

# Varijabilnost svojih svojstava tikovine u longitudinalnom smjeru

---

Čondrić, Ela

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:235:335546>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-07**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Ela Čondrić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

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

Studentica:

Ela Čondrić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem prof. dr. sc. Janošu Kodvanju, dipl. ing. na pomoći pri laboratorijskom ispitivanju uzoraka.

Pogotovo zahvaljujem prof. dr. sc. Veri Rede, dipl. ing. i asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na dostupnosti i pomoći te prenesenom znanju pri izradi ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem tvrtkama ATT Nautica d.o.o. i Topomatika d.o.o. na uzorcima tikovine i ispitivanju uzoraka.

Naposljetku, hvala mami, tati, Ivi, Anji i ostaloj obitelji i prijateljima koji su mi bili vjetar u leđa tijekom studiranja.

Ela Čondrić



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: **Ela Čondrić** JMBAG: 0035216402

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Varijabilnost savojnih svojstava tikovine u longitudinalnom smjeru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Variability of bending properties of teak wood in the longitudinal direction**

Opis zadatka:

Usmjerenost strukture kod različitih tehničkih materijala utječe na vrijednosti pojedinih mehaničkih i drugih važnih svojstava. Drvo ima izrazito usmjerenu strukturu koja je posljedica njegovih bioloških funkcija i zato se svojstva drva jako razlikuju u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku. U konstrukcijama je drvo najčešće savojno opterećeno pri čemu savojna sila djeluje okomito na uzdužnu (longitudinalnu) os debla. Uočeno je da kod nekih vrsta drva vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru ovise o kutu između smjera savojne sile i tangente na god, dok kod drugih vrsta ovaj kut nema nikakvog utjecaja na navedene vrijednosti. Do danas se ne zna točan uzrok ovakvog ponašanja, a vrlo vjerojatno ga treba tražiti u usmjerenosti mikrostrukture drva.

U diplomskom radu potrebno je ispitati kako kut između savojne sile i tangente na god utječe na vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti kod tikovine, egzotične vrste drva koja se zbog izvanredne dimenzijske stabilnosti, trajnosti i lijepog izgleda koristi u brodogradnji te za vanjsko i unutarnje uređenje. Savojno ispitivanje treba provesti metodom savijanja u tri točke, za vrijednosti navedenog kuta od 0°, 45° i 90°. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i usporediti s rezultatima recentnih istraživanja u dostupnoj literaturi. U zadnjem poglavlju potrebno je navesti svu korištenu literaturu, a potrebno je navesti i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURA DRVA .....	2
2.1. Botanička podjela drva.....	2
2.2. Tri karakteristična presjeka drva.....	3
2.3. Godovi.....	5
2.4. Drvne stanice.....	7
2.5. Jažice .....	9
2.6. Mikrostruktura četinjača .....	10
2.7. Mikrostruktura listača .....	11
3. KEMIJSKI SASTAV DRVA .....	14
3.1. Ugljikohidrati u drvu.....	14
3.2. Lignin .....	15
3.3. Ekstraktivi .....	15
4. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA .....	16
4.1. Modul elastičnosti E.....	16
4.2. Savojni modul elastičnosti i savojna čvrstoća.....	16
4.3. Poissonov koeficijent $\nu$ .....	20
4.4. Modul smicanja G .....	20
4.5. Tlačna čvrstoća .....	20
4.6. Smična čvrstoća .....	21
4.7. Vlačna čvrstoća .....	21

---

4.8. Žilavost.....	21
4.9. Tvrdoća .....	21
5. TIKOVINA.....	23
5.1. Uvjeti rasta tikovine .....	23
5.2. Svojstva tikovine.....	24
5.2.1. Mehanička i fizikalna svojstva.....	24
5.2.2. Tribološka svojstva .....	27
5.2.3. Ostala svojstva .....	28
5.3. Mikrostruktura tikovine .....	29
5.4. Primjena tikovine .....	30
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	32
6.1. Cilj rada i provedena ispitivanja .....	32
6.2. Analiza mikrostrukture uzoraka.....	32
6.3. Određivanje udjela vlage i gustoće uzorka prema normi ISO 13061 [26].....	36
6.4. Računalna tomografija uzorka .....	38
6.5. Uzorci za ispitivanje savojnog modula elastičnosti .....	40
6.6. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.....	44
6.7. Rezultati ispitivanja savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće .....	46
7. ANALIZA REZULTATA .....	52
8. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	60

## POPIS SLIKA

Slika 1.	A) Listača, B) Četinjača, C) Poprečni presjek listače (hrast), D) Poprečni presjek četinjače (bor) [2,3] .....	3
Slika 2.	Tri karakteristična presjeka drva [4] .....	4
Slika 3.	Poprečni presjek debla bijelog hrasta [5] .....	4
Slika 4.	Obični grab (lijevo) i šljiva (desno) [6] .....	5
Slika 5.	Karakteristični tipovi godova kod četinjača i listača [1] .....	6
Slika 6.	Poprečni presjek tikovine .....	7
Slika 7.	Dijelovi stanične stijenke [7] .....	8
Slika 8.	Dijelovi stanične stijenke [7] .....	9
Slika 9.	Smolni kanali drva smreke (lat. <i>Picea</i> ) - SEM prikaz [9] .....	11
Slika 10.	Radijalni presjek tikovine .....	13
Slika 11.	Shematski prikaz stanične stijenke [10] .....	14
Slika 12.	Savojno ispitivanje metodom u tri točke .....	17
Slika 13.	Određivanje savojnog modula elastičnosti [1] .....	18
Slika 14.	Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile: 0°, 45° i 90° .....	19
Slika 15.	Ovisnost savojne čvrstoće i modula elastičnosti o kutu između savojne sile i tangente na god [17] .....	20
Slika 16.	Ispitivanje tvrdoće tikovine .....	22
Slika 17.	Prirodna staništa tikovine [18] .....	23
Slika 18.	Morfologija tkiva tikovine prije (lijevo) i nakon toplinske obrade (desno) snimljena na SEM-u: a) i b) poprečni, c) i d) radijalni, e) i f) tangencijalni presjek [21] .....	26
Slika 19.	Termogram neobrađene i toplinski modificirane tikovine [21] .....	27
Slika 20.	Ovisnost koeficijenta trenja o normalnoj sili pri različitim brzinama za tikovinu [22] .....	28
Slika 21.	Utjecaj impregnacije na savojnu čvrstoću tikovine [24] .....	29
Slika 22.	Mikrostruktura tikovine [25] .....	29
Slika 23.	Slaganje tikovih letvica za brodsku palubu .....	31
Slika 24.	Dio montirane palube od tikovine .....	31
Slika 25.	Rezanje tankih uzoraka na mikrotomu .....	32
Slika 26.	Vrlo tanak uzorak za ispitivanje mikrostrukture .....	33



Slika 27.	Ispitivanje mikrostrukture tikovine .....	33
Slika 28.	Poprečni presjek tikovine .....	34
Slika 29.	Radijalni presjek tikovine.....	35
Slika 30.	Tangencijalni presjek tikovine .....	35
Slika 31.	Uzorak za sušenje .....	36
Slika 32.	Sušionik u kojem je sušen uzorak .....	36
Slika 33.	Eksikator za prijenos uzorka .....	38
Slika 34.	CT snimka poprečnog presjeka tikovine .....	39
Slika 35.	CT snimka radijalnog presjeka tikovine.....	39
Slika 36.	CT snimka tangencijalnog presjeka tikovine .....	40
Slika 37.	Daska od tikovine.....	40
Slika 38.	Rezanje uzoraka .....	41
Slika 39.	Rezanje uzoraka .....	41
Slika 40.	Uzorci s kutom između sile i goda od $0^\circ$ .....	43
Slika 41.	Uzorci s kutom između sile i goda od $45^\circ$ .....	43
Slika 42.	Uzorci s kutom između sile i goda od $90^\circ$ .....	43
Slika 43.	Kidalica Messphysik BETA 50-5.....	44
Slika 44.	Prikaz s videoekstenzometra ME 46 Messphysik .....	45
Slika 45.	Ispitni uzorak nakon loma .....	45
Slika 46.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 1-11 iz serije $0^\circ$ .....	47
Slika 47.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 12-22 iz serije $0^\circ$ .....	47
Slika 48.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 23-33 iz serije $0^\circ$ .....	48
Slika 49.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 35-45 iz serije $45^\circ$ .....	48
Slika 50.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 46-56 iz serije $45^\circ$ .....	49
Slika 51.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 57-67 iz serije $45^\circ$ .....	49
Slika 52.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 69-79 iz serije $90^\circ$ .....	50
Slika 53.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 80-90 iz serije $90^\circ$ .....	50
Slika 54.	Dijagram naprezanje-progib za uzorke 91-101 iz serije $90^\circ$ .....	51
Slika 55.	Kumulativna razdioba vrijednosti normaliziranog modula elastičnosti za skupinu $0^\circ$ .....	52
Slika 56.	Kumulativna razdioba vrijednosti normaliziranog modula elastičnosti za skupinu $45^\circ$ .....	53

---

Slika 57.	Kumulativna razdioba vrijednosti normaliziranog modula elastičnosti za skupinu 90° .....	53
Slika 58.	Kumulativna razdioba vrijednosti normalizirane savojne čvrstoće za skupinu 0°	55
Slika 59.	Kumulativna razdioba vrijednosti normalizirane savojne čvrstoće za skupinu 45° .....	55
Slika 60.	Kumulativna razdioba vrijednosti normalizirane savojne čvrstoće za skupinu 90° .....	56

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Građa uzdužnog i radijalnog sustava listača [1].....	12
Tablica 2. Kemijski sastav listača i četinjača [11] .....	15
Tablica 3. Vrijednosti modula elastičnosti za američku duglaziju [12] .....	16
Tablica 4. Rezultati mjerenja udjela vlage, mase i gustoće uzorka.....	38
Tablica 5. Dimenzije poprečnog presjeka uzoraka .....	42
Tablica 6. Rezultati ispitivanja savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće.....	46
Tablica 7. Statistički podaci za rezultate mjerenja savojnog modula elastičnosti za sve skupine.....	54
Tablica 8. Statistički podaci za rezultate mjerenja savojne čvrstoće za sve skupine .....	56
Tablica 9. Sažetak radova o savojnom modulu elastičnosti različitih vrsta drva.....	57
Tablica 10. Sažetak istraživanja o savojnom modulu elastičnosti različitih vrsta drva [32–37] .....	57
Tablica 11. Sažetak radova o savojnoj čvrstoći različitih vrsta drva .....	58

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$b$	mm	širina uzorka
$E_f$	MPa	savojni modul elastičnosti
$E_L$	MPa	modul elastičnosti - poprečni presjek
$E_R$	MPa	modul elastičnosti - radijalni presjek
$E_T$	MPa	modul elastičnosti - tangencijalni presjek
$f(x)$	-	funkcija gustoće vjerojatnosti Weibullove raspodjele
$G$	N/mm <sup>2</sup>	modul smicanja
$h$	mm	debljina uzorka
$m$	-	parametar oblika ili Weibullov modul
$m_1$	g	masa uzorka prije sušenja
$m_2$	g	masa uzorka nakon sušenja
$m_w$	g	masa pri nekom udjelu vlage
$R^2$	-	koeficijent determinacije
$V_w$	cm <sup>3</sup>	volumen pri nekom udjelu vlage
$w$	%	udio vlage
$x$	-	promatrana veličina (slučajna varijabla $\frac{\sigma}{\sigma_0}$ )
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$\rho_{12}$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća za udio vlage od 12 %
$\rho_{H_2O}$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća vode
$\rho_w$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća pri nekom udjelu vlage
$\sigma_0$	MPa	normalizirana savojna čvrstoća
$\sigma_f$	MPa	savojna čvrstoća

## SAŽETAK

U diplomskom radu istraženo je kako na savojni modul elastičnosti i savojnu čvrstoću tikovine u longitudinalnom smjeru, utječe kut između savojne sile i tangente na god. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti ispitani su metodom savijanja u tri točke. Optičkom mikroskopijom i računalnom tomografijom analizirana je mikrostruktura tikovine u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku.

Potvrđeno je da tikovina ima prstenasto poroznu mikrostrukturu. Gustoća tikovine iznosila je  $0,67 \text{ g/cm}^3$  uz udio vlage od 6,56 %.

Utvrđeno je da kut između savojne sile i tangente na god utječe na vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće u longitudinalnom smjeru. Najviše vrijednosti izmjerene su kod kuta od  $90^\circ$ , a najniže kod kuta od  $0^\circ$ . Vrijednosti savojnog modula elastičnosti nalaze se u rasponu od 13,28 GPa do 14,77 GPa, a vrijednosti savojne čvrstoće u rasponu od 138,53 MPa do 151,41 MPa. Koeficijent varijacije za savojni modul elastičnosti je u dopuštenim granicama, a za savojnu čvrstoću prelazi normom dopuštene vrijednosti. Rezultati su dobro opisani Weibullovom razdiobom, a najveći Weibullov modul je kod uzoraka gdje je kut između savojne sile i tangente na godove  $45^\circ$ . Koeficijent korelacije za sve kutove je viši od 0,97.

Ključne riječi: savojni modul elastičnosti, savojna čvrstoća, tikovina, Weibullova razdioba

## **SUMMARY**

In this thesis, it was investigated how the bending modulus of elasticity and bending strength of teak in the longitudinal direction is affected by the angle between the bending force and the tangent to the annual ring. Bending strength and bending modulus of elasticity were tested using the three-point bending method. The microstructure of teak in cross, radial, and tangential section was analyzed by optical microscopy and computed tomography.

It has been confirmed that teak has a ring-porous microstructure. The density of teak was  $0.67 \text{ g/cm}^3$  with a moisture content of 6.56%.

It was found that the angle between the bending force and the tangent to annual ring affects the values of the bending modulus of elasticity and bending strength in the longitudinal direction. The highest values were measured at an angle of  $90^\circ$ , and the lowest at an angle of  $0^\circ$ . The bending modulus values are in the range from 13.28 GPa to 14.77 GPa, and the bending strength values are in the range from 138.53 MPa to 151.41 MPa. The coefficient of variation for the bending modulus of elasticity is within the permissible limits, and for the bending strength it exceeds the permissible values. The results are well described by the Weibull distribution, and the largest Weibull modulus is found in samples where the angle between the bending force and the tangent to the grain is  $45^\circ$ . The correlation coefficient for all angles is higher than 0.97.

Key words: bending modulus of elasticity, bending strength, teak, Weibull distribution

## 1. UVOD

U inženjerstvu, jedan od ključnih preduvjeta za razumijevanje ponašanja materijala u eksploataciji je poznavanje odnosa strukture materijala i svojstava materijala. Obzirom na sastav, strukturu i svojstva materijali se obično dijele u četiri osnovne skupine: metali, polimeri, keramika i kompoziti.

Drvo se može promatrati kao prirodni kompozitni materijal koji se koristi u raznim tehničkim primjenama, od gradnje kuća i brodova do izrade namještaja i glazbenih instrumenata. Drvo kao materijal pruža estetsku vrijednost koja se teško može nadmašiti umjetnim materijalima. Svojom teksturom i raznim bojama, drvo se odlično uklapa u razne interijere i eksterijere. Također, drvo je obnovljiv izvor energije, što ga čini ekološki prihvatljivim izborom u današnjem svijetu koji teži održivosti. Zahvaljujući svojim iznimnim mehaničkim svojstvima, kao što su čvrstoća i otpornost na savijanje, drvo je omiljen materijal u raznim djelatnostima.

Drvo je anizotropan i heterogen materijal. Kod takvih materijala svojstva nisu jednaka u svim smjerovima i o tome treba voditi računa kako bi se iskoristio maksimalni potencijal drva kao konstrukcijskog materijala.

Osim toga, drvo ima sposobnost upijanja i otpuštanja vlage, što može utjecati na njegove dimenzije, mehanička i druga svojstva. To može biti izazov pri projektiranju konstrukcija od drva, posebice u vlažnim uvjetima.

Unatoč ovim izazovima, drvo se često koristi u inženjerstvu zbog svoje niske gustoće u odnosu na čvrstoću, što ga čini laganim i lako obradivim materijalom. Također, drvo ima dobra izolacijska svojstva, što ga čini pogodnim za primjenu u građevinskim konstrukcijama.

Suvremenim tehnologijama izrađuju se drvene konstrukcije koje su jednake čvrstoće kao one od čelika ili betona, ali znatno manje mase.

U ovom radu promatrat će se drvo tikovine koje se često koristi u izradi paluba brodova. U teorijskom dijelu rada naglasak će biti na strukturi i svojstvima drva dok će u eksperimentalnom dijelu rada biti istraženo kako usmjerenost mikrostrukture utječe na savojnu čvrstoću i savojni modul elastičnosti drva tikovine. Ispitivanje savojnih svojstava provest će se metodom savijanja u tri točke.

