

Usporedba abrazijske otpornosti tikovine u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku

Grgić, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:434352>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-07**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ana Grgić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Studentica:

Ana Grgić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede, dipl. ing. na predanom znanju tijekom studija i izrade diplomskog rada. Vaši savjeti, stručnost i vodstvo prilikom izrade ovog rada pružili su mi znanje i temelj za dalje na profesionalnom i životnom putu. Hvala Vam.

Veliko hvala Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na pruženoj podršci pri izradi rada te nesebično izdvojenom vremenu pri pomoći u provedbi eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem tvrtki ATT Nautica d.o.o. na materijalu za ispitivanje te tvrtki Topomatika d.o.o. na provedbi ispitivanja uzoraka.

Profesorima, asistentima i ostalim zaposlenicima fakulteta – hvala Vam na podijeljenom znanju, iskustvu i savjetima.

Draga bako Mirjana, hvala na razumijevanju i podršci tijekom studija. Tvoje ohrabrivanje na mom studijskom i životnom putovanju dovodi me do svakog željenog cilja.

Hvala tati Grgi, majci Ingi i bratu Toniju na bezgraničnoj ljubavi, kao i prabaki Roziki te na njezinoj vjeri.

Zahvaljujem Hrvoju na beskrajnoj podršci, razumijevanju i strpljenju, kao osloncu tijekom svih izazova.

Mojim prijateljicama, Eleni, Klaudiji i Tei, hvala na podršci, svakom našem smijehu i provedenom trenutku, koji bi olakšali teške studentske rokove i obaveze.

Drage kolegice i prijateljice, Ana i Ela, hvala vam na nesebičnom dijeljenju znanja tijekom studija i što ste ovaj period studijskog života obilježile na poseban način.

Ana Grgić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
 Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
 mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Studentica: Ana Grgić **JMBAG:** 0035214936

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Usporedba abrazijske otpornosti tikovine u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku

Naslov rada na engleskom jeziku: Comparison of the abrasion wear resistance of the teak wood in cross, radial, and tangential sections

Opis zadatka:

Tikovina je egzotična vrsta drva s dobrim mehaničkim svojstvima, izvanrednom trajnošću i otpornošću na biotičku i abiotičku razgradnju. Također se daje dobro obrađivati različitim postupcima obrade odvajanjem čestica. Zbog dobre dimenzijske stabilnosti i velike otpornosti na vlagu rabi se za izradu trupova drvenih brodova, za palube i uređenje interijera velikih brodova, za mostove, željezničke vagone, molove, za unutarnje i vanjske dijelove kuća te puno drugih namjena. Kod nekih od navedenih primjera primjene važno je svojstvo otpornosti na trošenje, osobito na abrazijski mehanizam trošenja.

U diplomskom radu potrebno je odrediti otpornost na abrazijsko trošenje tikovine u tri osnovna presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Ispitivanje treba provesti na uređaju Taber abrader uz primjenu brusnih papira s različitim veličinom abrazivnih čestica. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i usporediti sa sličnim ispitivanjima na drugim vrstama drva u dostupnoj literaturi. Na temelju svega navedenog potrebno je donijeti odgovarajuće zaključke. Svu korištenu literaturu navesti u zadnjem poglavlju rada, a potrebno je navesti i eventualno primljenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

28. rujna 2023.

30. studenoga 2023.

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadala:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	III
POPIS SLIKA	VI
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS OZNAKA	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
2. MAKROSTRUKTURA DRVA	2
2.1. Botanička podjela.....	2
2.2. Osnovni dijelovi drva.....	3
2.2.1. Godovi.....	4
2.3. Osnovne značajke makrostrukture drva	6
2.4. Karakteristični presjeci drva	7
3. MIKROSTRUKTURA DRVA.....	8
3.1. Drvne stanice.....	8
3.2. Struktura stanične stijenke	9
3.2.1. Jažice (pitovi).....	10
3.3. Podjela drva – meko (četinjače) i tvrdo (listače) drvo	10
3.4. Mikrostruktura četinjača	11
3.4.1. Traheide	11
3.4.2. Prijelaz između ranih i kasnih dijelova goda	12
3.4.3. Parenhimske stanice.....	13
3.4.4. Smolni kanali	14
3.4.5. Drvni traci	15
3.5. Mikrostruktura listača	15
3.5.1. Drvna vlakanca	15
3.5.2. Traheje	15
3.5.3. Parenhimske stanice.....	16
3.5.4. Drvni traci	16

4. KEMIJSKI SASTAV STANIČNE STIJENKE.....	17
4.1. Molekularna struktura drva.....	17
4.1.1. Celuloza	18
4.1.2. Hemiceluloza	19
4.1.2.1. Holoceluloza	20
4.1.3. Lignin.....	20
5. SVOJSTVA DRVA	21
5.1. Gustoća drva	21
5.1.1. Gustoća stanične stijenske drva.....	21
5.2. Mehanička svojstva drva.....	22
5.2.1. Svojstva elastičnosti.....	23
5.2.1.1. Modul elastičnosti.....	23
5.2.1.2. Poissonov omjer.....	25
5.2.1.3. Modul smicanja.....	27
5.2.2. Svojstva čvrstoće	27
5.2.2.1. Savojna čvrstoća	27
5.2.2.2. Tlačna čvrstoća	28
5.2.2.3. Smična čvrstoća	28
5.2.2.4. Vlačna čvrstoća.....	29
5.2.2.5. Žilavost	29
5.2.2.6. Tvrdoća	30
5.2.2.7. Puzanje.....	32
5.2.2.8. Umor	32
5.3. Higroskopnost.....	33
5.3.1. Promjena higroskopnosti drva kroz vrijeme	34
5.4. Toplinska svojstva.....	36
5.5. Otpornost na biološku razgradnju	38
6. MODIFIKACIJA DRVA	39
6.1. Acetilacija	39
6.2. Furfurilacija.....	39
6.3. Toplinska modifikacija	39
7. EKSPERIMENTALNI DIO	41

7.1. Cilj rada.....	41
7.2. Materijal za istraživanje	41
7.3. Provedena ispitivanja	42
7.3.1. Analiza mikrostrukture	42
7.3.1.1. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu	42
7.3.1.2. Analiza mikrostrukture računalnom tomografijom	45
7.3.2. Mjerenje gustoće i udjela vlage u uzorcima	47
7.3.3. Određivanje abrazijske otpornosti	49
7.3.4. Mjerenje tvrdoće metodom po Brinellu.....	59
7.4. Analiza rezultata	62
7.4.1. Osvrt na analizu mikrostrukture.....	62
7.4.2. Osvrt na rezultate ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje	62
7.4.3. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće	64
8. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Osnovna razlika između listača i četinjača [5]	2
Slika 2.2.	Dijelovi drva: krošnja, deblo, korijen [6]	3
Slika 2.3.	Dijelovi debla na poprečnom presjeku [6]	4
Slika 2.4.	Nagli prijelaz iz ranog dijela goda u kasni na poprečnom presjeku drva Istočnog ariša [5].....	5
Slika 2.5.	Postupni prijelaz iz ranog dijela goda u kasni na poprečnom presjeku drva Istočnog bijelog bora [5]	6
Slika 2.6.	Pojednostavljen prikaz strukture drva u različitim mjernim područjima [7]	6
Slika 2.7.	Tri karakteristična presjeka drva: X-poprečni presjek, R-radijalni presjek, T-tangencijalni presjek [5]	7
Slika 3.1.	Naprezanja pri rastu drvnih stanica [9]	8
Slika 3.2.	Slojevi stanične stijenke [11]	9
Slika 3.3.	Jažice u staničnoj stijenci [12]	10
Slika 3.4.	Mikrostruktura četinjača i listača [1].....	11
Slika 3.5.	Gruba, srednje fina i fina tekstura četinjača [13]	12
Slika 3.6.	Nagli (lijevo) i postupni (desno) prijelaz s ranog drva kasno	13
Slika 3.7.	Raspored parenhimskih stanica: difuzni (lijevo) i zonatni (desno) [13]	14
Slika 3.8.	Smolni kanali različitih vrsta drva: bor (ravnomjerni raspored), smreka (sporadični raspored), cedar (bez kanala) [13].....	15
Slika 3.9.	Prstenasto porozna (lijevo), difuzno porozna (sredina) i semi-prstenasto porozna vrsta (desno) [14].....	16
Slika 4.1.	Udio biopolimera u staničnim stijenkama drva [10]	17
Slika 4.2.	Molekularna struktura celuloze [10]	18
Slika 4.3.	Djelomična struktura celuloze [15].....	19
Slika 4.4.	Kemijska struktura celebioze [15].....	19
Slika 4.5.	Molekularna struktura hemiceluloze [10]	19
Slika 4.6.	Fenilpropanske jedinice lignina [15].....	20
Slika 4.7.	Molekularna struktura lignina [10].....	20
Slika 5.1.	Gustoća nekih vrsta drva u ovisnosti o visini stabla [18].....	22
Slika 5.2.	Tri osnovne osi u drvu [19]	23
Slika 5.3.	Određivanje modula elastičnosti u praksi u tri točke	24
Slika 5.4.	Specifična krutost drva i nekih drugih tehničkih materijala [4]	25

Slika 5.5. Različiti kutovi između sila i godova [19]	28
Slika 5.6. Djelovanje sila pri smičnom naprezanju	29
Slika 5.7. Geometrijska povezanost (a) kuglica pod opterećenjem, (b) kuglica nakon opterećenja [21]	31
Slika 5.8. Ispitivanje tvrdoće prema Janki: a – osovina, b – fleksibilna obujmica, c- poluga, d – ispust indentora [23]	32
Slika 5.9. Ravnotežni sadržaj vlage u odnosu na relativnu vlažnost kod starog i novog drva [25]	35
Slika 5.10. Struktura stanične stijenke; kristalna celuloza i amorfne tvari [25]	35
Slika 5.11. Shema mehanizma unutarnjeg naprezanja pri sušenju drva [25]	36
Slika 5.12. Termogravimetrijska analiza [26]	37
Slika 7.1. Materijal iz kojeg su izrezani svi potrebni uzorci	41
Slika 7.2. Izrezivanje uzoraka za analizu mikrostrukture na Microtomu	42
Slika 7.3. Svjetlosni mikroskop za analizu mikrostrukture	43
Slika 7.4. Mikrostruktura poprečnog presjeka drva tikovine	43
Slika 7.5. Mikrostruktura tangencijalnog presjeka drva tikovine	44
Slika 7.6. Mikrostruktura radijalnog presjeka drva tikovine	44
Slika 7.7. CT uređaj ZEISS Metrotom 6 Scout [29]	45
Slika 7.8. CT snimka mikrostrukture u poprečnom presjeku tikovine	46
Slika 7.9. CT snimka mikrostrukture u tangencijalnom presjeku tikovine	46
Slika 7.10. CT snimka mikrostrukture u radijalnom presjeku tikovine	47
Slika 7.11. Uzorak za određivanje gustoće i udjela vlage	47
Slika 7.12. Peć za sušenje uzorka	48
Slika 7.13. Eksikator	48
Slika 7.14. Shematski prikaz pozicije uzoraka za abrazijsko trošenje u odnosu na osnovne os	49
Slika 7.15. Tračna pila za izrezivanje uzoraka	50
Slika 7.16. Stolna pila FET za izrezivanje uzoraka za mjerenje na Taber abraderu	50
Slika 7.17. Prikaz ispitnih uzoraka: P – poprečni presjek, R – radijalni presjek, T – tangencijalni presjek	51
Slika 7.18. Proces finog brušenja uzorka	51
Slika 7.19. Vaga Ohaus Analytical Plus	52
Slika 7.20. Izmjerena masa jednog od uzoraka pomoću vage Ohaus Analytical Plus	52

Slika 7.21. Uređaj Taber abrader.....	53
Slika 7.22. Abrazijsko trošenje uzorka; A-početak trošenja, B-nakon određenog broja ciklusa	54
Slika 7.23. Ovisnost intenziteta trošenja tikovine o kvaliteti brusnog papira	59
Slika 7.24. Tvrdomjer HP250.....	59
Slika 7.25. Mjerenje tvrdoće i otisci kuglice na ispitnom uzorku tikovine.....	60
Slika 7.26. Gubitak volumena uzoraka nakon abrazijskog trošenja u ovisnosti o granulaciji brusnog papira pri udjelu vlage od 12 %.....	62
Slika 7.27. Intenzitet trošenja uzoraka u ovisnosti o srednjem promjeru abrazivnog zrna.....	63
Slika 7.28. Srednje vrijednosti tvrdoće HB po presjecima.....	64

POPIS TABLICA

Tablica 3.1.	Tekstura i hrapavost površine drva u ovisnosti o promjeru traheida [13] ...	12
Tablica 3.2.	Tri primarne skupine drva s obzirom na smolne kanale [13]	14
Tablica 5.1.	Poissonov omjer kod različitih vrsta listača [19].....	25
Tablica 5.2.	Poissonov omjer kod različitih vrsta četinjača [19].....	26
Tablica 5.3.	Podjela vlage u živom drvu [4].....	33
Tablica 5.4.	Sredstva za poboljšanje toplinskih svojstava kod drva [4]	38
Tablica 7.1.	Rezultati mjerenja gustoće i udjela vlage u uzorcima	49
Tablica 7.2.	Srednje veličine abrazivnog zrna u ovisnosti o kvaliteti abrazivnog papira [30].....	53
Tablica 7.3.	Izmjerene dimenzije uzoraka za abrazijsko trošenje	54
Tablica 7.4.	Gubitak mase uzoraka nakon abrazijskog trošenja pri udjelu vlage od 6,56 %	55
Tablica 7.5.	Gubitak mase uzoraka nakon abrazijskog trošenja pri udjelu vlage od 12 %	56
Tablica 7.6.	Volumni gubitak u uzorcima nakon abrazijskog trošenja za udio vlage od 12 %.....	57
Tablica 7.7.	Intenzitet abrazijskog trošenja tikovine za udio vlage od 12 %	58
Tablica 7.8.	Vrijednosti tvrdoće HB uzoraka	61

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	površina
b	mm	širina
CV	%	Koeficijent varijacije
D	mm	promjer indentora
d	mm	promjer otiska
E	GPa	modul elastičnosti
EMC	/	ravnotežni sadržaj vlage
F	N	sila
G	MPa	modul smicanja
h	mm	visina
HB	/	tvrdća, Brinellova metoda
KU, KV	J	udarni rad loma (žilavost)
l	mm	duljina
m	kg	masa
Ra	μm	hrapavost površine
RH	%	relativna vlažnost
R_m	MPa	vlačna čvrstoća
R_{ms}	MPa	savojna čvrstoća
R_{mt}	MPa	tlačna čvrstoća
$R_{m\tau}$	MPa	smična čvrstoća
t	s	vrijeme
V	cm^3	volumen
w	%	sadržaj vlage
w	%	maseni udio
\bar{x}		srednja vrijednost
Δm	g	promjena mase
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
ρ	g/cm^3	gustoća
σ		standardna devijacija
ν	/	Poissonov koeficijent

SAŽETAK

U diplomskom radu analizirana je mikrostruktura i istražen utjecaj usmjerenosti strukture drva tikovine na abrazijsku otpornost i tvrdoću. Mikrostruktura je analizirana na svjetlosnom mikroskopu i pomoću računalne tomografije. Tvrdoća je mjerena metodom po Brinellu, a intenzitet abrazijskog trošenja određen je na uređaju Taber abrader.

Mikrostruktura tikovine je izrazito usmjerena, a traheje su grupirane u ranom dijelu goda. Gustoća tikovine iznosila je 0,67 g/cm³.

Najveća otpornost na abraziju izmjerena je na poprečnom presjeku. Tangencijalni i radijalni presjek imaju manju i međusobno sličnu otpornost na abraziju. Veličina abrazivnog zrna ima veliki utjecaj na intenzitet abrazijskog trošenja kod sva tri osnovna presjeka. Na svim presjecima uočen je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna i iznosi oko 125 μm.

Najviša srednja vrijednost tvrdoće izmjerena je na poprečnom presjeku i iznosi 8,89 HB. Tangencijalni i radijalni presjek imaju niže i međusobno slične vrijednosti tvrdoće.

Ključne riječi: abrazijska otpornost, tvrdoća, mikrostruktura, tikovina

SUMMARY

In this thesis, the microstructure of teak wood has been analyzed and the influence of the structure's orientation on abrasion resistance and hardness was investigated. The light microscope was used to analyze the teak microstructure, as well as computerized tomography. Hardness was measured using the Brinell method while intensity of abrasive wear was determined on a Taber abrader.

The microstructure of teak wood is highly oriented with vessels grouped together in the earlywood. The density of teak wood was measured and it amounted to 0.67 g/cm³.

The highest abrasion wear resistance was measured in the cross section. The radial and tangential sections have lower resistance to abrasion than cross section, as well as very similar amongst themselves. The size of the abrasive grain has a significant impact on the intensity of abrasion wear in all three primary sections. The phenomenon of critical abrasive grain size was observed in all three sections and is about 125 µm.

The highest average Brinell hardness was measured in the cross section and has reached 8.89 HB. The tangential and radial section exhibit lower and relatively similar hardness values to each other.

Key words: abrasion wear resistance, hardness, microstructure, teak

1. UVOD

Od najranijih početaka čovječanstva, drvo je usko povezano s razvojem i napretkom čovjeka. Drvo, promatrano kao biljka, neophodan je dio ljudskih života, a korišteno kao materijal pokazuje izvrsna svojstva za razne potrebe čovjeka. Optimizacijom njegove strukture, drvo se primjenjuje na razne i učinkovite načine. Kao obnovljiv i održiv izvor energije, drvo je intenzivno utjecalo na povijest civilizacije. Kako se neobnovljivi izvori energije sve više iscrpljuju, budućnost ovisi o postizanju održivog društva, pri čemu drvo, kao obnovljiv izvor energije ima važnu ulogu. Smanjenje ugljičnog otiska jedan je od čimbenika koji utječe na povećanu zainteresiranost iskorištavanja drva. Razvojem ekološke svijesti potiče se uporaba recikličnih materijala, s ciljem smanjenja negativnog utjecaja na okoliš. Hijerarhijska i porozna struktura drva omogućuje njegovo strukturno i kompozicijsko oblikovanje i modificiranje. U prethodnim desetljećima ostvaren je veliki napredak u modifikaciji drva toplinskom obradom, kemijskoj modifikaciji te impregnacijom i nanošenjem premaza [1].

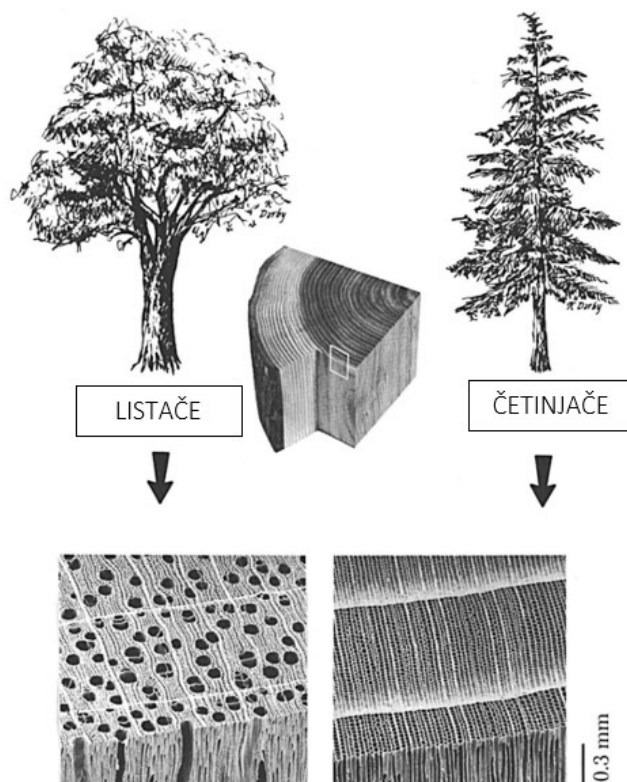
Abrazijsko trošenje je trošenje materijala pri kontaktu s abrazivnim česticama. Ono nastaje kada materijal s površinom većeg iznosa tvrdoće prodire u površinu materijala s manjom tvrdoćom. Razlikuje se abrazija između dva tijela i abrazija između tri tijela. Tribosustav kod abrazije u dodiru dva tijela sastoji se od abrazivnog tijela i abrazivnog protutijela. Tribosustav kod abrazije u dodiru tri tijela sastoji se od abrazivnog tijela, protutijela i čestica koje se slobodno gibaju između abrazivnog tijela i protutijela. Čestice koje se slobodno gibaju djeluju abrazijski. Kako bi se izbjeglo abrazijsko trošenje, potreban je odgovarajući odabir materijala u dodiru [2]. Otpornost na takvo trošenje materijala usko je povezano s tvrdoćom. Osim utjecaja tvrdoće, kod drva je dokazano da su abrazivna zrna osjetljiva na orijentaciju vlakana [3]. U ovom radu analiziran je utjecaj specifične orijentacije drvene građe na abrazijsku otpornost tikovine. Tikovina (lat. *Tectona grandis*) tropska je vrsta drva, a ubraja se u rod Verbanaceae. Drvo tikovina zbog izvrsnih svojstava smatra se jednim od najvrjednijih vrsta tropskih drva, a zbog navedenog se najčešće koristi u brodogradnji, često se primjenjuje i za vanjsku uporabu budući da pokazuje dugotrajnost i visoku otpornost na vanjske negativne utjecaje, koristi se i za izradu namještaja, i slično. Prirodan prostor na kojem tikovina raste je u južnoj i jugoistočnoj Aziji (primjerice: Bangladeš, Indija, Laos, Myanmar, Indonezija, Tajland). Boja srži tikovine je zlatnosmeđa, a jasno se razlikuje od žućkasto-bijele bjelike. Starenjem udio srži se povećava u odnosu na bjeliku.

2. MAKROSTRUKTURA DRVA

2.1. Botanička podjela

Sve vrste drva pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača. Četinjače se svrstavaju u skupinu golosjemenjača te su većinom zimzelene, dok listačama, koje pripadaju skupini kritosjemenjača, u hladnijem dijelu godine lišće opada. Na Slika 2.1. prikazan je opći oblik stabla četinjača i listača [4].

