje odgovorno je za nastanak ozonskog omotača. UV-C fotoni sudaraju se sa atomima kisika ( $O_2$ ) pri čemu nastaje ozon ( $O_3$ ). UV-C zračenje apsorbira se u atmosferi te skoro uopće ne dopire do površine Zemlje. Danas taj dio spektra koristi se kao dezinfekcijsko i sterilizacijsko sredstvo jer ima sposobnost ubijanja bakterija i virusa. Valne duljine u kojima se kreće UV-C zračenje su od 100 do 280 nm (Ryer, 1997).



Slika 2. Spektar UV zračenja (Ljekarna Lipa, 2023)

### 3.3 Zračenje elektronskim snopom

Modifikacija površine postaje sve važnija tema u području modifikacije drva i privukla je određen interes u posljednjih deset godina. Nove metode modifikacije usmjerene su na površinske slojeve s obzirom na ekološke i ekonomske razloge. Posebna pažnja usmjerena je na površinska svojstva drva (npr. otpornost na vremenske utjecaje ili stabilnost boje). Jedan pristup može biti korištenje zračenja elektronskim snopom (EBI) s niskom energetsom razinom kako bi se promijenili polimeri površine drva.

Rezultati analize celuloze visokog eneretskog zračenja pokazuju depolimerizaciju i smanjenje kristalčnosti s povećanjem doza. Međutim, ionizirajući zraci (npr. gama-zraci) ne utječu samo na celulozu, već je podložna i hemiceluloza. Promjene u zračenom ligninu događaju se na alifatskim hidroksilnim skupinama.

Zaključeno je da nije moguće primijetiti promjene u kemijskom sastavu kada se drvo sekvoje izloži određenoj količini gama zračenja zbog visokog udjela aromatskih spojeva (lignin i drugih ekstraktila) u odabranoj vrsti drva. Međutim, prethodna analiza

### 3. VRSTE OZRAČAVANJA POVRŠINE DRVA

---

formiranja kompleksa lignina i ugljikohidrata u drvnim vlaknima pokazuje da su se stvarale nove veze između modela lignina. Ovaj fenomen je utvrđen na uzorcima smreke koji su bili izloženi zračenju nakon tretmana NaOH-om.

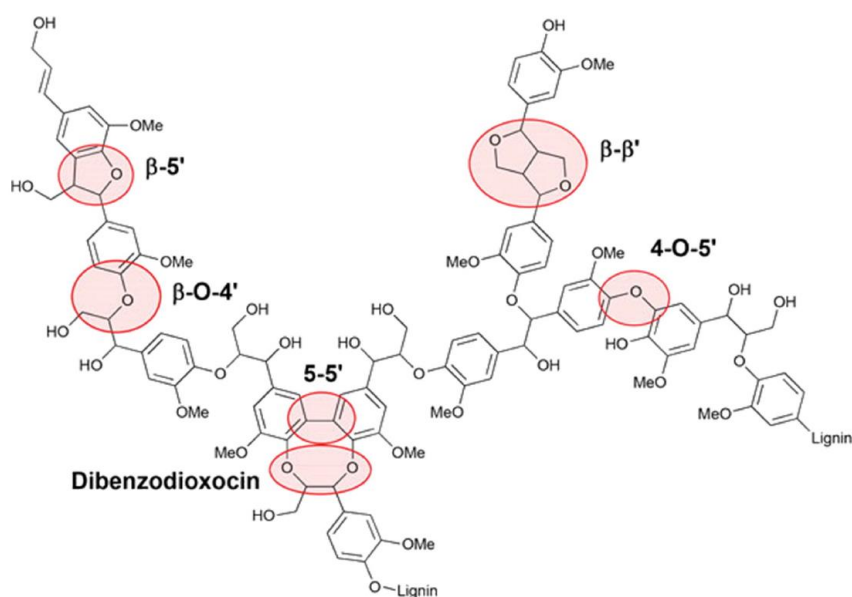
Također, strukturalna i mehanička svojstva mijenjaju se. Struktura drva pokazuje znakove razgradnje i mogu se pojaviti pukotine unutar srednje lamela i sekundarnog staničnog zida. Čvrstoća na vlak drva iznimno je osjetljiva i reagira na visokoenergetsko zračenje; neprekidno se smanjuje u rasponu doza od 1000 rad (10 Gy). Daljnja mehanička svojstva drva (npr. čvrstoća na tlak ili savijanje) ponašaju se drugačije. Niske doze zračenja uzrokuju blagi porast navedenih svojstava, dok više doze brzo smanjuju čvrstoću. Također, tvrdoća površine (npr. Brinellova tvrdoća) utječe na doze zračenja. Nadalje se pokazuje poboljšanje stabilnosti boje na uzorcima ariša putem zračenja elektronskim snopom (EBI) tijekom ispitivanja umjetnog starenja. Stopa razgradnje lignina zbog fotodegradacije bila je niža kod uzoraka nakon EBI nego kod referentnih uzoraka. Ovakva vrsta zračenja može promijeniti funkcionalnost površine drva. Neozračeni i ozračeni uzorci su pokazali različite karakteristike materijala. Razlike u infracrvenim spektrima između neprocesiranih i zračenih uzoraka bile su jasno vidljive (Huber i sur., 2019).

## 4 UTJECAJ UV SVJETLA NA DRVO

Od svih vrsta degradacija kojima drvo može biti izloženo, fotodegradacija smatra se najjačom i najbržom. Taj fenomen počinje apsorpcijom fotona. Na promjenu svojstava drva u najvećoj mjeri utječe UV-B spekter i manjim dijelom UV-A. Utjecaj sunčeve svjetlosti prvenstveno se primjećuje promjenom boje površine drva, ta promjena prihvaća se kao površinski fenomen.

Drvni spojevi manifestiraju različitu osjetljivost na proces fotodegradacije zbog svoje raznovrsnosti funkcionalnih skupina i veza. U slučaju lignina, najčešće prisutna veza je  $\beta - O - 4$ , ali tu su i  $5 - 5$ ,  $\beta - 5$ ,  $\beta - 1$ ,  $\alpha - O - 4$  i  $4 - O - 5$  veze. Rezultati studija modelnih spojeva Elektronske spinske rezonancije (ESR) sugeriraju da su  $\beta - O - 4$  veze najosjetljivije na proces cijepanja. Kada dođe do depolimerizacije lignina, dolazi do stvaranja slobodnih radikala koji imaju sposobnost prodora dublje unutar strukture drva. Ovaj proces rezultira degradacijom ispod površine drvnog materijala. Zbog promjena u kromofornim strukturama (odgovornim za boju drva) i nastanka sekundarnih kromofornih struktura, boja drva postupno mijenja svoj ton, prvo prema žutoj i smeđoj boji, a potom prema srebrnkastoj, uz općenito smanjenje svjetline.