## 2. STRUKTURA DRVA

### 2.1. Botanička podjela drva

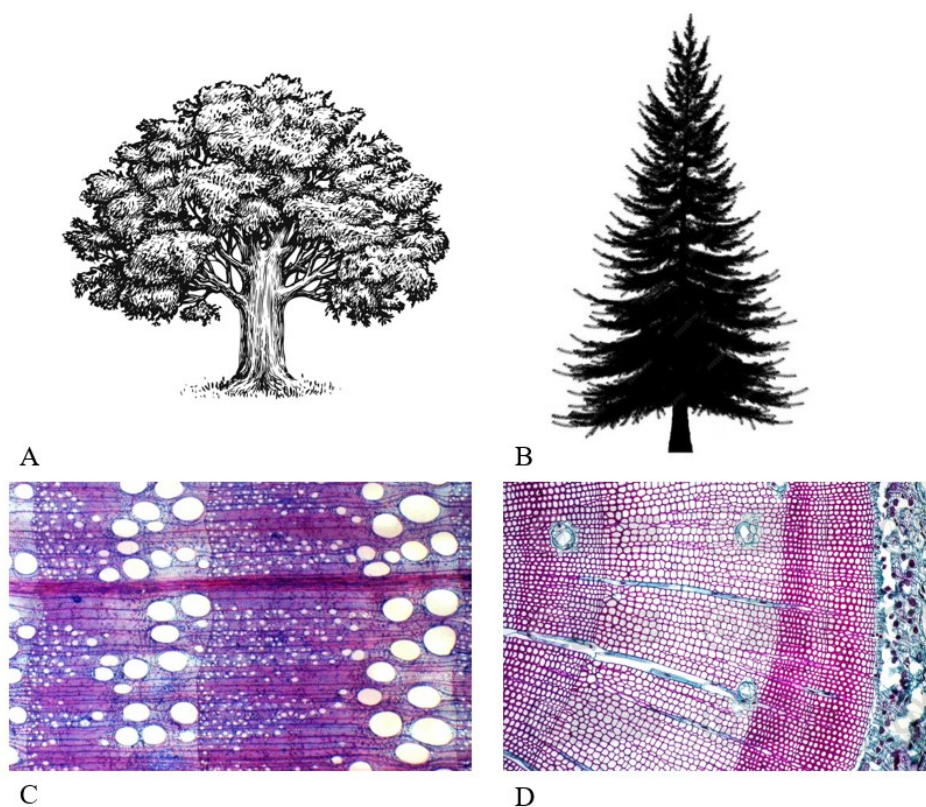
Botanički se drvo može podijeliti u dvije skupine: listače i četinjače.

**Listače** se nazivaju i tvrdo drvo (engl. *hardwood*) i pripadaju skupini kritosjemenjača (*Angiospermae*) koje imaju cvijet iz kojeg se razvija plod. Većini listača listovi opadaju u jesen. Neke listače koje rastu u Hrvatskoj su hrast lužnjak (lat. *Quercus robur*), hrast kitnjak (lat. *Quercus petraea*), obični grab (lat. *Carpinus betulus*), poljski jasen (lat. *Fraxinus angustifolia*).

**Četinjače** se nazivaju meko drvo (engl. *softwood*) i pripadaju skupini golosjemenjača (*Gymnosperms*). Rastu uglavnom na sjevernoj polutci Zemlje i većinom im lišće ne opada u hladnijem dijelu godine (zimzelene su). Neke najpoznatije četinjače su obični bor (lat. *Pinus sylvestris*), ariš (lat. *Larix*), smreka (lat. *Picea*), tisa (lat. *Taxus*), čempres (lat. *Cupressus*). Na slici 1. nalazi se primjer općenitog izgleda listače i četinjače te njihovi poprečni presjeci.

Sva stabla imaju tri dijela: korijen, deblo i krošnju. Korijen opskrbljuje drvo mineralima i hranjivim tvarima iz tla, ali i održava drvo stabilnim i čvrstim. Deblo također daje mehaničku potporu cijelom stablu, ali i prenosi vodu, minerale i hranjive tvari do svih ostalih dijelova drva. Krošnja je zadužena za obavljanje procesa fotosinteze putem listova te za održavanje optimalne količine vode u samoj biljci. Lišće na krošnji štiti plodove od atmosferskih uvjeta ili štetnih organizama [1].

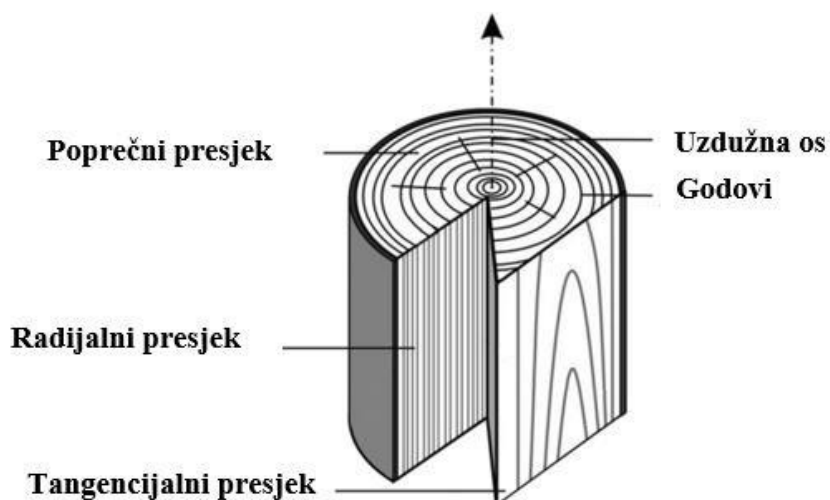




**Slika 1. A) Listača, B) Četinjača, C) Poprečni presjek listače (hrast), D) Poprečni presjek četinjače (bor) [2,3]**

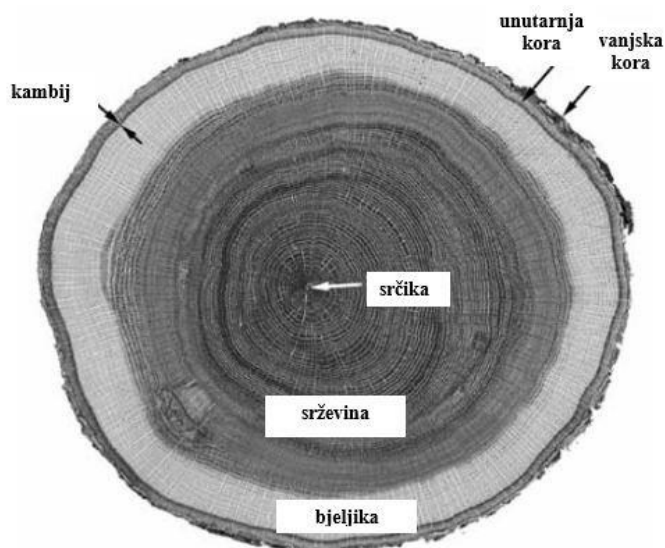
## 2.2. Tri karakteristična presjeka drva

Drvo se uglavnom promatra u tri karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom prikazanima na slici 2. Poprečni presjek okomit je na uzdužnu os debla i na vlakanca. Radijalni presjek nalazi se u ravnini polumjera i uzdužne osi debla. Tangencijalni presjek okomit je na radijalni i paralelan s uzdužnom osi debla i vlakancima. Drvo valja promatrati u sva tri presjeka kako bi se dobila realna slika mikrostrukture i svojstava drva [1].



Slika 2. Tri karakteristična presjeka drva [4]

Na slici 3. prikazan je poprečni presjek debla bijelog hrasta (lat. *Quercus alba*). Gledajući izvana prema unutra nalaze se sljedeći slojevi: vanjska kora, unutarnja kora, kambij, bjeljika, srževina i srčika [5].



Slika 3. Poprečni presjek debla bijelog hrasta [5]

Vanjska kora sprječava isušivanje unutarnje kore i štiti cijelo drvo. Unutarnja kora (floem) služi za prijenos produkata reakcije fotosinteze od lišća prema korijenu ili prema drugim dijelovima

drveta. Između kore i bjeljike nalazi se tanak sloj vaskularnog (žilnog) kambija koji svakog proljeća (na području naše klime) pokreće rast novog sloja drva (sekundarnog ksilema) prema unutra, a novog sloja unutarne kore (sekundarnog floema) prema van. Odnos širine floema i ksilema tijekom jedne vegetacijske sezone je otprilike 1:10. Bjeljika je živi sloj drva kroz koji se prenosi voda i mineralne tvari od korijenja sve do lišća. Ovdje se odvija sinteza i pohrana škroba i lipida što je direktno povezano s trajnošću i obradivošću drva. Bjeljika, kao što joj ime govori, svjetlije je boje od srčevine te se nalazi oko srčevine. U srčevini se nalaze različite biokemijske tvari koje nazivamo ekstraktivi koji produljuju trajnost srčevine. Ekstraktivne tvari kod većine vrsta čine srčevinu tamnijom od bjeljike, a mineralne tvari i voda ne mogu se prenositi kroz srčevinu. U sredini debla nalazi se srčika, tkivo iz početne faze razvoja stabla prije formiranja debla [1].

Jedričave vrste drva imaju srčevinu puno tamniju od bjeljike, a bakuljave vrste nemaju preveliku razliku u boji između srčevine i bjeljike. Primjer jedričave i bakuljave vrste drva prikazan je na slici 4.



Slika 4. Obični grab (lijevo) i šljiva (desno) [6]

### 2.3. Godovi

Drveće raste u visinu i širinu tijekom cijelog životnog vijeka. Primarni rast je rast u visinu, a sekundarni rast je rast u širinu odnosno debljinu. Na područjima s pravilnom izmjenom godišnjih doba, kao što je područje Republike Hrvatske, vaskularni kambij (koji je zadužen za rast drva) djeluje sezonski ili diskontinuirano. Drvno tkivo raste najintenzivnije u proljeće, a

onda rast opada i potpuno prestaje najkasnije do jeseni. Sekundarni ksilem je novi sloj drva koji tada nastane i to se naziva god [1].

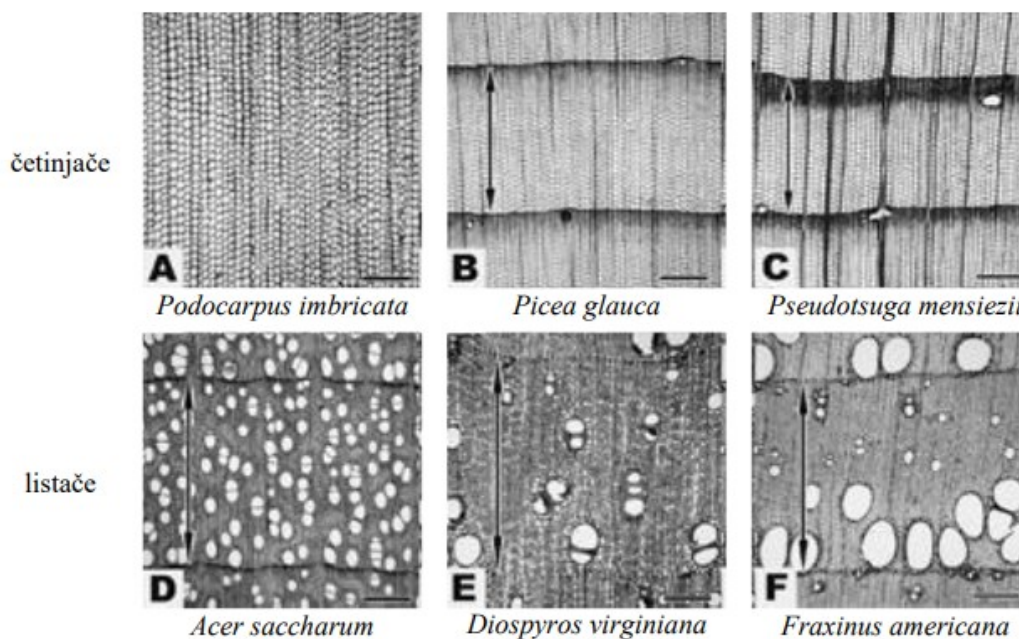
S druge strane, u vlažnim tropskim klimama kambij djeluje kontinuirano pa sve vrste ne moraju nužno imati godove. Tropske vrste koje imaju godove, poput tikovine, imaju šire godove tijekom vlažnog i hladnog dijela godine, dok su godovi uži tijekom suhih i vrućih dana.

Drvne stanice koje nastanu na početku vegetacijske sezone zovu se rani dio goda, a one stanice nastale kasnije u sezoni nazivaju se kasni dio goda.

Različite vrste drva pripadaju jednoj od tri skupine:

- Vrste drva kod kojih nije vidljiva razlika između stanica ranog i kasnog dijela goda
- Vrste drva kod kojih se promjer stanica postepeno smanjuje od ranog prema kasnom dijelu goda
- Vrste drva kod kojih se promjer stanica naglo smanjuje od ranog prema kasnom dijelu goda

Na slici 5. prikazani su primjeri za četinjače i za listače.



Slika 5. Karakteristični tipovi godova kod četinjača i listača [1]

A – ne vidi se prijelaz iz ranog u kasni dio goda

B – postepen prijelaz iz ranog u kasni dio goda

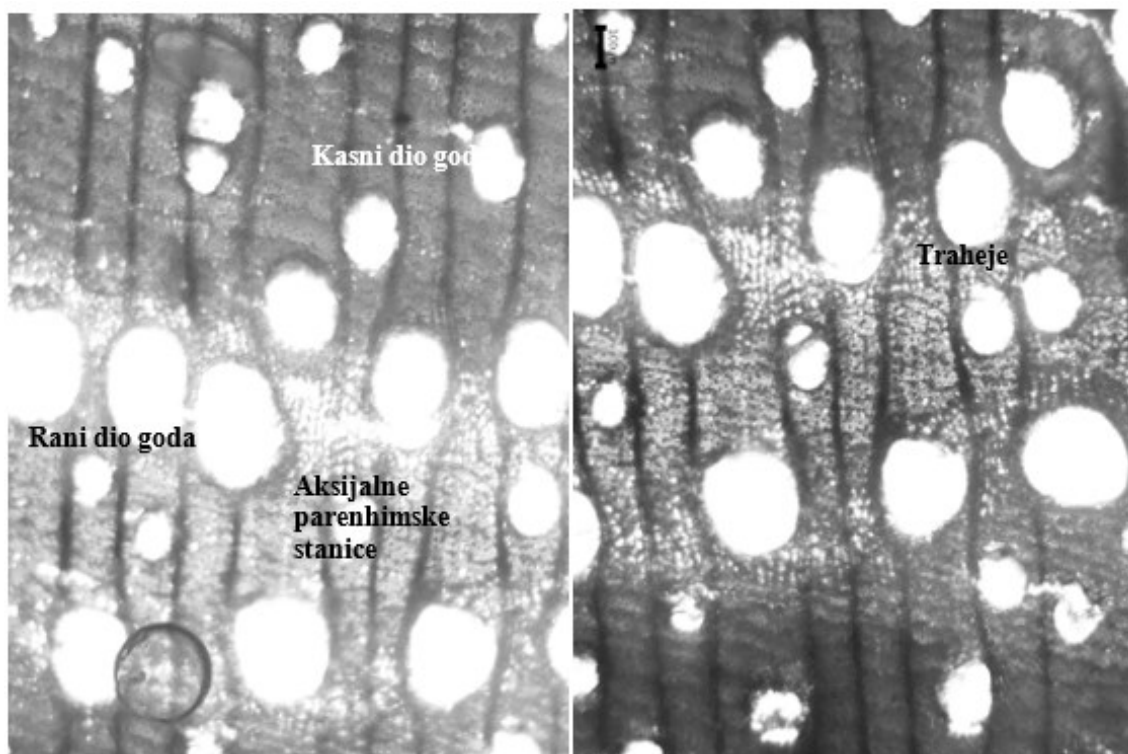
C – nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda

D – ne vidi se prijelaz iz ranog u kasni dio goda – difuzno ili rastresito porozno drvo

E – postepen prijelaz iz ranog u kasni dio goda – semi-difuzno porozno drvo

F – nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda – prstenasto porozno drvo

Četinjače su jednostavnije građe od listača i imaju markantije godove. Listače imaju velike provodne sudove koje nazivamo traheje ili pore. Traheje mogu biti raspoređene ravnomjerno po cijelom godu, slika 5.D, pa se to drvo naziva difuzno drvo. Kad su traheje „zbijene“ na rani dio goda radi se o prstenasto poroznom drvu, slika 5.F. Prijelazni oblik između difuznog i prstenasto poroznog drva prikazan je na slici 5.E i naziva se semi-difuzno porozno drvo [1]. Slika 6. prikazuje poprečni presjek tikovine gdje se vide traheje naglog prijelaza iz ranog u kasni dio goda stoga tikovina spada u prstenasto porozno drvo.



Slika 6. Poprečni presjek tikovine

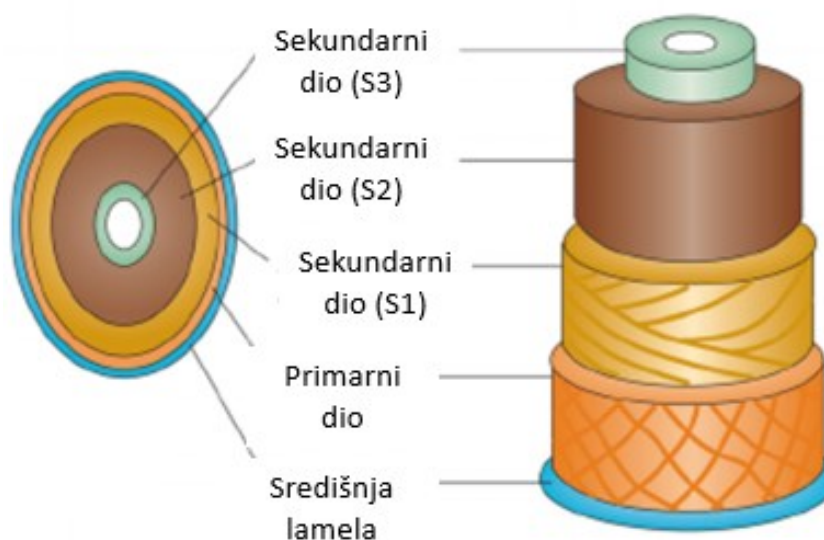
#### 2.4. Drvne stanice

Stanice od kojih se drvo sastoji su biljne stanice i imaju dva glavna dijela: protoplast i staničnu stijenku. Protoplast je omeđen staničnom membranom i predstavlja živi dio stanice. Stanična

stijenka je sastavljena većinom od ugljikohidrata i predstavlja neživi dio stanice. Ona štiti protoplast i pruža mu potporu i čvrstoću. Navedeni opis biljne stanice je poprilično općenit te je građa stanice malo složenija kad je drvo u pitanju.