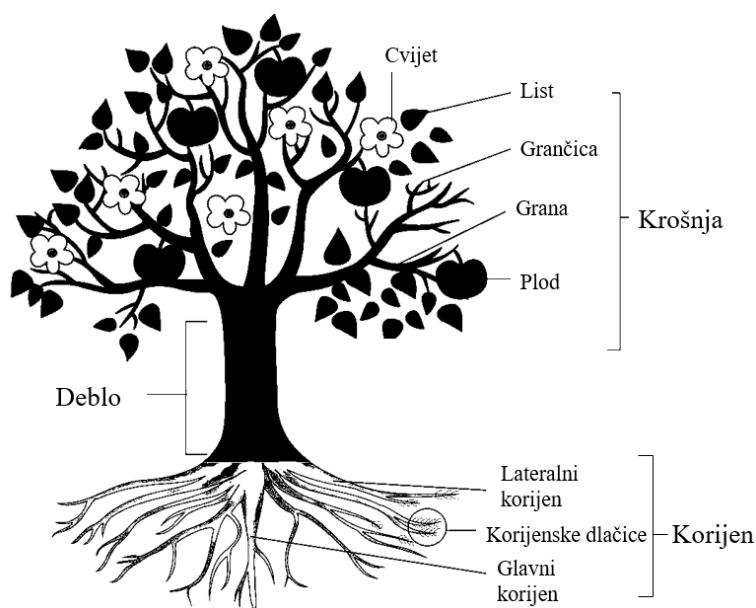
Mikrostrukturna građa četinjača i listača se dosta razlikuje. U zreloom stanju, većina stanica drva je mrtva i šuplja, a tkivo (sekundarni ksilem) je sastavljeno od staničnih stijenki i šupljina (lumena), omeđenih staničnom stijenkom. Četinjače imaju puno jednostavniju građu od listača. Drvno tkivo četinjača sastavljeno je uglavnom od traheida. To su izdužene drvne stanice koje čine 90-95% volumena drva četinjača. S druge strane, listače imaju puno složeniju građu i više vrsta drvnih stanica od četinjača. Najveće stanice kod listača zovu se pore ili traheje, a osim njih postoji niz drugih stanica s tanjom staničnom stijenkom i užim lumenom. Na slici 2.1. prikazana je razlika u obliku stabla listača i četinjača, a na istoj slici mogu se vidjeti spomenute razlike u mikrostrukтури između listača i četinjača [5].



Slika 2.1. Osnovna razlika između listača i četinjača [5]

2.2. Osnovni dijelovi drva

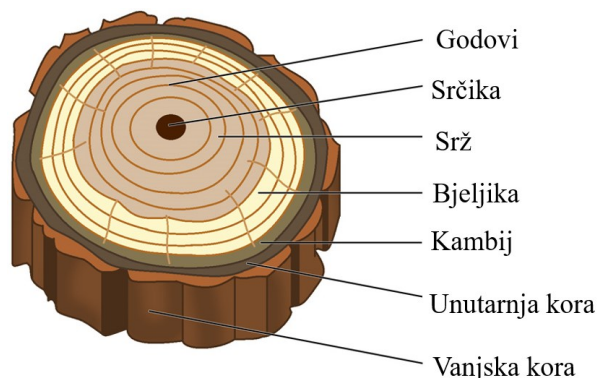
Drvo čovjeku služi u brojne svrhe, poput proizvodnje kisika, pročišćavanja atmosfere, očuvanja vode, sprječavanja erozije tla, služi i kao stanište životinjskim bićima, i tako dalje. Zrelo drvo ima tri osnovna dijela: korijen, krošnju i deblo. Osnovna građa drva dana je na slici 2.2. Struktura svakog navedenog dijela varira o zemljopisnom položaju drva, a svaki dio ima svoju funkciju.



Slika 2.2. Dijelovi drva: krošnja, deblo, korijen [6]

Korijeni su ispod razine tla. Primarni (glavni) korijen raste uz sekundarne (bočne) korijene koji proizlaze iz njega. Svaki korijen ima sitne dlačice koje povećavaju mogućnost apsorpcije tvari iz tla. Glavna zadaća korijena je pružanje stabilnosti, upijanje vode i minerala iz tla, skladištenje rezervnih tvari te sprječavanje erozije tla. Najviši dio drva je krošnja koja se najviše razlikuje kada se promatraju različite vrste drva. Krošnja sadrži lišće koje filtrira zrak i održava ga čistim, grane koje pohranjuju organske tvari u obliku šećera te pružaju snagu i potporu. Deblo spaja korijen i krošnju i najvažniji je dio stabla s gledišta iskorištavanja drva kao tehničkog materijala. [6].

Na poprečnom presjeku debla, mogu se uočiti različiti slojevi prikazani na slici 2.3. Promatrajući poprečni presjek debla s periferije prema središtu razlikuju se sljedeći slojevi: vanjska kora, unutarnja kora, kambij, bjeljika, srž, srčika.



Slika 2.3. Dijelovi debla na poprečnom presjeku [6]

Vanjska kora daje drvu čvrstoću i štiti unutarnju koru od isušivanja i vanjskih utjecaja. Kambij je tanki sloj živog tkiva, od čijih stanica nastaje nova unutarnja kora (prema periferiji debla) i novo drveno tkivo (prema srčiki).

Ispod kambija nalazi se bjeljika, koja je najmlađi živi sloj drva. Stanice koje se nalaze u bjeljiki provode vodu i minerale od korijena do lišća, a tijekom vremena osržuju. Srž ili srževina je obično tamnija od bjeljike i nalazi se bliže središtu debla. Srž sadrži ekstraktive, šećer, ulja i ostale tvari. U središtu debla nalazi se srčika, koja je najraniji i vrlo osjetljivi dio debla. Zaštićena je od utjecaja vjetra, insekata i ostalih vanjskih utjecaja. [6]

2.2.1. Godovi

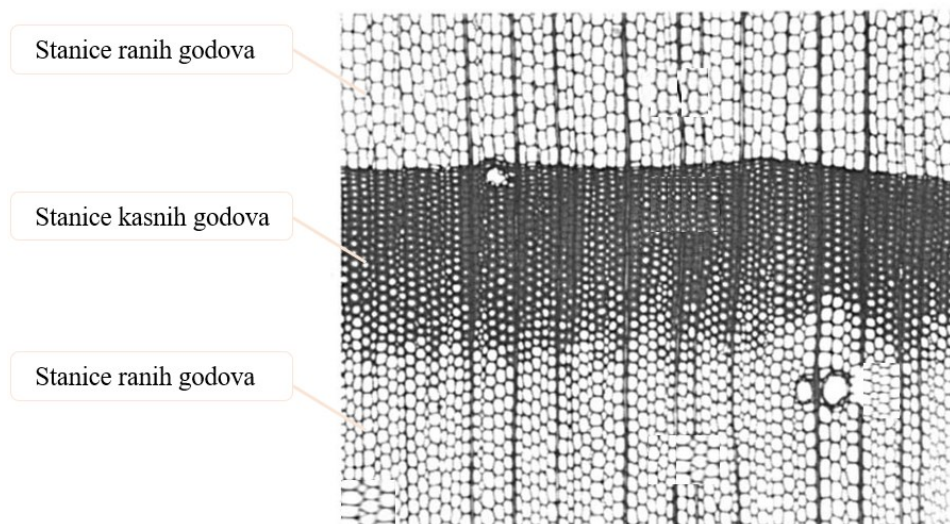
Primarni rast drva je rast u visinu, a sekundarni rast je rast u debljinu. Sekundarni rast potaknut je djelovanjem kambija. U umjerenim podnebljima, proizvodnja drvnih stanica događa se samo tijekom jednog dijela godine i to se naziva diskontinuiranim djelovanjem kambija [4]. Drvne vrste u tim područjima svake godine narastu u debljinu za jedan god. Zbog toga se god može definirati kao godišnji prirast debla. U tropskim i suptropskim područjima temperaturne promjene nisu uobičajene te kambij nema pravo sezonsko vrijeme mirovanja. U tim područjima rast drva i proizvodnja novih stanica ovise o promjenama lokalne klime, a osobito o količini dostupne vlage. Kako je djelovanje kambija uglavnom kontinuirano, kontinuiran je i sekundarni rast drva pa nije jednostavno uočiti pojedine godove koji ondje nemaju isto značenje kao godovi kod vrsta koje rastu u umjerenom pojasu.

Drvne stanice koje nastaju u rano proljeće i formiraju rani dio goda imaju veće lumene i tanju staničnu stijenku nego stanice koje nastaju kasnije. Stanice u ranom dijelu goda trebaju provesti veću količinu vlage jer u to vrijeme stablo intenzivno raste i treba puno vlage.

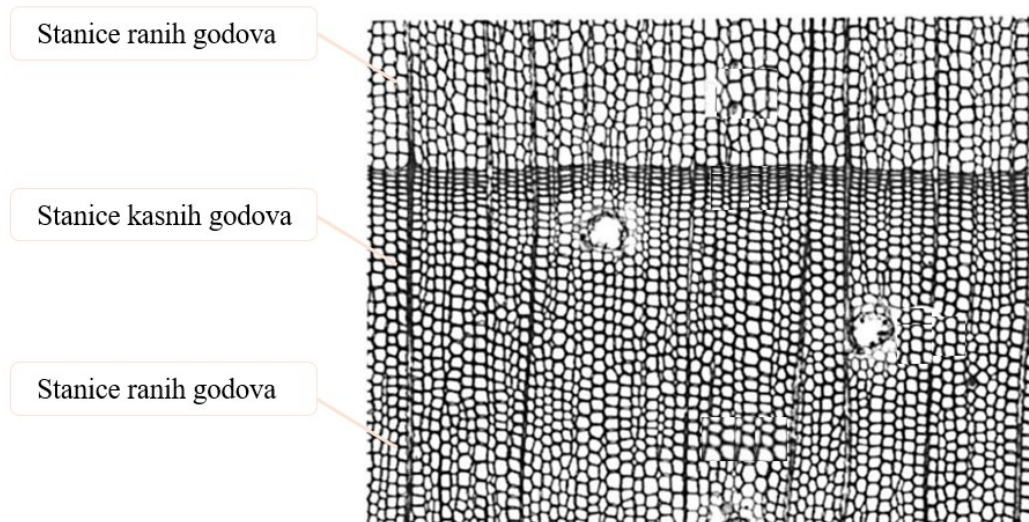
Na širinu i oblik godova utječu mnogi faktori: vrsta drva, starost drva, uvjeti rasta, utjecaj okoline, itd. Razlika u veličini radijusa lumena i debljini staničnih stijenki omogućuje razlučivost između ranog i kasnog goda. U ranom dijelu goda četinjače imaju tanke stanične stijenke i širok radijus lumena, a u ljeto se njihova debljina povećava naglo ili postupno, ovisno o vrsti. Istovremeno smanjuje se radijus lumena. Zbog toga je gustoća u kasnom dijelu goda veća, nego u ranom dijelu goda. Za većinu listača, prijelaz između stanica ranog i kasnog dijela goda može biti vrlo uočljiv, najčešće se razlikuju po promjenama u promjeru traheja, a koje variraju od suptilnih do vrlo jasnih. Općenito, drvene vrste mogu se podijeliti u tri skupine prema načinu na koji rani dio goda prelazi u kasni dio goda:

1. vrste s naglim prijelazom između ranog i kasnog dijela goda (prstenasto porozne)
2. vrste s postupnim prijelazom između ranog i kasnog dijela goda (poluprstenasto porozne)
3. vrste kod kojih nema razlike između ranog i kasnog dijela goda (difuzno porozne) [5].

Na slici 2.4. prikazana je četinjača s naglim prijelazom između stanica ranog i kasnog dijela goda, a na slici 2.5. prikazan je postupni prijelaz između stanica.



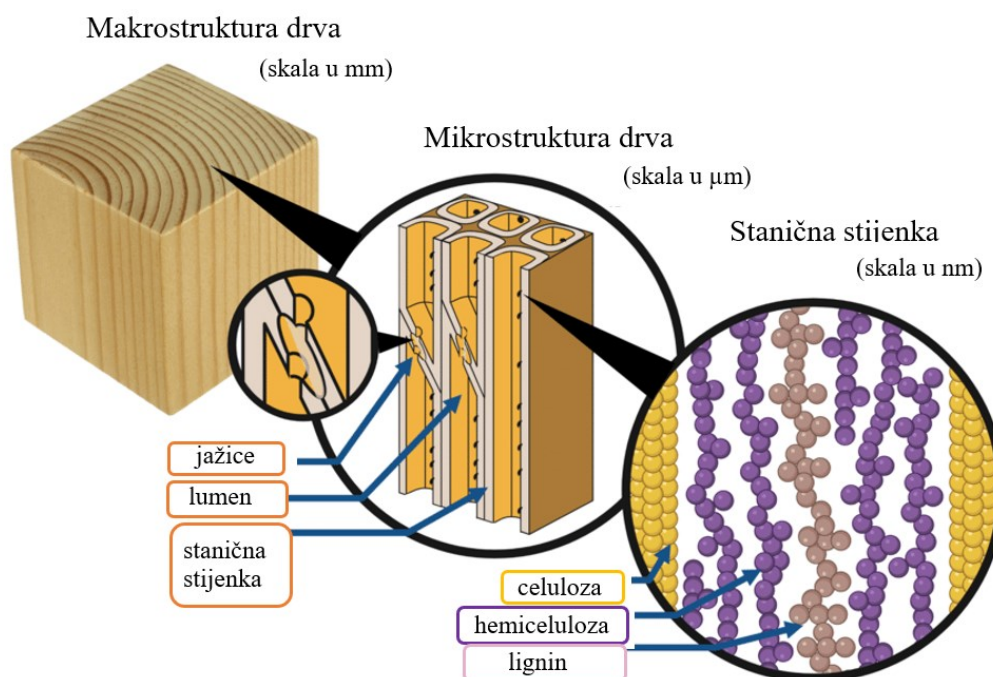
Slika 2.4. Nagli prijelaz iz ranog dijela goda u kasni na poprečnom presjeku drva ariša [5]



Slika 2.5. Postupni prijelaz iz ranog dijela goda u kasni na poprečnom presjeku drva bijelog bora [5]

2.3. Osnovne značajke makrostrukture drva

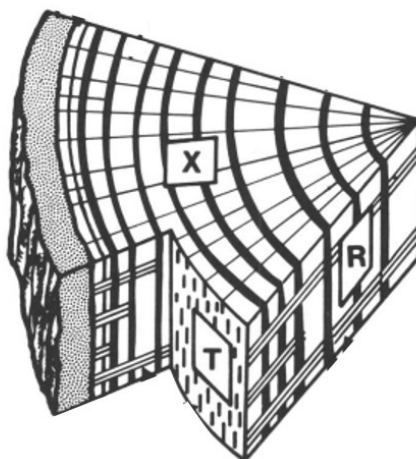
U ovom poglavlju razmotrit će se makrostruktura drva, koja je važna za daljnje razumijevanje utjecaja presjeka, uz ostale čimbenike, na abrazijsku otpornost. Na slici 2.6. vidi se pojednostavljeni prikaz strukture drva na različitim mjernim područjima, pri čemu se makrostruktura razmatra na milimetarskoj skali [7].



Slika 2.6. Pojednostavljen prikaz strukture drva u različitim mjernim područjima [7]

2.4. Karakteristični presjeci drva

S obzirom na usmjerenost građe drva, mikrostruktura se promatra i svojstva drva se određuju u tri karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjek. Navedena tri presjeka prikazana su na slici 2.7. Poprečni presjek je okomit na uzdužnu os debla i na drvena vlakna. Na poprečnom presjeku analiziraju se karakteristike drva od srčike do vanjske kore. Radijalni presjek je presjek debla njegovim radijusom, a služi za promatranje karakteristika drva od srčike do vanjske kore te analizu uzdužnog usmjerenja. Tangencijalni presjek je u ravnini okomitoj na radijalni presjek [4].



Slika 2.7. Tri karakteristična presjeka drva: X-poprečni presjek, R-radijalni presjek, T-tangencijalni presjek [5]

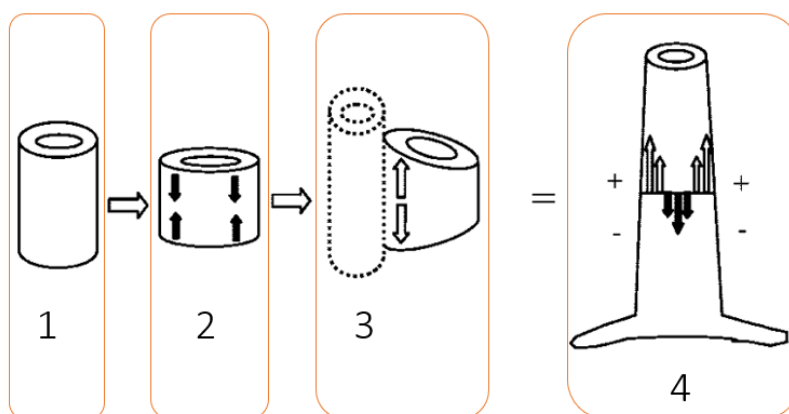
3. MIKROSTRUKTURA DRVA

3.1. Drvne stanice

Osnovna jedinica drvne građe je drvna stanica. Drvne stanice nastaju iz vaskularnog kambija, a to je vrlo složeni i kompleksni proces. Kambij je odgovoran za sekundarni rast izdanaka i korijena, kontinuirano proizvodi funkcionalne stanice ksilema i floema. Djelovanjem kambija nadograđuju se sustavi aksijalnih i radijalnih stanica. Identitet kambijskih stanica više je povezan s položajem nego li s identitetom stanične vrste. Na početku diferencijacije, mlade stanice ksilema se izdužuju, a pri čemu se ne povećava njihova širina. U toj početnoj fazi imaju samo primarnu staničnu stijenkicu. Daljnim povećanjem, povećava se promjer te nastaje sekundarna stijenkica i stanice poprimaju svoje karakteristike. Sekundarna stanična stijenkica je potom lignificirana, odnosno u njoj dolazi do taloženja lignina. Lignin se potom postupno povezuje s hemicelulozom u staničnoj stijenci, stvarajući hidrofobnu okolinu. Stanice postaju krute i nepropusne. Na kraju iz stanica nestaje citoplazmatski sadržaj i ostaje samo stanična stijenkica [8]. Nastala praznina omeđena staničnom stijenkicom naziva se lumen, a ima važnu ulogu kod upijanja vlage, pri modificiranju drvne građe i formiranju drvnih kompozita [4].

Na slici 3.1. prikazana su naprezanja koja nastaju u novorazvijenoj drvnoj stanici:

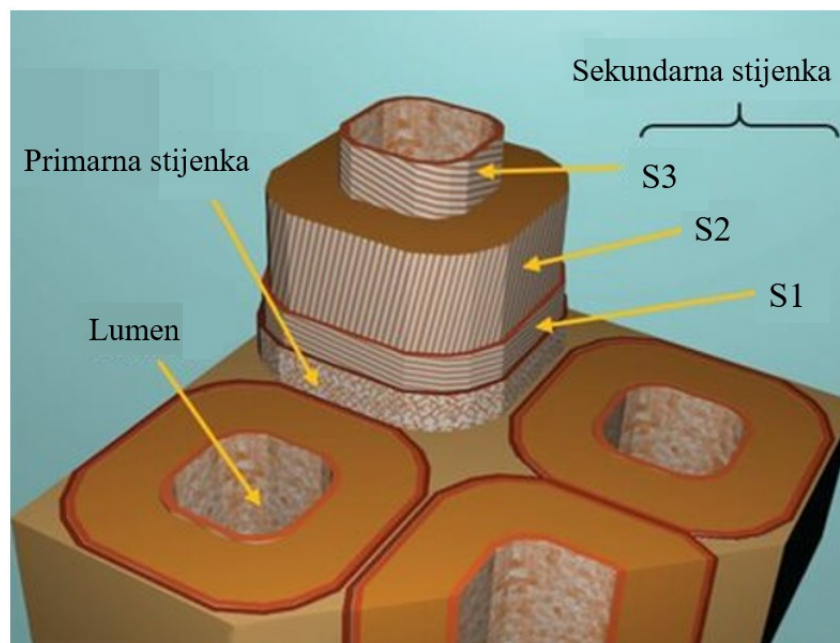
1. početak diferencijacije
2. taloženje lignina i celuloze – dolazi do lateralnog rastezanja i uzdužnog skupljanja
3. drvna stanica koja se formira pričvršćena je na starije drvo pa se ne može slobodno deformirati, što stvara mehaničko naprezanje u staničnoj stijenci
4. nastala vlačna naprezanja stvaraju napetosti u drvu, a rastom kroz godine svaki novi sloj će stvarati tangencijalnu silu na prethodne slojeve i time ih komprimirati [9].



Slika 3.1. Naprezanja pri rastu drvnih stanica [9]

3.2. Struktura stanične stijenke

Stanična stijenka drvene stanice je čvrsta, ali propusna. Sastoji se od: središnje lamele, primarne stijenke, višeslojne sekundarne stijenke i otvorenih lumenskih prostora, kao što je prikazano na slici 3.2. [10].

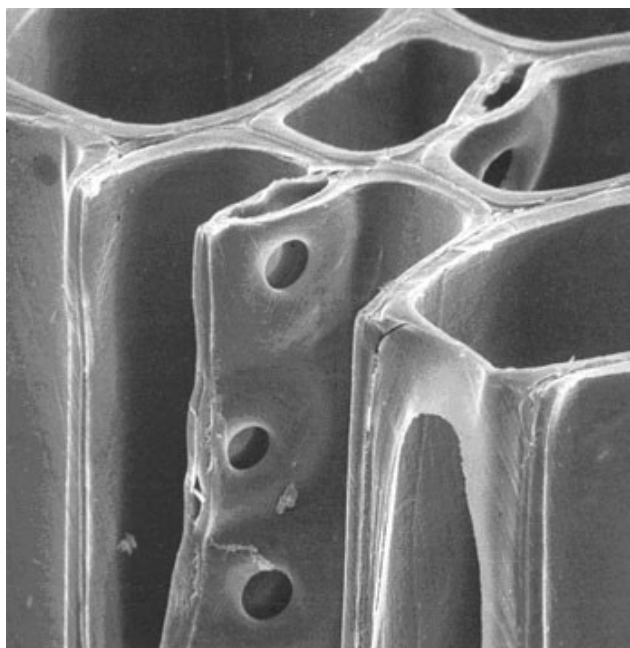


Slika 3.2. Slojevi stanične stijenke [11]

Debljina stanične stijenke ovisi o vrsti drva. Središnja lamela prijanja na primarne stijenke susjednih stanica čineći cjelinu, a sastoji se od peptidnih spojeva. Stabilnost stanične stijenke ovisi o udjelu lignina. Primarna stanična stijenka je relativno tanka, njezina debljina iznosi od 0,1 do 0,2 μm . Odlikuje se visokom izdržljivošću na vlačna naprezanja koja nastaju pri upijanju vode i povećanju stanice. Slojevi sekundarne stijenke (S1, S2, S3) formiraju se nakon primarne stijenke, a sastoje se od visoko uređenih mikrovlakna celuloze. Debljina sloja S1 varira između 0,1 i 0,3 μm , a debljina sloja S2 između 1 i 5 μm . Debljina najtanjeg sloja S3 iznosi oko 0,1 μm . Orijentacija mikrovlakna celuloze u slojevima S1, S2 i S3 dosta se razlikuje. Mikrovlakna celuloze u sloju S1 imaju poprečnu orijentaciju, u odnosu na središnju os stanice raspoređena su pod kutovima od 50° do 70°. U sloju S2 mikrovlakna su usmjerena pod kutovima od 10° do 30°. U sloju S3 celulozna mikrovlakna nalaze se pod kutovima od 60° do 90° u odnosu na središnju os stanice. Sloj S2 pruža drvu visoku žilavost, a odgovoran je i za čvrstoću drva budući da podnosi najveći udio aksijalnog opterećenja.