Proces fotorazgradnje drva uključuje razgradnju hemiceluloze i depolimerizaciju celuloze. Postoje različiti pristupi proučavanja ovog procesa u svrhu boljeg razumijevanja degradacije drva. Dva ključna pristupa uključuju mjerenje boje drva pomoću CIELAB sustava boja i FTIR analize površina. Metoda pomoću CIELAB sustava omogućuje praćenje promjena boje drva kao posljedica razgradnje lignina i formiranja kromofora. To nam pomaže razumjeti kako se boja drva mijenja tijekom procesa degradacije. FTIR analiza površine omogućuje proučavanje kemijskih promjena koje se događaju na površini drvnog materijala tijekom fotodegradacije. Ovo istraživanje pomaže u identifikaciji kemijskih promjena uzrokovanih procesom razgradnje. (Cogulet i sur., 2016)



**Slika 3.** Različite intermolekularne veze u ligninu (Cogulet i sur., 2016)

#### 4. UTJECAJ UV ZRAČENJA NA DRVO

---

Nadalje, ako neka komponenta polimera može apsorbirati svjetlo, tada svaka od njegovih molekula može apsorbirati kvant radijacije. Ovo uzrokuje primarne disocijacije molekula polimera, te niz sekundarnih reakcija slobodnih radikala. Kvantum energije pridružen ultra-ljubičastom svjetlu može razoriti mnoge kemijske veze prisutne u drvnim sastojcima (ugljik-ugljik, ugljik-kisik, ugljik-vodik veze) (Turkulin, 1996). Drvo i apsorbira više u ultraljubičastom nego u drugim područjima spektra. Hon i Feist (1981) su naveli da celuloza apsorbira intenzivno ispod 200 nm, nešto manje između 200 i 300 nm (290 nm je daljnja granica sunčevog zračenja koje pada na površinu zemlje), a rep krivulje apsorpcije celuloze proteže se do 400 nm (tj. u UV područje). Lignin i polifenoli, s druge strane, mnogo lakše apsorbiraju svjetlo s izraženim vrhom na 280 nm i s apsorpcijom sve do vidljivog područja spektra. Žućenje lignina počinje kod zračenja valnim duljinama između 385 i 335 nm, a doseže najveće vrijednosti između 335 i 305 nm. Očito je da je područje između 290 i 400 nm upadnog sučevog zračenja najvažniji dio spektra za prirodnu svjetlosnu razgradnju drva (Turkulin 1996, Mihulja i sur., 1999)

Pretpostavlja se da vidljivo svjetlo u rasponu od 400 do 700 nm nema dovoljno energije da razbije kemijske veze u drvu jer njegova energija ne prelazi 70 kcal/mol, što se smatra najnižom energijom veze koja se nalazi u nekom od sastojaka drva. Utvrđeno je da je granica učinkovitih valnih duljina za razgradnju drva oko 540 nm.

Dubina prodiranja sunčevog UV i vidljivog zračenja u drvo je ograničena, što rezultira promjenama koje su koncentrirane u površinskom sloju. Zaključuje se da UV svjetlo ne prodire dublje od 75  $\mu\text{m}$ , dok vidljivo svjetlo doseže do 200  $\mu\text{m}$ . Smatra se da slobodni radikali ne nastaju ispod 80  $\mu\text{m}$  dubine drva. Bilo kakve promjene u boji ispod sloja debljine 200  $\mu\text{m}$ , pripisuju se sekundarnim reakcijama, a ne direktnom djelovanju svjetla (Turkulin, 1996).

Već 1981. godine u svome radu Derbyshire i Miller zaključuju kako čak i kratka izloženost sunčevom svjetlu znatno narušava površinski integritet drva, a mjerenja čvrstoće na vremenski izloženim trakama pružaju precizniju i relevantniju procjenu oštećenja uslijed vremenskog utjecaja od promatranja promjene boje i razgradnje mikrostrukture. U radu su koristili dvije vrste drva, lipu (*Tilia vulgaris*) i srževinu borovine (*Pinus sylvestris*). Potvrdili su da je razgradnja lignina u središnjoj lameli rezultat izlaganja sunčevom svjetlu, a istovremeno najveći utjecaj na integritet površine potječe od depolimerizacije sastojka celuloze. Korištenje filtera omogućilo je razlikovanje učinaka različitih spektralnih područja, a u skladu s energetske razmatranjima, najbrža razgradnja događa se u drvu izloženom svjetlu koje sadrži ultraljubičaste valne duljine. S obzirom na to da samo otprilike 5 % ukupne solarne energije leži u ultraljubičastim područjima, jasno je da je ovo područje spektra najučinkovitije u uzrokovanoj fotodegradaciji. Unatoč tome, drvo izloženo samo valnim duljinama dužim od 400 nm razgradit će se otprilike polovinom brzine opažene kod materijala izloženih cijelom spektru sunčeve svjetlosti, što se objašnjava velikom količinom energije prisutnom u vidljivim i infracrvenim valnim duljinama. Otkriće da

#### 4. UTJECAJ UV ZRAČENJA NA DRVO

---

vidljiva svjetlost djeluje fotokemijski ima velik praktični značaj jer postavlja ograničenje u principu na performanse prozirnih i poluprozirnih premaza.

Radi svih ovih saznanja godinama se radi na sustavima zaštite drva i drvnih površina od štetnog djelovanja sunčeve svjetlosti. Drvo se zaštićujem raznim premazima poput lakova, lazura i ulja. U zadnjem desetljeću dolazi se do nekih novih spoznaja i nameće se pitanje može li se UV zračenje koristiti za aktivaciju površine te poboljšavanje svojstava drva i drvnih spojeva?

## 5 UTJECAJ UV OZRAČAVANJA POVRŠINE DRVA NA LIJEPLJENI SPOJ

Da bi shvatili što se događa u lijepljenom spoju potrebno je prvenstveno istražiti utjecaj UV zračenja na samo drvo. Rad i istraživanje mikrovlačne čvrstoće ozračenog drva autora Turkulina i Živkovića, (2018) mogu uvelike pomoći u tome. U njihovom istraživanju izrađene su iznimno tanke probe (listići) od više vrsta pomno odabranog drva, bez grešaka u anatomskoj građi. Debljina proba iznosila je samo 80  $\mu\text{m}$ , ta debljina odabrana je iz razloga što je to debljina drva kroz koju prodire UV zračenje.