Naime, kako bi drvene stanice postigle potpunu zrelost, one potpuno gube protoplaste. Iako to biološki nije ispravno, većinom se ta struktura naziva drvnom stanicom iako nema protoplaste. Kad drvena stanica dosegne svoju zrelost, prazno mjesto na kojem su bili protoplasti zove se lumen. Dakle, drvene stanice sastoje se od već spomenute stanične stijenke i lumena. Lumen je izrazito bitan za higroskopna svojstva drva i za formiranje drvnih kompozita [5].

Stanična stijenka je čvrsta i propusna ovojnica oko lumena koja štiti stanični sadržaj i daje oblik stanici. Sastoji se od središnje lamele te primarnog i sekundarnog dijela stijenke, prikazanih na slici 7. [1].

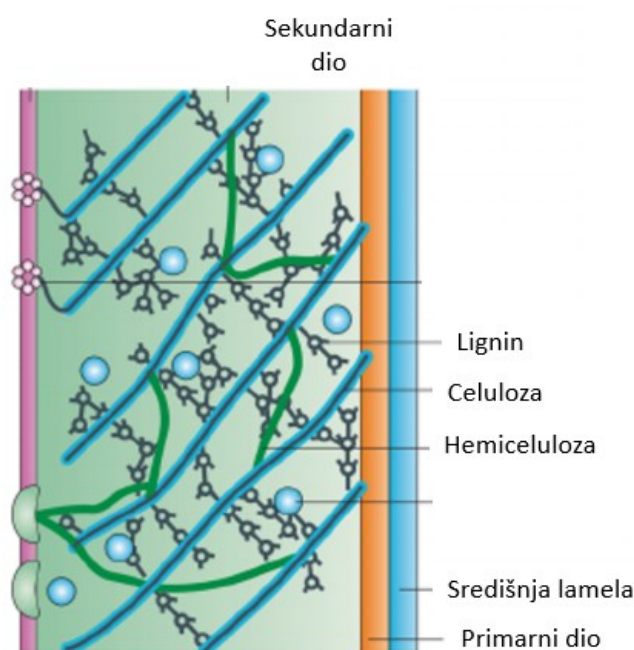


**Slika 7. Dijelovi stanične stijenke [7]**

Sekundarni dio stijenke sastoji se od tri sloja koja se razlikuju po debljini. Prvi sloj sekundarnog dijela stijenke, označen sa S1 je tanak, a celulozna vlakna su usmjerena pod kutom od  $50^\circ$  do  $70^\circ$  u odnosu na središnju os stanice. Drugi sloj sekundarnog dijela stijenke, označen sa S2 najdeblji je sloj i ključan je za svojstva same stanične stijenke i drva na makroskopskoj razini. Kut između celuloznih mikrovlakana i središnje osi je između  $5^\circ$  i  $30^\circ$ , a udio lignina je manji nego u središnjoj lameli i primarnoj stijenci. Ispod sloja S2 nalazi se treći sloj sekundarne stanične stijenke, označen sa S3 koji sadrži još manje lignina, relativno je tanak, a mikrovlakna

su smještena pod kutom većim od  $70^\circ$ . Lignin je građen od hidrofobnih makromolekula, a njegova se koncentracija smanjuje od središnje lamele prema lumenu kako bi se olakšao prijenos vode i transpiracija u živom drvu.

Sva tri dijela stanične stijenke sastoje se od celuloze, hemiceluloze, pektina i lignina, a prikazani su na slici 8. Duge makromolekule celuloze posložene su kristalnim rasporedom u strukture koje nazivamo micela. Dvadesetak micela čine celulozne mikrovlakna (mikrofibrile). Mikrovlakna pri grupiranju čine makrovlakna (makrofibrile), a između njih nalazi se prostor u koji kapilarno može ući voda. Celuloza i hemiceluloza se nalaze u prostoru koji okružuje matrica od pektina i od lignina. Središnja lamela je prostor između susjednih stanica i sastoji se od lignina. Središnja lamela služi za prijenos vode i biokemijskih tvari između susjednih stanica [1].



Slika 8. Dijelovi stanične stijenke [7]

## 2.5. Jažice

Jažice (pitovi) su dijelovi stanične stijenke kroz koje se obavlja transport tvari iz jedne u drugu stanicu. Jažica je sa strane gdje je okrenuta prema praznom prostoru stanice (lumen) otvorena, a sa strane prema drugoj, susjednoj stanici je zatvorena pomoću membrane. Jažice su nezadebljana mjesta, poput plitkih jamica, kod maloga zadebljanja, a pri jačem zadebljanju stijenki, jažice postaju cjevasti kanalići [8].

## 2.6. Mikrostruktura četinjača

Četinjače imaju jednostavniju mikrostrukturu od listača. Vertikalno se nalaze traheide, a radijalno su parenhimske stanice u drvnim tracicima.

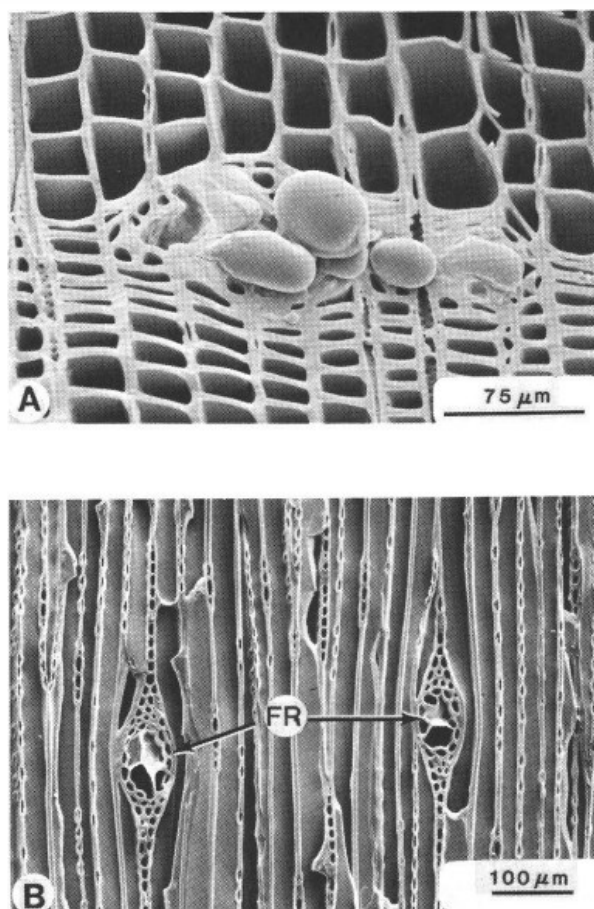
Traheide su duge stanice s velikim omjerom duljine i širine i orijentirane su uzduž osi debla. One provode vodu i daju potporu građi stanice. Traheide čine preko 90 % drva četinjača. Većinom su pravokutnog oblika u poprečnom presjeku. Rani dio goda ima traheide s tanjom stijenkom i većim lumenom, dok traheide kasnog dijela goda imaju deblje stanične stijenske i manji lumen. Razlog tome je što u prvom dijelu godine biljka ima više vode pa je stijenka tanja kako bi se voda lakše transportirala u drugu stanicu od korijena prema drugim dijelovima. S vremenom količina vode opada pa sukladno tome lumen postaje manji, a stijenka stanice deblja. Takve stanice pridonose većoj mehaničkoj otpornosti drva. Voda i otopljene tvari prelaze iz jedne u drugu stanicu u gore spomenutim jažicama. Jažice usporavaju provođenje vode i tvari, a traheide su uske pa je provodnost vode kod četinjača slabija u usporedbi s listačama.

Neke vrste četinjača, uz traheide imaju i parenhimske stanice, ali u vrlo malom udjelu. Parenhimske stanice su tamnijeg lumena od traheida jer u lumenu talože organske tvari.

Smolni kanali ili smolenice sastoje se od šupljine okružene parenhimskim stanicama koje proizvode smolu [1].

Na slici 9. prikazana je smolenica drva smreke. Ti kanali se većinom i pojavljuju kod borova, smreka, ariša i duglazija, ali mogu se pojaviti i kod drugih vrsta u slučaju mehaničkog oštećenja ili bolesti.





Slika 9. Smolni kanali drva smreke (lat. *Picea*) - SEM prikaz [9]

Drvni traci usmjereni su radijalno, od srčike debla prema kori. Sastoje se od parenhimskih stanica prizmatičnog oblika, a sudjeluju u sintezi, skladištenju i lateralnom transportu hranjivih tvari i vode kroz drvo. Parenhimske stanice u drvnim tracima slažu se jedna na drugu. Tamo gdje se parenhimske stanice sijeku s aksijalnim traheidama nastaju posebne jažice koje se razlikuju od drva do drva. One vrste drva koje imaju smolne kanale, u drvnim tracima mogu imati i traheide (osim parenhimskih stanica). Također, neke vrste koje nemaju smolenice isto mogu imati traheide u svojim drvnim tracima [1].

## 2.7. Mikrostruktura listača

Mikrostruktura listača puno je složenija od mikrostrukture četinjača. U tablici 1. navedeni su dijelovi uzdužnog odnosno aksijalnog i radijalnog sustava listača. Svaki dio je različitog oblika i rasporeda čime direktno utječe na svojstva drva te svaki dio ima svoju ulogu.

Tablica 1. Građa uzdužnog i radijalnog sustava listača [1]

Uzdužni/aksijalni sustav	Radijalni sustav
Drvena vlakanca	Parenhimske stanice
Traheje	
Traheide	

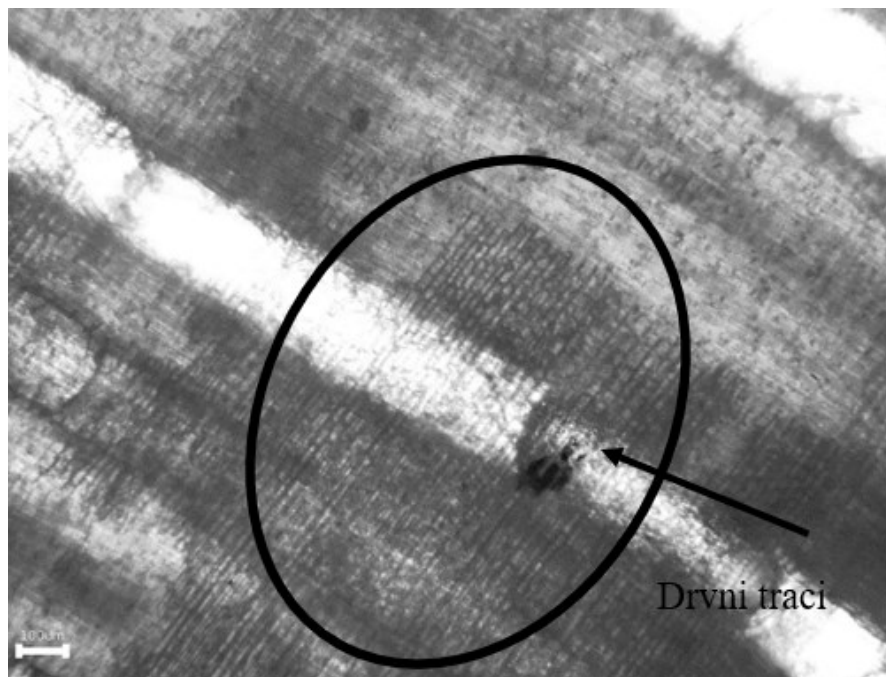
**Drvena vlakanca** su duge stanice s uskim lumenom i debelom stijenkom. Dulja su od traheja, ali kraći od traheida kod četinjača. Gustoća vrste ovisi o debljini stijenke i lumena: deblja stijenka i uski lumen karakteriziraju drva veće gustoće i čvrstoće (jasen, bukva, brijest), a tanja stijenka i širi lumen su karakteristični za drva niže gustoće i čvrstoće (balza, topola, lipa). Gustoća listača je između 100 i 1400 g/cm<sup>3</sup> (za 12 % vlage), a gustoća četinjača između 300 i 800 g/cm<sup>3</sup> [1].

**Traheje** su stanice listača koje provode vodu i otopljene mineralne soli. Promjer u poprečnom presjeku traheja većinom je između 50 i 200 μm, a duljina između 100 i 1200 μm. Traheide su kraće od traheja. Traheje su kod difuzno-poroznih vrsta ravnomjerno raspoređene po cijeloj širini goda dok su kod prstenasto-poroznih vrsta grupirane u ranom dijelu [1].

**Parenhimske stanice** su stanice velikog lumena i tanje stijenke. Građa im je jednaka i kod listača i kod četinjača, ali su kod listača češće, a kod četinjača vrlo rijetke.

**Traheide** se nalaze samo kod nekih vrsta i isto kao traheje, provode vodu i pružaju mehaničku stabilnost.

**Drvni traci** tikovine u radijalnom presjeku prikazani su na slici 10. Vidi se da su stanice jednakih oblika, ali mogu biti i različitih.



Slika 10. Radijalni presjek tikovine

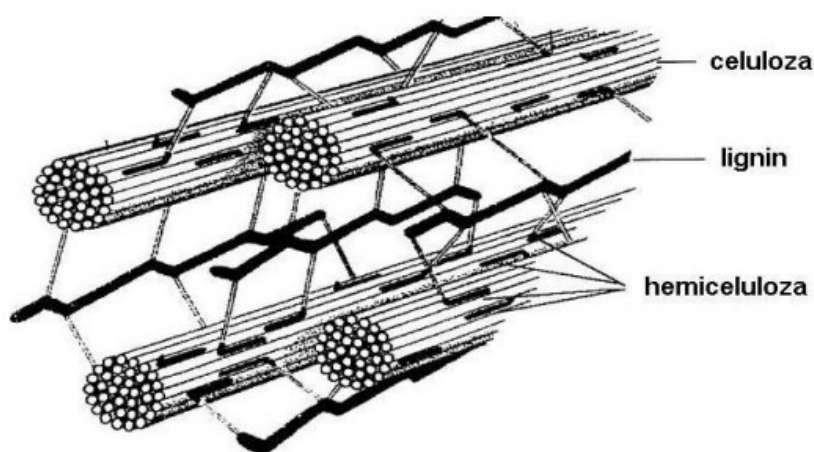
### 3. KEMIJSKI SASTAV DRVA

Drvo je biopolimerni kompozit prikazan na slici 11. Sastavljen je od lignina, celuloze i hemiceluloze te vrlo malog sadržaja ekstraktiva i anorganskih tvari. Voda je dio živog drva, a suha drvena tvar odnosno stanična stijenka većinom se sastoji od polimera – ugljikohidrata s ligninom. Gledajući kemijske elemente, u suhoj drvnoj tvari nalaze se ugljik, kisik i vodik te drugi kemijski elementi u tragovima [1].

#### 3.1. Ugljikohidrati u drvu

Celuloza je polimer sastavljen od ugljikohidrata i najčešći je polisaharid i organski spoj na Zemlji. Celuloza se sastoji od tisuća glukoznih jedinica  $-C_6H_{12}O_6-$  koje su poredane u lance duge oko 5  $\mu\text{m}$ . Molekule su nasumično raspoređene, ali porastom gustoće se molekule sve uređenije slažu pa struktura postaje manje amorfna (oko 35 %), a više kristalična (65 % ukupne mase). Celuloza je povezana s ligninom i hemicelulozom i nije topiva u jakim lužinama, već u jakim kiselinama. Četinjače imaju između 40 i 45 % celuloze, a listače između 38 i 49 % [1].

Hemiceluloza ima puno manji stupanj polimerizacije nego celuloza. Razgranata je i lako se otapa u lužinama. Četinjače imaju nešto manje hemiceluloze, između 7 i 14 %, dok listače imaju između 19 i 26 %. Pektin, škrob i proteini su ostali ugljikohidrati u listačama i četinjačama [1].



Slika 11. Shematski prikaz stanične stijenke [10]

### 3.2. Lignin

Lignin je polimer koji povećava krutost i stabilnost stanične stijenke. Struktura lignina varira od vrste do vrste drva, kao i udio u suhoj drvnoj tvari. Kod četinjača ga ima između 25 i 35 %, a kod listača između 18 i 25 % [1].

### 3.3. Ekstraktivi

Ekstrahirane tvari su različite masti, smola, vosak i ostale tvari ekstrahirane iz biljnih sokova. Boja, miris i trajnost drva ovise o vrsti i udjelu ekstrakтива [1].

U tablici 2. prikazan je udio gore navedenih komponenti kemijskog sastava listača i četinjača.