3.2.1. Jažice (pitovi)

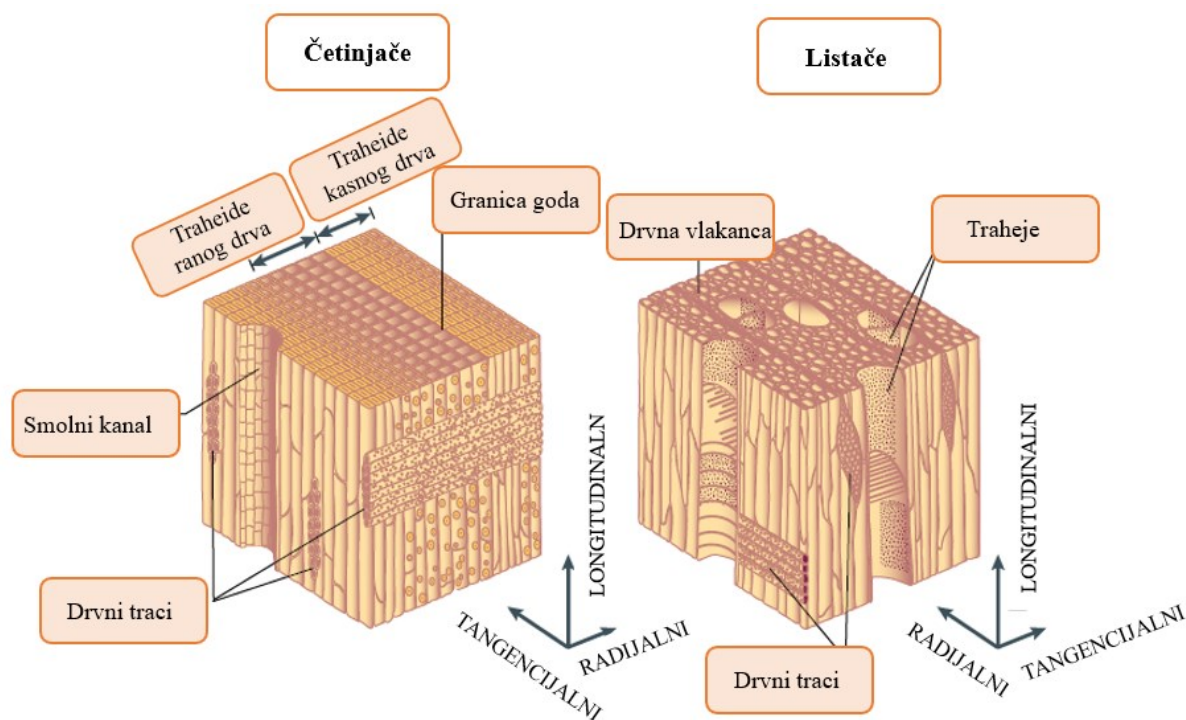
U staničnim stijenkama nalaze se otvori malih dimenzija koji omogućuju transport tvari između stanica, a nazivaju se jažicama. Na slici 3.3. prikazana je fotografija jažica u staničnoj stijenci četinjača, snimljene na elektronskom mikroskopu. Jažice se mogu razlikovati po: tipu, broju, dimenzijama [4].



Slika 3.3. Jažice u staničnoj stijenci [12]

3.3. Podjela drva – meko (četinjače) i tvrdo (listače) drvo

Sve vrste drva pripadaju jednoj od dviju osnovnih skupina - četinjačama ili listačama. Četinjače koje se još zovu i meko drvo imaju relativno jednostavnu građu i uglavnom se sastoje od istog tipa stanica koje nazivamo traheide. Osim traheida u drvnom tkivu četinjača nalaze se i parenhimske stanice. Listače ili tvrdo drvo imaju složeniju mikrostrukturu, koja se sastoji od traheja (pora), drvnih vlaknaca i parenhimskih stanica. Neke vrste tvrdog drva sadrže i traheide. Radijalne stanične strukture, okomite na godove, nazivaju se drvni traci. Njihova osnovna funkcija je provođenje vode, hranjivih i drugih organskih tvari od srčike prema kori i obrnuto. Na slici 3.4. shematski je prikazana mikrostruktura četinjača i listača [1].



Slika 3.4. Mikrostruktura četinjača i listača [1]

3.4. Mikrostruktura četinjača

U svijetu ima manji broj četinjača u odnosu na listače. Mikrostruktura četinjača je jednostavnija nego mikrostruktura listača te ih je teško identificirati makroskopskim promatranjem. Najveća razlika četinjača i listača je u prisustvu pora; četinjače nemaju pore [13].

3.4.1. Traheide

Mikrostruktura četinjača sastoji se uglavnom od traheida, dugih, tankih stanica koje su usmjerene paralelno s osi debla. Traheide četinjačama omogućavaju protok vode s mineralnim tvarima od korijena prema gore, a o njima ovise čvrstoća i mehanička otpornost debla. Njihov promjer varira ovisno o vrsti drva i utječe na teksturu drva – veći promjer daje grublju teksturu. U tablici 3.1. navedena je hrapavost površine i finoća teksture površine u ovisnosti o relativnoj veličini promjera traheida [13].

Tablica 3.1. Tekstura i hrapavost površine drva u ovisnosti o promjeru traheida [13]

RELATIVNA VELIČINA PROMJERA TRAHEIDA	HRAPAVOST (μm)	TEKSTURA
Vrlo mali	< 25	Vrlo fina
Mali	25 – 35	Fina
Srednji	35 – 50	Srednje fina
Velik	50 – 60	Gruba
Vrlo velik	> 60	Vrlo gruba

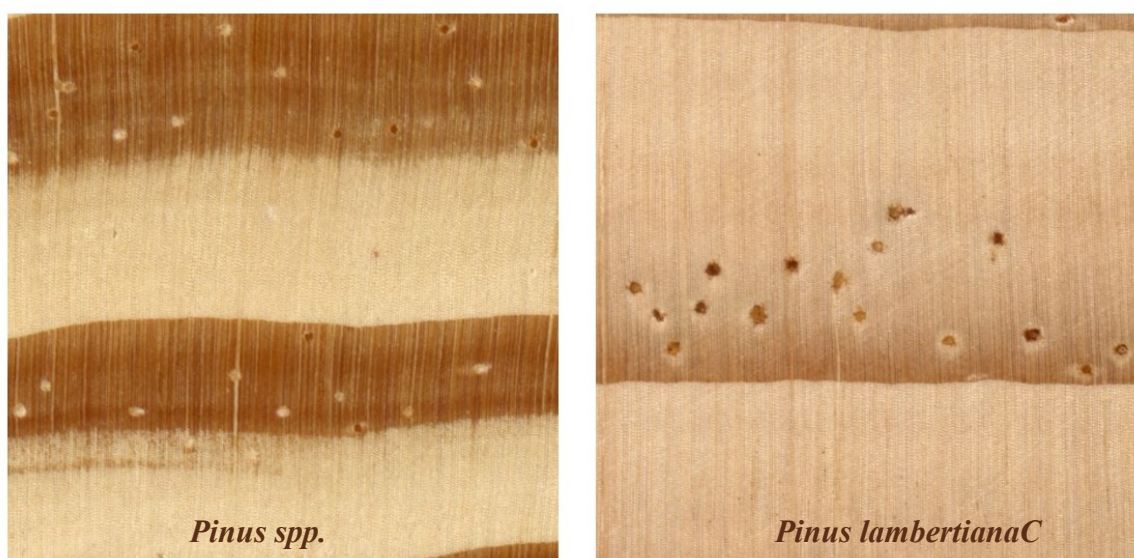
Na slici 3.5. prikazan su mikrostrukture triju vrsta drva u poprečnom presjeku s različitom veličinom promjera traheida. Na slici lijevo vidi se mikrostruktura čempresa s relativno velikim promjerom traheida, koje se mogu razlučiti pri povećanju od 10 \times . Ovako krupne traheide daju grubu teksturu površine. Mikrostruktura jela sa srednje velikim promjerom traheida i srednje finom teksturom površine prikazana je u sredini, a na slici desno vidi se najfinija tekstura površine vrste cedar s traheidama vrlo malog promjera koje se ne mogu razlučiti pri povećanju od 10 \times [13].

**Slika 3.5. Gruba, srednje fina i fina tekstura četinjača [13]**

3.4.2. Prijelaz između ranih i kasnih dijelova goda

Rano drvo brže raste, a kasno drvo ima veću gustoću jer raste sporije. U ranom dijelu goda drvene stanice imaju veći lumen i tanju stijenku od traheida u kasnom dijelu goda. Osim što se

može promatrati veličina lumena i debljina stanične stijenke, pri identificiranju vrste drva promatra se i način na koji rani dio goda prelazi u kasni. Prijelaz može biti opisan kao vrlo postupan, vrlo nagli ili nešto između navedenog. Ovaj vizualni način identificiranja je subjektivan, ali zabilježena opažanja mogu pomoći za usmjeravanje. Na slici 3.6. prikazana je razlika između naglog (*Pinus spp*) i postupnog (*Pinus lambertiana*) prijelaza s ranog na kasno drvo [13].

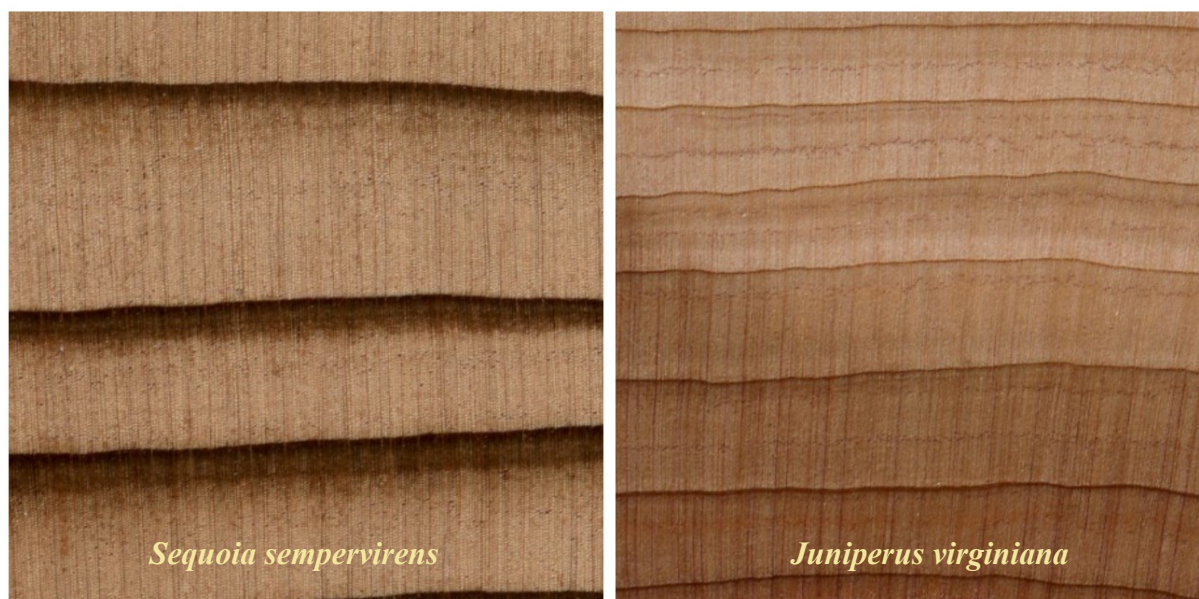


Slika 3.6. Nagli (lijevo) i postupni (desno) prijelaz s ranog drva kasno [13]

Pri ovom vizualnom principu identificiranja treba uzeti u obzir i stopu rasta; drvo s većom stopom rasta imat će veću zonu ranog drva, dok će drvo s manjom stopom rasta imati veću zonu kasnog drva, a što rezultira prividnim dojmom da postoji postupni, odnosno nagli prijelaz [13].

3.4.3. Parenhimske stanice

Parenhimske stanice protežu se duž duljine debla, zbog čega se nazivaju još i uzdužni ili aksijalni parenhim. Budući da većinu stanice četinjača čine traheide, parenhimske stanice su vrlo rijetke. Kod četinjača razmatranjem parenhima uočavaju se dva osnovna tipa; prvi tip je kad je parenhim raspršen po staničnoj strukturi bez redosljeda (difuzni parenhim) i drugi tip je kada postoji raspored u obliku prstena ili linije, a koji je paralelan s godovima (zonatni parenhim). Na slici 3.7. prikazan je difuzni parenhim, odnosno zonatni parenhim [13].



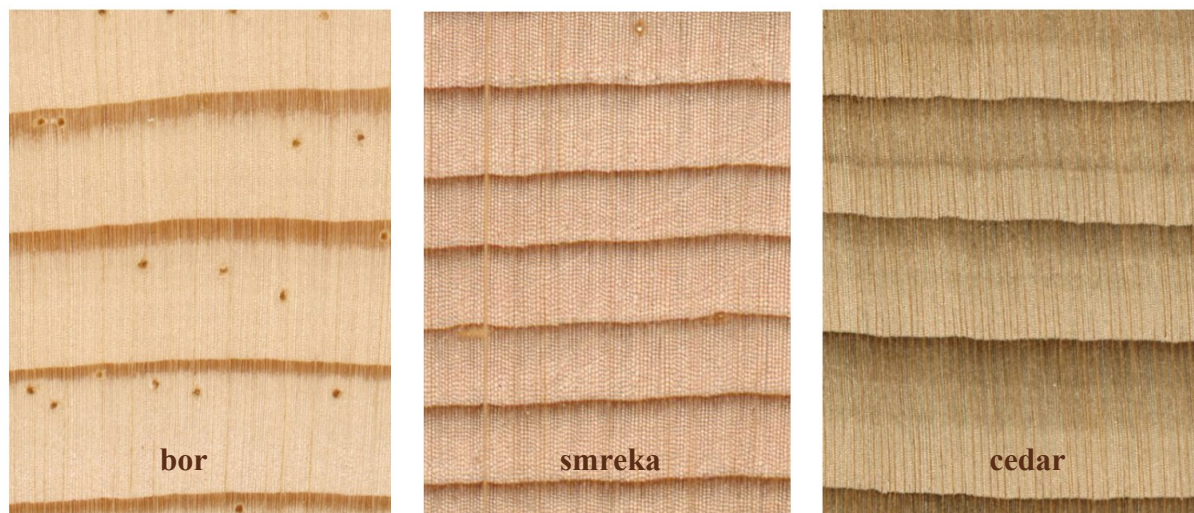
Slika 3.7. Raspored parenhimskih stanica: difuzni (lijevo) i zonatni (desno) [13]

3.4.4. Smolni kanali

Smolne kanale posjeduju samo četinjače. Smolni kanali su otvori koji su omeđeni parenhimskim stanicama, koje izlučuju smolu. Funkcija ovih kanala je zaštita drva, odnosno izlučena smola štiti oštećeno područje drva. S obzirom na brojnost i raspored prisutnih smolnih kanala, četinjače se mogu podijeliti u tri primarne skupine, navedene u tablici 3.2. Na slici 3.8. može se vidjeti poprečni presjek po jednog predstavnika iz svake skupine [13].

Tablica 3.2. Tri primarne skupine drva s obzirom na smolne kanale [13]

BROJ SKUPINE	OPIS IZGLEDA KANALA	PRIMJER DRVA
1	veliki, brojni, ravnomjerno raspoređeni	borovi
2	mali, rijetki, sporadično razmaknuti, tangencijalno grupirani	duglazija, smreka, ariš
3	bez kanala	jela, borovice, čuga, tisa



Slika 3.8. Smolni kanali različitih vrsta drva: bor (ravnomjerni raspored), smreka (sporadični raspored), cedar (bez kanala) [13]

3.4.5. Drvni traci

Drvni traci četinjača su obično širine jedna do dvije stanice [13]. Oni su građeni od parenhimskih stanica. Osnovna zadaća drvnih traka je sinteza, skladištenje i lateralni transport biokemijskih tvari i vode.

3.5. Mikrostruktura listača

Mikrostruktura listača je izuzetno složena, a njihova analiza je zahtjevnija od analize četinjača. Uzdužni (aksijalni) sustav kod listača se sastoji od vlaknaca, traheja, traheida i parenhimskih stanica. Radijalni sustav građen je od parenhimskih stanica koje su grupirane u drvene trake [14].

3.5.1. Drvna vlakanca

Drvna vlakanca imaju staničnu stijenku puno veće debljine od lumena. Vlakanca su kraća od traheida i dvostruko tanja. Duljina im se kreće između 200 i 1200 μm . Osnovna uloga drvnih vlaknaca je mehanička potpora.

3.5.2. Traheje

Traheje su najveće stanice u drvu, a često ih se naziva porama. Traheje kod listača su puno veće od traheida kod četinjača. Služe za prijenos tvari od korijena drva prema vrhu. Za razliku od drugih stanica listača, traheje se zbog svoje veličine mogu uočiti individualno, a često i bez

povećanja. Listače se prema rasporedu traheja mogu podijeliti u tri glavne skupine, a takva podjela se može nazivati i podjelom prema poroznosti. Tako se razlikuju: prstenasto porozne, difuzno porozne i semi-prstenasto porozne listače. Na slici 3.9. prikazan je po jedan predstavnik za svaku vrstu poroznosti drva [14].



Slika 3.9. Prstenasto porozna (lijevo), difuzno porozna (sredina) i semi-prstenasto porozna vrsta (desno) [14]

3.5.3. Parenhimske stanice

Postoji nekoliko različitih vrsta parenhimskih stanica, a najčešća prisutan je uzdužni ili aksijalni parenhim, orijentiran paralelno s uzdužnom osi debla. Parenhimne stanice mogu se pojaviti kao pojedinačne raspršene stanice ili u obliku difuznih nakupina u širokom rasponu uzoraka [14].

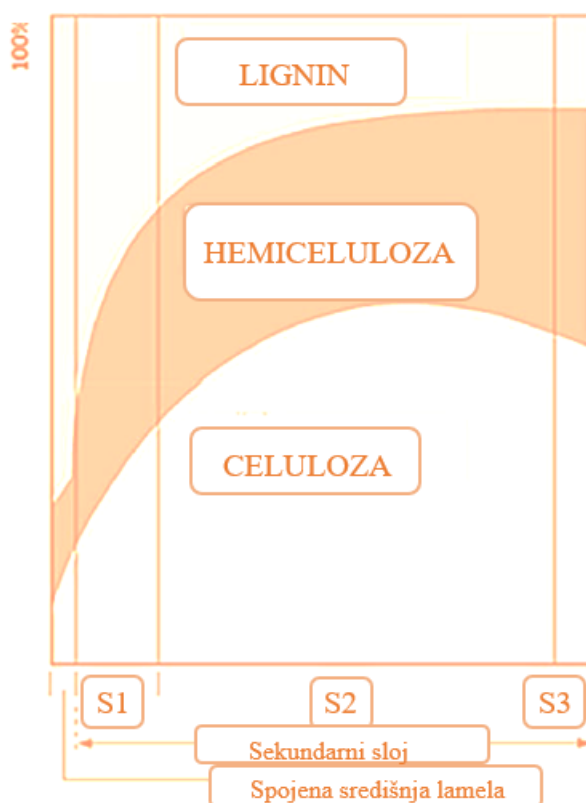
3.5.4. Drvni traci

Okomito na vlakna nalaze se drveni traci s funkcijom provođenja hranjivih tvari između kambija, bjeljike i srčevine. Pri identifikaciji može se mjeriti razmak između drvnih traka, ali treba uzeti u obzir da neke vrste drva imaju različite veličine drvnih traka [13].

4. KEMIJSKI SASTAV STANIČNE STIJENKE

4.1. Molekularna struktura drva

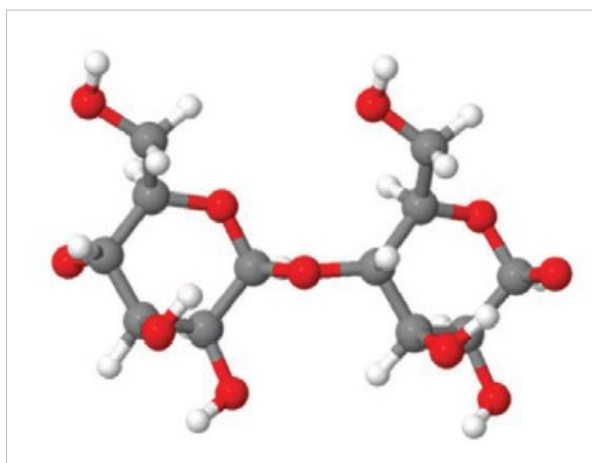
Drvo je kompozit biopolimera celuloze, hemiceluloze i lignina, uz prisutnost drugih neorganskih tvari. Celuloza čini oko 40 % mase drva, hemiceluloza od 15 do 35 % i lignin od 20 do 30 % mase drva. U prvim i drugim slojevima stijenke, celuloza je okvirni materijal, čiji mikrofibrili su raspoređeni unutar matrice od hemiceluloze i lignina. Kemijski sastav drva na elementarnoj razini sastoji se od ugljika, čiji udio iznosi oko 50 %, vodika približnog udjela 6 % te kisika od oko 44 %. Osnovne karakteristike drva i svojstva stanice povezane su s orijentacijom mikrovlakna celuloze. Orijehtacija se razlikuje kod mladog i zrelog drva, pri čemu mlado drvo pokazuje manje vrijednosti čvrstoće, krutosti i dimenzijske stabilnosti. Na slici 4.1. je prikazan udio biopolimera (celuloze, hemiceluloze i lignina) u staničnim stijenjkama te njihov raspored. Udio celuloze i hemiceluloze povećava se prema sekundarnom sloju, dok se udio lignina smanjuje [10].



Slika 4.1. Udio biopolimera u staničnim stijenjkama drva [10]

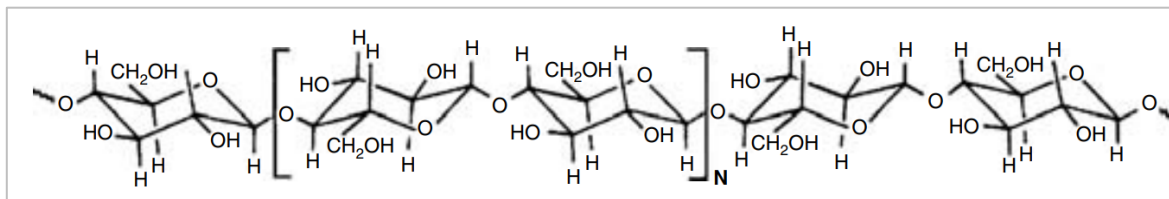
4.1.1. Celuloza

Celuloza je najzastupljenija organska tvar na Zemlji. Ovaj složeni polisaharid sastavljen je od linearno povezanih jedinica glukoze. Broj jedinica glukoze u molekuli celuloze naziva se stupanj polimerizacije, a njegova vrijednost se može kretati do 15000, a najčešće je između 9000 i 10000 glukoznih jedinica. Duljina takvih lanaca može biti do oko 5 μm [15]. Mikrofibrili celuloze omeđuju stanične stijenke unutar hemiceluloze, a obloženi su ligninom. Celuloza daje staničnoj stijenci visoku čvrstoću. Više lanaca β -d-glukoze povezuju se vodikovim vezama i van der Waalsovima silama formirajući mikrofibrile od kristalne i amorfne građe. Anhidroglukozna jedinica sastoji se od dvije molekule glukoze, a prikazana je na slici 4.2.