Ispitivanje mikrovlačne čvrstoće drva pokazalo se kao osjetljiva i precizna metoda za praćenje promjena u sastavu drva (uslijed degradacije od svjetla ili elemenata). Rezultati jasno pokazuju da različite strukture unutar uzoraka mogu dovesti do nejednolikih rezultata. Udio kasnog drva i njegova čvrstoća na vlak pokazali su se dominantnima u procesu ispitivanja. Usporedbe između različitih vrsta trebaju se provoditi na materijalu prosječne gustoće i udjela kasnog drva za svaku vrstu, kako bi se izbjegao utjecaj varijacija u fizičkim i strukturalnim karakteristikama s efektima uzrokovanim glavnom eksperimentalnom varijablom, kao što je otpornost na vremenske uvjete određene vrste drva. Općenito, veća gustoća rezultira većom čvrstoćom i manjim stopama degradacije drva. Na temelju prikazanog eksperimenta, može se zaključiti da takav općeniti zaključak treba interpretirati s oprezom.

Udio kasnog drva i njegova mehanička svojstva utječu kako na stope degradacije, tako i na pouzdanost ispitivanja. Izloženosti u oba umjetna uređaja (Xenon i UV izvor) pokazale su zadovoljavajući raspon uvjeta za testiranje stopa degradacije drva. Unatoč znatnim razlikama u spektralnoj distribuciji izvora zračenja, rezultati su se razlikovali samo u brzini degradacije. Prema dosadašnjem tekstu većinom se moglo zaključiti kako UV zračenje ima samo štetne i negativne utjecaje na površinu drva. To potvrđuje i istraživanje Cao i sur. (2022) koji su u svome radu istraživali utjecaj UV zračenja na lijepljeni spoj unutar inženjerski projektiranog drva.

Ispitivan je nastanak reaktivnih kisikovih vrsta (ROS), foto-oksidacije i gubitak mehaničkih svojstava međufaze drva i ljepila kako bi se što bolje pokušalo shvatiti pogoršanje performansi projektiranog drva koje je uzrokovano UV zračenjem.

Rezultati pokazuju da je većinu reaktivnih kisikovih vrsta čine fenoksil radikali, što je potaknuto izlaskom elektrona iz fenolnih prstena. Međusobna interakcija između fenoksil radikala, kisika i vode dovodi do nastanka drugih radikala koji sadrže kisik. Značajna uloga akumulacije fotona u koncentraciji ROS-ova rezultirala je očitom foto-degradacijom međufaze između drva i ljepila, zbog razbijanja slabo kovalentnih veza u ljepilu i drvu. Smatra se da se foto-oksidacija međufaze između ljepila i drva događa istovremeno s foto-degradacijom, što dovodi do ozbiljnog smanjenja mehaničkih svojstava međufaze, kao i pojave šupljina u staničnoj stijenci. Sve to rezultira očitim smanjenjem čvrstoće pri smicanju i kompresiji za više od 40%.

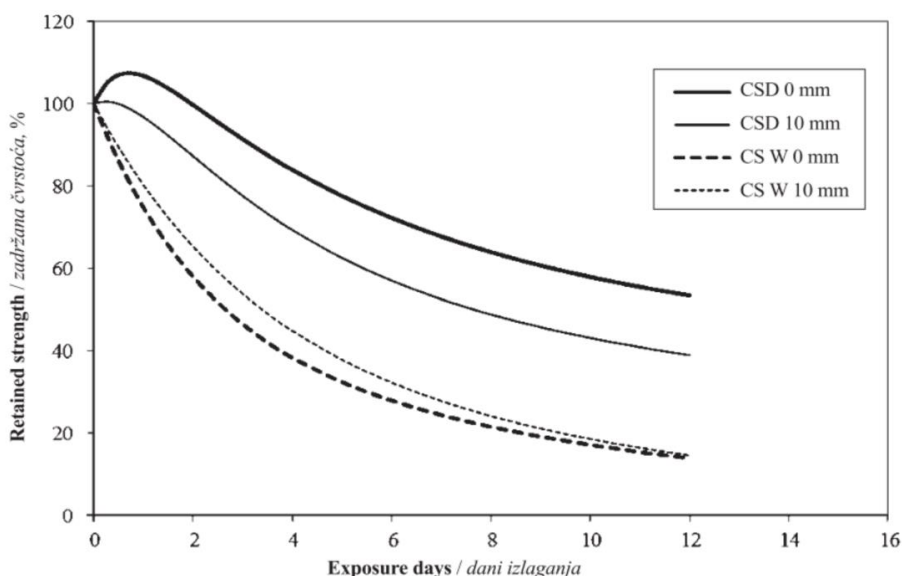
## 5. UTJECAJ UV OZRAČAVANJA NA LIJEPLJENI SPOJ

Svoje istraživanje proveli su na probama od drva duglazije (*Pseudotsuga menziesii*), bez grešaka i ikakvih defekata. Probe su iz istog dijela drva, te su osušene na isti sadržaj vode od 6%. Prilikom istraživanja koristili su fenol-formaldehidno ljepilo, kao tipično i široko korišteno strukturalno ljepilo. Viskoznost ljepila iznosila je 152,4 mPa x s, a sadržaj krute tvari 47,8 %. Lijepljeni spojevi pripremljeni su postupkom vrućeg prešanja pri temperaturi od 140 °C i tlaku od 0,8 mPa tijekom 40 minuta. Utrošak ljepila iznosio je 150 g/m<sup>3</sup>, zalijepljene probe su zatim kondicionirane na temperaturu zraka od 25°C i relativnu vlažnost zraka od 55% tijekom 48 sati. Izmjereni sadržaj vode proba nakon kondicioniranja iznosio je 10,2 %.

Zračenje UV svjetlom provodili su pomoću komore za starenje kineskog proizvođača OPAS Xlite 600F s snagom UV zračenja od 1.0 Wm<sup>-2</sup> i valne duljine od 420 nm. Probe su ozračivali u ciklusima od 12 sati (12 sati zračenja, 12 sati bez zračenja). Tim načinom željeno je pokazati normalnu dnevnu ekspoziciju drva vanjskim utjecajima. Međufaza drva i ljepila bila je izložena zračenju.

Istraživanjem Cao i sur. (2020) potvrđuje se teza da duga ekspozicija lijepljenog spoja UV zračenju dovodi do značajne degradacije.

Također, Turkulin i Živković (2018) zaključuju da promjene u gubitku čvrstoće prate isti obrazac, što nam ukazuje na to da nema razlike u prirodi procesa degradacije u različitim uređajima za vremensko izlaganje, ali brzine i stope degradacije mogu biti različite. Pažljiv odabir materijala i umjetnih uvjeta za vremensko izlaganje čini temelj za valjano uspoređivanje između umjetnih i prirodnih režima vremenskog izlaganja. Međutim, osim gubitka čvrstoće, u nekim slučajevima se dogodio nagli porast mikrovlačne čvrstoće, ali kod kratkotrajnog intenzivnog izlaganja UV svjetlu. Navedeno ukazuje na vjerojatno modificiranje površine drva o čemu je više raspravljano u daljnjem tekstu.