**Tablica 2. Kemijski sastav listača i četinjača [11]**

Sastav	Listače	Četinjače
Celuloza	38 – 49 %	40 – 44 %
Hemiceluloza	15 – 35 %	30 – 32 %
Lignin	18 – 25 %	25 – 32 %
Ekstraktivi	2 %	5 %

## 4. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA

Drvo je prirodan materijal stoga mu svojstva variraju unutar različitih vrsta pa čak i unutar iste vrste. Mehanička svojstva drva ovise o udjelu vlage, temperaturi, kemijskoj obradi i načinu opterećenja drva. Svojstva drva ovise i o usmjerenosti strukture [1].

### 4.1. Modul elastičnosti E

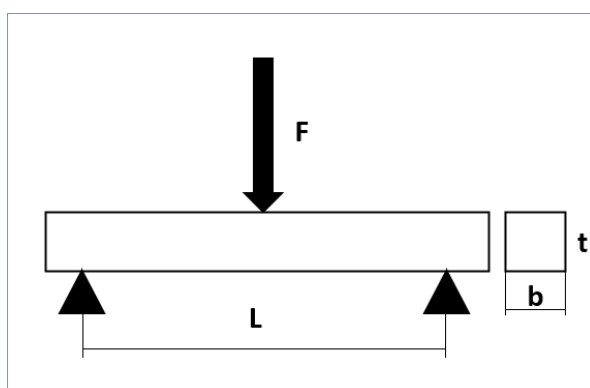
Modul elastičnosti razlikuje se u tri karakteristična presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Modul elastičnosti predstavlja otpornost materijala prema elastičnoj deformaciji. Najviše vrijednosti modula elastičnosti su u longitudinalnom smjeru koji je paralelan s osi debla, dok su na druge dvije osi vrijednosti niže [3]. Navedene razlike u vrijednostima modula elastičnosti za američku duglaziju (lat. *Pseudotsuga menziesii*) prikazane su u tablici 3. U tablici su navedene vrijednosti modula elastičnosti u sva tri različita smjera, za puno drvo, rani i kasni dio goda. Najviše vrijednosti modula elastičnosti izmjerene su u longitudinalnom smjeru u kasnom dijelu goda, a najniže vrijednosti modula elastičnosti izmjerene su kod ranog dijela goda u tangencijalnom smjeru. Vrijednosti modula elastičnosti za rani dio goda puno su manje u svim smjerovima u odnosu na vrijednosti modula elastičnosti za kasni dio goda zbog niže gustoće [12].

**Tablica 3. Vrijednosti modula elastičnosti za američku duglaziju [12]**

Svojstvo	Puno drvo	Rani dio goda	Kasni dio goda
$E_T$ , MPa	620	152	1215
$E_R$ , MPa	960	566	1752
$E_L$ , MPa	14500	10400	20700

### 4.2. Savojni modul elastičnosti i savojna čvrstoća

Sve što je vezano uz ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti propisano je normama. Najčešće se određivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti provodi standardnom metodom u tri točke po normi ISO 130161. Shematski prikaz ovog ispitivanja prikazan je na slici 12.



Slika 12. Savojno ispitivanje metodom u tri točke

Izraz prema kojem se računa vrijednost savojnog modula elastičnosti je (1) [13]:

$$E_f = \frac{L^3 * (F_2 - F_1)}{4 * b * h^3 * (a_2 - a_1)}, \text{ MPa} \quad (1)$$

gdje je:

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$b$  – širina uzorka, mm

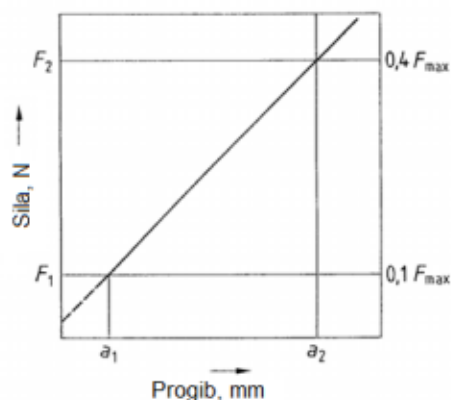
$h$  – visina uzorka, mm

$(F_2 - F_1)$  – prirast sile u području gdje je ovisnost sila-progib linearna

$F_1 \approx (0,1 \times F_{\max})$  i  $F_2 \approx (0,4 \times F_{\max})$ , N

$F_{\max}$  – maksimalna sila, N

$(a_2 - a_1)$  – prirast progiba (odgovara razlici  $(F_2 - F_1)$ ), prikazan na slici 13.



Slika 13. Određivanje savojnog modula elastičnosti [1]

Vrijednosti savojnog modula elastičnosti u tri karakteristična smjera (longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom) se dosta razlikuju, a kod nekih vrsta vrijednosti savojnog modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru ovise i o kutu između savojne sile i tangente na godove. Taj kut može biti u rasponu od 0 do 90 stupnjeva [14].

U nekoliko znanstvenih radova istraživao je ovaj utjecaj na različitim vrstama drva. U radu „Utjecaj usmjerenosti strukture na savojni modul elastičnosti drva hrasta lužnjaka u longitudinalnom smjeru“ najviši savojni modul elastičnosti dobiven je za skupinu gdje je kut između savojne sile i tangente na god 0°, a najniži savojni modul elastičnosti za skupinu u kojoj je kut između savojne sile i tangente na god 90° [15].

Rede i dr. u svom radu su ispitivali savojni modul elastičnosti subfosilnog drva brijesta. Orijentacija goda tijekom savojnog ispitivanja također je imala veliki utjecaj na vrijednosti savojnog modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru. Najviše vrijednosti savojnog modula elastičnosti su bile za skupinu uzoraka gdje je savojna sila s tangentom na god radila kut od 45°, dok su vrijednosti za kutove 0° i 90° bile niže i međusobno slične [16].

Savojna čvrstoća je najveće unutarnje naprezanje tijela koje je učvršćeno na jednom ili oba kraja koje se javlja na to tijelo dok na njega djeluje vanjska sila koja ga nastoji dovesti do loma. U slučaju metode savijanja u tri točke, savojna sila djeluje na sredini između dva oslonca te je gornji dio uzorka opterećen tlačno, a donji dio uzorka je opterećen vlačno. Ispitivanje savojne čvrstoće drva traje do trenutka loma uzorka.

Prema normi ISO 13061 savojna čvrstoća se računa prema izrazu (2):

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \text{ MPa} \quad (2)$$



gdje je:

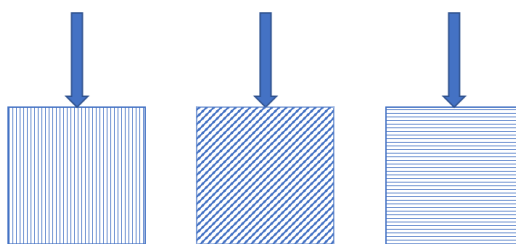
$F_{\max}$  – maksimalna sila, N

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$b$  – širina uzorka, mm

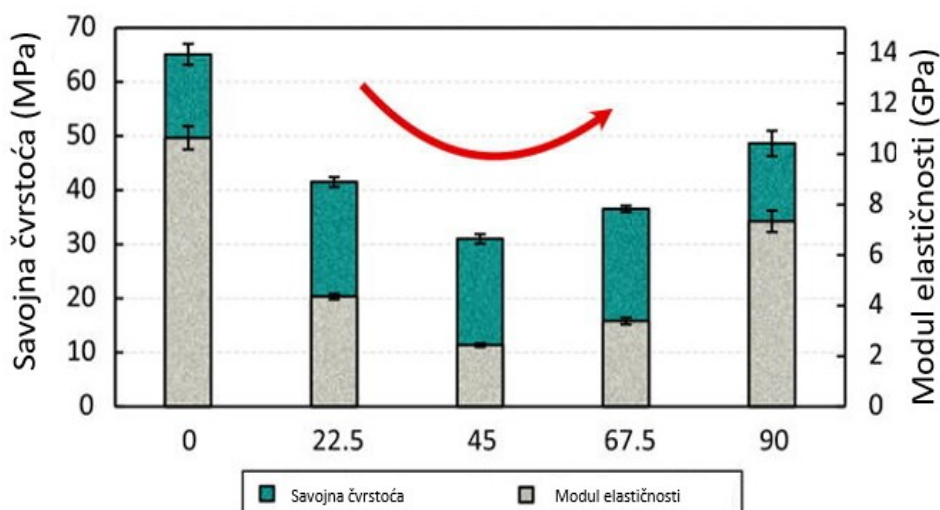
$h$  – visina uzorka, mm.

Kao i ostala svojstva drva, savojna čvrstoća ovisi o usmjerenosti strukture, a najviša je u longitudinalnom smjeru. Kod nekih vrsta drva kut koji zatvara savojna sila s tangentom na god ima utjecaj na vrijednosti savojne čvrstoće u longitudinalnom smjeru kao što je i prikazano u već provedenim istraživanjima. Kao i modul elastičnosti, najčešće se mjeri pri kutovima od  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$  što je prikazano na slici 14.



**Slika 14. Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$**

Prema istraživanju Wanga i suradnika, na slici 15. prikazane su vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti u ovisnosti o kutu koji zatvara savojna sila s tangentom na god za šperploču drva obične breze (lat. *Betula pendula*). Kad savojna sila, u odnosu na tangentu na god, djeluje pod kutom od  $0^\circ$  stupnjeva vrijednosti su najviše. Malo niže vrijednosti očitane su pri  $90^\circ$ , dok je ispitivanje na  $45^\circ$  pokazalo najniže vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti [17].



Slika 15. Ovisnost savojne čvrstoće i modula elastičnosti o kutu između savojne sile i tangente na god [17]

#### 4.3. Poissonov koeficijent $\nu$

Poissonov koeficijent ili omjer je bezdimenzijska veličina koja govori o odnosu poprečne i uzdužne deformacije za neki određen materijal tijekom aksijalnog opterećenja. Ako je materijal opterećen u smjeru jedne osi, on će se širiti u smjeru druge dvije osi. Stoga je potrebno čak šest Poissonovih koeficijenata da bi se opisalo elastično ponašanje drva. Prvo slovo u indeksu označava smjer sile koja djeluje na materijal dok drugo slovo označava smjer poprečne deformacije:  $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{RL}$ ,  $\nu_{LT}$ ,  $\nu_{TL}$ ,  $\nu_{RT}$ ,  $\nu_{TR}$  [1].

#### 4.4. Modul smicanja G

Ovo mehaničko svojstvo govori o otpornosti materijala smičnom opterećenju. Modul smicanja označava se s  $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$ ,  $G_{RT}$  redom u ravninama LR, LT i RT. Primjerice,  $G_{LR}$  je modul smicanja za deformaciju u ravnini LR i smično naprezanje u ravninama LT i RT. Modul smicanja također ovisi o raznim faktorima i varira od vrste do vrste [5].

#### 4.5. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća predstavlja najveće naprezanje koje uzorak može podnijeti pri djelovanju sile okomite na podlogu na kojoj se uzorak nalazi. Čvrstoća se razlikuje u smjeru vlakancija i u smjeru okomito na vlakanca. U pravilu, ako tlačna sila djeluje u smjeru vlakancija, čvrstoća je

3 do 10 puta veća, nego čvrstoća kad tlačna sila djeluje okomito na vlakanca. Također, tlačna sila u smjeru vlakanca puno je manja od vlačne čvrstoće u tom istom smjeru [5].

#### **4.6. Smična čvrstoća**

Smično naprezanje rezultat je usporednog djelovanja dviju suprotnih sila koje određuju ravninu smicanja. Smična čvrstoća u smjeru vlakanca drva manja je od smične čvrstoće okomito na vlakanca [1].

#### **4.7. Vlačna čvrstoća**

Vlačna čvrstoća predstavlja omjer najveće postignute sile pri vlačnom opterećenju uzorka i početnog presjeka ispitnog uzorka. Vlačna čvrstoća u smjeru vlakanca veća je od vlačne čvrstoće okomito na vlakanca. Budući da je drvo prirodan materijal, nerijetko ima kvрге i udubine u strukturi što uvelike utječe na vrijednosti vlačne čvrstoće i na rasipanja rezultata pri mjerenju [1].

#### **4.8. Žilavost**

Žilavost je mehaničko svojstvo koje pokazuje sposobnost materijala da se plastično deformira prije nego što dođe do loma pri udarnom opterećenju. Materijale koji se deformiraju plastično nazivamo duktilnima, dok su krhki materijali oni koji pucaju bez prethodne plastične deformacije. Svojstvo žilavosti drva ovisi o usmjerenosti strukture. Žilavost je najniža (drvo je krhkije) kad je udarac tangencijalan na godove, a žilavost je najviša (drvo je duktilnije) kad je udarac u radijalnom smjeru [1].

Lomna žilavost govori o širenju pukotina koje već postoje u materijalu. Sadržaj vlage u drvu utječe na vrijednost lomne žilavosti. Najviše vrijednosti lomne žilavosti dobivene su kod udjela vlage od 6 do 15 %, a za više ili niže vrijednosti sadržaja vlage, vrijednost lomne žilavosti opada [1].

#### **4.9. Tvrdoća**

Tvrdoća predstavlja otpor prodiranju tvrdog materijala. Gabriel Janka osmislio je metodu za određivanje tvrdoće pomoću čelične kuglice promjera 11,28 milimetara koja prodire u uzorak te se mjeri sila prodiranja. Kuglica tog promjera čini površinu kruga od 100 mm<sup>2</sup>.

Kao i kod ostalih materijala i kod drva se koristi metoda za određivanje tvrdoće po Brinellu. U uzorak se utiskuje čelična kuglica silom od 500 N (meko drvo) ili 1000 N (tvrde drvo).

Tvrdoća po Brinellu računa se prema izrazu (3):

$$HB = \frac{2 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

gdje je:

$HB$  – Tvrdoća po Brinellu

$F$  – sila utiskivanja kuglice, N

$D$  – promjer kuglice, mm

$d$  – promjer otiska kuglice, mm.

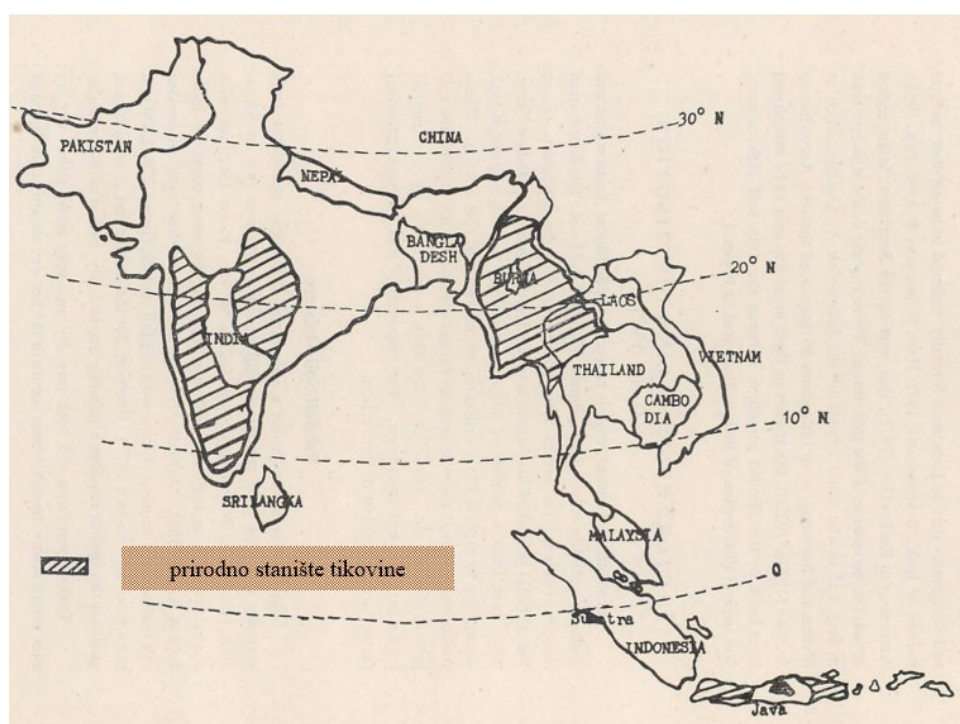
Mjerenje tvrdoće metodom po Brinellu prikazano je na slici 16. Gustoća ima utjecaj na tvrdoću i u pravilu one paralelno rastu. Također, tvrdoća je viša na kasnijim dijelovima goda, koji imaju i višu gustoću. Tvrdoća poprečnog presjeka drva približno je 1,6 do 2,5 puta veća od tvrdoće mjerene po radijalnom ili tangencijalnom presjeku [1].



**Slika 16. Ispitivanje tvrdoće tikovine**

## 5. TIKOVINA

Tikovina (lat. *Tectona grandis*) prirodno raste u Indiji, Burmi, Tajlandu i Laosu što je i prikazano na slici 17. Rasprostranjenost tikovine nije kontinuirana jer na njen rast utječu mnogi faktori poput količine padalina, vlažnosti zraka, tlaka, temperature, svjetlosti i dr. U Indoneziju je donesena prije 400 do 600 godina. Kao jedna od najvrjednijih tropskih vrsta, koristi se za brodogradnju, namještaj i brojne druge svrhe. Tikovinu karakterizira niska gustoća, visoka čvrstoća i izdržljivost, otpornost na oblikovanje bez pucanja i cijepanja, otpornost na gljivice i termite, razne vremenske uvjete i antikorozivnost [18].