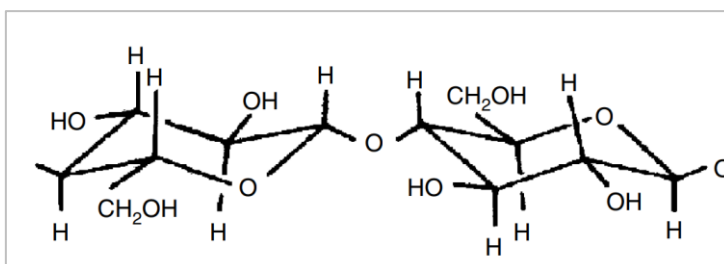


Slika 4.2. Molekularna struktura celuloze [10]

Djelomična struktura celuloze dana je na slici 4.3. Molekule celuloze su nasumično orijentirane, a povezivanjem vodikovim vezama gustoća se povećava te se stvaraju kristalno uređena područja. Celuloza dobivena iz drva može sadržavati 65 % kristalno uređene građe, a preostali dio poprima amorfnu strukturu. Općenito, u drvu se mogu razlikovati kristalna i amorfna celuloza te dostupna i nedostupna celuloza. Pod pojmom dostupna, odnosno nedostupna podrazumijeva se na dostupnost celuloze vodi, mikroorganizmima i slično. Većina amorfne celuloze je dostupna, ali dio može biti prekriven hemicelulozom i ligninom te postaje nedostupan. Pojmovi nedostupan i dostupan su od izrazite važnosti pri analizi sorpcije vlage, kemijskoj modifikaciji, interakciji s mikroorganizmima, i slično [15]. Više povezanih anhidroglukoznih jedinica sačinjava celobiozu (građevni blok), ponavljajuću kemijsku jedinicu celuloznog polimera, a čija je kemijska struktura prikazana na slici 4.4. [10].



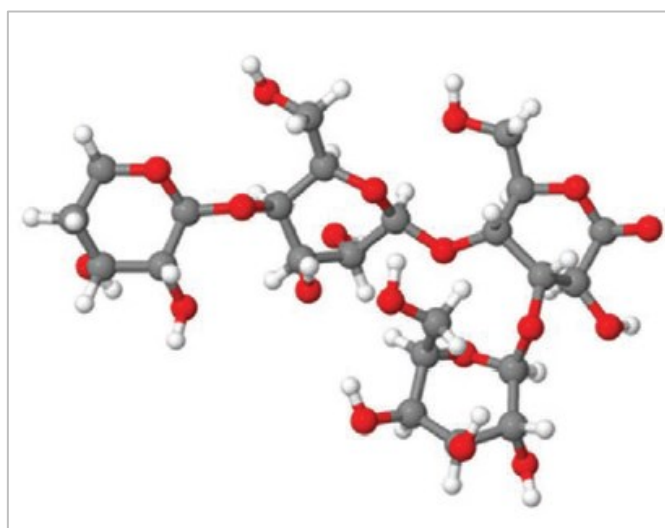
Slika 4.3. Djelomična struktura celuloze [15]



Slika 4.4. Kemijska struktura celebioze [15]

4.1.2. Hemiceluloza

Heteropolisaharid hemiceluloza ujedinjuje šećerne jedinice. Hemiceluloza je amorfne i razgranate strukture, prikazane na slici 4.5. Ovaj heteropolisaharid povezuje celulozu i lignin te ima funkciju prijenosa vode kroz staničnu stijenku, čime staničnoj stijenci pruža mehaničku potporu i fleksibilnost [10].



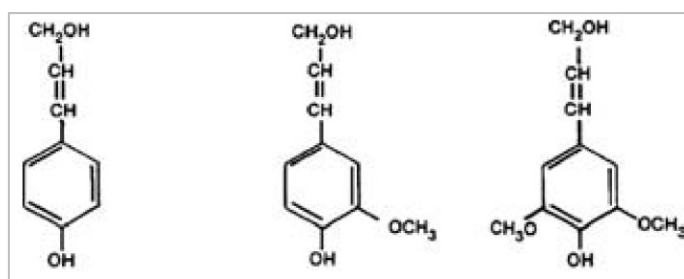
Slika 4.5. Molekularna struktura hemiceluloze [10]

4.1.2.1. Holoceluloza

Kombinacija celuloze i hemiceluloze uz manje količine drugih polimera, poput šećera (škrob), je glavni ugljikohidrat u drvu, a naziva se holoceluloza. Holoceluloza čini od 65 do 70 % mase suhog drva. Ovi polimeri se sastoje od jednostavnih šećera. Osim toga, bogati su hidroksilnim skupinama koje su odgovorne za sorpciju vlage kroz vodikovu vezu [15].

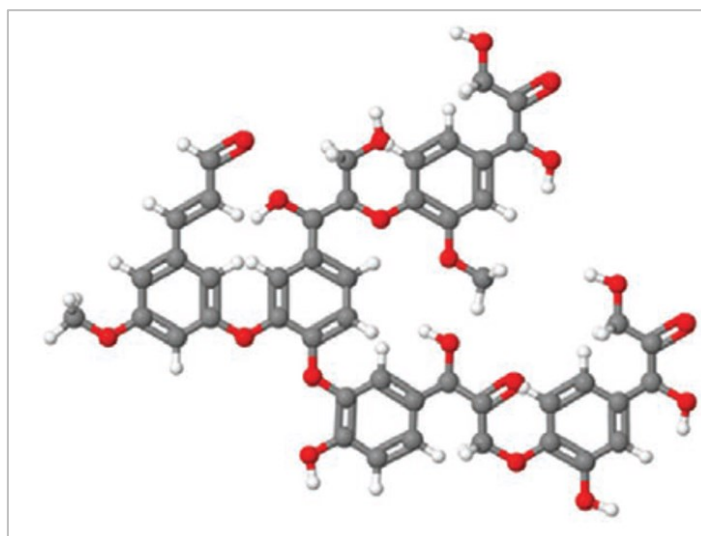
4.1.3. Lignin

Lignin je amorfni, vro složeni polimer s fenilpropanskim jedinicama, prikazanim na slici 4.6. [15].



Slika 4.6. Fenilpropanske jedinice lignina [15]

Lignin se nalazi u primarnoj i sekundarnoj stijenki, dajući im visoku krutost i čvrstoću te regulira prijenosu vode i tvari kroz staničnu stijenku. Molekularna struktura lignina dana je na slici 4.7. [10].



Slika 4.7. Molekularna struktura lignina [10]

5. SVOJSTVA DRVA

Drvo je jedno od najznačajnijih materijala u povijesti čovječanstva, a danas je također ključan resurs u građevinarstvu, raznim industrijama, šumarstvu, arhitekturi i dizajnu, umjetnosti, u proizvodnji sportske opreme, brodogradnji te mnogim drugim sektorima. Kako bi se drvo iskoristilo na optimalan način, potrebno je poznavati svojstva drva, razumjeti ista i primijeniti najbolju tehnologiju za dobivanje željenog produkta.

5.1. Gustoća drva

Neovisno o brzini rasta, gustoća drva se razlikuje ovisno o promatranoj vrsti. Drvo većeg koeficijenta brzine rasta neće uslijed te brzine imati manju gustoću. Vrijednosti gustoće mogu služiti za dobivanje volumena suhog drva, a što su važni podaci za iskorištavanje bioenergije ili proračun ravnoteže ugljika. Gustoća drva definirana se kao omjer mase drva i volumena [16]. Prosječna gustoća tikovine varira od 660 do 980 kg/m², ovisno o geografskom položaju rasta [17]. Gustoća drva je pokazatelj udjela čvrste tvari. Budući da su stanične šupljine drva u većoj ili manjoj mjeri ispunjene vodom, pri mjerenju gustoće potrebno je uzeti u obzir i sadržaj vlage u drvu. Gustoća drva utječe na čvrstoću i krutost drvnih proizvoda, a prilikom oblikovanja pulpa važan je pokazatelj prinosa vlakana po jedinici volumena drva. Ovisno o vrsti, ali i između jedinki unutar iste vrste drva, ovisi vrijednost gustoće drva [16]. U nastavku je dana formula za izračun gustoće (1):

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

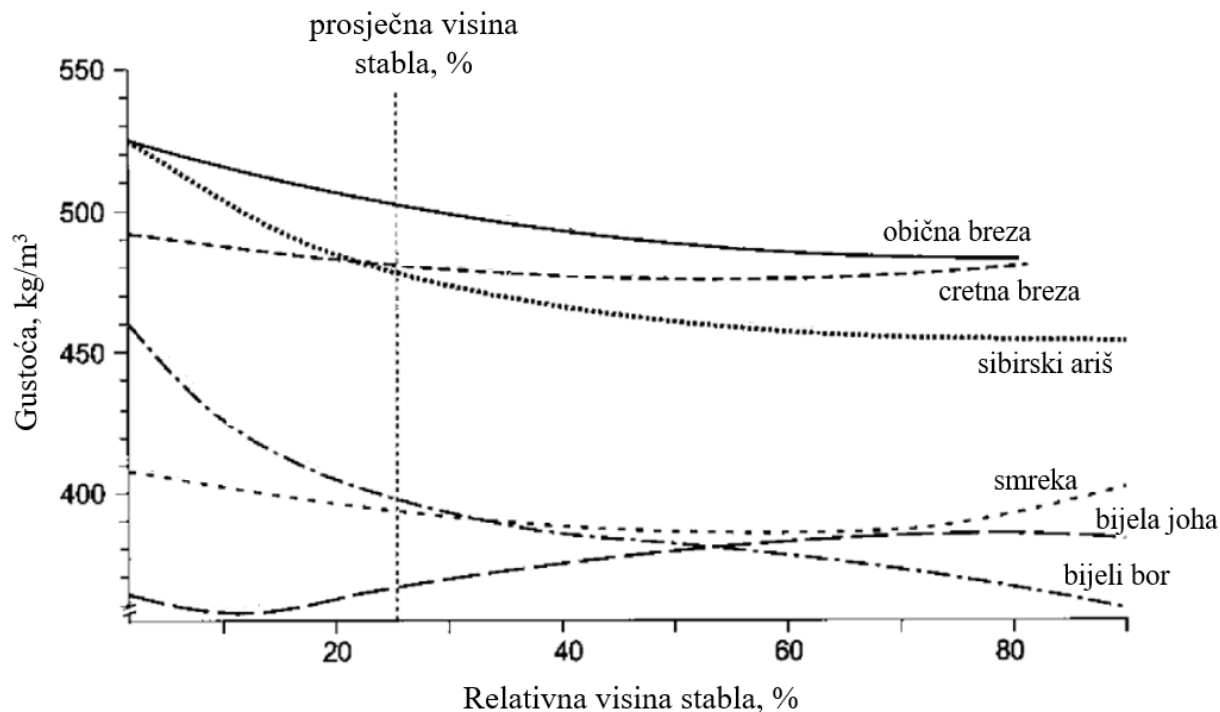
pri čemu je:

- ρ – gustoća, g/cm³
- m – masa uzorka, g
- V – volumen uzorka, cm³.

5.1.1. Gustoća stanične stijenke drva

Stanične stijenke sastoje se od prethodno opisane celuloze, hemiceluloze i lignina. Ove tri komponente zajedno određuju gustoću stanične stijenke i drvnog tkiva. Četinjače imaju više lignina nego listače. Utvrđeno je da gustoća poprima više vrijednosti onda kada je udio celuloze

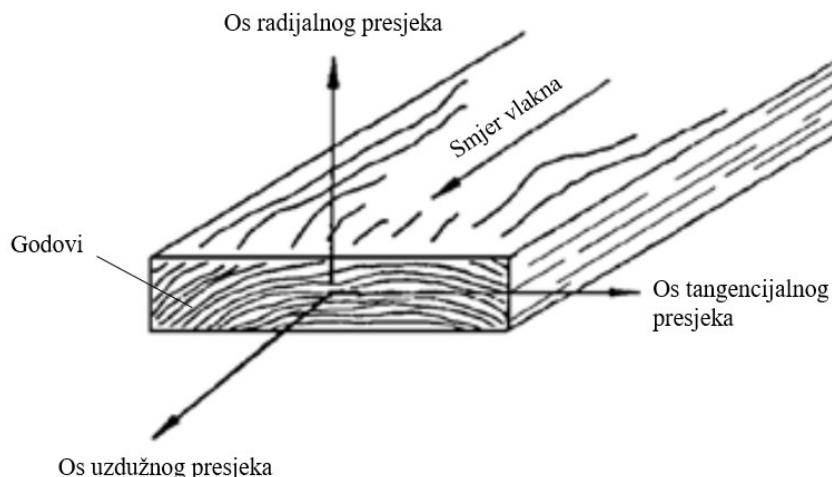
viši. Na slici 5.1. prikazan je odnos gustoća nekih vrsta četinjača i listača, od njihova podnožja do vrha drva [18].



Slika 5.1. Gustoća nekih vrsta drva u ovisnosti o visini stabla [18]

5.2. Mehanička svojstva drva

Varijabilnost u svojstvima zajednička je svim materijalima. Kako je već objašnjena ovisnost svojstava o odabranoj vrsti drva, tako i mehanička svojstva ovise o vrsti, a osim toga moguće je razmatrati ovisnost mehaničkih svojstava o tri osnovna presjeka drva - uzdužnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku. Drvo je prirodni materijal te kao takav je podložan različitim i promjenjivim utjecajima. Drvo je ortotropni materijal, mehanička svojstva drva ovise o usmjerenju, odnosno različita su u tri osnovne osi: tangencijalnoj, radijalnoj i poprečnoj. Navedene osi imaju točno određenu poziciju u odnosu na smjer godova i uzdužnu os debla, kao što je prikazano na slici 5.2. [19].



Slika 5.2. Tri osnovne osi u drvu [19]

5.2.1. Svojstva elastičnosti

Za opisivanje ponašanja drva prema svojstvima elastičnosti, potrebno je dvanaest konstanti, od kojih su devet nezavisne, a to su: tri modula elastičnosti, tri modula smicanja i šest Poissonovih omjera. Ovisnost modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta dan je u sljedećoj formuli (2): [19]

$$\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j}, i \neq j, i, j = L, R, T \quad (2)$$

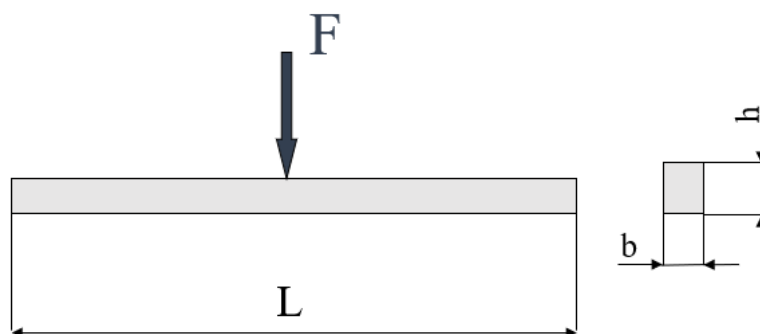
pri čemu je:

- μ – Poissonov koeficijent
- E – modul elastičnosti.

5.2.1.1. Modul elastičnosti

Svojstvo elastičnosti ima tijelo koje se nakon deformacije uzrokovane nižim naprezanjem vraća u prvobitno stanje nakon uklanjanja opterećenja. Primjenom većih opterećenja, u tijelu će se pojaviti plastična deformacija, a moguće je i lom. Omjeri elastičnosti i konstante elastičnosti variraju unutar jedne vrste te između različitih vrsta, a ovise i o sadržaju vlage i gusotoći. Modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru određen metodom savijanja najčešće se utvrđuje eksperimentalnim postupkom. Pomoću dobivenog modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru moguće je odrediti vrijednosti modula elastičnosti po radijalnom i tangencijalnom

presjeku. Najviše vrijednosti modula elastičnosti kod drvnih vrsta su u longitudinalnom smjeru. U praksi se modul elastičnosti određuje metodom u tri točke, kao što je prikazano na slici 5.3. [19].



Slika 5.3. Određivanje modula elastičnosti u praksi u tri točke

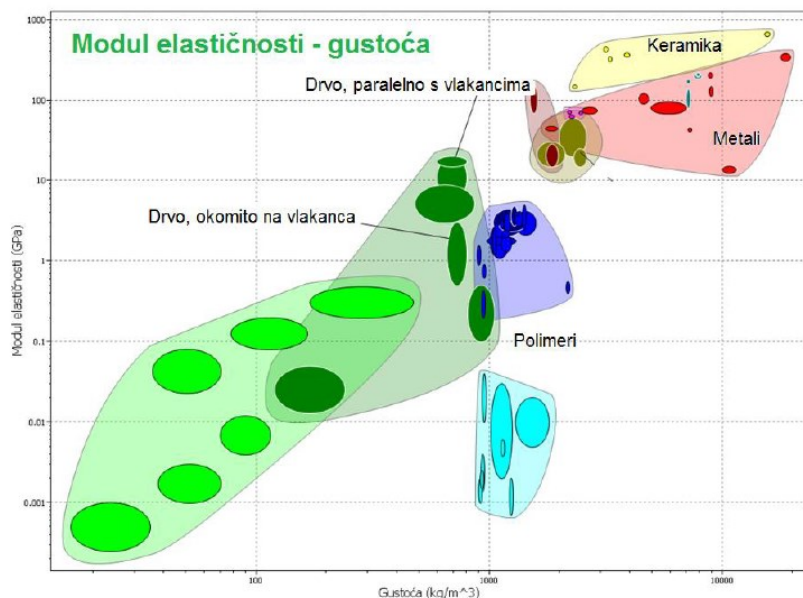
Modul elastičnosti kod savijanja računa se prema izrazu (3):

$$E = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)}, \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

pri čemu je:

- L – razmak između oslonaca, mm
- b – širina uzorka, mm
- h – visina uzorka, mm
- $(F_2 - F_1)$ - prirast sile u području gdje je ovisnost sila-progib linearna
- F_{\max} – maksimalna sila, N
- $(a_2 - a_1)$ – prirast progiba.

Specifična krutost je naziv za omjer modula elastičnosti i gustoće. Drvo karakterizira optimalan omjer tih dviju vrijednosti i kao takvo parira drugim materijalima poput keramike, metala, polimera, a što je prikazano na slici 5.4. [4].



Slika 5.4. Specifična krutost drva i nekih drugih tehničkih materijala [4]

5.2.1.2. Poissonov omjer

Poissonov omjer je omjer deformacija u dvije okomite osi. Otpeteti li se drvo aksijalno, deformacija koja je okomita na smjer aksijalnog opterećenja je proporcionalna deformaciji koja je paralelna s aksijalnim opterećenjem. Pomoću dva indeksa označava se Poissonov omjer, prvi indeks ukazuje na deformaciju koja nastaje na nekom od triju presjeka, a drugi indeks ukazuje na os opterećenja. U tablici 5.1. i tablici 5.2. dan je primjer nekih listača i četinjača s vrijednostima Poissonovog omjera [19].

Tablica 5.1. Poissonov omjer kod različitih vrsta listača [19]

Vrsta drva	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RL}	μ_{TL}
Bijeli jasen	0,371	0,440	0,684	0,360	0,059	0,051
Aspen	0,489	0,374	—	0,496	0,054	0,022
Balza	0,229	0,488	0,665	0,231	0,018	0,009
Lipa	0,364	0,406	0,912	0,346	0,034	0,022
Žuta breza	0,426	0,451	0,697	0,426	0,043	0,024
Crna trešnja	0,392	0,428	0,695	0,282	0,086	0,048
Pamuk	0,344	0,420	0,875	0,292	0,043	0,018

Vrsta drva	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RL}	μ_{TL}
Afrički mahagonij	0,297	0,641	0,604	0,264	0,033	0,032
Honduras mahagonij	0,314	0,533	0,600	0,326	0,033	0,034
Javor	0,424	0,476	0,774	0,349	0,065	0,037
Crveni javor	0,434	0,509	0,762	0,354	0,063	0,044
Crveni hrast	0,350	0,448	0,560	0,292	0,064	0,033
Bijeli hrast	0,369	0,428	0,618	0,300	0,074	0,036
Crni orah	0,495	0,632	0,718	0,367	0,052	0,036
Žuta topola	0,318	0,392	0,703	0,329	0,030	0,019

Tablica 5.2. Possinov omjer kod različitih vrsta četinjača [19]

Vrsta drva	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RL}	μ_{TL}
Čempres	0,338	0,326	0,411	0,356	—	—
Sjeverni bijeli cedar	0,337	0,340	0,458	0,345	—	—
Zapadni crveni cedar	0,378	0,296	0,484	0,403	—	—
Duglazija	0,292	0,449	0,390	0,374	0,036	0,029
Podalpska jela	0,341	0,332	0,437	0,336	—	—
Zapadni ariš	0,355	0,276	0,389	0,352	—	—
Loboda bor	0,328	0,292	0,382	0,362	—	—
Dugolisni bor	0,332	0,365	0,384	0,342	—	—
Crveni bor	0,347	0,315	0,408	0,308	—	—
Bor-šećer	0,356	0,349	0,428	0,358	—	—
Zapadni bijeli bor	0,329	0,344	0,410	0,334	—	—
Sekvoja	0,360	0,346	0,373	0,400	—	—
Sitka smreka	0,372	0,467	0,435	0,245	0,040	0,025
Engelman smreka	0,422	0,462	0,530	0,255	0,083	0,058

5.2.1.3. Modul smicanja

Modul smicanja je otpornost deformaciji koju uzrokuje posmično naprezanje. Kao i prethodni moduli, i modul smicanja se definira u tri ravnine. Modul smicanja varira u odnosu na strukturu, usmjerenost mikrostrukture, udio vlage, temperaturu, kemijski tretman te način opterećenja [19].

5.2.2. Svojstva čvrstoće

Mehanička svojstva čvrstoće koja se najčešće upotrebljavaju za opisivanje tehničkog drva su: vlačna čvrstoća, tlačna čvrstoća te smična čvrstoća.

Osim navedenih, dodatno se provode i mjerenja koja uključuju čvrstoću na savijanje te tvrdoću. Navedeno omogućuje lakšu procjenu primjenjivosti drva i usklađivanje radnih uvjeta [19].