Slika 4. Učinak mokrog ispitivanja smrekovine (CS) na karakter vlačnih promjena tijekom izlaganja u uvjetima visoke vlažnosti (QUV-3). Probni su uzorci kidani u suhom stanju (pri 20±1 °C i 60±5 % r.v.z.) ili u mokrom stanju, tj. nakon potapanja u vodi (Turkulin i Živković, 2018)

Dakle, istovremeno istraživanja su pokazala da kratkotrajna izloženost drva UV svjetlu aktivira površinu drva, što povoljno utječe na vlaženje, prijanjanje i lijepljenje. Također, izlaganje drva kombiniranom djelovanju vode i temperature uzrokuje dubinske promjene u drvu, poboljšavajući trajnost spoja. Godine 1999., Mihulja i sur. provode istraživanje na temu „Modificiranje površine bukovine ozračivanjem UV svjetlošću“, s ciljem definiranja režima vlaženja površine kako bi se postigla zasićenost vlaknaca pri izlaganju UV svjetlu. Isto tako zadani ciljevi bili su i procijeniti vrijeme izlaganja pri kojem će površina drva postići maksimalnu energiju površinskog sloja. Utvrditi interval između posljednjeg vlaženja i izvlačenja ispitnih proba iz uređaja QUV. Ovaj podatak je važan za isključivanje utjecaja drugih tehnoloških parametara na proces lijepljenja, kao što su razlike u vlažnosti površine izlaganih i neizlaganih ispitnih pločica. Odrediti optimalni tlak tijekom postupka lijepljenja, pri čemu se izbjegava utjecaj tlaka na proces vlaženja i penetraciju.

Nakon obrađenih dobivenih podataka Mihulja i sur. (1999) dolaze do izrazito zanimljivih zaključaka. Izlaganje nakvašenih proba drva UV svjetlosti rezultira snažnom reakcijom koja, tijekom 60 minuta, doprinosi povećanju površinske energije drva. Unatoč tehničkim ograničenjima u istraživanju jasno su vidljive naznake da je moguće povećati čvrstoću spojeva od PVA-c ljepila modifikacijom vlage na površini bukovine putem UV svjetlosti.

Za ispitivanje korištene su probe bukovine gustoće  $0,681 \text{ g/ m}^3$ , prosječnog sadržaja vode 8,7%. Probe su veličine  $10 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  polublistave i blistave teksture. Metoda istraživanja zahtijevala je vlaženje površine što je odrađeno ručnom prskalicom.

Režimi izlaganja proba bili su slijedeći: upotrijebljene su lampe UV-A 340, temperatura u QUV uređaju iznosila je  $60 \pm 5^\circ\text{C}$ , ukupno trajanje izlaganja bilo je 60 minuta, režim vlaženja ispitnih pločica vodom bio je u intervalima od 5 minuta počevši od nule (7 puta tijekom izlaganja), količina nanosa vode bila je dva pritiska na ručicu raspršivača, a trajanje sušenja površine bio je 30 minuta nakon posljednjeg vlaženja.

Ispitne pločice bile su zalijepljene s PVAc ljepljivom Drvofix S, primijenjenim na obje strane s nazubljenom lopaticom u ukupnoj količini od  $180 - 200 \text{ g/ m}^2$ . Vrijeme otvorenosti ljepila bilo je približno 5 minuta. Prešanje je izvršeno upotrebom jednostavne ručne mehaničke preše, pri čemu se čelična opruga sabija okretanjem vijka glavne osovine. Parametri prešanja bili su: lijepljenje na hladno, specifični tlak od 2 Mpa, a vrijeme stezanja bilo je 24 sata. Nakon lijepljenja probe su kondicionirane u periodu od sedam dana pri temperaturi od  $20^\circ\text{C}$  i relativnoj vlazi zraka od 75%. Slijepljenje probe su zatim opterećene na tlak na kidalici proizvođača Wolpert konstantnom brzinom pomaka od  $6 \text{ mm/min}$ .

U radu Rushanovich Safin i sur., 2021 znanstvenici su proučavali učinak ultraljubičastih zraka na površinsku aktivaciju drva bora toplinski modificiranog na temperaturama od 180 - 240 stupnjeva Celzijusa radi povećanja hrapavosti površine,



## 5. UTJECAJ UV OZRAČAVANJA NA LIJEPLJENI SPOJ

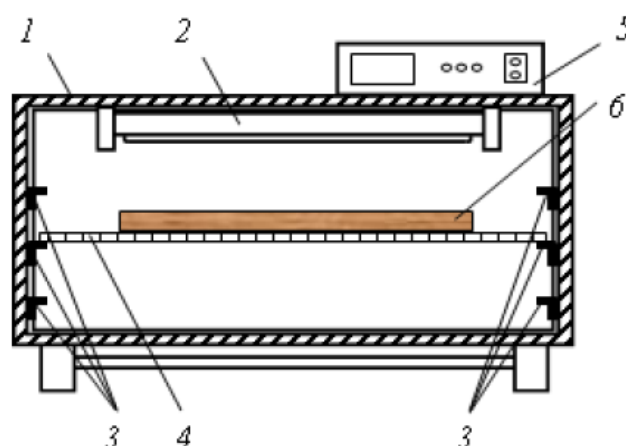
poboljšanja kvašenja toplinski modificiranog drva i čvrstoće prianjanja ljepila u proizvodnji ploča za namještaj.

Studija utjecaja ultraljubičastog tretmana na toplinski modificirano drvo bila je provedena na uzorcima bora (*Pinus sylvestris*), uobičajenog u europskom dijelu Rusije, a odabir bora je zbog činjenice da je on jedna od najčešće korištenih vrsta mekog drva u industriji u Rusiji. Po svojoj strukturi, drvo karakterizira značajna neujednačenost gustoće, poroznost i niz drugih bioloških čimbenika koji utječu na proces. Stoga, kako bi se dobilo što homogenije polazno drvo, potreban je bio pažljiv odabir uzoraka. Uzorci su napravljeni od jednog trupca dužine 2 m. U tu svrhu odabrani su trupci bez ikakvih nedostataka i oštećenja. Komadi su izrezani iz debla na udaljenosti 2 m od panja, srce je odbačeno prilikom sječe trupaca, a uzorci određene veličine izrađivani su na glodalici.

Pripremljene su probe veličina određenih veličina, s debljinama od 7 i 22 mm, te početnim sadržajem vode od 2-6%. Ukupno je ispitano 120 uzoraka drva. Dio blokova korišten je za ispitivanje čvrstoće lijepljenog spoja. Za to je korišteno 48 proba, podvrgnutih toplinskoj modifikaciji i UV obradi. Ostatak blokova korišten je za određivanje apsorpcije vlage, kvašenja i adhezivne snage tretiranog drva. Ukupan broj uzoraka drva bio je 24 komada za svako istraživanje.