Slika 17. Prirodna staništa tikovine [18]

### 5.1. Uvjeti rasta tikovine

Tikovina raste brže u vlažnim uvjetima, nego u suhim. Za rast veće količine tikovine, najprikladnija su područja s godišnjom količinom padalina od 1250 do 2500 mm/m<sup>2</sup>, uz suhi period godine od 3 do 5 mjeseci.

Prema istraživanjima u kontroliranim uvjetima, optimalna temperatura za bolji rast i razvoj tikovine je između 27 °C i 36 °C tijekom dana i između 20 °C i 30 °C tijekom noći. U prirodi,

ova vrsta raste najbolje na području gdje temperatura varira od 13 °C u najhladnijem mjesecu do 40 °C u najtoplijem mjesecu.

Tikovina za rast treba svjetlost. Intenzitet svjetlosti od 75 % do 95 % najpovoljniji je za tikovinu. Dužina dana, posebno u tropskom području, ima mali utjecaj na rast i razvoj tikovine. Geološka formacija ima veliki utjecaj na rast tikovine. Najpogodnija su tla iz stijena vulkanskog podrijetla dok su tla pjeskovitih stijena neprikladna za rast tikovine.

pH-vrijednost tla ograničava rast tikovine na nekim područjima. Tikovina uspijeva na neutralnim ili blago alkalnim područjima gdje je pH-vrijednost između 6,5 i 7,5.

Za rast tikovine potreban je kalcij iz tla. Također, potrebne su i organske tvari i dušik. Iako nema puno podataka o tome, u tikovini su pronađeni fosfor i silicij [18].

## 5.2. Svojstva tikovine

Tikovina je listopadno drvo koje može biti visoko i do 40 metara. Listovi su veliki, sjajni i eliptični, a cvjetovi su mali i bijele boje. Plod je zelen, dlakav i drvenast.

Tikovo drvo je zlatno smeđe boje kad je tek izrezano. Kako vrijeme prolazi i kako se tikovina suši, postaje više smeđa i crvenkasta. Tikovina je prirodno puna ulja što se može osjetiti pri samom dodiru.

### 5.2.1. Mehanička i fizikalna svojstva

Rizanti i ostali su 2018. godine istraživali promjenu svojstava tikovine ovisno o trajanju rotacije u gospodarenju šumama. Trajanje rotacije se odnosi na vremenski period (broj godina) koje drvo ima prije nego što se posiječe. Tikovina dugog trajanja ima više vrijednosti gustoće i čvrstoće. Dulje razdoblje rasta omogućuje drvetu da formira kompaktnije godove i veći postotak tamnog tkiva srčevine koje je poznato po izdržljivosti i otpornosti na truljenje. S komercijalne strane, tikovini dugog trajanja vrijednost raste zbog bolje kvalitete koja se traži u industriji namještaja, brodova i podova. Također, duže razdoblje rasta pridonosi očuvanju ekosustava jer se drvo siječe rjeđe [19].

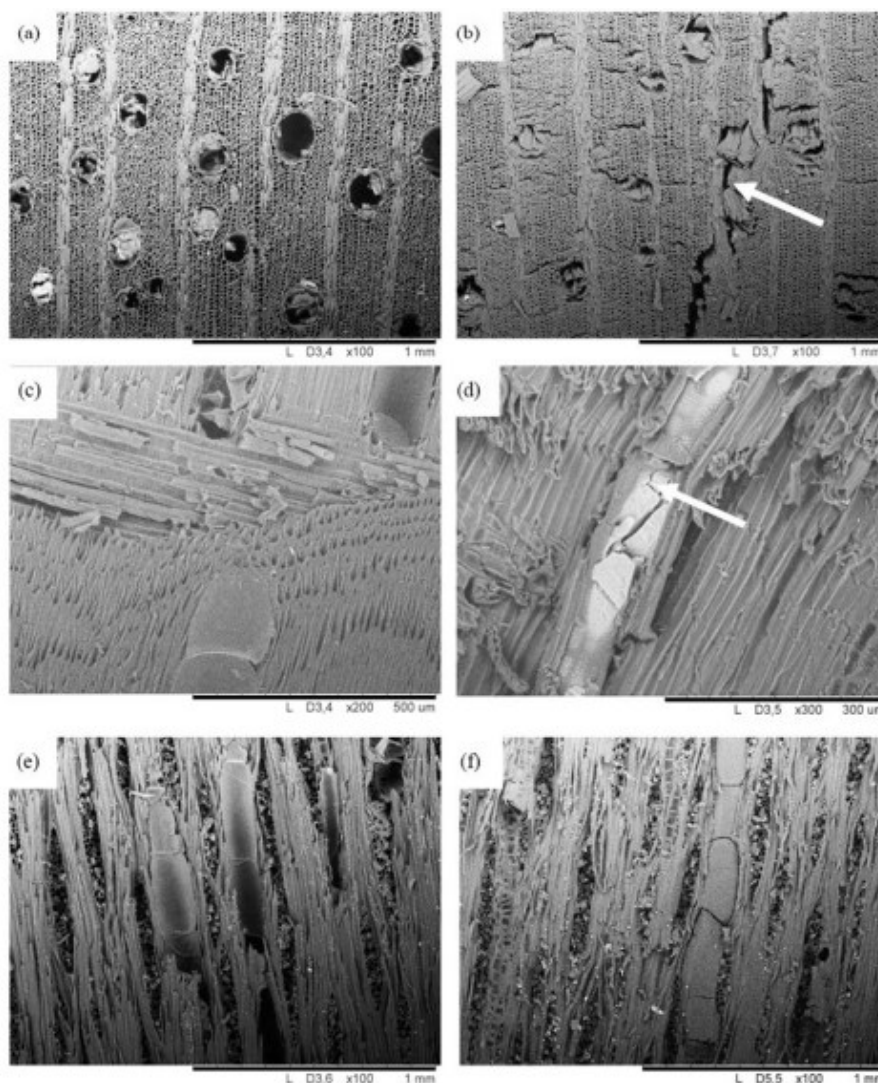
Gustoća tikovine dugog trajanja iznosila je 664 kg/m<sup>3</sup>, a gustoća tikovine kratkog trajanja 472 kg/m<sup>3</sup>. Gustoća je mjerena pri udjelu vlage od 12 do 15 % [19].

U istom radu autori su odredili savojni modul elastičnosti i savojnu čvrstoću za tikovinu dugog i kratkog trajanja. Korišteni su uzorci dimenzija 5 mm × 20 mm × 200 mm i metoda savijanja

u tri točke. Iznos srednje vrijednosti savojnog modula elastičnosti kod tikovine dugog trajanja iznosio je 12,86 GPa i bio je puno viši od vrijednosti savojnog modula tikovine kratkog trajanja koji je iznosio 9,93 GPa. Iznos savojne čvrstoće kod tikovine dugog trajanja je 102 MPa, a kod tikovine kratkog trajanja 77 MPa. Juvenilno drvo pokazuje nižu gustoću, čvrstoću i otpornost na lom [19].

Također je određena tvrdoća po Brinellu na tangencijalnom i radijalnom presjeku. Promjer kugle iznosio je 10 mm, a sila utiskivanja iznosila je 1960 N. Tvrdoća je kod tikovine dugog trajanja iznosila oko 35,2 HB, dok je kod tikovine kratkog trajanja iznosila 27,9 HB. Veća vrijednost tvrdoće je zbog veće gustoće kod tikovine dugog trajanja [19].

Bhat i suradnici 2004. zaključili su da se kod tikovine prijelaz od mlađeg do zrelog drva odvija između 20. i 25. godine [20].

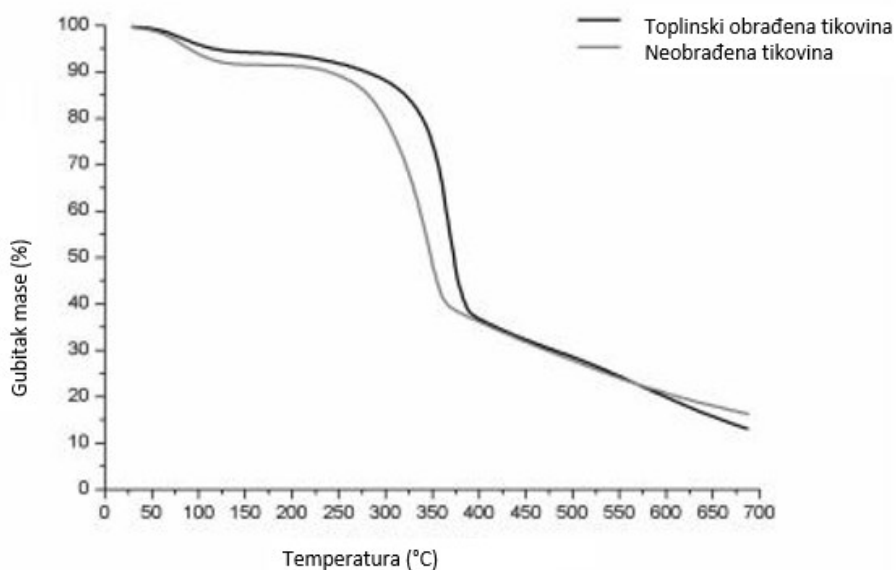


**Slika 18. Morfologija tkiva tikovine prije (lijevo) i nakon toplinske obrade (desno) snimljena na SEM-u: a) i b) poprečni, c) i d) radijalni, e) i f) tangencijalni presjek [21]**

Lengowski i suradnici ispitivali su svojstva toplinski modificirane tikovine. Toplinska obrada poboljšava svojstva drva, smanjuje iznos vlage u drvu i poboljšava dimenzijsku stabilnost. Tvrdoća i udarni rad loma bili su manji nakon toplinske obrade. Rezultati njihovog istraživanja pokazali su da je toplinska obrada smanjila debljinu stanične stijenke, a pojavile su se i poprečne pukotine kako je prikazano na slici 18., desno. Na slici su prikazana sva tri karakteristična presjeka – poprečni, radijalni i tangencijalni, snimljeni na pretražnom elektronskom mikroskopu (SEM), prije i nakon toplinske obrade. Ekstraktivi su isparili, a polisaharidi u drvu su popucali. Također, drvo je promijenilo boju iz svijetlije u tamno smeđu [21].

U istom radu prikazana je razlika u gubitku mase tijekom termogravimetrijske analize između toplinski neobrađenih i toplinski modificiranih uzoraka. Rezultati su prikazani na slici 19.



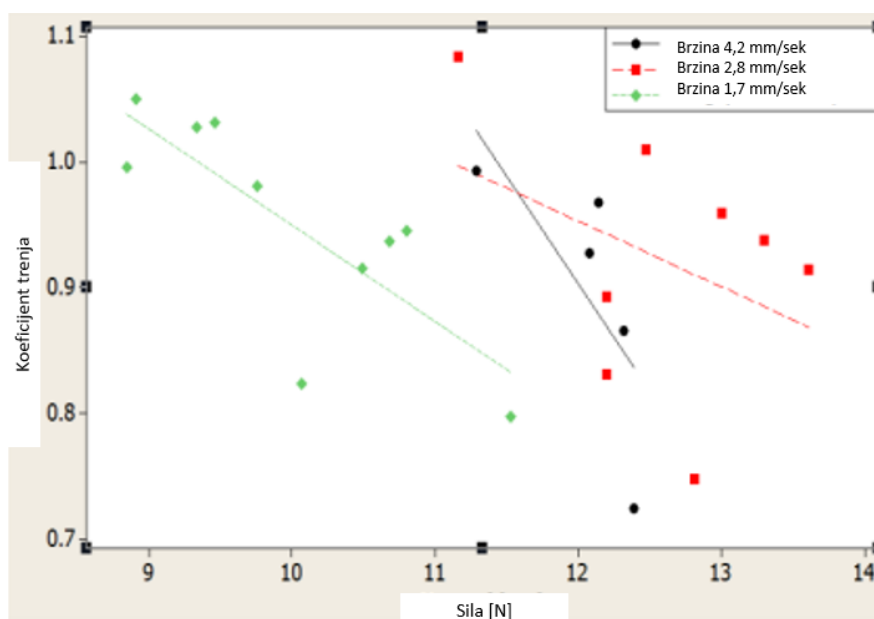


Slika 19. Termogram neobrađene i toplinski modificirane tikovine [21]

### 5.2.2. Tribološka svojstva

Od svih osnovnih mehanizama trošenja, abrazija i adhezija su najprisutnije kod drvnih konstrukcija.

Jain i dr. istraživali su kako se mijenja koeficijent trenja na uzorcima od tikovine u ovisnosti o normalnoj sili za različite brzine gibanja. Na slici 20. prikazan je odnos koeficijenta trenja i normalnog opterećenja za tri različite brzine. Kod svih brzina s porastom normalne sile opada vrijednost koeficijenta trenja, a smanjenje koeficijenta trenja je najjače izraženo kod najviše brzine. Vrijednosti koeficijenta trenja za tikovinu kreću se između 0,7248 i 1,084 [22].

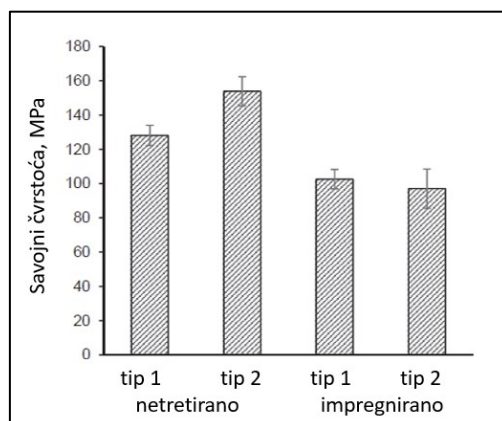


Slika 20. Ovisnost koeficijenta trenja o normalnoj sili pri različitim brzinama za tikovinu [22]

### 5.2.3. Ostala svojstva

Zbog velike količine prirodnih ulja tikovina je otporna na biološku razgradnju, čak i na termite. Zdravo drvo tikovine ima specifičan miris zbog ulja i drugih ekstrakta. Sadrži visoki udio silicija, oko 1,4 %, pa može doći do zatupljenja oštrice alata pri obradi odvajanjem čestica. Iako ima prirodna ulja, obično se dobro lijepi. Kako bi se smanjila količina prirodnih ulja, nekad se površina drva obriše otapalom [23].

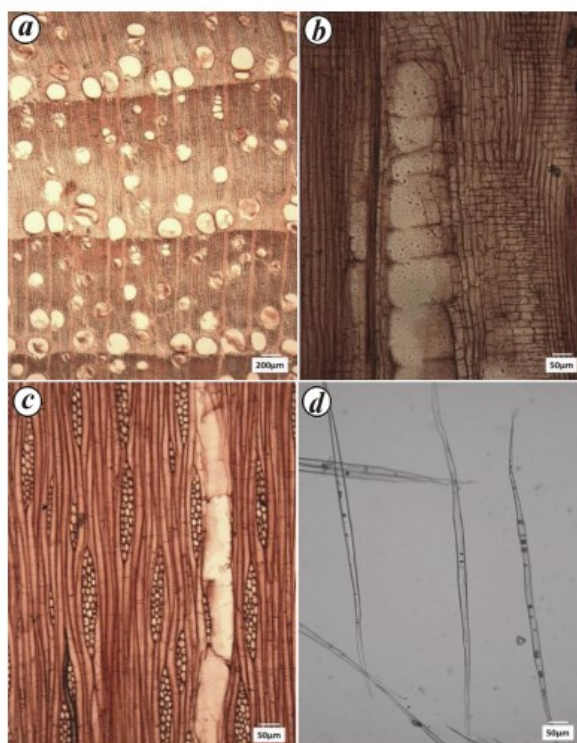
Tikovina se može impregnirati furfuralnom smolom kako bi joj se poboljšala otpornost na truljenje i stabilnost. Impregnacijom se povećava dimenzijska stabilnost drva i smanjuje se mogućnost apsorpcije vode. Furfurilni alkohol reagira s drvnim vlakancima i stvara polimerni materijal unutar drva. Na slici 21. prikazano je kako impregnacija furfuralnom smolom utječe na vrijednosti savojne čvrstoće tikovine s dva različita zemljopisna područja (tip 1 i tip 2). Impregnacija najčešće smanjuje vrijednost savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Također, neobrađena tikovina ima nižu toplinsku stabilnost nego tikovina obrađena ovim postupkom [24].



Slika 21. Utjecaj impregnacije na savojnu čvrstoću tikovine [24]

### 5.3. Mikrostruktura tikovine

U svom radu S. Tripathi i suradnici analizirali su mikrostrukturu tikovine s olupina brodova. Na slici 22. prikazane su fotografije mikrostrukture napravljene na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Prikazana je mikrostruktura u poprečnom (a), radijalnom (b) i tangencijalnom (c) presjeku te izolirana drvena vlakanca (d).



Slika 22. Mikrostruktura tikovine [25]

Na poprečnom presjeku vidi se da je uzorak prstenasto porozan [25]. Traheje ranog dijela goda su vrlo velike, solitarne i u radijalnim grupama od 2 do 3. Pore su kasnom dijelu goda su manje, nema ih puno i ravnomjerno su distribuirane. Drvni traci po širini imaju od 3 do 4 parenhimske stanice.