5.2.2.1. Savojna čvrstoća

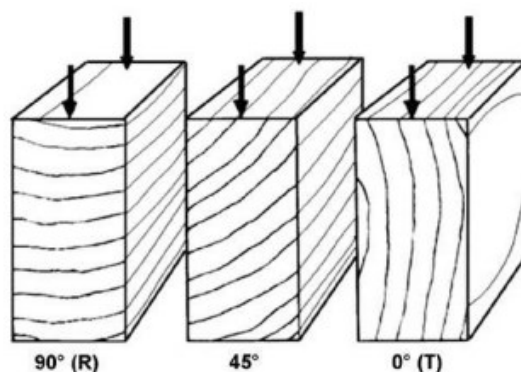
Za određivanje savojne čvrstoće razvijene su standardne metode, a najčešća je metoda savijanja u tri točke. Savojnim opterećenjem, uzorak se s gornje strane opterećuje tlačno, a s donje strane vlačno. Najviše vrijednosti savojne čvrstoće drvo postiže u longitudinalnom usmjerenju. Osim usmjerenja, općenito su važni i drugi faktori koji uzrokuju lom pri savojnom opterećenju, poput prirasta sile u jedinici vremena. Kut koji savojna sila zatvara s linijama godova može utjecati na vrijednosti savojne čvrstoće u longitudinalnom smjeru. Na slici 5.5. prikazani su kutovi koji se promatraju pri mjerenju savojne čvrstoće drva [4].

Savojna čvrstoća računa se prema sljedećem izrazu (4):

$$R_{ms} = \frac{3F_{max} \cdot L}{2b \cdot h^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

pri čemu je:

- L – razmak između oslonaca, mm
- b – širina ispitnog uzorka, mm
- h – visina ispitnog uzorka, mm
- F_{max} – maksimalna savojna sila, N.



Slika 5.5. Različiti kutovi između sila i godova [19]

5.2.2.2. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća je otpornost tijela na deformaciju pri djelovanju sila jedna nasuprot drugoj. Kod drva vrlo je važno u kojem je smjeru djelovanja tlačna čvrstoća u odnosu na vlakna. Veća tlačna čvrstoća kod drva se javlja onda kada je ona usmjerena u smjeru vlakana. Tlačna naprezanja mogu uzrokovati izvijanje drva [4].

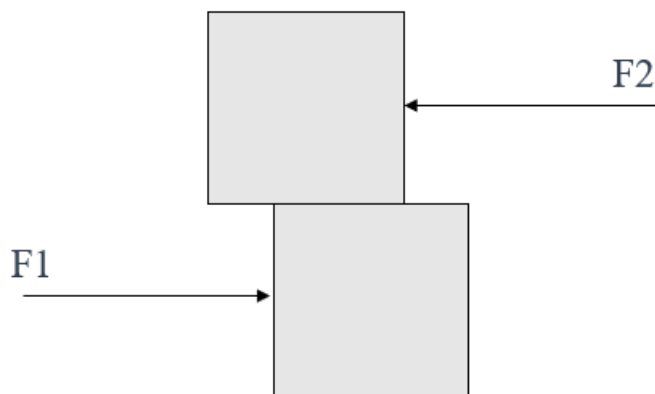
5.2.2.3. Smična čvrstoća

Smična čvrstoća je otpornost materijala na djelovanje dviju nasuprotnih sila koje nisu na istom pravcu djelovanja, prikazano na slici 5.6. Smična čvrstoća je sposobnost materijala da se odupre unutarnjem klizanju dvaju dijelova u dodiru. Smična čvrstoća računa se prema sljedećem izrazu (5) [4]:

$$R_{m\tau} = \frac{F_{max}}{b \cdot l}, \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

pri čemu je:

- b – širina smične površine, mm
- l – duljina smične površine, mm
- F_{max} – maksimalna sila, N.



Slika 5.6. Djelovanje sila pri smičnom naprezanju

5.2.2.4. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća se izračunava prema izrazu (6):

$$R_m = \frac{F_{max}}{A}, \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

pri čemu je:

- F_{max} – maksimalna sila, N
- A – dimenzije početne površine, mm^2 .

Vrijednosti vlačne čvrstoće u smjeru vlaknaca više su nego kad je smjer vlačne sile okomit na vlakanca [4].

5.2.2.5. Žilavost

Žilavost je otpornost materijala pri udarnom opterećenju. Udarno opterećenje može dovesti do potpunog loma uzorka. Žilavost se određuje na Charpyevom batu, a računa se prema izrazu (7):

$$KU(KV) = G(h_1 - h_2), \text{ J} \quad (7)$$

pri čemu je:

- G – težina bata, N

- h_1 – početna visina bata, m
- h_2 – visina bata nakon loma epruvete, m.

Najveća vrijednost žilavosti kod drva je pri udarcu u radijalnom smjeru. Uz žilavost se veže i lomna žilavost, koja se temelji na linearno-elastičnoj mehanici loma. Predstavlja se kao kritična veličina faktora intenzivnosti naprezanja, ondje gdje već je nastala pukotina, a ovaj faktor može utjecati na njeno daljnje širenje. Lomna žilavost u drvu pokazuje najmanje vrijednosti onda kada je u paralelnoj ravnini s vlaknima. Pukotina se može otvoriti na tri načina: jednostavno otvaranje, uzdužno smicanje i poprečno smicanje [4]. Mjera koja opisuje kombinaciju čvrstoće i žilavosti drva, rad pri maksimalnom opterećenju uzrokovanom savijanjem, je sposobnost amortizacije udarca s određenom trajnom deformacijom uz veća ili manja oštećenja [19].

5.2.2.6. *Tvrdoća*

Tvrdoća je otpornost na prodiranje nekog tijela u promatrano tijelo. Za eksperimentalno određivanje tvrdoće drva, najčešće se koriste Brinellova metoda i metoda po Janki. Kod obje metode za utiskivanje se koriste kuglice, a rezultati spomenutih metoda nisu međusobno usporedivi. Brinellovo ispitivanje tvrdoće odvija se prema normi EN 1534 u većini europskih zemalja, dok se metoda mjerenja tvrdoće po Janki provodi prema ASTM D. 143 u Sjedinjenim Američkim Državama i Australiji.

Tvrdoća za pojedine vrste vrlo je različita. Tvrdoća drva direktno ovisi o gustoći. U istom godu više vrijednosti tvrdoće mjere su u kasnom dijelu goda (kasnom drvu). Najveće vrijednosti tvrdoće mjere se u poprečnom presjeku, dok se vrijednosti tvrdoće između radijalnog i tangencijalnog presjeka značajno ne razlikuju.

Moguće je mjerenje nanoindentacijske tvrdoće, što se provodi na nanometarskoj skali. Pri ovom mjerenju koristi se iznimno mali utisni dio od tvrdog materijala, određenog oblika (najčešće oblik piramide), a koji se utište u površinu i dovodi do deformacije. Ova karakteristika može pojasniti razlike u strukturi stanica drva i pomoći u predviđanju ponašanja materijala nakon kemijskih tretmana.

Brinellova metoda

Tvrdoća po Brinellu mjeri se utiskivanjem metalne kuglice u površinu ispitnog tijela. Kuglica se utiskuje određenim iznosom sile, ovisno o ispitnom tijelu, u specificiranom vremenu trajanja,

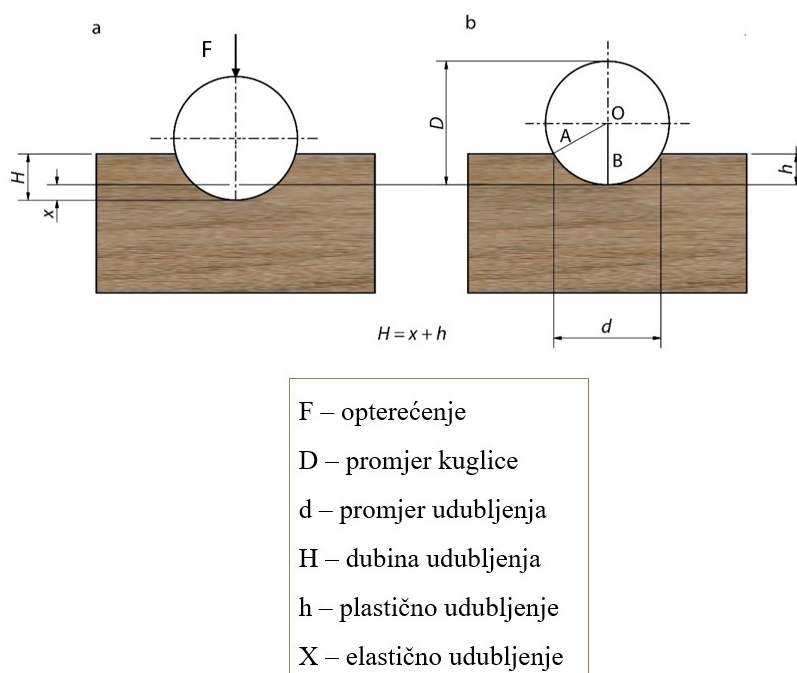
odnosno sila će se održavati do plastičnog deformiranja ispitnog tijela. Udubljenje koje nastaje na površini određuje se optičkim mjerenjem promjera tog udubljenja. Brinellova tvrdoća se potom izračunava prema sljedećoj formuli (8) [20]:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

pri čemu je:

- F – ispitna sila, N
- D – promjer kuglice, mm
- d – promjer otiska kuglice, mm.

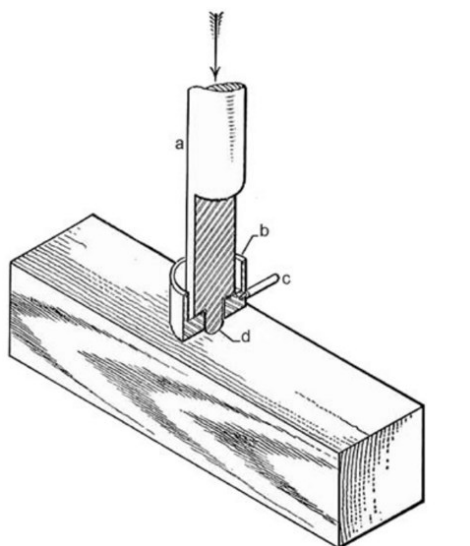
Na slici 5.7. je shematski prikaz geometrijskih odnosa pri mjerenju tvrdoće Brinellovom metodom.



Slika 5.7. Geometrijska povezanost (a) kuglica pod opterećenjem, (b) kuglica nakon opterećenja [21]

Metoda po Janki

Kod metode po Janki u materijal se utiskuje metalna kuglica promjera 11,284 mm, na uzroke veličine 50 mm × 50 mm [22]. Na slici 5.8. prikazana je oprema koja se koristi za ispitivanje tvrdoće po Janki, prema normi ASTM D 143 [23].



Slika 5.8. Ispitivanje tvrdoće prema Janki: a – osovina, b – fleksibilna obujmica, c- poluga, d – ispust indentora [23]

5.2.2.7. Puzanje

Puzanje je deformacija materijala pri konstantnom opterećenju u nekom vremenskom periodu koje se javlja uglavnom pri povišenim temperaturama. Do nepovratne deformacije uzorka doći će nakon dovoljno visokog i dovoljno dugog opterećenja [19].

5.2.2.8. Umor

Umor podrazumijeva otpornost na lom pri cikličkom opterećenju uzorka. Učestalost, broj ciklusa, maksimalno naprezanje i amplituda važni su čimbenici koji utječu na ponašanje nekog materijala pri promjenjivom opterećenju [19].

5.3. Higroskopnost

Drvo je higroskopni materijal, koji ima mogućnost apsorpiranja i desorbiranja vode u svrhu uravnoteženja s klimom. Vlažnost drva je od 0 do 95 % (ili maksimalno 98 %) relativne vlažnosti. Voda je vezana vodikovim vezama u staničnim stijenkama, a pri dovoljno visokoj vlažnosti, voda se unosi putem kapilarne kondenzacije izvan staničnih stijenki. U živom drvu voda i hranjive tvari prenose se od korijena do listova pomoću ksilema pa je sadržaj vlage u ksilemu izuzetno visok. Sadržaj vlage snažno utječe na svojstva drva poput čvrstoće, dimenzijske stabilnosti, itd. Osim sadržaja vlage, važan je i raspored vlage unutar drva [24]. Živo drvo sadrži vlagu, što pozitivno utječe na njegovu otpornost prema vanjskim naprezanjima. Kao tehnički materijal koristi se mrtvo drvo u kojem se udio vlage mijenja s obzirom na vanjske uvjete. Podjela vlage u živom drvu dana je u tablici 5.3. [4].

Tablica 5.3. Podjela vlage u živom drvu [4]

Vlaga u živom drvu:		
SLOBODNA	VEZANA	
	konstitucijska	nalazi se u staničnoj stijenci, odstranjuje se samo uz promjenu kemijskog sastava drva
	površinski vezana	vezana na OH-skupine celuloznih makromolekula, odstranjuje se fizikalno
	kapilarno kondenzirana	nalazi se u šupljinama stanične stijenke nakon djelovanja kapilarnih sila

Slobodna i vezana voda čine ukupnu vlagu. Sadržaj vlage određuje se prema sljedećem izrazu (9):

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100, \% \quad (9)$$

pri čemu je:

- w – sadržaj vlage u drvu, %
- m_1 – masa drva kod nekog sadržaja vlage, g
- m_2 – masa drva u apsolutno suhom stanju, g.

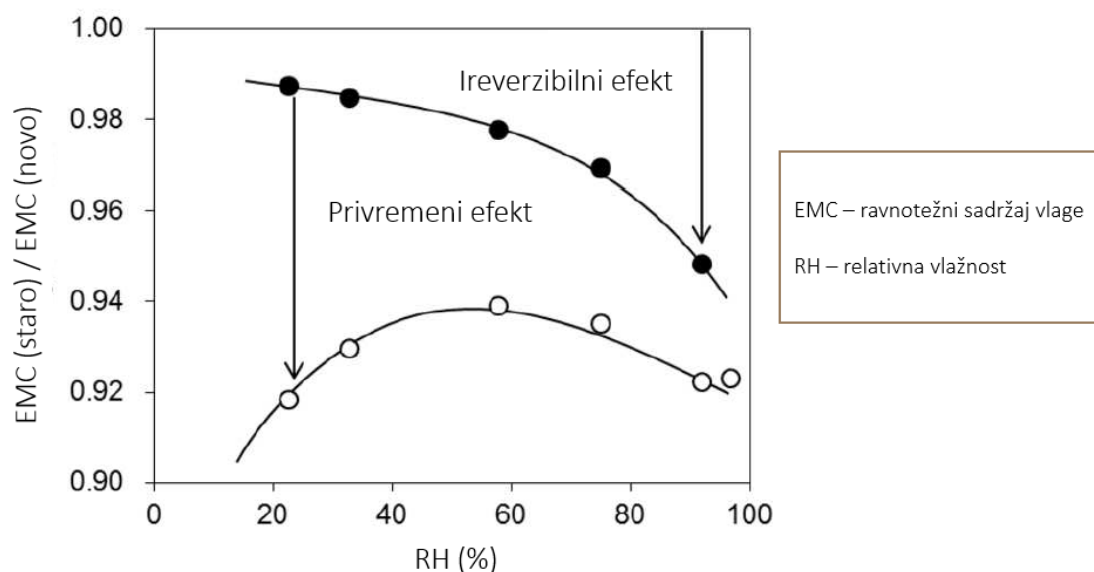
Duljim sušenjem drva u peći pri temperaturama od 103 ± 2 °C dobiva se standardno suho drvo ili drvo u apsolutno suhom stanju koje ima sadržaj vlage oko 0 % (nikada jednako 0 jer je uvijek prisutan mali udio vlage).

Drvo u vlažnoj atmosferi (vodi) apsorbira vlagu u staničnu stijenku. Zbog toga nastupa porast volumena drva, a što se još naziva bubrenjem. Nakon zasićenja stanične stijenke vezanom vodom, drvo dalje apsorbira slobodnu vodu unutar lumena pri čemu volumen ostaje konstantan. Bubrenje je reverzibilno. Reverzibilan proces, utezanje, najprije uključuje gubitak slobodne vode iz lumena, a potom dolazi do smanjenja volumena drva kako drvo gubi vodu iz stanične stijenke. Ako se radi o drvnom kompozitu, onda je bubrenje ireverzibilan proces ako je udio vlage ispod točke zasićenja. Točka zasićenja je granica slobodne i vezane vode, odnosno granica nakon koje sušenjem dolazi do promjene volumena (drvo se uteže). Utezanje je najviše izraženo u tangencijalnom, a najmanje u longitudinalnom smjeru. U točki zasićenja postoji voda samo u staničnoj stijenci [4].

5.3.1. Promjena higroskopnosti drva kroz vrijeme

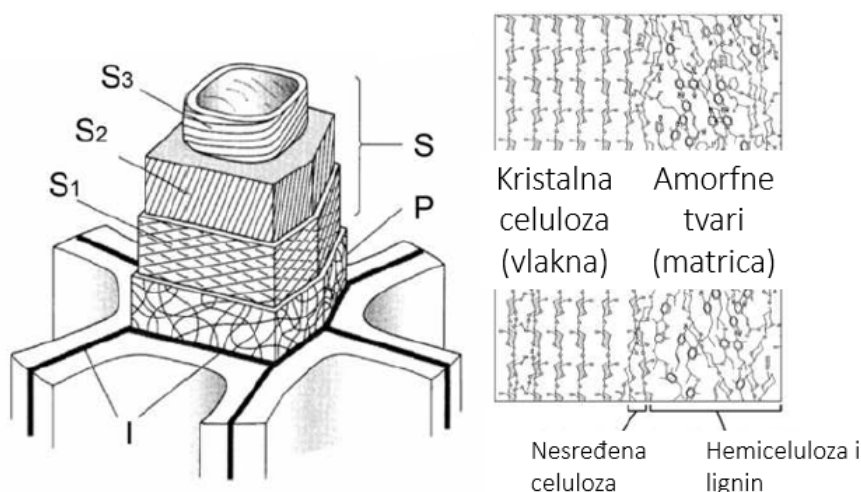
Starenjem drva higroskopnost se smanjuje. Navedeno se povezuje s razgradnjom i gubitkom hemiceluloze, budući da je hemiceluloza najviše higroskopna komponenta drva. Razgradnjom hemiceluloze smanjuje se istežljivost i žilavost drva. Nova istraživanja pokazuju da je ovaj proces moguće učiniti reverzibilnim pomoću tretmana vlaženja. Starenjem drva značajno se smanjuju vlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, žilavost i neka druga svojstva. Higroskopnost nekog uzorka drva ocjenjuje se promatrajući ravnotežni sadržaj vlage u odnosu na relativnu vlažnost. Ravnotežni sadržaj vlage ostaje nepromijenjen pri srednjoj vrijednosti relativne vlažnosti ili se smanjuje tijekom dugotrajnog starenja.

Na slici 5.9. prikazan je relativni ravnotežni sadržaj vlage prije i nakon tretmana ovlaživanja. Vrijednosti ravnotežnog sadržaja vlage starog drva su normalizirane u odnosu na novo drvo, uz iste uvjete. Vrijednosti za staro drvo su niže nego za novo, a nakon povećanja vlage na 100 %, vrijednosti ravnotežnog sadržaja vlage starog drva se djelomično vraćaju (posebno pri niskoj relativnoj vlažnosti) [25].



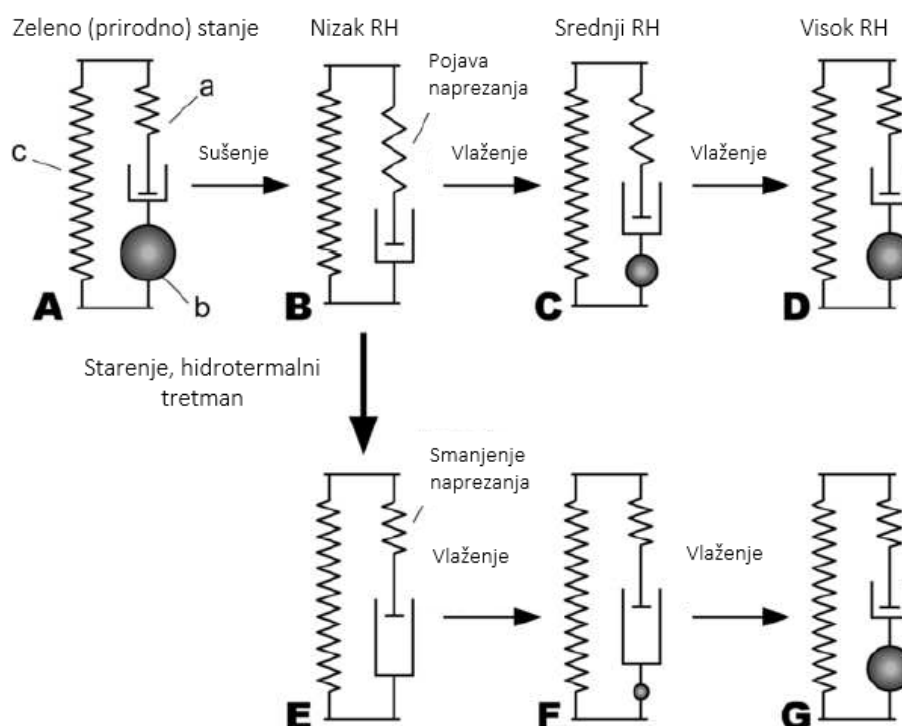
Slika 5.9. Ravnotežni sadržaj vlage u odnosu na relativnu vlažnost kod starog i novog drva [25]

Na slici 5.10. je shematski prikaz strukture stanične stijenke drva, odnosno na slici 5.11. mehanizam unutarnjeg naprezanja tijekom sušenja drva. Stanična stijenka je kompozit s kristalnim celuloznim vlaknima unutar amorfne matrične tvari. Kristalna celuloza je kruta i hidrofobna, a polimerna amorfna matrica je nabubrena od vlage u zelenom stanju te je spremna za skupljanje uslijed sušenja [25].



Slika 5.10. Struktura stanične stijenke; kristalna celuloza i amorfne tvari [25]

Drvo se suši iz svog zelenog stanja (A), a skupljanje polimerne amorfne matrice je ograničeno susjednom kristalnom celulozom (B). Zbog toga se amorfni polimeri deformiraju i suše pod naprezanjem (C). Tijekom dugotrajnog starenja, moguće je minimizirati naprezanja (E). S druge strane, drveni polimeri obnavljaju svoje početno stanje nakon što nabubre i plastificiraju se vlagom pri visokim vrijednostima relativne vlažnosti (G). Higroskopnost se obnavlja vlaženjem i naknadnim sušenjem, što objašnjava privremeno smanjenje higroskopnosti kao posljedice zagrijavanja u peći [25].