Za proučavanje procesa ultraljubičaste obrade drva izrađena je eksperimentalna instalacija čija je shema prikazana na slici 4. Eksperimentalna instalacija za ultraljubičasto zračenje drva sastoji se od:

- 1) komore s reflektirajućim elementima,
- 2) UV lampe,
- 3) držača polica,
- 4) rešetke
- 5) sustava upravljanja procesnim parametrima.



**Slika 5.** Dijagram eksperimentalnih postavka za UV ozračavanje materijala.

Kao rezultat istraživanja otkriveno je da toplinska modifikacija drva utječe na smanjenje adhezije što se može objasniti pogoršanjem kvašenja toplinski modificiranog drva, dok UV zračenje toplinski modificiranog drva povećava adhezivnu snagu ljepila za površinu drva za 13 %.

Na temelju studija i analize vizualnih mjerenja kontaktnog kuta kvašenja toplinski modificiranih uzoraka, autori zaključuju, da tretman UV zračenjem pridonosi povećanju adhezijskih svojstava površinskog sloja drva zbog reaktivnosti UV zraka na oksidaciju i uništavanje drva koji sadrži lignin. To omogućuje daljnje smanjenje potrošnje ljepila pri lijepljenju uzoraka i time smanjenje emisije štetnih hlapljivih tvari. U isto vrijeme, najaktivniji proces površinske aktivacija se odvija tijekom 60 minuta ultraljubičastog zračenja drva s ukupnim zračenjem od najmanje 125 W/cm<sup>2</sup>. Otkriveno je da kombinirani učinak dvostupanjske obrade drva, uključujući preliminalnu volumetrijsku toplinsku modifikaciju, praćenu površinskom obradom UV zračenjem, uzrokuje povećanje otpornosti na vlagu proizvoda od lijepljenog drva za 24 %. Pokazano je da se snaga sloja ljepila kod lijepljenog uzorka prirodnog drva nakon vrenja smanjila za 46 %, a uzorak koji je podvrgnut dvostupanjskoj obradi pokazao je smanjenje za samo 22 %.

U istraživanju Gržan i sur. (2023) također je potvrđen pozitivan utjecaj UV zračenja na poboljšavanje svojstava lijepljenja. Pretpostavlja se da je razlog tomu čišćenje površine drva, mijenjanje morfologije površine i djelomično mijenjanje kemijskog sastava, čime se aktiviraju i modificiraju slabe granice slojeva. Isto tako dolazi se do zaključka da UV zračenje utječe drugačije ovisno o stupnju obrade površine. Kut kvašenja smanjio se u svim probama (povećanje površinske energije drva), a čvrstoća smicanja značajno je porasla. Probe obrađene glodanjem, brušenjem i blanjanjem zabilježile su značajan porast vrijednosti čvrstoće na smicanje, nakon UV zračenja, u usporedbi sa kontrolnim probama. Istovremeni cilj bio je saznati ima li ulogu način obrade probe na krajnji rezultat. Iznosi proba obrađenih brušenjem bili su veći za 27 %, dok su iznosi proba obrađenih glodanjem vrijednosti narasle za 42 %, probama obrađenih blanjanjem vrijednost je porasla za 22 %. Ti rezultati odraz su bolje mehaničke i kemijske adhezije ljepila. Veći iznose kod brušenja i glodanja možemo objasniti tako da prilikom tih obrada dolazi do finog podrezivanja stanica, čime su izložene djelovanju UV zračenja i ono lakše prodire u dublje u središnji lamel. Dok prilikom blanjanja stanice se destruiraju prilikom tlaka koji djeluje na površinu i više se drobe nego li režu pa svijetlo ne prodire toliko duboko. Gržan i sur. (2023) dolaze do zaključka kako je potrebno provesti niz novih postupaka kako bi se preciznije identificirali svi ključni parametri i razradila ova metoda u većem rasponu i preciznosti. Kratkotrajno UV zračenje može intenzivno i iznenada aktivirati površine drva, pa je stoga potrebno definirati režime zračenja unutar tog raspona, uzimajući u obzir promjenu energetske svojstava površine. Također je važno riješiti tehnološki problem sušenja ljepila, na primjer, produženjem vremena otvrdnjavanja ljepila, kako bi se postigla potpuna veza spojeva i kako bi se utvrdilo kako to utječe na čvrstoću spojeva. Ovisno o rezultatima, daljnja istraživanja provodila bi se s drugim vrstama drva i

## 5. UTJECAJ UV OZRAČAVANJA NA LIJEPLJENI SPOJ

---

moogućnostima tehnološke primjene radi poboljšanja čvrstoće zalijepljenih spojeva, kao i adhezije i trajnosti premaza na drvu.

Za provedbu ispitivanja korištene su probe od parenog drva bukve (*Fagus sylvatica*), izrađene su u veličinama 1000 mm×130 mm×13 mm. Odabrani su komadi drva visoke kvalitete bez grešaka, radijalne teksture površine. Sadržaj vode uzoraka kretao se od  $9 \pm 2\%$  sadržaja vode. Površine proba obrađene su blanjanjem, brušenjem i glodanjem. Kondicioniranje površine UV zračenjem izvedeno je na stroju tvrtke Trivec za sušenje premaza UV zračenjem (Slika 5).

Tijekom zračenja, uzorci su prolazili ispod UV lampe na udaljenosti od 130 mm od površine uzorka, pri najmanjoj brzini transportne trake i najvišem intenzitetu. Za ovo istraživanje korištena je srednjotlačna živina lampa (marke Heraeus) s UV spektrom od 200 nm do 600 nm.