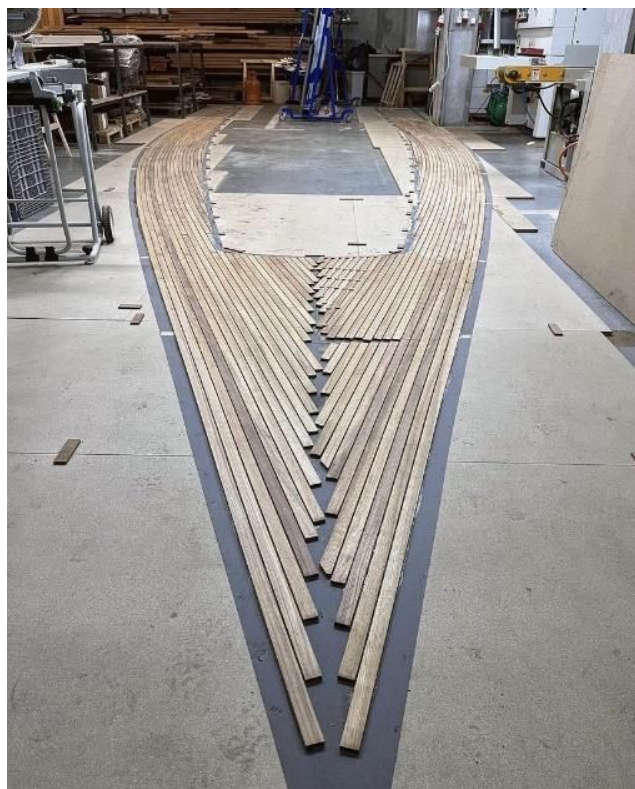
#### **5.4. Primjena tikovine**

Budući da se ovo drvo smatra najboljim građevnim drvom na svijetu koristi se u mnoge svrhe. Tikovina je otporna na vlagu, gljivice i insekte zbog visokog udjela ulja. Pri sušenju se minimalno skuplja pa rijetko puca tijekom procesa sušenja. Uz lijep izgled, ima i karakterističan miris. Tikovina ima neka svojstva poput:

- niske toplinske provodljivosti
- niske gustoće – niske mase
- dobre obradivosti – podliježe visokim zahtjevima točnosti dimenzija
- otpornosti na vlagu
- protuklizne površine
- mijenja boju tijekom godina, ali se može izbrusiti na početnu boju.

Sva navedena svojstva čine tikovinu idealnim izborom za brodske palube, pod terasa ili sauna (općenito podovi i zidovi interijera i eksterijera) i namještaj.

Na slici 23. i slici 24. nalaze se neki proizvodi od tikovine.



**Slika 23. Slaganje tikovih letvica za brodsku palubu**



**Slika 24. Dio montirane palube od tikovine**

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Cilj rada i provedena ispitivanja

Usmjerenost strukture kod drva utječe na vrijednosti mehaničkih svojstava. Svojstva drva razlikuju se u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku. Drvene konstrukcije većinom su opterećene savojno pri čemu savojna sila djeluje na uzdužnu os debla. Neke vrste drva imaju različite vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru ovisno o kutu između savojne sile i tangente na god. Kod drugih vrsta ovaj kut nema utjecaja na vrijednosti dobivene pri savojnom ispitivanju.

Osnovni cilj ovog rada je da se utvrdi kako promjena navedenog kuta utječe na vrijednost savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti kod tikovine. Savojno ispitivanje provedeno je metodom savijanja u tri točke, za kutove  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ .

Osim savojnih svojstava, analizirana je mikrostruktura u tri karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Također je napravljena računalna tomografija (engl. *Computed Tomography – CT*) za sva tri presjeka. Uzorcima je nakon ispitivanja izmjerena udio vlage, određena je gustoća u apsolutno suhom stanju i gustoća za 12 % vlage.

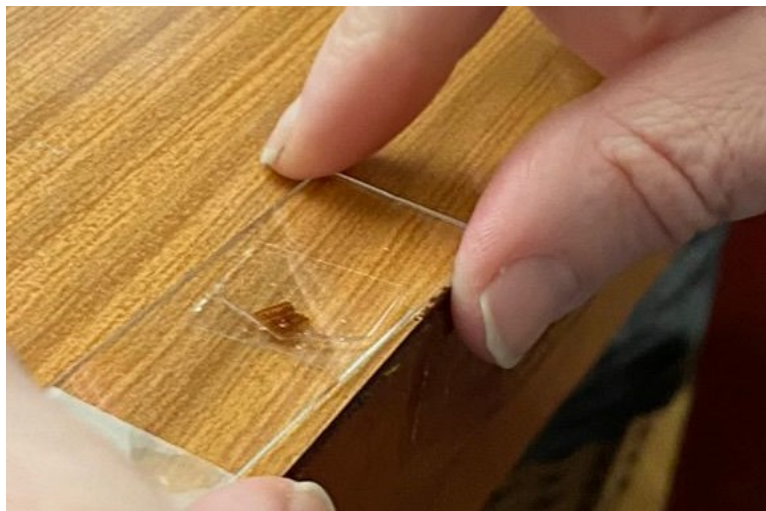
### 6.2. Analiza mikrostrukture uzoraka

U Laboratoriju za polimere i kompozite Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje izrezani su tanki uzorci na mikrotomu sa slike 25.



Slika 25. Rezanje tankih uzoraka na mikrotomu

Uzorci su rezani tanko kako bi svjetlost mogla proći kroz uzorak. Nakon toga su uzorci uronjeni u destiliranu vodu i odneseni u Zavod za botaniku Prirodoslovno matematičkog fakulteta. Vlažni uzorci stavljeni su između dva stakalca, kako je prikazano na slici 26. te analizirani na svjetlosnom mikroskopu sa slike 27.



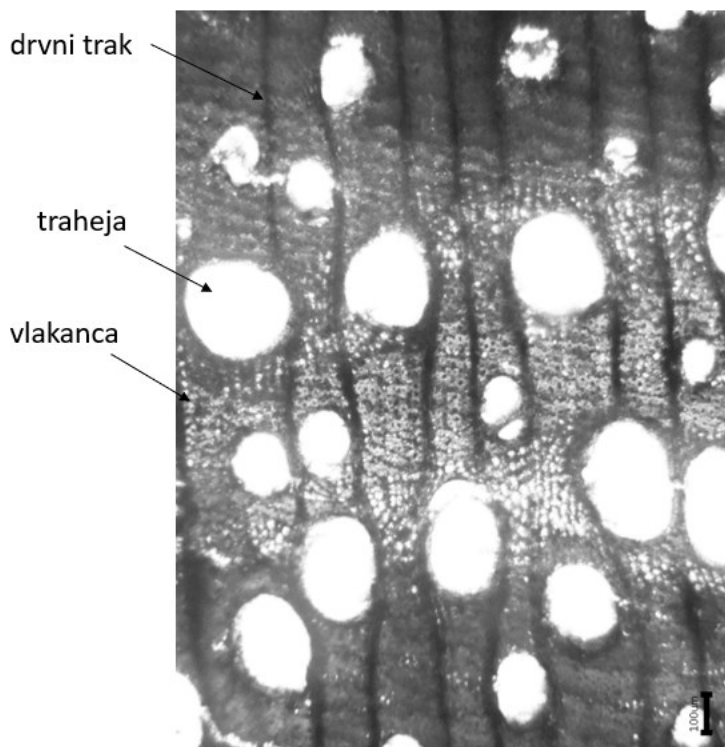
**Slika 26.** Vrlo tanak uzorak za ispitivanje mikrostrukture



**Slika 27.** Ispitivanje mikrostrukture tikovine

Na sljedećim fotografijama redom su prikazane mikrostrukture poprečnog, radijalnog i tangencijalnog presjeka.

Na slici 28. prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka u kojem se vide krupne, prstenasto raspoređene traheje grupirane u ranom dijelu goda. Traheje se mogu vidjeti i u kasnom dijelu goda, ali su puno manje i homogeno raspoređene. Na slici se vide i drvena vlakanca s vrlo malim lumenima. Tamnije pruge, usmjerene od dolje prema gore, su drvni traci.

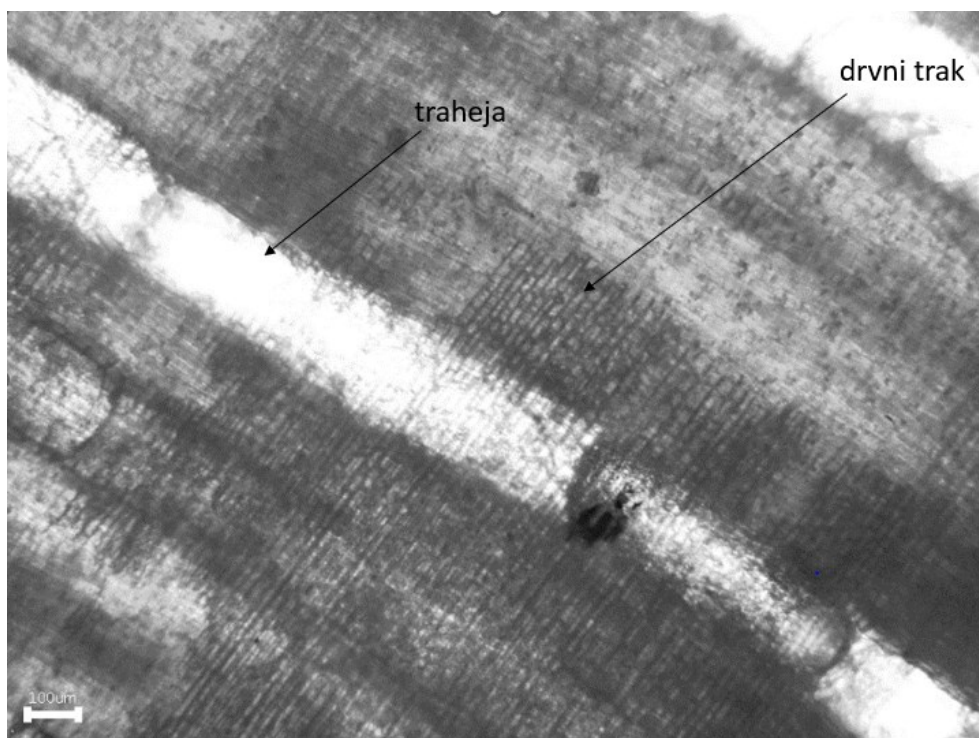


**Slika 28. Poprečni presjek tikovine**

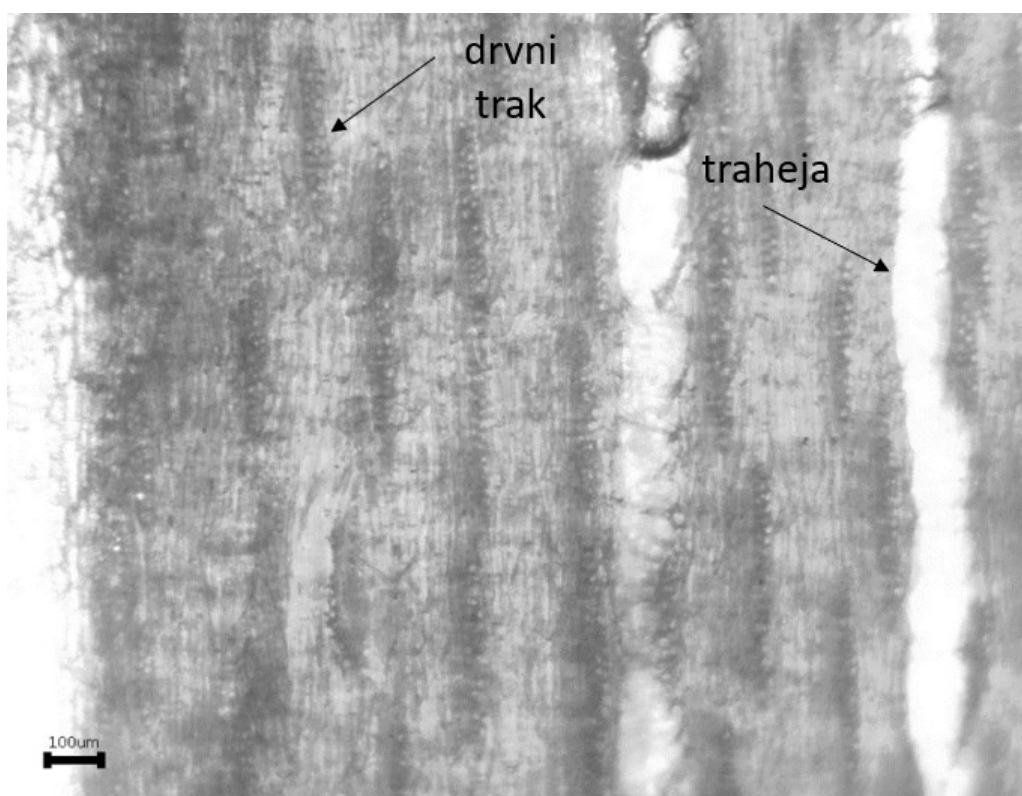
Na slici 29. prikazana je mikrostruktura radijalnog presjeka tikovine. Jasno se vide uzdužno presječene traheje i uzdužno presječeni drvni traci koji se šire radijalno i okomiti su na traheje.

Slika 30. prikazuje mikrostrukturu tikovine u tangencijalnom presjeku. Traheje su prerezane uzdužno, a drvni traci poprečno. Može se vidjeti da drvni traci po širini imaju 2 do 3 parenhimske stanice.





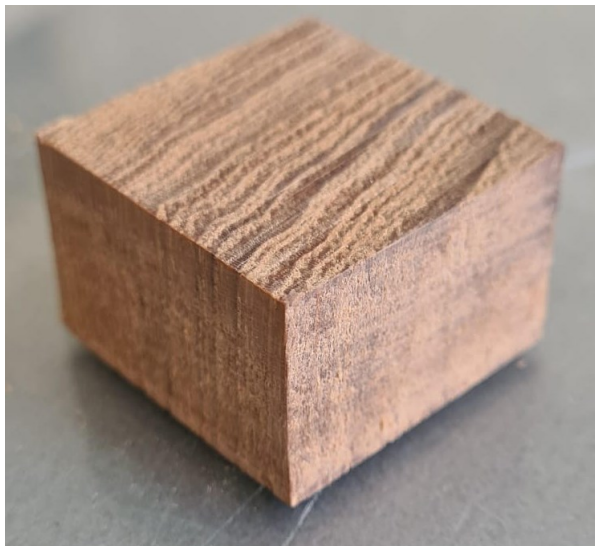
Slika 29. Radijalni presjek tikovine



Slika 30. Tangencijalni presjek tikovine

### 6.3. Određivanje udjela vlage i gustoće uzorka prema normi ISO 13061 [26]

Određivanje udjela vlage i gustoće uzorka provedeno je u Laboratoriju za analizu metala na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Uzorak dimenzija  $30,42 \times 30,22 \times 20,21$  mm, na slici 31., izrezan je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za alatne strojeve.



Slika 31. Uzorak za sušenje

Kako bi se odredio udio vlage u uzorku i gustoća u apsolutno suhom stanju, uzorak je grijan u peći na temperaturi  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ . Sušionik je prikazan na slici 32.



Slika 32. Sušionik u kojem je sušen uzorak

Udio vlage ( $w$ ) u uzorku računa se prema sljedećem izrazu (4):

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100, \quad \% \quad (4)$$

gdje je:

$m_1$  – masa uzorka prije sušenja, g

$m_2$  – masa uzorka nakon sušenja, g.

Gustoća uzorka pri određenom udjelu vlage ( $\rho_w$ ) računa se po sljedećem izrazu (5):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (5)$$

gdje je:

$m_w$  – masa pri nekom udjelu vlage, g

$V_w$  – volumen pri nekom udjelu vlage,  $\text{cm}^3$ .

Vrijednosti gustoće koje su dobivene, preračunate su na vrijednost gustoće za udio vlage od 12 % ( $\rho_{12}$ ) sljedećim izrazom (6):

$$\rho_{12} = \frac{1 + 0,01 * (12 - w)}{1 + 0,01 * (12 - w) * \frac{\rho_w}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (6)$$

gdje je:

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  – gustoća vode = 1  $\text{g/cm}^3$ .

Norma ISO13061, po kojoj se provodilo ispitivanje, propisuje da je apsolutno suho stanje postignuto kada je između dva uzastopna vaganja razlika masa manja od 0,1 %.

Uzorak je od sušionika do vage nošen u eksikatoru sa slike 33. kako bi se spriječilo upijanje vlage.