Slika 5.11. Shema mehanizma unutarnjeg napreznja pri sušenju drva [25]

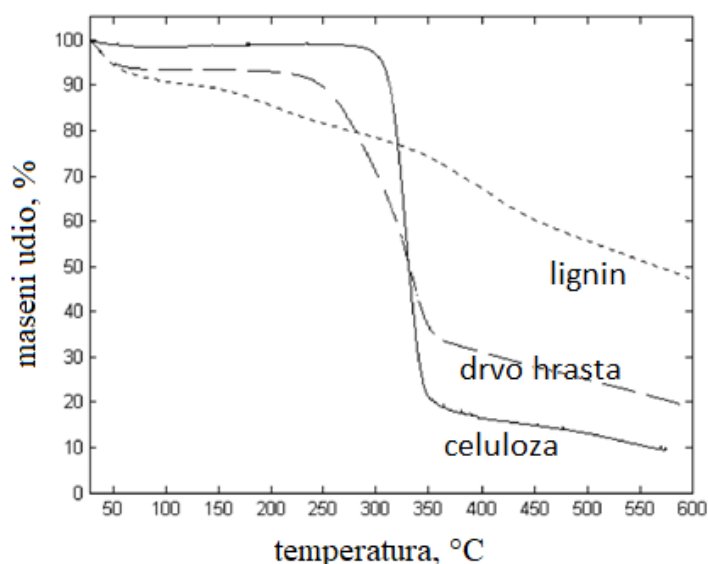
5.4. Toplinska svojstva

Drvo je prirodni materijal sastavljen od celuloze, hemiceluloze i lignina i osjetljiv je na povišene temperature. Zagrijavanjem do 100 °C iz drva hlapi voda, a daljnjim zagrijavanjem hlape i drugi plinovi koji na dovoljno visokoj temperaturi gore. Lignocelulozna tvar iz drva degradira na dva načina:

1. na temperaturi ispod 300 °C pucaju unutarnje primarne veze pri čemu hlape plinovi iz drva i gore
2. na temperaturi iznad 300 °C pucaju sekundarne veze i slijedi karbonizacija drvnog tkiva

Toplinska svojstva drva određuju se termogravimetrijskom analizom, čiji su primjeri rezultata za drvo hrasta (cjelovito) te za celulozu i lignin dani na slici 5.12. Tijekom pirolize drvo se zagrijava u peći, u zaštitnoj atmosferi dušika, na temperaturu od 500 do 600 °C. Kako se drvo zagrijava, mijenja se njegova masa zbog smanjenja udjela vode, odnosno vlage. Tijekom ovoga dolazi do pirolize drva. Potom se temperatura u peći spusti na 300 °C, u peć se pusti zrak zbog čega drveni ugljen izgara.

Drvo pri visokim temperaturama degradira na otprilike 250 °C. Više temperature podnosi jedino lignin od prisutnih polimer u drvu. Hemiceluloza se raspada na temperaturama višim od 225 °C, celuloza na temperaturama od 370 °C, a lignin se krene raspadati na 200 °C, ali vrlo sporo. Na 100 °C dolazi do sušenja drva, a sve dok vlaga ne ispari neće se povisiti temperatura [4].



Slika 5.12. Termogravimetrijska analiza [26]

Za ponašanje drva u požaru važno je da izgaranjem na površini nastaje pougljeni sloj, koji štiti unutrašnjost drva. Nakon tog sloja slijedi pirolizirani sloj, u kojem je promijenjen kemijski sastav drvene tvari, ali nije potpuno razgrađen. Ispod piroliziranog sloja je nepromijenjeno drvo u smislu mehaničkih i ostalih svojstava.

Drvo pokazuje dobra toplinska svojstva, a koja se mogu poboljšati impregnacijom, odnosno primjenom zaštitnih slojeva. U tablici 5.4. prikazana su sredstva koja poboljšavaju toplinska svojstva drva, a dijele se prema načinu djelovanja. [4]

Tablica 5.4. Sredstva za poboljšanje toplinskih svojstava kod drva [4]

Redni broj	Sredstvo:
1.	sredstva kojima se promiče stvaranje pougljenog sloja na nižoj temperaturi
2.	sredstva koja formiraju zaštitnu prevlaku na površini drva
3.	sredstva koja povećavaju toplinsku vodljivost drva
4.	sredstva kojima se razrjeđuju gorivi plinovi koji na dovoljno visokoj temperaturi hlape iz drva s plinovima koji ne gore
5.	sredstva kojima se reducira količina topline oslobođena gorenjem hlapivih plinova

5.5. Otpornost na biološku razgradnju

Drvo je biorazgradiv materijal, koji bez odgovarajuće zaštite, a uslijed djelovanja drugih živih organizama propada [4]. Vlaga i temperatura imaju važnu ulogu u procesima biološke razgradnje. Najčešći razgrađivači drva su različite vrste bakterija, gljivice i plijesni, različite vrste kukaca i različiti organizmi koji žive u vodi. Različite vrste drva imaju različitu (prirodnu) otpornost na biološku razgradnju. U pravilu srževina je puno otpornija na djelovanje bioloških razgrađivača od bjeljike u kojoj su pohranjene hranjive tvari. Te hranjive tvari privlače biološke razgrađivače. Različitim postupcima preobrazbe drva može se poboljšati njegova otpornost na biološku razgradnju [24].

6. MODIFIKACIJA DRVA

Drvo je biorazgradivi materijal s organskim i anorganskim tvarima u tkivu, a kojeg je kao takvog potrebno zaštititi u ovisnosti o uvjetima u kojima se nalazi. Nepovoljni uvjeti za drvo su prisutnost raznih bakterija, plijesni, gljivica, različitih kukaca i drugih organizama. Bakterije predstavljaju opasnost drvu koje je zasićeno vlagom. S vremenom bakterije mogu nepovoljno utjecati na mehanička svojstva drva. Plijesni su gljivice na mikroskopskoj razini, međusobno su umrežene i tvore micelije. Gljivice prodiru dublje u tkivo i nije ih moguće otkloniti brušenjem, blanjanjem ili nekim postupkom. Kao i prethodno navedeni organizmi, i gljivice utječu na pojavu lošijih mehaničkih svojstava. Najveću prijetnju drvu predstavljaju kukci, koji drvo koriste kao stanište i hranu. Kako bi se drvo zaštitilo od mogućeg propadanja, potrebno ga je podvrgnuti različitim modifikacijama. U nastavku su pojašnjene najčešće korištene metode zaštite drva.

6.1. Acetilacija

Acetilacija je reakcija vode s octenim anhidridom, pri čemu nastaje octena kiselina. Hidroksilne skupine zamjenjuju se acetilnim skupinama, smanjujući pritom broj hidroksilnih skupina dostupnih molekulama vode. Također acetilacija popuni šupljine u staničnoj stijenci, što smanjuje slobodan prostor za vodu, a što se smatra osnovnim mehanizmom smanjenja sadržaja vlage u staničnoj stijenci [24].

6.2. Furfurilacija

Ova metoda se izvodi impregniranjem drva s kombinacijom furfural alkohola i katalizatora uz zagrijavanje. Postupak dovodi do polimerizacije, smanjujući sadržaj vlage u staničnoj stijenci [24].

6.3. Toplinska modifikacija

Kada se drvo izloži povišenim temperaturama, nastupa toplinska degradacija nekih komponenti, a što dovodi i do gubitka mase. Gubitak mase je najčešće posljedica razgradnje hemiceluloze, a koja je najviše hidrofilna komponenta stanične stijenke. Toplinska obrada koristi takvu toplinsku degradaciju kako bi se proizveli proizvodi od drva s modificiranim svojstvima, uključujući smanjenu higroskopnost. Pri zagrijavanju nastaju i kemijske te

strukturne promjene, koje značajno utječu na hidrofobnost drva. Sposobnost bubrenja smanjuje se sa sušenjem, što se objašnjava kao posljedica prijanjanja susjednih mikrofibrila prilikom uklanjanja vode [27].

7. EKSPERIMENTALNI DIO

7.1. Cilj rada

U diplomskom radu cilj je odrediti otpornost na abrazijsko trošenje tikovine u tri osnovna presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom te istražiti utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet trošenja.

Ispitivanje abrazijskog trošenja provedeno je na uređaju Taber abrader uz brusne papire s različitom veličinom abrazivnih čestica.

Osim ispitivanja abrazijskog trošenja određen je udio vlage u ispitnim uzorcima, gustoća uzoraka te analiza mikrostrukture u tri osnovna presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu i postupkom računalne tomografije (engl. *Computed tomography* – CT).

Brinellovom metodom ispitana je tvrdoća tikovine u tri osnovna presjeka.

7.2. Materijal za istraživanje

Materijal za sva potrebna ispitivanja izrezan je iz daske od tikovine, prikazane na slici 7.1. Dimenzije daske bile su $600 \times 180 \times 52$ mm. Drvo je dobiveno iz tvrtke ATT Nautica d.o.o., koja se bavi proizvodnjom brodskih paluba.



Slika 7.1. Materijal iz kojeg su izrezani svi potrebni uzorci

7.3. Provedena ispitivanja

7.3.1. Analiza mikrostrukture

7.3.1.1. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu

Mikrostruktura je ispitana na tankim uzorcima, izrezanim u Laboratoriju za polimere na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorci su rezani na uređaju Microtom proizvođača Reichert, koji je prikazan na slici 7.2. Na istoj slici prikazan je detalj položaja uzorka pri izrezivanju.



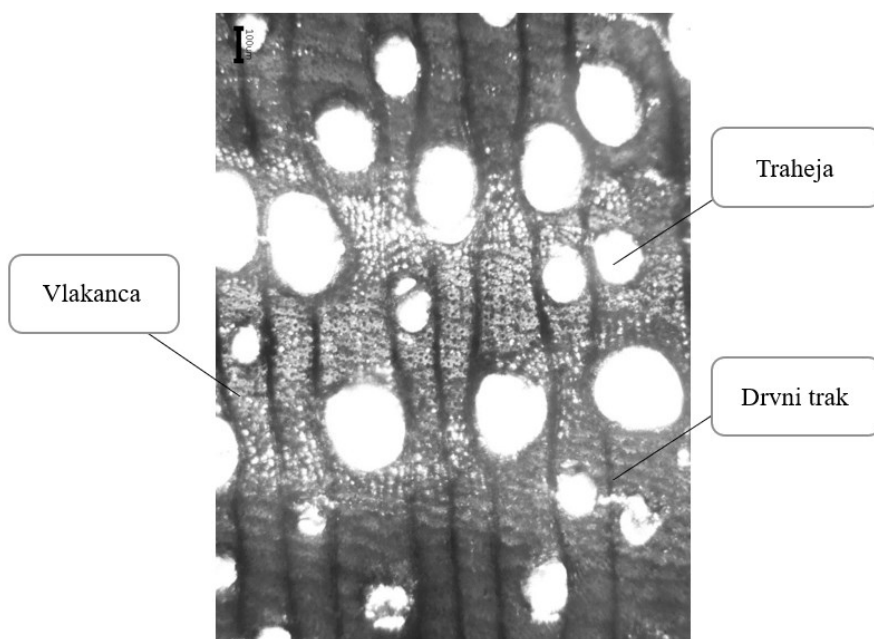
Slika 7.2. Izrezivanje uzoraka za analizu mikrostrukture na Microtomu

Spomenuti uzorci tikovine čuvani su u destiliranoj vodi, a potom su ispitani na Zavodu za botaniku na Prirodoslovno matematičkom fakultetu. Korišteni uređaj za analizu mikrostrukture je svjetlosni mikroskop s uvećanjem od $50 \times$ do $1000 \times$, proizvođača Zeiss, prikazan na slici 7.3.



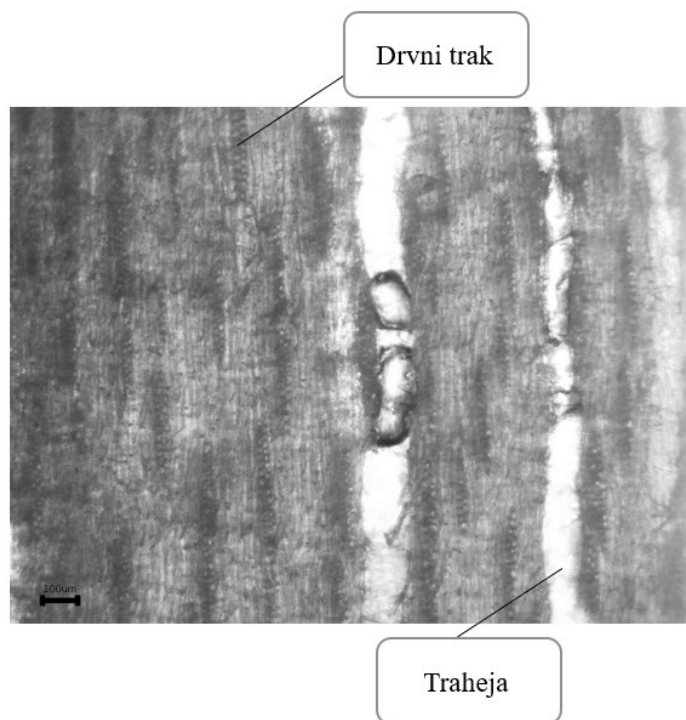
Slika 7.3. Svjetlosni mikroskop za analizu mikrostrukture

Slika 7.4. prikazuje poprečni presjek tikovine. Na njemu se vidi prstenasto porozni raspored traheja, a vide se i poprečno prerezana vlakanca. Također se vide drvni traci u obliku tamnih pruga.

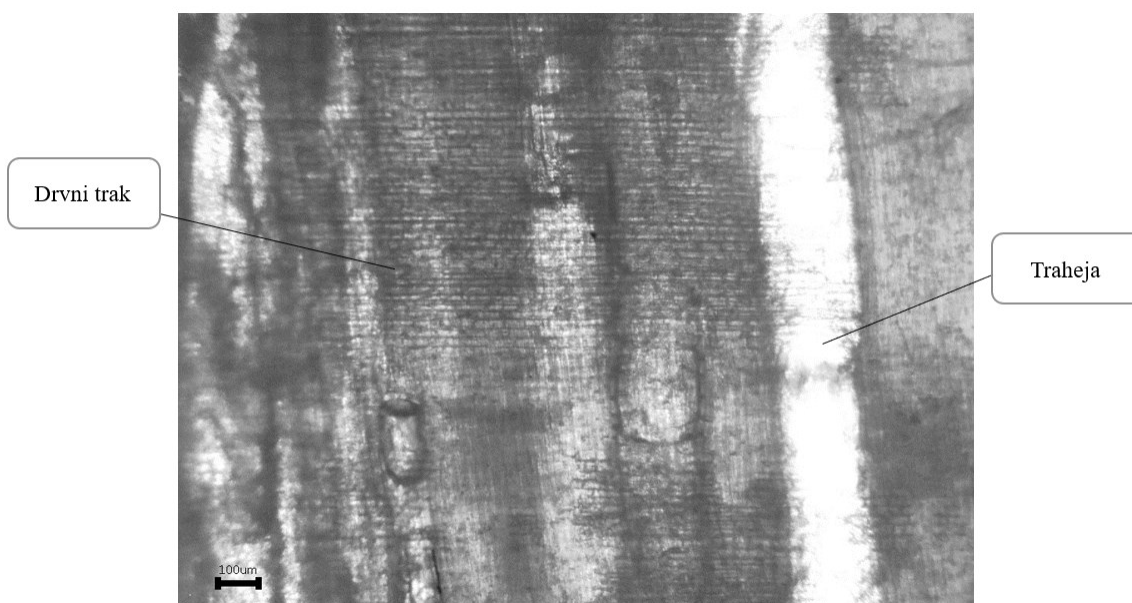


Slika 7.4. Mikrostruktura poprečnog presjeka drva tikovine

Na slici 7.5. vidi se mikrostruktura u tangencijalnom presjeku. Traheje i vlakanca su prerezani uzdužno, a drvni traci poprečno. Na slici 7.6. vidi se radijalni presjek gdje su uzdužno prerezane traheje, vlakanca i drvni traci.



Slika 7.5. Mikrostruktura tangencijalnog presjeka drva tikovine



Slika 7.6. Mikrostruktura radijalnog presjeka drva tikovine

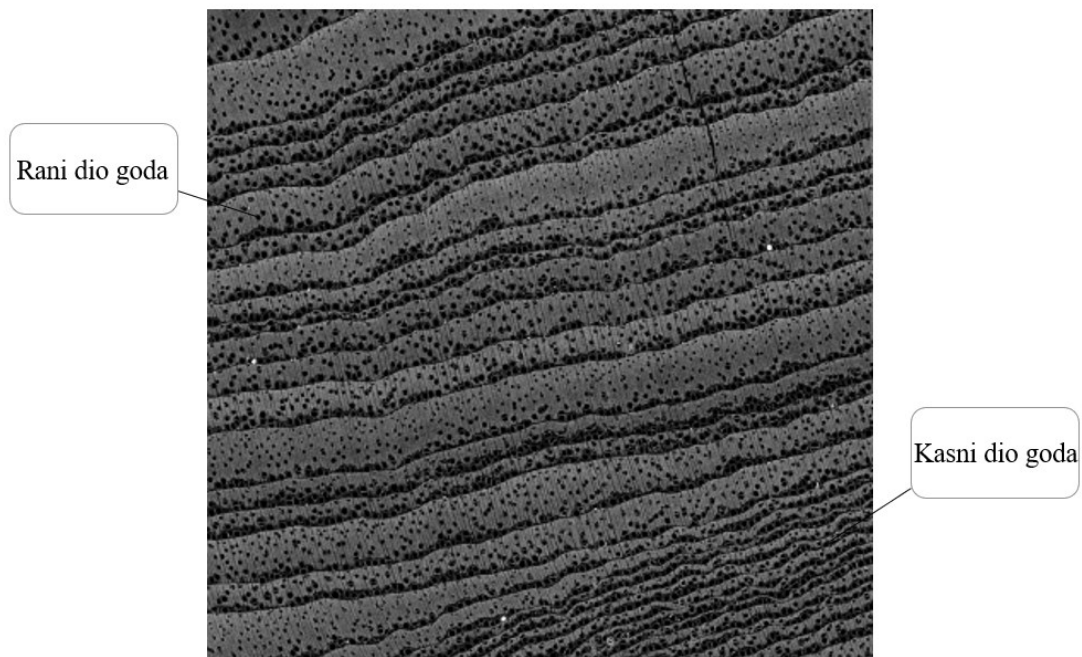
7.3.1.2. Analiza mikrostrukture računalnom tomografijom

Analiza mikrostrukture računalnom tomografijom provedena je pomoću CT uređaja ZEISS Metrotom 6 Scout, u tvrtki Topomatika d.o.o. Uređaj je prikazan na slici 7.7. CT sustavi sastoje se od tri ključna dijela, a to su: izvor zračenja, rotirajuće platforme i detektor. Rendgenske zrake su generirane pomoću izvora zračenja, a prolaze kroz predmet sve do detektora zračenja. Predmet se rotira za 360 °. Na temelju očitano, softver stvara sliku u različitim sivim nijansama. Svjetlija područja upućuju da se radi o većoj gustoći, odnosno debljini materijala. Rotirajuća platforma nakon skeniranja, zakreće predmet sve dok ga ne skenira čitavog. Kombinacijom prikupljenih slika računalni algoritam daje trodimenzionalni prikaz predmeta [28]. Korišteni mjerni sustav je ZEISS Metrotom 6 Scout, a mjerno područje je 0,020 mm. Ispitivanje je provedeno na temperaturi od 20 ± 1 °C te vlažnosti $55 \% \pm 10 \%$.

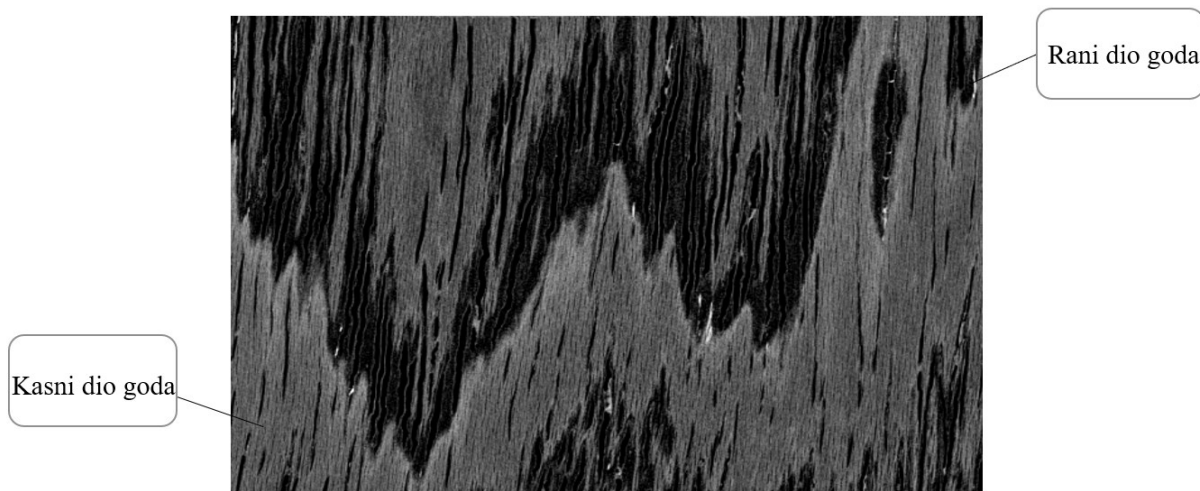


Slika 7.7. CT uređaj ZEISS Metrotom 6 Scout [29]

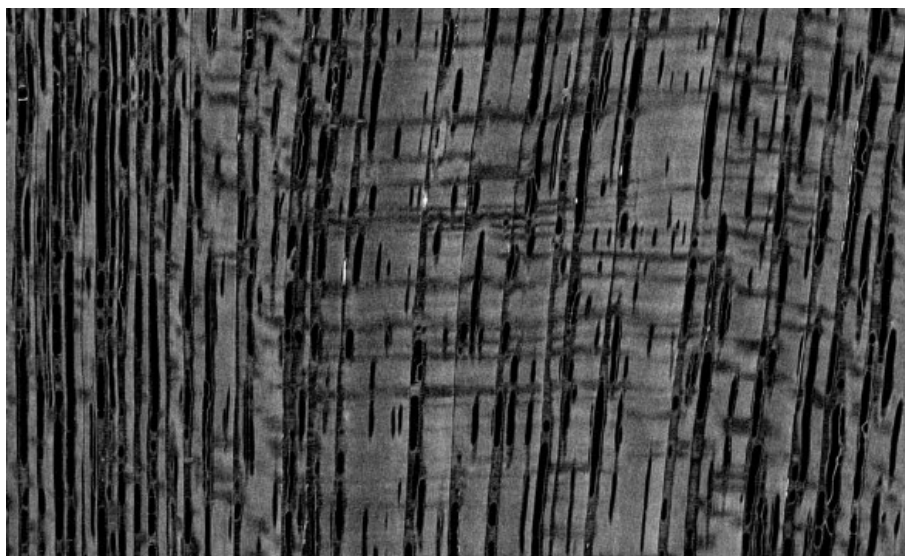
Rezultati su prikazani na slici 7.8, slici 7.9 i slici 7.10. Na svakom presjeku postoje tamnija i svjetlija područja. Tamnije područje znači da je drvo ondje manje gustoće, dok svjetlije područje upućuje na obrnuto. Na svim presjecima vrlo jasno se vide godovi te prijelaz iz ranog u kasni dio goda. Također se jasno vide razlike u širini godova, osobito na poprečnom presjeku.