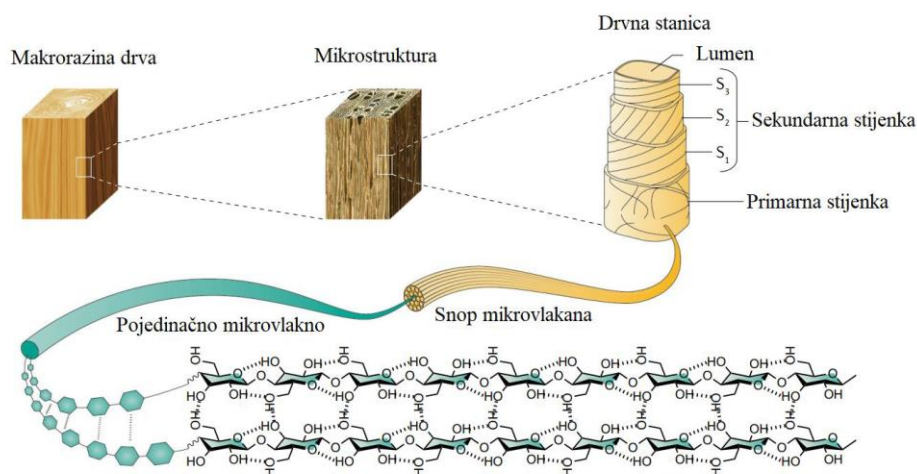


*Slika 6. Stroj za sušenje premaza Trivec.*

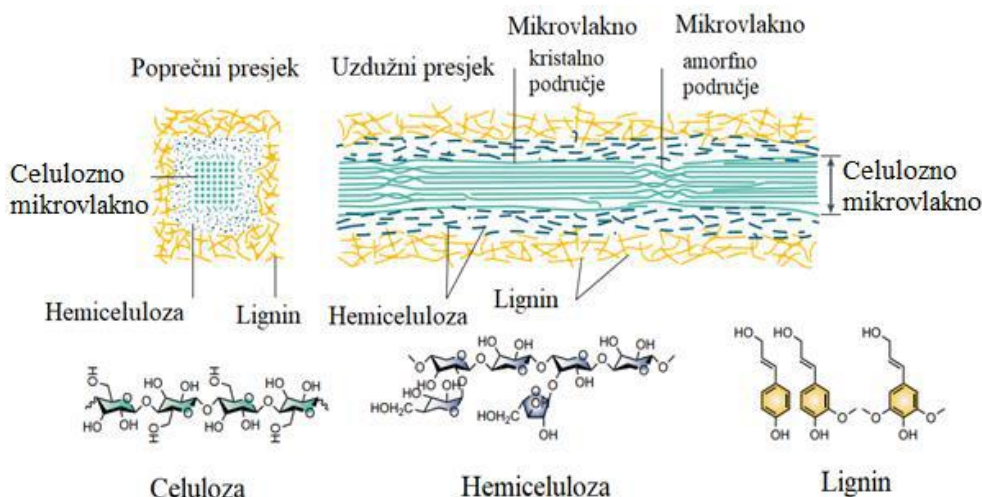
## 6 ISPITIVANJA TRAJNOSTI LIJEPLJENOG SPOJA

Trajnost slijepljenog spoja odražava sposobnost spoja da održi svoju čvrstoću tijekom vremena. Kvalitetan slijepljen spoj posjedovat će visoku čvrstoću i dugotrajnost samo ako se u procesu lijepljenja pažljivo uzmu u obzir svi relevantni faktori. Ovi faktori ovise o karakteristikama drva, ljepila i samog procesa lijepljenja (Mihulja i Bogner, 2005).

Za bolje za razumijevanje utjecaja ozračavanja potrebno je dobro poznavati anatomiju drva, i to čak na nano razini. Na slikama 7. i 8. prikazan je kompletan hijerarhijski prikaz od makro razine do nano razine odnosno do sastava pojedinačnog mikrovlakna.



Slika 7. Hijerarhijski prikaz građe drva (Jakopec, 2022)



Slika 8. Prikaz poprečnog i uzdužnog presjeka pojedinačnog mikrovlakna drva te njegovog sastava (Jakopec, 2022)

Turkulin (1996) je u svom istraživanju pretpostavio da se povećanja mikrovlačne čvrstoće događa baš zbog smanjenja amornog područja unutar celuloznog mikrovlakna odnosno amorfno područje na neki način postaje kristalično zbog utjecaja

## 6. ISPITIVANJA TRAJNOSTI LIJEPLJENOG SPOJA

---

UV svjetla. Nadalje, poznato je da je amorfno područje celuloze, vrlo nestabilno i time odgovorno za dimenzijske promjene drva – bubrenje i utezanje. Stoga se osim povećanja čvrstoće koje je već dokazano, može pretpostaviti i povećanje trajnosti tako tretiranog drva, baš zbog utjecaja UV svjetla na dimenzijski nestabilno amorfno područje. Dakle, ako je stanični prostor oko linije lijepljenja dimenzijski stabilan onda je i trajnost spoja veća te neće dolaziti do delaminacije takvog spoja.

Čvrstoća i trajnost lijepljenog spoja glavne su odrednice kvalitete lijepljenja. Međutim, trajnost se također kvantificira pomoću iznosa čvrstoće lijepljenog spoja, na način da se ispitne probe kondicioniraju u vlažnim uvjetima koji su propisani prema normama, ubrzanom izlaganju simulacijom vanjskih uvjeta te prirodnom izlaganju. Ispitivanje trajnosti najbrže i najlakše je provoditi prema normiranim metodama, koje nam često ne daju kompletnu sliku trajnosti spoja, jer se relativna vlažnost zraka u stvarnosti mijenja unutar jednoga dana, a normirane metode predlažu duže periode izlaganja. Pošto je drvo higroskopan materijal, česte izmjene relativne vlage zraka uvelike će utjecati na njegovo ponašanje, stoga je za utvrđivanje trajnosti spoja najbolje izlagati prirodno. Zbog dugog trajanja prirodnog izlaganja, znanstvenici su izradili uređaje za ubrzano umjetno izlaganje simulacijom stvarnih uvjeta (Slika 9). QUV uređaj za izlaganje koristi UV svjetlost i vodenu paru za simuliranje uvjeta, dok Xenon Test komora koristi cjelokupni spektar sunčevog zračenja i paru. Osim toga, u potonjem uređaju se uzorci automatski rotiraju na stalku.



Slika 9. Prikaz uređaja za ubrzano umjetno izlaganje simulacijom stvarnih uvjeta: QUV uređaj (lijevo) i Xenon Test komora (desno) (Izvor: <https://www.q-lab.com/products/> (Pristupljeno: 23. 9. 2023.))

Pošto se trajnost na kraju kvantificira s iznosom čvrstoće spoja koja je preostala nakon izlaganja, vrlo je važno upoznati se s pravilnim ispitivanjem čvrstoće te potkrepljivanjem rezultata s načinom inicijacije loma, odnosno izgledom lomnih površina nakon ispitivanja.