Slika 33. Eksikator za prijenos uzorka

Rezultati mjerenja udjela vlage, mase i gustoće prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja udjela vlage, mase i gustoće uzorka

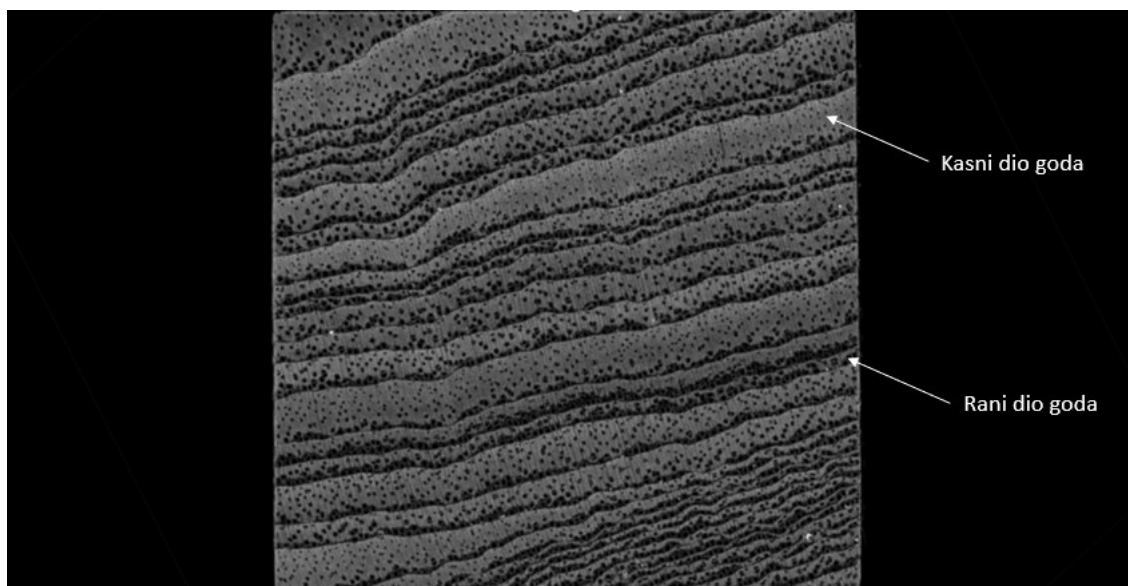
	Dimenzije, mm	Masa, g	Udio vlage	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>
Prije sušenja	30,63 × 30,76 × 20,19	12,67700	6,56 %	0,667
Nakon sušenja	30,42 × 30,22 × 20,21	11,89623	≈ 0 %	0,666

#### 6.4. Računalna tomografija uzorka

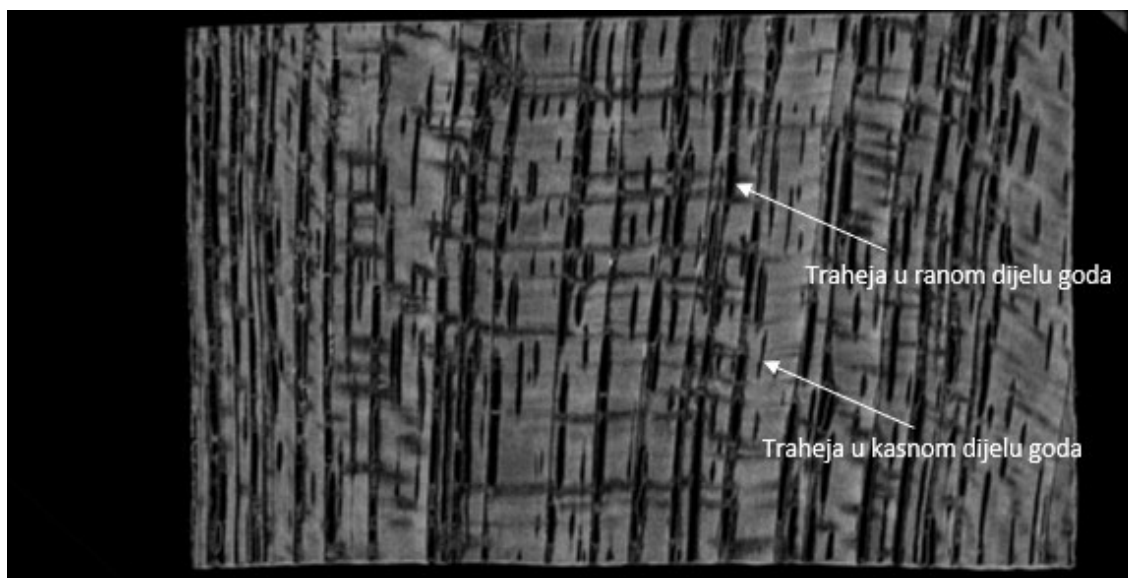
Uređaji za računalnu tomografiju (engl. *Computed Tomography* – CT) koriste rendgensko zračenje koje prolazi kroz uzorak sve do detektora zračenja. Rendgenske zrake se više ili manje apsorbiraju, ovisno o gustoći uzorka. Strukture veće gustoće na CT snimci su svjetlije, a strukture s nižom gustoćom su tamnije [27].

Analiza uzorka računalnom tomografijom provedena je u tvrtki Topomatika d.o.o., na mjernom sustavu ZEISS Metrotom 6 Scout. Tijekom snimanja, temperatura je iznosila  $20 \pm 1$  °C, a relativna vlažnost  $55 \pm 10$  % kao što je propisano normom. Na slici 34., slici 35. i slici 36. prikazane su CT snimke uzorka u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku.

Na slici 34., rani dio goda tamnije je boje jer je njegova gustoća zbog velikih provodnih sudova manja od gustoće kasnog dijela goda, koji je svjetliji. Na ovoj slici vrlo jasno se vidi da tikovina ima prstenasto poroznu strukturu. Na slici 35. prikazana je CT snimka radijalnog presjeka gdje se vide uzdužno usmjerene traheide i radijalno usmjereni drvni traci.

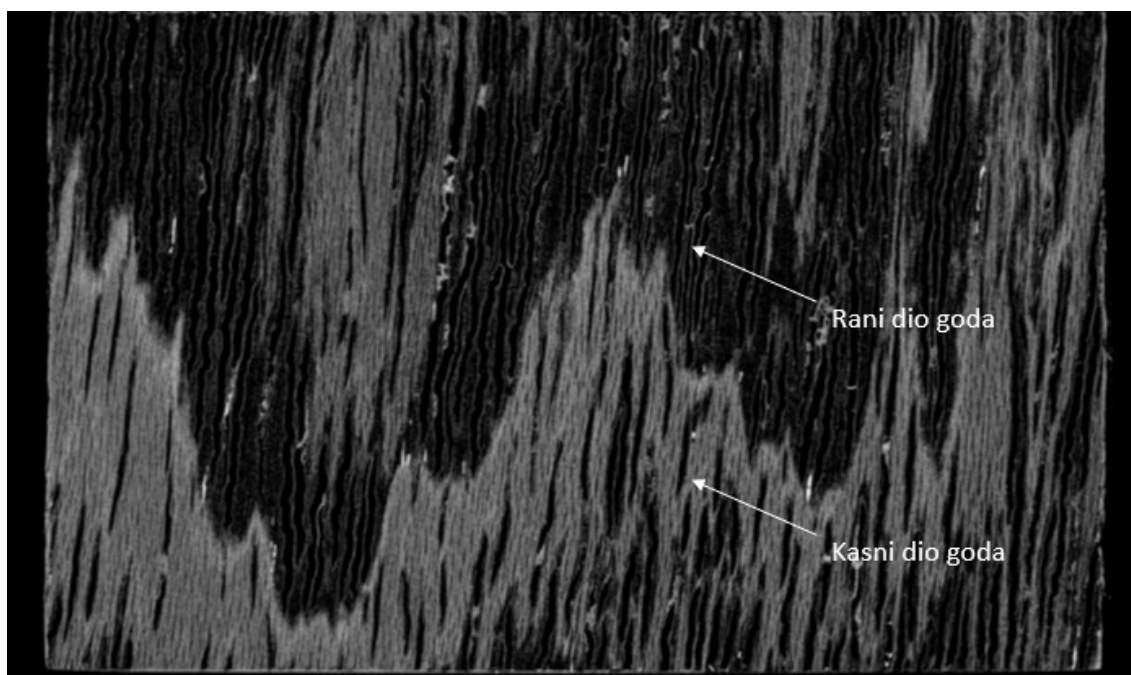


**Slika 34. CT snimka poprečnog presjeka tikovine**



**Slika 35. CT snimka radijalnog presjeka tikovine**

Na slici 36. prikazana je CT snimka tangencijalnog presjeka gdje se vide uzdužno usmjerene traheide i poprečni presjek drvnih traka.



Slika 36. CT snimka tangencijalnog presjeka tikovine

### 6.5. Uzorci za ispitivanje savojnog modula elastičnosti

Uzorci za sva potrebna ispitivanja izrezani su iz drva tikovine s područja Indije. Daska dimenzija  $600 \times 180 \times 52$  mm iz koje su izrezani uzorci prikazana je na slici 37.

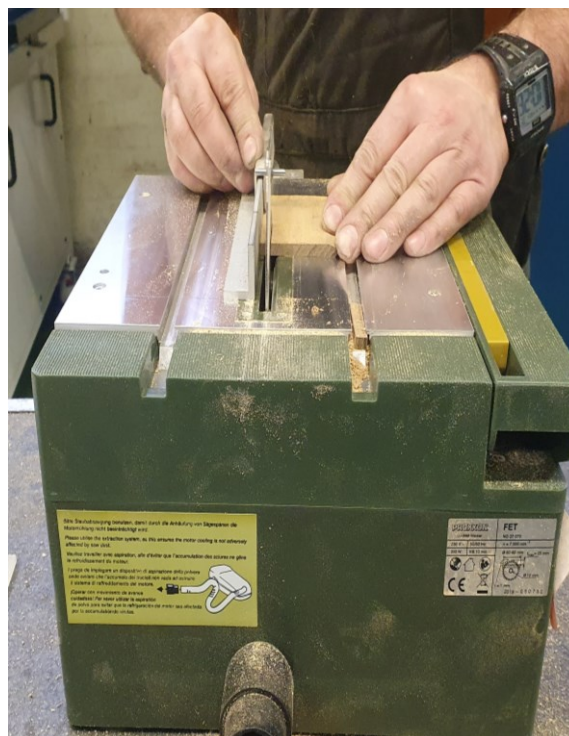


Slika 37. Daska od tikovine

Dasku je darovala tvrtka ATT Nautica d.o.o. koja se bavi izradom brodskih paluba. Uzorci su izrezani u Laboratoriju za alatne strojeve Zavoda za tehnologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, a proces rezanja uzoraka prikazan je na slici 38. i slici 39.



Slika 38. Rezanje uzoraka



Slika 39. Rezanje uzoraka

Uzorci za ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti su duljine 90 mm, poprečnog presjeka dimenzija  $6 \times 6$  mm, sukladno normi ISO 13061.

Ukupno je izrezano 99 uzoraka. Svi uzorci su usmjereni u longitudinalnom smjeru, duljina im se poklapala s longitudinalnom osi. Na trećini uzoraka (33 komada) u poprečnom presjeku (kvadrat  $6 \times 6$  mm) tangenta na godove zatvarala je sa stranicom kvadrata kut od  $45^\circ$ , a kod preostalih uzoraka tangente na godove bile su paralelne/okomite na stranicu kvadrata.

Stranice uzoraka su nakon rezanja brušene i očetkane kako bi se pripremile za savojno ispitivanje. Prije samog ispitivanja, uzorcima su izmjerene dimenzije pomoću pomičnog mjerila.

U tablici 5. navedene su debljina (h) i širina (b) svih uzoraka.

Tablica 5. Dimenzije poprečnog presjeka uzoraka

redni broj uzorka	UZORCI					
	0°		45°		90°	
	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>h</i>
1	5,95	5,89	5,99	5,87	5,72	5,64
2	5,97	5,93	5,80	5,91	5,85	6,16
3	5,77	5,74	5,88	5,78	5,78	5,92
4	5,65	5,91	5,94	6,05	5,87	5,92
5	5,61	5,90	5,86	5,62	5,86	5,74
6	5,93	5,81	5,93	5,89	5,80	5,90
7	6,03	5,89	5,91	5,68	5,72	5,97
8	5,72	5,95	5,90	5,92	5,81	5,89
9	5,91	5,76	5,92	5,69	5,76	5,90
10	5,97	5,79	5,90	5,73	5,93	5,90
11	5,87	5,80	6,02	5,91	5,79	5,58
12	5,85	6,02	5,94	5,79	5,83	5,97
13	5,81	5,82	5,90	5,74	5,86	5,88
14	5,92	5,99	5,87	5,87	5,94	5,92
15	5,89	5,88	5,62	5,88	5,75	5,93
16	5,98	5,84	5,81	5,98	5,81	5,89
17	6,01	5,88	6,01	5,90	5,84	5,73
18	5,91	5,81	5,97	5,74	5,86	5,91
19	5,88	5,86	5,99	5,79	5,87	5,95
20	5,92	5,76	5,92	5,69	5,81	5,86
21	5,97	5,75	5,89	5,86	5,79	5,87
22	5,93	5,84	5,92	6,05	5,87	5,86
23	5,99	5,83	5,95	5,95	5,87	5,81
24	5,94	5,79	5,71	5,95	5,85	5,88
25	5,98	5,83	5,78	5,99	5,82	5,88
26	5,83	5,88	5,59	5,72	5,78	5,88
27	5,90	5,83	5,92	5,78	5,71	6,16
28	5,90	5,78	6,03	5,92	5,76	5,88
29	5,85	5,75	5,92	5,93	5,66	5,95
30	5,95	5,89	5,92	5,87	5,83	5,91
31	5,93	5,54	5,91	5,95	5,82	5,94
32	5,93	5,58	6,02	5,90	5,72	5,94
33	5,90	6,03	5,75	5,94	5,92	6,03

Na slici 40., slici 41. i slici 42. prikazani su uzorci svih triju skupina prije ispitivanja.





Slika 40. Uzorci s kutom između sile i goda od  $0^\circ$



Slika 41. Uzorci s kutom između sile i goda od  $45^\circ$



Slika 42. Uzorci s kutom između sile i goda od  $90^\circ$

## 6.6. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

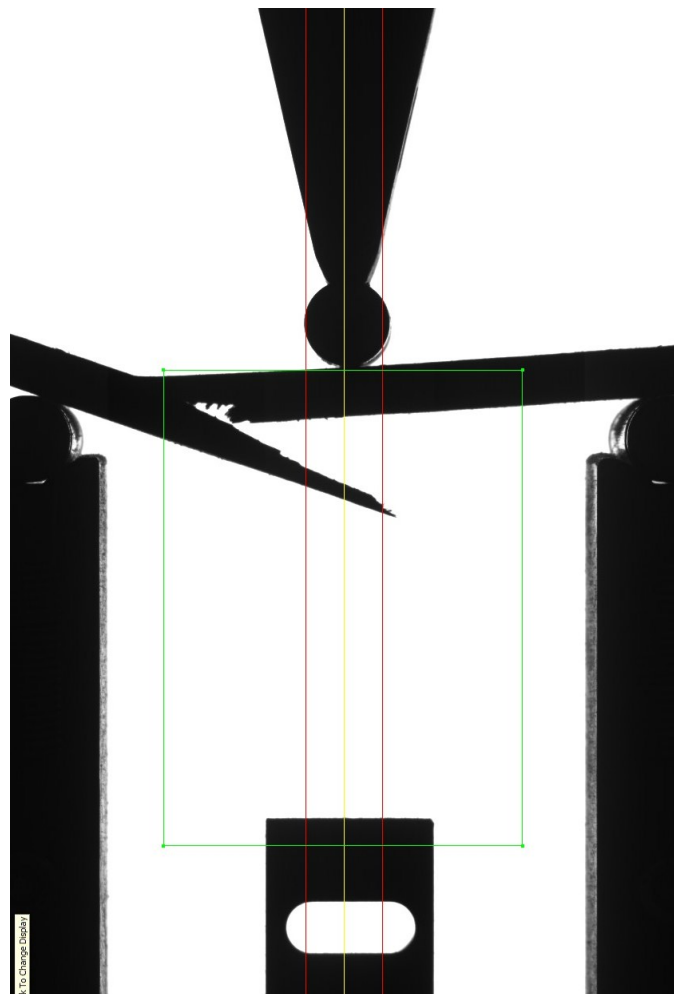
Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti provedeno je prema normi ISO 13061-4:2014 [26] na kidalici Messphysik BETA 50-5, prikazanoj na slici 43., u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Zavoda za tehničku mehaniku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Metodom savijanja u tri točke ispitano je ukupno 99 uzoraka podijeljenih u tri grupe ovisno o kutu između savojne sile i tangente na god:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ . Razmak između oslonaca bio je 74 mm, a brzina spuštanja srednjeg valjka preko kojeg se opterećivao ispitni uzorak iznosila je 2,8 mm/min. Uzorci su postavljeni na oslonce i opterećivani sve do loma. Tijekom ispitivanja mjerila se savojna sila i progib uzoraka. Progib je mjereno videoekstenzometrom ME 46 Messphysik sa slike 44.

Temperatura okoline tijekom ispitivanja iznosila je  $22^\circ\text{C}$ , a relativna vlažnost zraka 48 %.



Slika 43. Kidalica Messphysik BETA 50-5



Slika 44. Prikaz s videoekstenzometra ME 46 Messphysik

Na slici 45. prikazan je jedan uzorak nakon loma.