Slika 7.8. CT snimka mikrostrukture u poprečnom presjeku tikovine



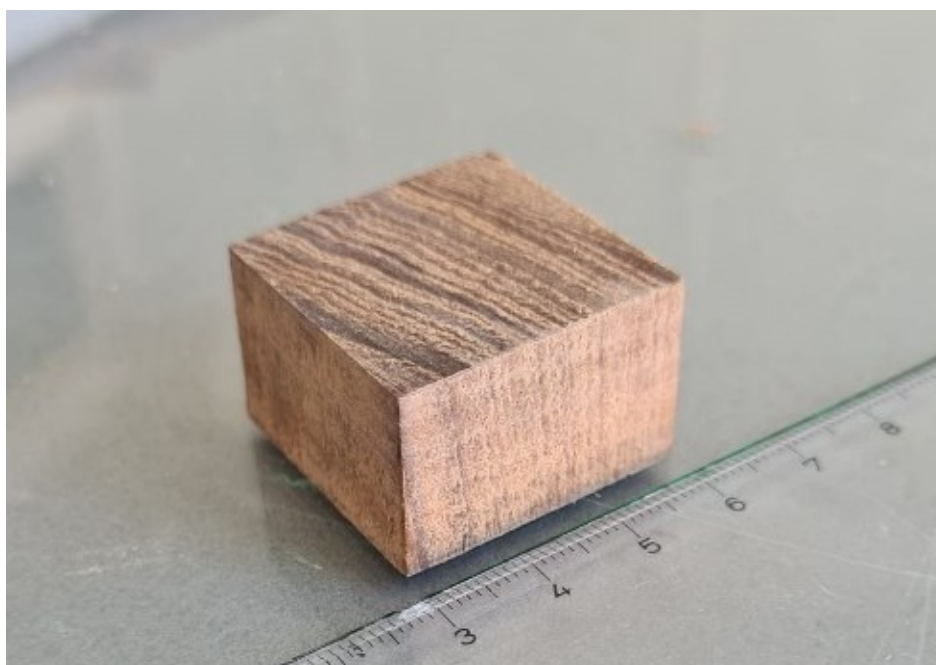
Slika 7.9. CT snimka mikrostrukture u tangencijalnom presjeku tikovine



Slika 7.10. CT snimka mikrostrukture u radijalnom presjeku tikovine

7.3.2. Mjerenje gustoće i udjela vlage u uzorcima

Dimenzije na koje je potrebno izrezati uzorak, propisane su normom ISO-13061-2. Na uzorku dimenzija $30,63 \text{ mm} \times 30,76 \text{ mm} \times 20,19 \text{ mm}$ određena je gustoća u apsolutno suhom stanju te udio vlage. Uzorak je prikazan na slici 7.11.



Slika 7.11. Uzorak za određivanje gustoće i udjela vlage

Prije sušenja, izmjerena je početna masa uzorka pri nekom udjelu vlage. Sušenje uzorka provodi se u peći, koja je prikazana na slici 7.12., na temperaturi 103 ± 2 °C dok se ne postigne apsolutno suho stanje. Vrijeme sušenja je vrijeme koje je potrebno da dva uzastopna mjerenja pokažu razliku mase manju od 0,1 %. Navedeno je određeno prema normi HRN ISO 13061-2:2015 kako bi se postiglo apsolutno suho stanje.



Slika 7.12. Peć za sušenje uzorka

Eksikator, prikazan na slici 7.13., je posuda koja sprječava upijanje vlage iz atmosfere. Ova posuda je korištena pri prijenosu uzoraka od sušionika do vage nakon postignutog apsolutno suhog stanja.



Slika 7.13. Eksikator

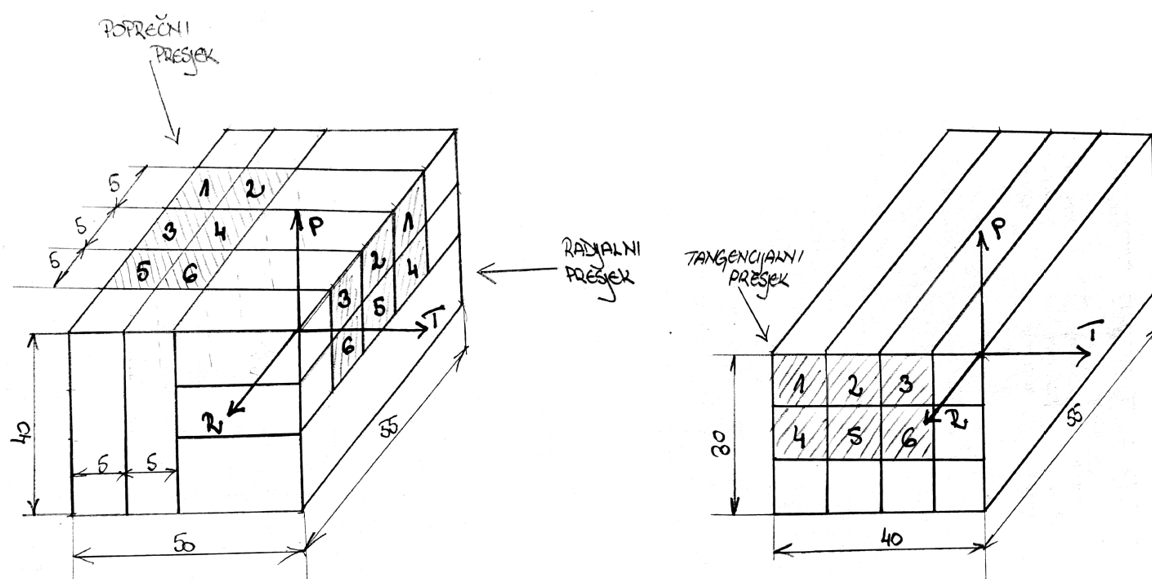
U tablici 7.1. prikazani su rezultati mjerenja udjela vlage, dimenzije, mase i gustoće uzoraka.

Tablica 7.1. Rezultati mjerenja gustoće i udjela vlage u uzorcima

Udio vlage, %	Dimenzije uzorka, mm	Masa uzorka, g	Gustoća uzorka, g/cm ³
6,56 (prije sušenja)	30,63 × 30,76 × 20,19	12,67700	0,667
≈ 0 (nakon sušenja)	30,42 × 30,22 × 20,21	11,89623	0,666
12	/	/	0,739

7.3.3. Određivanje abrazijske otpornosti

Uzorci na kojima se ispitivala otpornost na trošenje izrezani su prema shemi na slici 7.14., u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 7.14. Shematski prikaz pozicije uzoraka za abrazijsko trošenje u odnosu na osnovne osi

Za grubo izrezivanje uzoraka korištena je tračna pila, a postupak izrezivanja prikazan je na slici 7.15. Uzorci na kojima se ispitivala otpornost na trošenje na uređaju Taber abraderu, rezani su pomoću stolne pile FET proizvođača Proxxon, kao što je prikazano na slici 7.16. Na izrezanom komadu dimenzija 50 mm × 55 mm × 40 mm izrezani su uzorci poprečnog presjeka dimenzija 5 mm × 5 mm × 40 mm te uzorci radijalnog presjeka dimenzija 5 mm × 5 mm × 50 mm, dok

su na izrezanom komadu dimenzija 30 mm × 40 mm × 70 mm izrezani uzorci tangencijalnog presjeka dimenzija 5 mm × 5 mm × 55 mm. Za svaki karakteristični presjek izrezano je po 5 uzoraka.

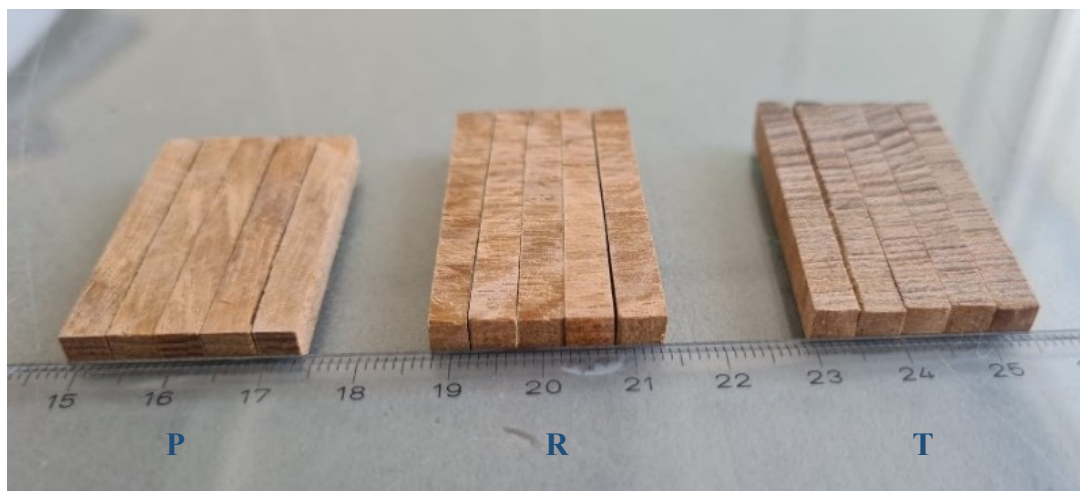


Slika 7.15. Tračna pila za izrezivanje uzoraka



Slika 7.16. Stolna pila FET za izrezivanje uzoraka za mjerenje na Taber abraderu

Na slici 7.17. prikazani su dobiveni ispitni uzorci nakon postupka rezanja tikovine.



Slika 7.17. Prikaz ispitnih uzoraka: P – poprečni presjek, R – radijalni presjek, T – tangencijalni presjek

Nakon što su uzorci izrezani te prije provedbe ispitivanja, isti su brušeni i polirani, a potom očetkani kako bi se dobile preciznije mjere, koje su izmjerene pomičnim mjerilom. Na slici 7.18. prikazan je proces finog brušenja.



Slika 7.18. Proces finog brušenja uzoraka

U laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, izmjerena je masa pojedinog uzorka pomoću analitičke vage Ohaus Analytical Plus, prikazane na slici 7.19. Vaga je prije početka ispitivanja podešena, a uzorci su pomoću pincete postavljeni na mjernu ploču. Na slici 7.20. prikazan je primjer mjerenja mase jednog od uzorka.



Slika 7.19. Vaga Ohaus Analytical Plus



Slika 7.20. Izmjerena masa jednog od uzoraka pomoću vage Ohaus Analytical Plus

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Laboratoriju za tribologiju, ispitana je otpornost na abrazijsko trošenje pomoću uređaja Taber abrader, prikazanog na slici 7.21.



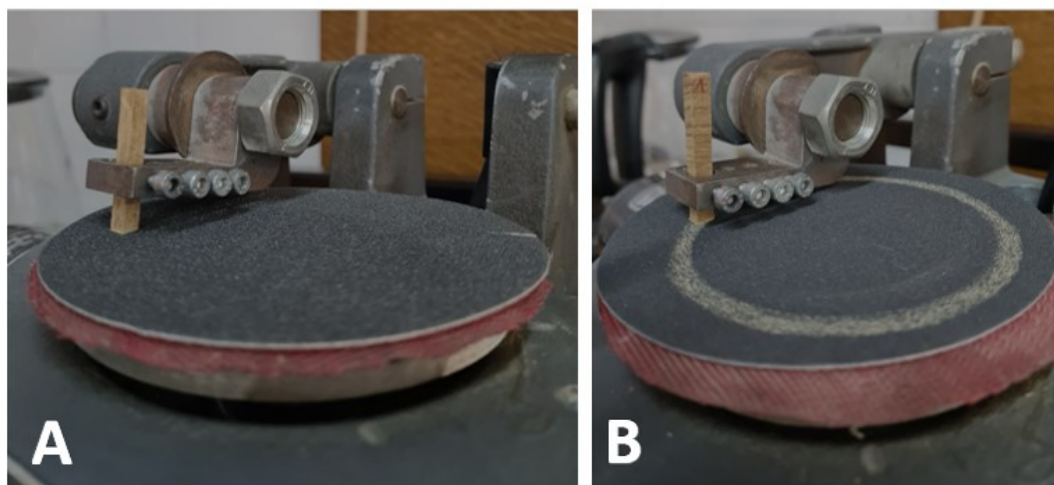
Slika 7.21. Uređaj Taber abrader

Taber abrader se uključuje pomoću male ručice nakon čega brojčanik prikazuje broj okretaja diska koji je promjera 125 mm. Brzina rotacije pri ispitivanju tikovine je 1 okr/s. Na disk se postavlja brusni papir po kojem kruži ispitni uzorak. Ispitni uzorak pričvršćen je vijkom, pri čemu treba paziti da se pritegne optimalnom silom kako ne bi nastupilo oštećenje uzorka pri prejakom učvršćenju, odnosno, kako ne bi nastupio lom, ako se ne učvrsti dovoljno. Sila kojom uzorak pritišće brusni papir tijekom ispitivanja je 4,91 N. Svaki uzorak izložen je trošenju na brusnom papiru u trajanju od 60 okretaja diska. Brusni papiri korišteni pri ispitivanju tikovine sadržavali su abrazivne čestice od silicijevog karbida. Korištene su četiri kvalitete brusnih papira: P80, P120, P220, P800. Prilikom okretanja diska, potrebno je koristiti usisavač kako abradirane čestice ne bi utjecale na rezultat ispitivanja. Za ispitivanje je uzeto pet uzoraka poprečnog presjeka, pet uzoraka radijalnog presjeka i pet uzoraka tangencijalnog presjeka. U svakoj skupini uzoraka primijenjena su četiri brusna papira, koja se razlikuju po kvaliteti kao što je navedeno u tablici 7.2.

Tablica 7.2. Srednje veličine abrazivnog zrna u ovisnosti o kvaliteti abrazivnog papira [30]

Kvaliteta abrazivnog papira	P800	P220	P120	P80
Srednja veličina abrazivnog zrna, μm	21,8	68,0	125,0	201,0

Nakon svakog ciklusa abradiranja izmjerena je masa svakog pojedinačnog uzorka te je izračunat gubitak mase u odnosu na prethodno stanje. Na slici 7.22. prikazan je uzorak pri početku abradiranja i nakon određenog broja ciklusa, gdje se pojavljuje trag abrazijskog trošenja.



Slika 7.22. Abrazijsko trošenje uzorka; A-početak trošenja, B-nakon određenog broja ciklusa

Za određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje, mjerena je gubitak mase uzoraka. U tablici 7.3. prikazane su duljina (b) i širina (h) abradirane površine korištenih uzoraka, a u tablici 7.4. prikazani su rezultati gubitka mase uzoraka pri abradiranju i pri udjelu vlage od 6,56 %. Kako bi se dobiveni rezultati za tikovinu mogli uspoređivati s drugim materijalima, vrijednosti gubitka mase preračunate su na udio vlage od 12 % i prikazane su u tablici 7.5.

Tablica 7.3. Izmjerene dimenzije uzoraka za abrazijsko trošenje

Uzorci	Presjeci					
	poprečni		radijalni		tangencijalni	
	b	h	b	h	b	h
1.	4,97	4,97	5,07	5,01	5,34	4,93
2.	5,01	5,01	4,51	4,97	5,31	5,01
3.	4,96	5,08	5,16	4,97	5,35	5,04
4.	4,95	5,06	4,45	4,99	5,42	5,04
5.	5,00	4,96	5,30	5,01	5,24	5,00

Tablica 7.4. Gubitak mase uzoraka nakon abrazijskog trošenja pri udjelu vlage od 6,56 %

Uzorci		Gubitak mase, g			
		Δm_{800}	Δm_{220}	Δm_{120}	Δm_{80}
POPREČNI PRESJEK	1.	0,0103	0,0225	0,0439	0,0486
	2.	0,0090	0,0223	0,0424	0,0534
	3.	0,0085	0,0261	0,0440	0,0487
	4.	0,0095	0,0205	0,0399	0,0416
	5.	0,0063	0,0284	0,0461	0,0538
	\bar{x}	0,0087	0,0240	0,0433	0,0492
RADIJALNI PRESJEK	1.	0,0053	0,0426	0,0923	0,0959
	2.	0,0044	0,0488	0,0871	0,0938
	3.	0,0133	0,0436	0,0866	0,0942
	4.	0,0176	0,0444	0,0835	0,1091
	5.	0,0142	0,0509	0,0909	0,1126
	\bar{x}	0,0109	0,0461	0,0881	0,1011
TANGENCIJALNI PRESJEK	1.	0,0127	0,0490	0,0973	0,0929
	2.	0,0122	0,0413	0,0998	0,1019
	3.	0,0158	0,0437	0,0885	0,0959
	4.	0,0101	0,0346	0,0975	0,0819
	5.	0,0136	0,0401	0,0898	0,0972
	\bar{x}	0,0129	0,0417	0,0946	0,0940

Tablica 7.5. Gubitak mase uzoraka nakon abrazijskog trošenja pri udjelu vlage od 12 %

Uzorci		Gubitak mase, g			
		Δm_{800}	Δm_{220}	Δm_{120}	Δm_{80}
POPREČNI PRESJEK	1.	0,0123	0,0270	0,0526	0,0583
	2.	0,0108	0,0268	0,0508	0,0640
	3.	0,0101	0,0313	0,0527	0,0584
	4.	0,0114	0,0246	0,0478	0,0498
	5.	0,0075	0,0340	0,0553	0,0644
	\bar{x}	0,0104	0,0287	0,0518	0,0590
RADIJALNI PRESJEK	1.	0,0063	0,0510	0,1106	0,1149
	2.	0,0052	0,0585	0,1044	0,1125
	3.	0,0159	0,0523	0,1038	0,1129
	4.	0,0211	0,0533	0,1001	0,1307
	5.	0,0170	0,0610	0,1089	0,1349
	\bar{x}	0,0656	0,2761	0,5279	0,6060
TANGENCIJALNI PRESJEK	1.	0,0152	0,0587	0,1166	0,1114
	2.	0,0147	0,0496	0,1196	0,1221
	3.	0,0189	0,0523	0,1061	0,1150
	4.	0,0121	0,0415	0,1169	0,0981
	5.	0,0163	0,0481	0,1077	0,1165
	\bar{x}	0,0771	0,2502	0,5669	0,5632

Zbog različite gustoće uzoraka izmjereni gubitak mase pri abraziji uvijek se mora preračunati u gubitak volumena. U tablici 7.6. vide se gubici volumena pri abraziji za sve uzorke i srednje vrijednosti od pet mjerenja, za sve osnovne presjeke i sve brusne papire.

Tablica 7.6. Volumni gubitak u uzorcima nakon abrazijskog trošenja za udio vlage od 12 %

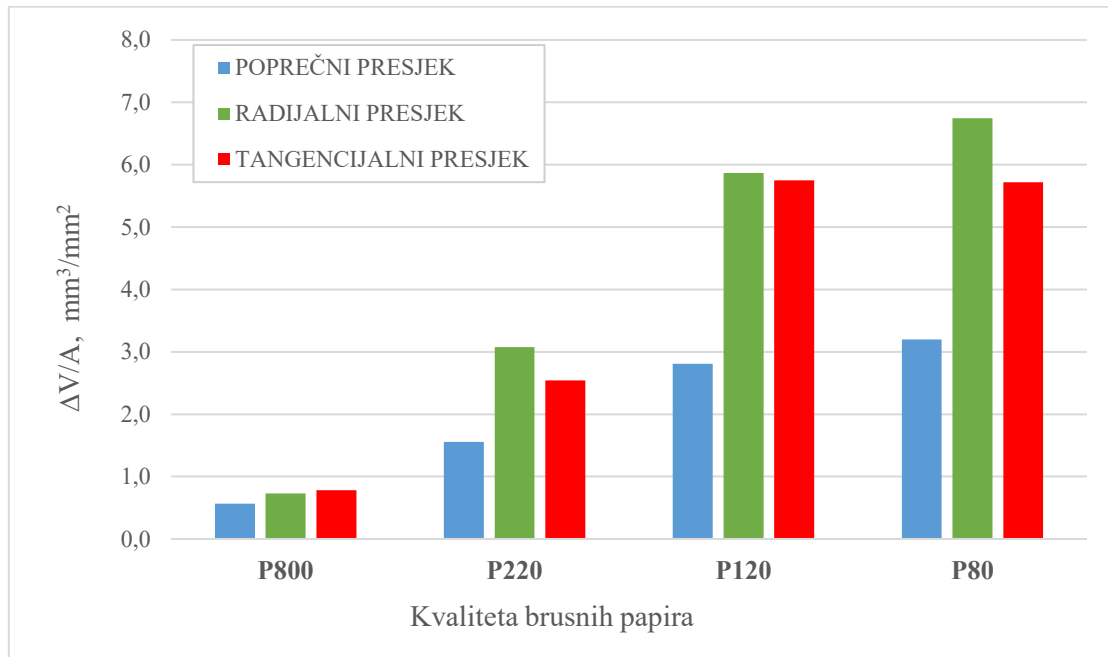
Uzorci		Gubitak volumena, mm ³			
		ΔV_{800}	ΔV_{220}	ΔV_{120}	ΔV_{80}
POPREČNI PRESJEK	1.	0,0167	0,0365	0,0712	0,0789
	2.	0,0146	0,0362	0,0688	0,0866
	3.	0,0137	0,0424	0,0714	0,0791
	4.	0,0154	0,0333	0,0647	0,0674
	5.	0,0102	0,0461	0,0749	0,0872
	\bar{x}	0,0141	0,0389	0,0702	0,0798
RADIJALNI PRESJEK	1.	0,0085	0,0690	0,1497	0,1555
	2.	0,0071	0,0792	0,1413	0,1522
	3.	0,0215	0,0708	0,1405	0,1528
	4.	0,0286	0,0721	0,1354	0,1769
	5.	0,0230	0,0826	0,1474	0,1826
	\bar{x}	0,0177	0,0747	0,1429	0,1640
TANGENCIJALNI PRESJEK	1.	0,0205	0,0795	0,1578	0,1508
	2.	0,0198	0,0671	0,1619	0,1653
	3.	0,0256	0,0708	0,1436	0,1556
	4.	0,0164	0,0561	0,1582	0,1328
	5.	0,0220	0,0651	0,1457	0,1577
	\bar{x}	0,0209	0,0677	0,1534	0,1524

Kako bi se poništio utjecaj veličine abradirane površine na ispitnim uzorcima, gubitak volumena na pojedinim uzorcima dijeli se s površinom abradiranog poprečnog presjeka. Dobivena veličina je intenzitet abrazijskog trošenja, a izražava se u mjernim jedinicama mm³/mm². Iznosi intenziteta abrazijskog trošenja tikovine navedeni su u tablici 7.7.