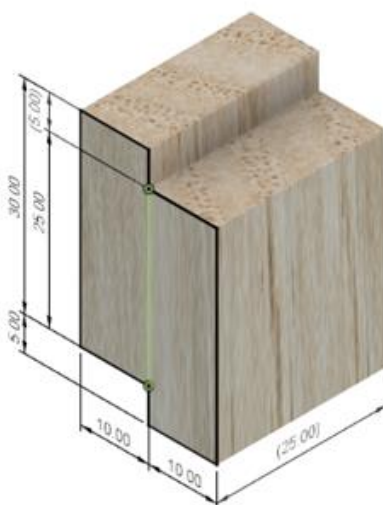
### 6.1 Ispitivanje čvrstoće lijepljenog spoja

Kako svaki materijal možemo definirati njegovom otpornošću prema razaranju pod djelovanjem sile (čvrstoćom), i lijepljeni spoj možemo definirati na isti način. Međutim, određivanje čvrstoće lijepljenja drva znatno je složenije od određivanja čvrstoće samo jednog materijala, ponajprije zato što se lijepljeni spoj sastoji od više različitih materijala. Pritom je složenost problematike dodatno povećana jer su površine drva koje dolaze u dodir s ljepljom porozne, pa se penetracijom ljeplja stvara potpovršinski sloj drva impregniranog ljepljom, a to je materijal koji ima drugačija svojstva od svojstava drva i ljeplja i kojemu zbog neravnomjerne impregnacije drva ljepljom nije moguće odrediti granicu u smislu ravnine kojom bismo razdijelili materijale (Mihulja i Bogner, 2005).

Čvrstoća u kontekstu lijepljenja drva označava otpornost na razdvajanje slijepljenog spoja. Slijepljeni drveni spoj posjeduje svoja jedinstvena mehanička svojstva koja se razlikuju od svojstava materijala iz kojeg je izrađen. Ovo svojstvo, često nazivano čvrstoća slijepljenog spoja, igra ključnu ulogu u procjeni kvalitete takvih spojeva.

Prema Mihulji i Bogneru (2005) glavni činitelji koji utječu na čvrstoću lijepljenja su kvašenje površine drva ljepljom, vrsta ljeplja, vrsta drva, svojstva površine drva, proces lijepljenja. Mjerenje stvarne čvrstoće spoja predstavlja izazov, a izračunavanje je dodatno kompleksno. Provođenje preciznih mjerenja može smanjiti odstupanja od stvarnih vrijednosti čvrstoće, posebice ako pažljivo biramo metode primjene sile na spoj. Za odabir optimalnog postupka, ključno je imati duboko razumijevanje slijepljenog spoja i faktora koji utječu na uspješno lijepljenje drva.

Čvrstoću spoja koju teoretski određujemo naprežanjem na smicanje (Slika 10), a u praksi često ispitujemo kroz vlačna, savojna ili njihova kombinirana naprežanja. Stvarni odnos između čvrstoće na smicanje i čvrstoće na vlak ili savijanje nije potpuno razjašnjen za nijedan tip ispitivanja.



Slika 10. Prikaz probe za ispitivanje smične čvrstoće lijepljenog spoja tlačnim pokusom prema ISO 6238 (Gržan i sur., 2023)



## 6. ISPITIVANJA TRAJNOSTI LIJEPLJENOG SPOJA

---

Pri ispitivanju slijepljenih spojeva, važno je razumjeti da lom može nastati u sloju ljepila, drvu ili njihovom dodiru, ovisno o intenzitetu i smjeru nametnutog opterećenja. Variranje mehaničkih svojstava drva, ljepila i sučelja drvo-ljepilo dovodi do varijabilnosti rezultata.

Drvo je prirodno anizotropan materijal, kako u fizičkom izgledu, tako i u ponašanju. Pri ispitivanju slijepljenih spojeva, važno je uzeti u obzir varijacije u anatomskim obilježjima, gustoći, sadržaju vlage, položaju godova i smjeru vlakana u drvu. Lom u zoni drva je čest fenomen u visokokvalitetnim slijepljenim spojevima. Iako je prisutnost puknuća kroz drvo često poželjna, kada se dogodi, izmjerena čvrstoća je obično niža od stvarne čvrstoće spoja. Standardiziranim analitičkim metodama za ispitivanje lomne površine često nije moguće dokazati kvalitetu slijepljenosti. To bi bilo izvedivo samo ako bismo mogli definirati utjecaj svih potencijalno negativnih faktora, što kod slijepljenih spojeva drva nije uvijek moguće sa sigurnošću utvrditi. (Mihulja i Bogner, 2006).

Ljepilo također igra važnu ulogu u ispitivanju slijepljenih spojeva, s posebnim naglaskom na stupanj stvrdnjavanja ili krutosti ljepila. Ljepila se skupljaju tijekom stvrdnjavanja, što može uzrokovati dodatna naprezanja u sloju ljepila. Naprezanja koja se javljaju pri slijepljenju materijala mogu biti privremena ili trajna, iako se trajna naprezanja mogu mijenjati tijekom vremena zbog različitih čimbenika, poput promjena temperature ili vlage drva. Izračun unutarnjih naprezanja je kompleksan, pa se često provodi eksperimentalno.

Sučelje drvo-ljepilo podložno je utjecaju kemijskih i fizikalnih svojstava drva i ljepila, uključujući polaritet, površinske energije, prisutnost nečistoća, hrapavost površine drva, anatomiju vlakana i viskoznost ljepila. Ovi izvori varijabilnosti odnose se na različite oblike ispitivanja slijepljenih spojeva.

Kako različiti istraživači koriste različite oblike ispitivanja, povezanost između njih nije uvijek jasna. Ipak, važno je da oblik ispitivanja što vjernije odražava praktičnu upotrebu slijepljenog spoja kako bi rezultati bili relevantni. Drvo je anizotropan materijal s mnogim varijacijama, pri čemu je ključni parametar koji utječe na ponašanje ispitivanja čvrstoće lijepljenja reologija drva. Male promjene u obliku ispitivanja, koje proizlaze iz specifične građe drva, mogu značajno utjecati na ponašanje spoja.

Tijekom procesa stvaranja spojeva lijepljenjem ili otvrdnjavanjem ljepila, formira se složeni materijalni sustav s određenim karakteristikama. Kao što čvrstoća materijala definira njegovu otpornost na uništenje pod utjecajem sile, tako i slijepljeni spoj možemo definirati na isti način. Međutim, procjena čvrstoće slijepljenog spoja znatno je kompleksnija nego kod samostalnog materijala, uglavnom zbog činjenice da spoj čine različiti materijali. Ovaj problem dodatno komplicira činjenica da su površine drva koje dolaze u kontakt s ljepilom porozne, stvarajući novi materijal čiju granicu nije moguće jasno odrediti. Također, nedostatak čvrsto utvrđene površine na koju djeluje adhezija dodatno komplicira situaciju, pa se dimenzije slijepljenog spoja moraju definirati ortogonalnom projekcijom temeljenom na mjerenom uzorku.

## 6. ISPITIVANJA TRAJNOSTI LIJEPLJENOG SPOJA

---

Pitanje ostaje koliko se stvarni procesi naprezanja u slijepljenim konstrukcijama realno procjenjuju korištenjem metoda ispitivanja. Ove metode često uključuju dimenzije ispitnih uzoraka koje moraju biti takve da dođe do loma kako bi se na temelju izmjerene sile loma i udjela loma na drvu odredilo zadovoljavaju li ljepilo minimalne zahtjeve.