Tablica 7.7. Intenzitet abrazijskog trošenja tikovine za udio vlage od 12 %

Uzorci		Intenzitet abrazijskog trošenja, mm ³ /mm ²			
		$\Delta V_{800}/A$	$\Delta V_{220}/A$	$\Delta V_{120}/A$	$\Delta V_{80}/A$
POPREČNI PRESJEK	1.	0,6765	1,4777	2,8806	3,1932
	2.	0,5798	1,4439	2,7404	3,4514
	3.	0,5447	1,6824	2,8329	3,1381
	4.	0,6134	1,3284	2,5824	2,6925
	5.	0,4115	1,8578	3,0182	3,5160
	\bar{x}	0,5651	1,5580	2,8109	3,1982
RADIJALNI PRESJEK	1.	0,3366	2,7176	5,8937	6,1217
	2.	0,3156	3,5334	6,3061	6,7917
	3.	0,8388	2,7606	5,4801	5,9589
	4.	1,2865	3,2459	6,0996	7,9684
	5.	0,8676	3,1110	5,5512	6,8769
	\bar{x}	0,7290	3,0737	5,8661	6,7435
TANGENCIJALNI PRESJEK	1.	0,7801	3,0201	5,9934	5,7272
	2.	0,7458	2,5209	6,0853	6,2121
	3.	0,9488	2,6268	5,3252	5,7710
	4.	0,6010	2,0542	5,7921	4,8621
	5.	0,8396	2,4854	5,5609	6,0204
	\bar{x}	0,7831	2,5415	5,7514	5,7185

Na slici 7.23. je grafički prikaz intenziteta trošenja na svakom karakterističnom presjeku u ovisnosti o primijenjenom brusnom papiru.



Slika 7.23. Ovisnost intenziteta trošenja tikovine o kvaliteti brusnog papira

7.3.4. Mjerenje tvrdoće metodom po Brinellu

Tvrdoća uzoraka tikovine ispitana je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pomoću uređaja tvrdomjera HP250, prikazanog na slici 7.24.



Slika 7.24. Tvrdomjer HP250

Na podlogu se postavlja uzorak, potom se okreće pomoću ručnog kotača do indentora. Indentor je kuglica promjera 5 mm, koja se utiskuje u uzorak. Povlačenjem ručice aktivira se sila, kojom se kuglica utiskuje u površinu drva. Vrijednost primijenjene sile pri mjerenju iznosila je 490,3 N. Maksimalno opterećenje postignuto je nakon 15 ± 3 sekunda te je zadržano 30 sekundi. Nakon rasterećenja, na uzorku su vidljivi otisci, čiji je promjer izmjeren preciznim uređajem za mjerenje.

Na slici 7.25. prikazan je postupak mjerenja tvrdoće metodom po Brinellu te otisci na uzorku radijalnog presjeka.



Slika 7.25. Mjerenje tvrdoće i otisci kuglice na ispitnom uzorku tikovine

Na svakom karakterističnom presjeku napravljeno je po 16 mjerenja tvrdoće, ukupno četrdeset i osam mjerenja.

U tablici 7.8. prikazane su pojedinačne i srednje vrijednosti izmjerene tvrdoće (\bar{x}), standardna devijacija (σ) te koeficijent varijacije (CV) za sve osnovne presjeke.

Tablica 7.8. Vrijednosti tvrdoće HB uzoraka

Mjerenje	Presjeci		
	Poprečni	Tangencijalni	Radijalni
1	9,51	4,46	4,46
2	6,87	5,12	4,46
3	6,87	5,12	4,16
4	9,51	6,37	4,16
5	6,87	6,37	4,46
6	9,51	4,16	5,12
7	9,51	4,46	5,12
8	9,51	5,50	5,12
9	13,77	4,46	3,64
10	6,87	4,46	3,64
11	13,77	3,89	4,16
12	6,87	4,46	5,91
13	6,87	5,12	5,12
14	6,87	3,89	4,16
15	9,51	3,89	5,91
16	9,51	5,12	5,91
\bar{x}	8,89	4,80	4,72
σ	2,29	0,79	0,76
CV, %	25,81	16,40	16,14

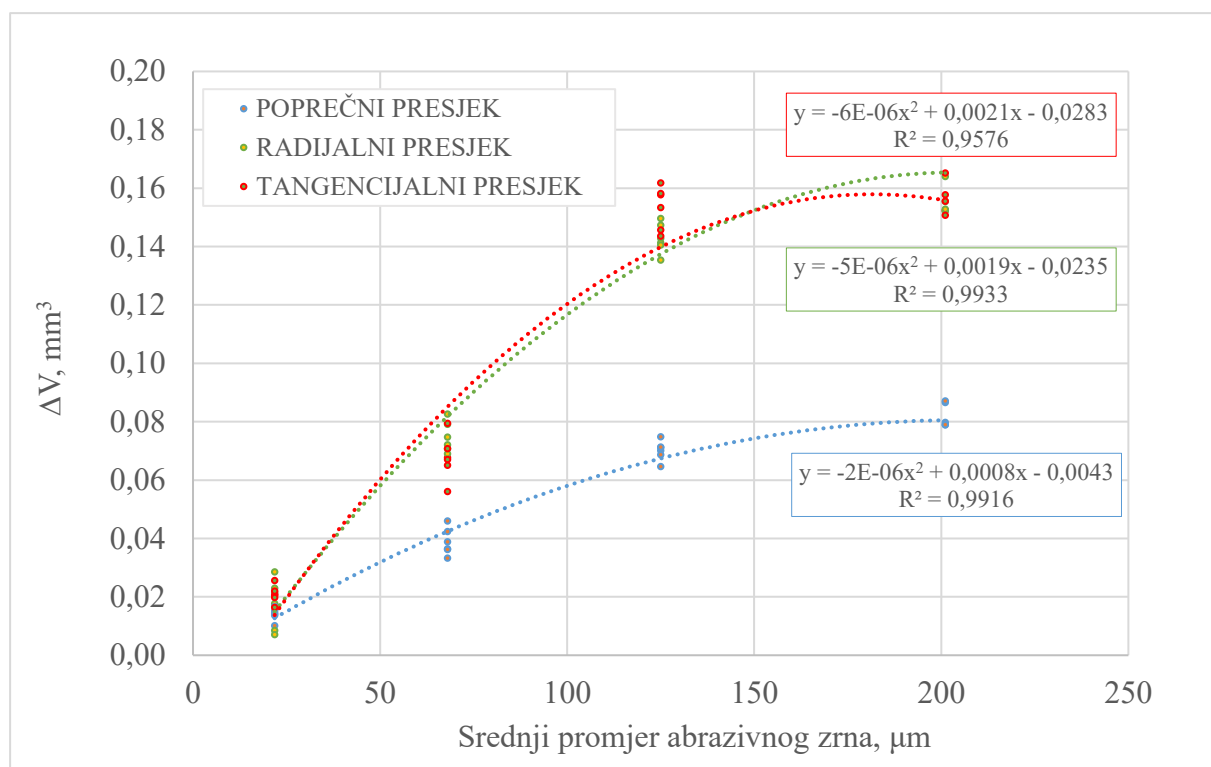
7.4. Analiza rezultata

7.4.1. Osvrt na analizu mikrostrukture

Promatranjem tikovine na svjetlosnom mikroskopu i analizom CT snimki zaključeno je da se radi o drvu izrazito usmjerene mikrostrukture. Na poprečnom presjeku vide se krupne traheje koje su grupirane u ranom dijelu goda, što ovo drvo svrstava u prstenasto porozne vrste. Traheje su međusobno odijeljene drvnim tracima. Drvnih traka ima relativno puno, njihova širina je uglavnom od tri do četiri parenhimske stanice. Gustoća tikovine iznosi oko $0,67 \text{ g/cm}^3$.

7.4.2. Osvrt na rezultate ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Gubitak mase uzoraka pri abrazijskom trošenju, preračunat je u gubitak volumena, a njegova ovisnost o veličini abrazivnih čestica prikazana je na slici 7.26.



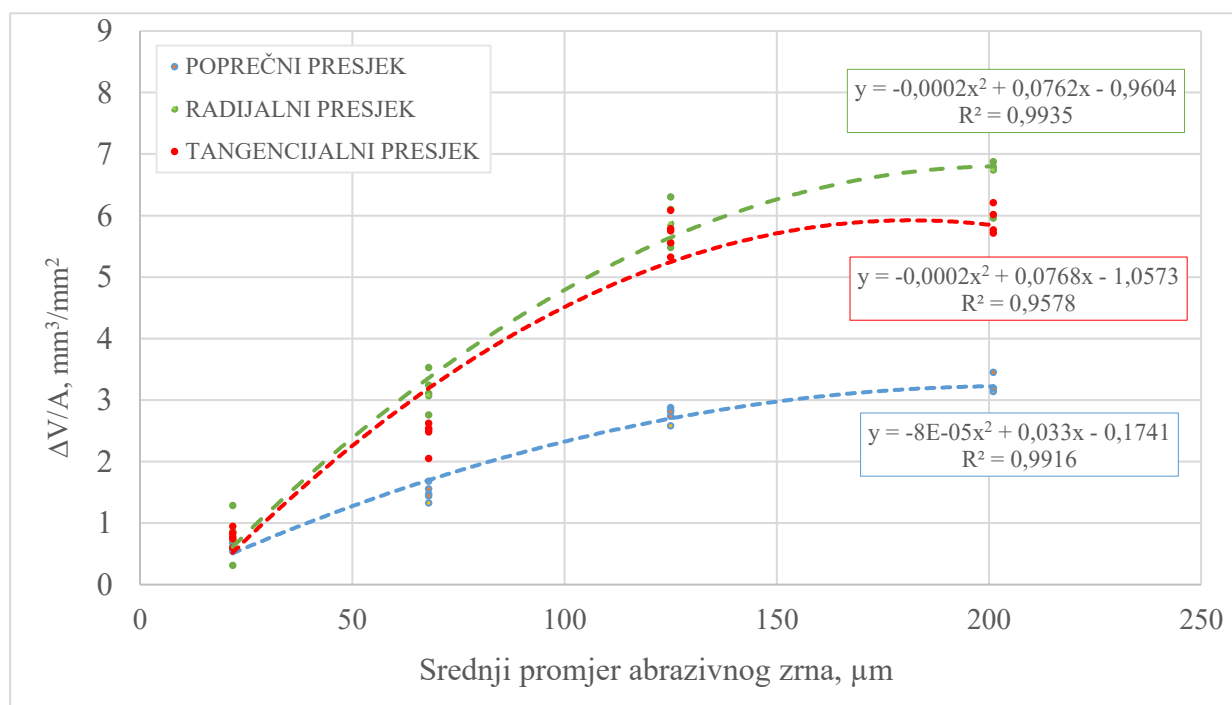
Slika 7.26. Gubitak volumena uzoraka nakon abrazijskog trošenja u ovisnosti o granulaciji brusnog papira pri udjelu vlage od 12 %

Vrlo jasno se vidi da srednji promjer abrazivnog zrna utječe na gubitak volumena pri abrazijskom trošenju. S povećanjem abrazivnih čestica povećava se i abradirani volumen na sva tri osnovna presjeka. Najmanji gubitak volumena pri abrazijskom trošenju izmjereno je na poprečnom presjeku za sve kvalitete

brusnog papira. Tangencijalni i radijalni presjek imaju veći gubitak volumena i njihove vrijednosti su međusobno slične. Razlika između gubitka volumena na poprečnom i druga dva presjeka povećava se s povećanjem veličine abrazivnog zrna.

Dobiveni podaci mogu se vrlo dobro aproksimirati polinomom drugog stupnja uz vrlo visoki koeficijent determinacije. Za sitnije abrazivne čestice korelacija između srednje veličine abrazivnih čestica i gubitka volumena je skoro linearna. S povećanjem srednjeg promjera abrazivnih čestica, odnosno upotrebom grubljih brusnih papira, gubi se linearnost i prirast gubitka volumena je sve manji. Ovaj fenomen u literaturi se uobičajeno naziva kritičnom veličinom abrazivnog zrna. Na dijagramu se vidi da je u ovom slučaju kritična veličina abrazivnog zrna oko 125 μm .

Na slici 7.27. prikazan je utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet abrazijskog trošenja. Kako su ispitni uzorci precizno izrezani i bili vrlo sličnih dimenzija, relativni odnosi između krivulja gubitaka volumena i krivulja intenziteta abrazijskog trošenja su vrlo slični.



Slika 7.27. Intenzitet trošenja uzoraka u ovisnosti o srednjem promjeru abrazivnog zrna

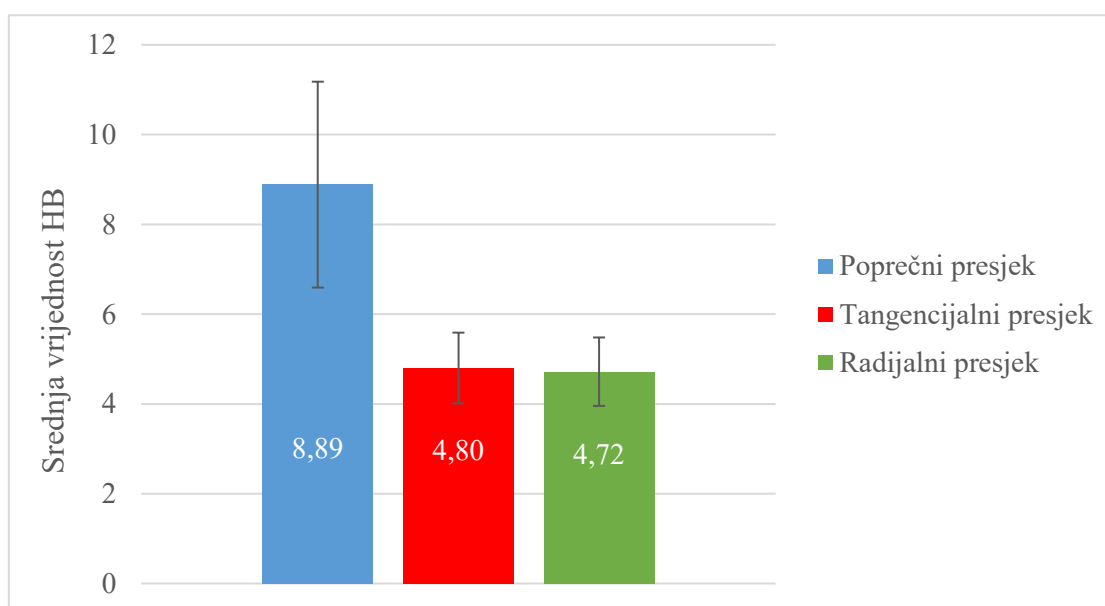
Usporedbom tikovine s drugim vrstama drva, može se zaključiti da imaju sličan utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitete abrazijskog trošenja. Hrast lužnjak [32] i bagrem [31] imaju manji intenzitet trošenja i veću otpornost na abraziju od tikovine. Sve tri vrste imaju sličnu vrijednost kritične veličine abrazivnog zrna.

7.4.3. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće

Najveće vrijednosti tvrdoće izmjerene su na poprečnom presjeku, što je općenito karakteristično za većinu vrsta drva. Vrijednosti tvrdoće na tangencijalnom i radijalnom presjeku puno su niže i međusobno imaju približno slične vrijednosti.

Dobivene srednje vrijednosti tvrdoće mjerene Brinellovom metodom za sva tri osnovna presjeka mogu se vidjeti na slici 7.28.

Rasipanja rezultata pri mjerenju tvrdoće su velika, osobito na poprečnom presjeku gdje koeficijent varijacije iznosi 25,81 %.



Slika 7.28. Srednje vrijednosti tvrdoće HB po presjecima

8. ZAKLJUČAK

Usporedbom abrazijske otpornosti tikovine u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku uz dodatne analize za jasnije tumačenje svojstava drva tikovine, doneseni su sljedeći zaključci:

- Tikovina je prstenasto porozno drvo. Traheje su grupirane u ranom dijelu goda i međusobno odvojene drvnim trcima, koji po širini imaju tri do četiri parenhimske stanice.
- Gustoća tikovine iznosi oko $0,67 \text{ g/cm}^3$.
- Veličina abrazivnog zrna utječe na abrazijsku otpornost tikovine i s povećanjem abrazivnih čestica smanjuje se abrazijska otpornost na sva tri osnovna presjeka.
- Najveću otpornost na abraziju ima poprečni presjek, a tangencijalni i radijalni presjek međusobno imaju sličnu otpornost na abraziju. S povećanjem veličine abrazivnog zrna razlika između poprečnog i druga dva presjeka postaje veća.
- Na svim presjecima uočen je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna i iznosi oko $125 \mu\text{m}$.
- Na poprečnom presjeku izmjerena je najveća srednja vrijednost tvrdoće i iznosila je 8,89 HB. Srednje vrijednosti tvrdoće na tangencijalnom i radijalnom presjeku su slične i znatno niže, a iznose 4,80 HB (tangencijalni) i 4,72 HB (radijalni).
- Rasipanja rezultata pri mjerenju tvrdoće su vrlo velika, osobito na poprečnom presjeku.

LITERATURA

- [1] Chen C, Kuang Y, Zhu S, Burgert I, Keplinger T, Gong A, et al. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. Vol. 5, *Nature Reviews Materials*. Nature Research; 2020. p. 642–66. doi: 10.1038/s41578-020-0195-z
- [2] Murakami T. Importance of biotribology. In: *Biotribology of Natural and Artificial Joints*. Elsevier; 2023. p. 1–27. doi: 10.1016/b978-0-12-823669-7.00007-7
- [3] Friedrich K, Akpan EI, Wetzels B. Structure and mechanical/abrasive wear behavior of a purely natural composite: black-fiber palm wood. *J Mater Sci*. 2017 Sep 1;52(17):10217–29. doi: 10.1007/s10853-017-1184-5
- [4] Rede V. *Drvo-tehnički materijal*, 2017.
- [5] Parham RA, Gray RL. Formation and Structure of Wood [Internet]. 1984. Dostupno na: <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- [6] Parts of a Tree and Their Functions. 2020 Jul 3 (pristupljeno: 10/15/2023); Dostupno na: <https://www.sciencefacts.net/parts-of-a-tree.html>
- [7] Thybring EE, Fredriksson M. Wood modification as a tool to understand moisture in wood. *Forests*. 2021;12(3). doi: 10.3390/f12030372
- [8] Dejardin A, Laurans FF, Arnaud D, Breton C, Pilate GG, Leplé J-C. Wood formation in Angiosperms. *C R Biol* [Internet]. 2010;(4):325–34. Dostupno na: <http://www.orleans.inra.fr/uagpf> doi: 10.1016/j.crv.2010.01.010i
- [9] Plomion C, Leprovost G, Stokes A. Wood formation in trees. Vol. 127, *Plant Physiology*. American Society of Plant Biologists; 2001. p. 1513–23. doi: 10.1104/pp.010816
- [10] Kumar A, Jyske T, Petrič M. Delignified Wood from Understanding the Hierarchically Aligned Cellulosic Structures to Creating Novel Functional Materials: A Review. Vol. 5, *Advanced Sustainable Systems*. John Wiley and Sons Inc; 2021. doi: 10.1002/adsu.202000251
- [11] (a) Illustration of wood cell structure (redrawn from Haygreen & Bowyer... | Download Scientific Diagram [Internet]. (pristupljeno: 11/16/2023). Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/a-Illustration-of-wood-cell-structure-redrawn-from-Haygreen-Bowyer-11-The-fibre_fig1_309299732
- [12] Keey RB. Colour Development on Drying [Internet]. 2004 (pristupljeno: 11/16/2023). Dostupno na: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0718-221x2005000100001&script=sci_arttext
- [13] Meier E. *Softwood Anatomy*. The Wood Database.

- [14] Meier E. Hardwood anatomy. The Wood Database [Internet]. (pristupljeno: 11/17/2023); Dostupno na: <https://www.wood-database.com/wood-articles/hardwood-anatomy/>
- [15] Handbook of wood chemistry and wood composites.
- [16] Brouard JS, Brouard JS. Wood density and growth in clonally propagated aspen [Internet]. Dostupno na: <https://mc06.manuscriptcentral.com/cjfr-pubshttps://mc06.manuscriptcentral.com/cjfr-pubs>
- [17] Wood Species - Densities [Internet]. The Engineering Tool Box. (pristupljeno: 10/21/2023). Dostupno na: https://www.engineeringtoolbox.com/wood-density-d_40.html
- [18] Barnett J, Jeronimidis G. Wood Quality and its Biological Basis. Blackwell Publishing; 2003.
- [19] Kretschmann DE. Mechanical Properties of Wood.
- [20] Low S, Hattori K, Germak A, Knott A. Proposed definition for the brinell hardness indentation edge. In: 20th IMEKO World Congress 2012. 2012. p. 521–6. doi: 10.21014/acta_imeko.v3i3.72
- [21] Sydor M, Pinkowski G, Jasińska A. The Brinell method for determining hardness of wood flooring materials. Forests. 2020 Aug 1;11(8). doi: 10.3390/f11080878
- [22] Millaniyage K, Kotlarewski N, Wallis L, Taoum A, Nolan G. Janka Hardness Evaluation of Plantation-Grown Eucalyptus nitens for Engineered Flooring Applications. Buildings. 2022 Nov 1;12(11). doi: 10.3390/buildings12111862
- [23] Green DW, Begel M, Nelson W. Janka Hardness Using Nonstandard Specimens [Internet]. 2006. Dostupno na: www.fpl.fs.fed.us.
- [24] Fredriksson M. On wood-water interactions in the over-hygroscopic moisture range-mechanisms, methods, and influence of wood modification. Vol. 10, Forests. MDPI AG; 2019. doi: 10.3390/f10090779
- [25] Obataya E. Elsevier Editorial System(tm) for Journal of Cultural Heritage Manuscript Draft Title: Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments Title: Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments.
- [26] Beramendi-Orosco LE, Castro-Diaz M, Snape CE, Vane CH. Application of catalytic hydrolysis for the rapid preparation of lignin concentrates from wood. Elsevier BV.
- [27] Borrega M, Kärenlampi PP, Kärenlampi Hygroscopicity PP. Hygroscopicity of heat-treated Norway spruce () wood. European Journal of Wood and Wood Products

- [Internet]. 2009;68(2). Dostupno na: <https://hal.science/hal-00568249> doi: 10.1007/s00107-009-0371-8i
- [28] Kruth JP, Bartscher M, Carmignato S, Schmitt R, De Chiffre L, Weckenmann A. Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals*. 2011;60(2):821–42. doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.006
- [29] The powerhouse of resolution for CT inspection and metrology [Internet]. (pristupljeno: 11/01/2023). Dostupno na: <https://www.zeiss.se/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom-6-scout.html>
- [30] ISO 6344-3:2021 Determination and designation of grain size distribution.
- [31] Damijanić D, Jakopec S, Kurtalj L, Lukšić H, Rede V. Effect of abrasive grain size on the abrasion resistance of black locust (*Robina pseudoacacia*) in three characteristic sections. *Proceeding of Natural Resources, Green Technology & Sustainable Development*. 2022;
- [32] Bratić L. Utjecaj veličine abrazivnog zrna i usmjerenosti strukture na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka (*Quercus petraea*). 2023.