### 7 ZAKLJUČAK

Iz dosadašnjih istraživanja i saznanja dalo bi se zaključiti da je UV zračenje isključivo štetno za drvo. Smatra se jednim od najintenzivnijih faktora u degradaciji drva i drvnih proizvoda. Ukoliko zračenje djeluje dugo i intenzivno na površinu drva i lijepljeni spoj destrukcija je neizbježna.

Istovremeno, pojavljuje se nova struja razmišljanja i istraživanja sa drugačijim rezultatima. Ukoliko je UV zračenje snažno i kratkotrajno ono djeluje pozitivno na adhezijska svojstva površine, čisteći površinu i uzrokujući povećanje energije površine, blago mijenjajući kemijska svojstva i morfologiju. Svi autori koji su proveli istraživanja na tu temu u svojim rezultatima vide značajna poboljšanja u čvrstoći lijepljenoga spoja.

Istraživanja koja se bave utjecajem ozračavanja na svojstva lijepljenih spojeva u drvu trenutno su u ranoj fazi razvoja. Još nije jasno kada i pod kojim uvjetima se poboljšavaju ta svojstva, a kada počinju opadati. Za dublje razumijevanje ovog fenomena, nužno je detaljno poznavanje anatomiju drva, čak i na nano razini. Osim dokazanog povećanja čvrstoće, sugerira se da bi pod utjecajem UV svjetla mogla rasti i trajnost tretiranog drva, posebice ako stanični prostor oko linije lijepljenja ostaje dimenzijski stabilan. Dakle, stabilnost tog staničnog prostora igra ključnu ulogu u sprječavanju delaminacije spoja.

Tehnologija kojom se provodi UV zračenje mogla bi vrlo jednostavno, jeftino i efikasno biti prilagođena za industrijsku proizvodnju. Pošto se tehnologija kojom su provedena istraživanja lako implementira u dosadašnje sustave proizvodnje, te je ekološki prihvatljiva, smatra se kako je nužno nastaviti sa procesom istraživanja i daljnjih prikupljanja informacija i podataka na ovu temu. Kratkotrajno intenzivno izlaganje drvene površine UV svjetlu poboljšava komponente adhezije ozračenog drva, čvrstoću lijepljenih spojeva, kvalitetu lijepljenja

Međutim, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se odredili idealni parametri za izlaganje vodi, temperaturi i UV svjetlu. Vrlo je bitno ispitati trajnost takvih spojeva – uz čvrstoću, trajnost je ključan faktor kvalitete lijepljenja jer određuje krajnju primjenu proizvoda.

**LITERATURA**

1. Bogner, A., 1991.: Modifikacija der Holzoberfläche zur Verbesserung der Verleimung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 49: 271-275.
2. Bogner, A.; Grbac, I.; Risović, S., 2003.: Kvantifikacija sposobnosti drva za lijepljenje. *Drvna industrija*, 54 (3): 147-153.
3. Cao, Y.; Xu, C.; Xu, S.; Chen, H.; Yujing Nie, Y.; Yan, Y.; Chen, Y.; Wu, Q., 2022.: UV-irradiation reduces the mechanical performance of wood-adhesive interphase. *Wood Material Science & Engineering*, 18: 1291-1301. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2129446>
4. Cogulet, A.; Blanchet, P.; Landry V., 2016.: Wood degradation under UV irradiation: A lignin characterization. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, 158: 184–191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.02.030>
5. Derbyshire, H.; Miller, E.R., 1981.: The Photodegradation of Wood During Solar Irradiation. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 39: 341-350.
6. Despot, R.; Hasan, M.; Rapp, A.O.; Brischke, C.; Humar, M.; Welzbacher, C.R.; Ražem, D., 2012.: Changes in Selected Properties of Wood Caused by Gamma Radiation. *Gamma Radiation*. DOI:10.5772/34860
7. Gržan, T.; Grieco, L.; Živković, V.; Mihulja, G., 2023.: UV Irradiation of Wood Surface: Bonding Properties. *Polymers*, 15 (11): 2552. <https://doi.org/10.3390/polym15112552>
8. Hon, D.N.-S.; Feist, W.C., 1981.: Free Radical Formation in Wood: The Role of Water. *Wood Sci.* 1981, 14, 41-81.
9. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=21168>, (pristupljeno: 9. 9. 2023.)
10. <https://www.g-lab.com/products/> (Pristupljeno: 23. 9. 2023.)
11. Huber, H.; Haas, R.; Petutschnigg, A.; Grüll, G.; Schnabel, T., 2019.: Changes in wettability of wood surface using electron beam irradiation. *Wood Material Science & Engineering*, 15: 237-240. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1580310>
12. Jakopc, 2022.: Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazivnu otpornost bagrema (*Robinia pseudoacacia*) u tri karakteristična presjeka. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
13. Ljekarna Lipa 'Štetno djelovanje UV zračenja'. Dostupno: <http://ljekarna-lipa.hr/stetno-djelovanje-uv-zracenja/> (Pristupljeno, 20. 9. 2023.).
14. Mihulja, G., Bogner, A., Turkulin, H., 1999.: Modificiranje površine bukovine ozračivanjem UV svjetlošću. Prethodno priopćenje. *Drvna industrija* 50 (3) 133-140
15. Mihulja, G.; Bogner, A., 2005.: Čvrstoća i trajnost lijepljenog drva Dio I: Činitelji čvrstoće lijepljenog drva. *Drvna industrija*, 56 (2): 69-78.
16. Mihulja, G.; Bogner, A., 2007.: Čvrstoća i trajnost lijepljenog drva Dio II: Ispitivanje čvrstoće lijepljenja drva. *Drvna industrija* 58 (2): 89-96.

17. Rushanovich Safin, R.; Ravilevna Shaikhutdinova, A.; Khasanshin, R.; Mukhametzyanov, S.; Safina, A., 2021.: Increasing the Strength of the Glue Line in the Production of Thermally Modified Wood Paneling. *Coatings*, 11: 253. <https://doi.org/10.3390/coatings11020253>
18. Ryer, A., 1997.: *Light measurement handbook*, International Light.
19. Turkulin, H. 1996: *Fotodegradacija Proizvoda Od Drva u Građevinarstvu*. Ph.D. Thesis, Faculty of Forestry, University of Zagreb, Zagreb, Hrvatska.
20. Turkulin, H.; Živković, V., 2018.: Microtensile Testing of Wood – Influence of Material Properties, Exposure and Testing Conditions on Analysis of Photodegradation. *Drvna industrija*, 69 (2): 183-191. <https://doi.org/10.5552/drind.2018.1757>