Slika 45. Ispitni uzorak nakon loma

### 6.7. Rezultati ispitivanja savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće

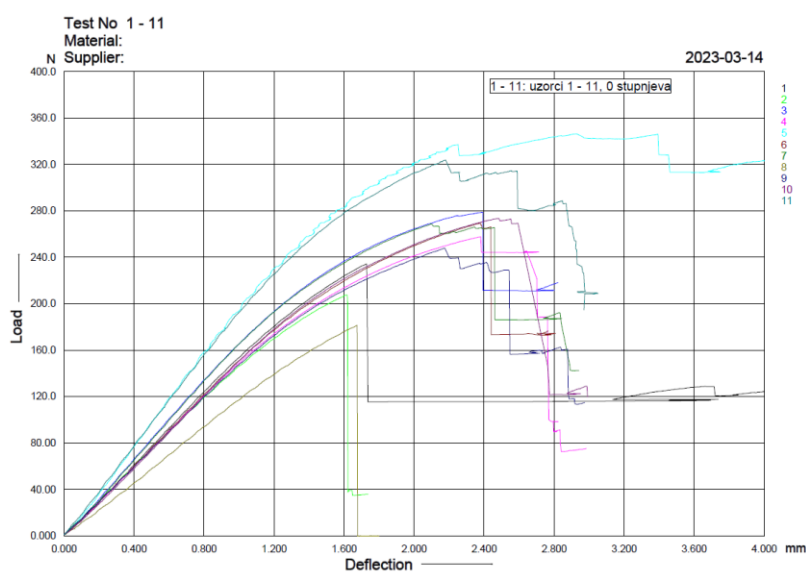
U tablici 6. prikazani su rezultati savojnog ispitivanja za sve tri serije uzoraka: 0°, 45°, 90°.

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće**

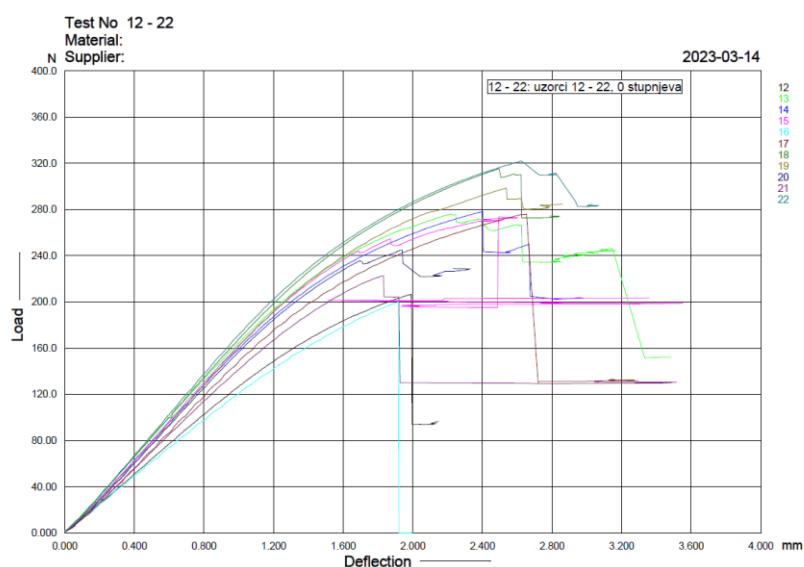
redni broj uzorka	UZORCI					
	0°		45°		90°	
	E, GPa	$\sigma$ , MPa	E, GPa	$\sigma$ , MPa	E, GPa	$\sigma$ , MPa
1	9,86	83,42	11,07	166,80	13,56	148,00
2	10,34	99,36	11,24	137,30	14,56	144,40
3	10,46	108,20	11,34	141,10	15,62	163,30
4	10,57	108,40	11,41	135,70	10,36	115,50
5	11,03	108,90	11,65	152,50	16,70	174,70
6	11,10	109,40	12,66	128,70	15,92	167,90
7	11,43	109,70	12,90	122,60	13,91	154,60
8	11,53	119,00	12,94	123,10	16,03	173,90
9	11,85	119,80	13,12	113,80	18,32	143,70
10	12,21	124,90	13,17	178,10	13,61	159,70
11	12,52	125,10	13,60	152,70	18,98	184,50
12	12,74	125,20	13,76	160,30	12,86	142,10
13	12,87	126,00	13,78	165,70	15,57	171,90
14	12,97	129,20	13,91	164,60	13,03	119,00
15	13,07	130,00	14,01	169,50	15,75	163,50
16	13,18	138,40	14,08	136,70	14,83	149,20
17	13,27	140,30	14,23	173,80	10,88	122,30
18	13,33	142,50	14,35	149,70	16,00	146,20
19	13,43	144,90	14,44	154,20	9,24	79,19
20	13,46	145,40	14,91	162,20	15,25	159,70
21	13,74	147,50	15,01	173,70	13,34	143,10
22	13,75	149,10	15,02	156,10	11,27	134,40
23	13,99	149,50	15,18	122,20	17,73	184,00
24	14,03	151,60	15,22	130,80	14,30	152,20
25	14,42	155,80	15,29	141,10	16,57	164,80
26	14,86	158,90	15,34	180,00	16,31	187,50
27	14,96	162,80	15,46	156,50	12,78	141,30
28	15,04	163,20	15,64	153,50	20,69	186,40
29	15,06	164,00	16,23	120,40	18,71	172,60
30	15,87	175,40	16,63	156,90	15,64	153,30
31	15,99	176,70	16,94	161,50	15,99	169,60
32	17,41	182,00	17,04	152,10	11,87	128,60
33	17,84	196,80	17,54	151,40	11,21	95,56
aritmetička sredina	13,28	138,5	14,22	149,9	14,77	151,4
standardna devijacija	1,958	26,10	1,737	18,08	2,641	25,35
koeficijent varijacije	0,147	0,188	0,122	0,121	0,179	0,167

U gornjoj tablici navedene su pojedinačne i srednje vrijednosti za savojni modul elastičnosti i savojnu čvrstoću kao i standardne devijacije te koeficijenti varijacije.

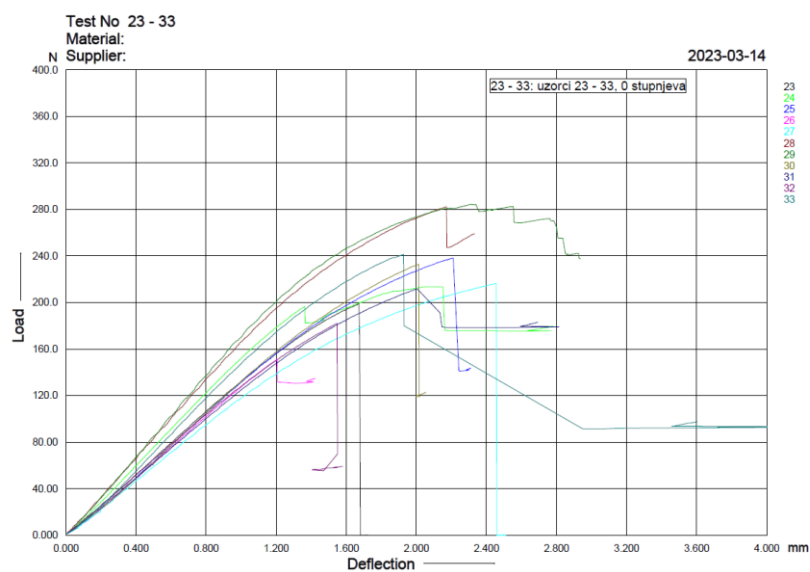
Tijekom ispitivanja za svaki uzorak snimljena je krivulja savojna sila-progib. Na slici 46., slici 47. i slici 48. prikazane su navedene krivulje za uzorke kod kojih je kut između sile i tangente na godove iznosio  $0^\circ$ . Na svakom dijagramu, zbog bolje preglednosti, prikazano je po 11 krivulja.



Slika 46. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 1-11 iz serije  $0^\circ$

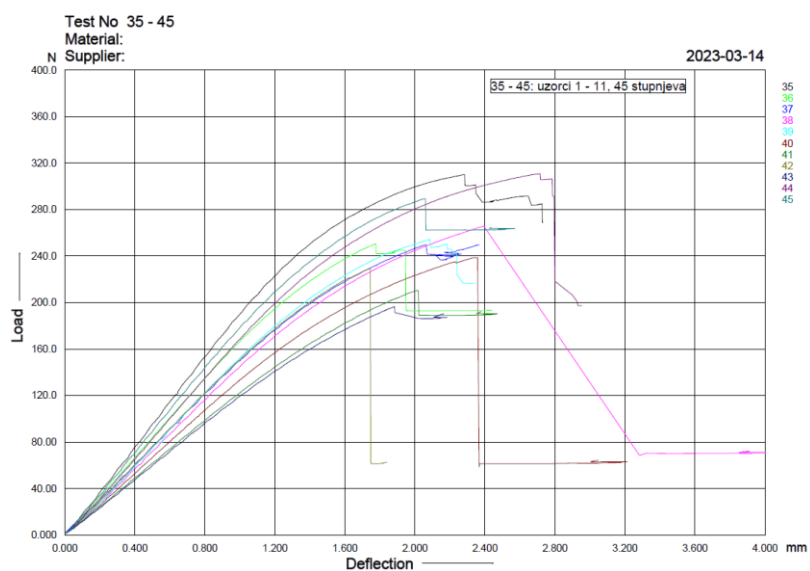


Slika 47. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 12-22 iz serije  $0^\circ$

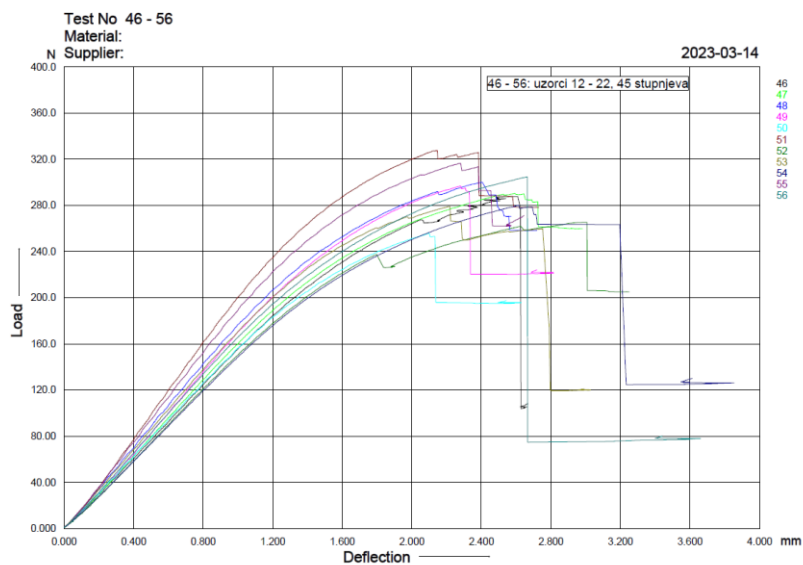


Slika 48. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 23-33 iz serije 0°

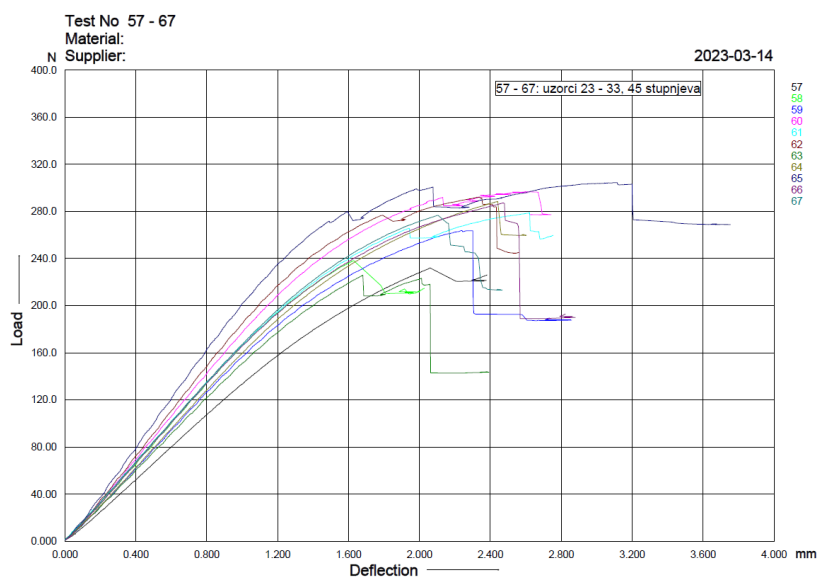
Na slici 49., slici 50. i slici 51. prikazane su navedene krivulje za uzorke kod kojih je kut između sile i tangente na godove iznosio 45°.



Slika 49. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 35-45 iz serije 45°

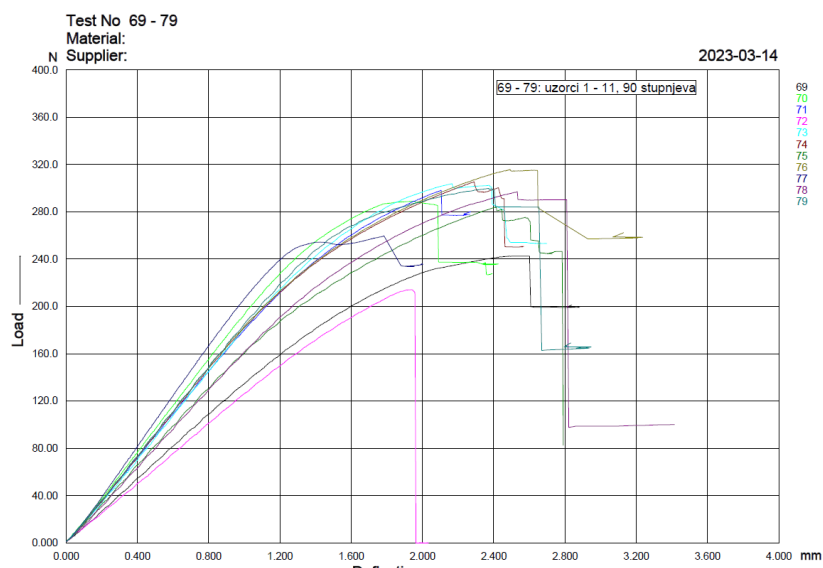


Slika 50. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 46-56 iz serije 45°

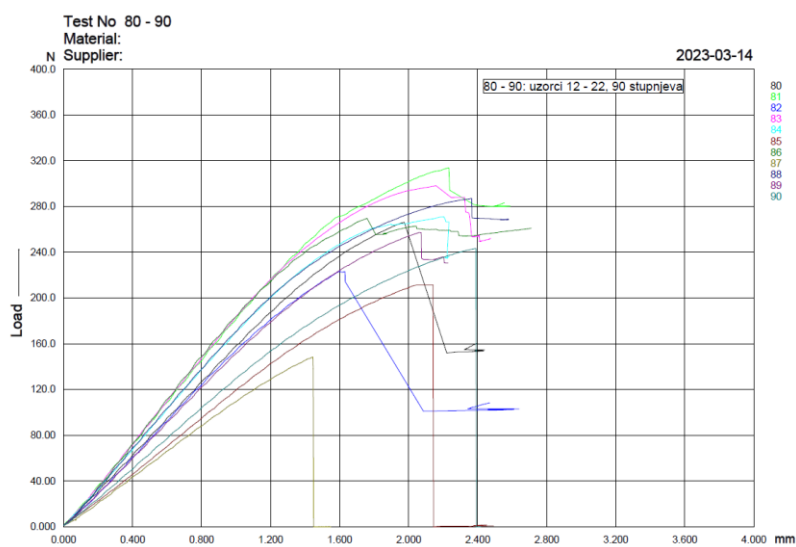


Slika 51. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 57-67 iz serije 45°

Na slici 52., slici 53. i slici 54. prikazane su navedene krivulje za uzorke kod kojih je kut između sile i tangente na godove iznosio 90°.

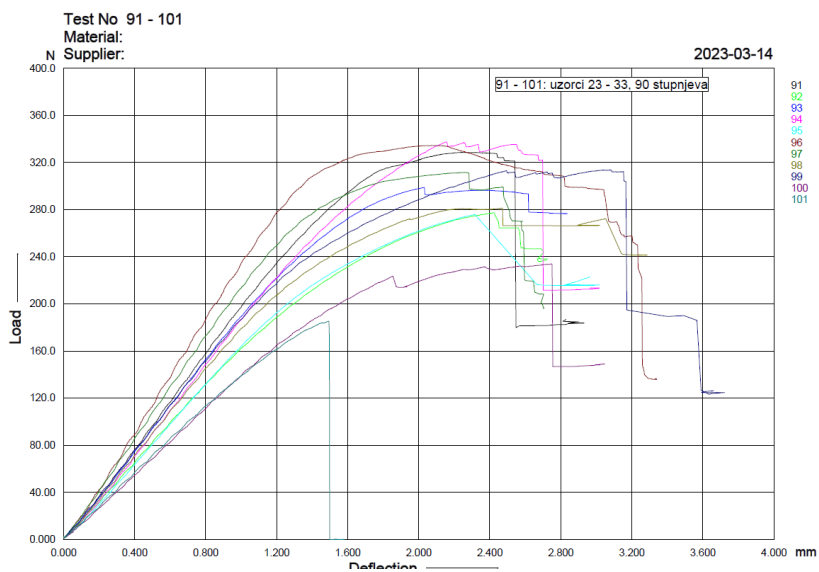


Slika 52. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 69-79 iz serije 90°



Slika 53. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 80-90 iz serije 90°





Slika 54. Dijagram naprezanje-progib za uzorke 91-101 iz serije 90°

## 7. ANALIZA REZULTATA

Iz dijagrama naprezanje-progib i vrijednosti koje su dobivene za savojni modul elastičnosti i savojnu čvrstoću tikovine, primjećuje se veliko rasipanje vrijednosti. To je očekivano zbog toga što je drvo prirodan, heterogen i anizotropan materijal. Varijabilnost vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće može se opisati Weibullovom razdiobom koja se većinom koristi kod problema mehaničkih svojstava krhkih materijala i testiranja trajnosti [28]. Izraz glasi (7):

$$f(x) = m(x)^{m-1} * e^{-x^m} \quad (7)$$

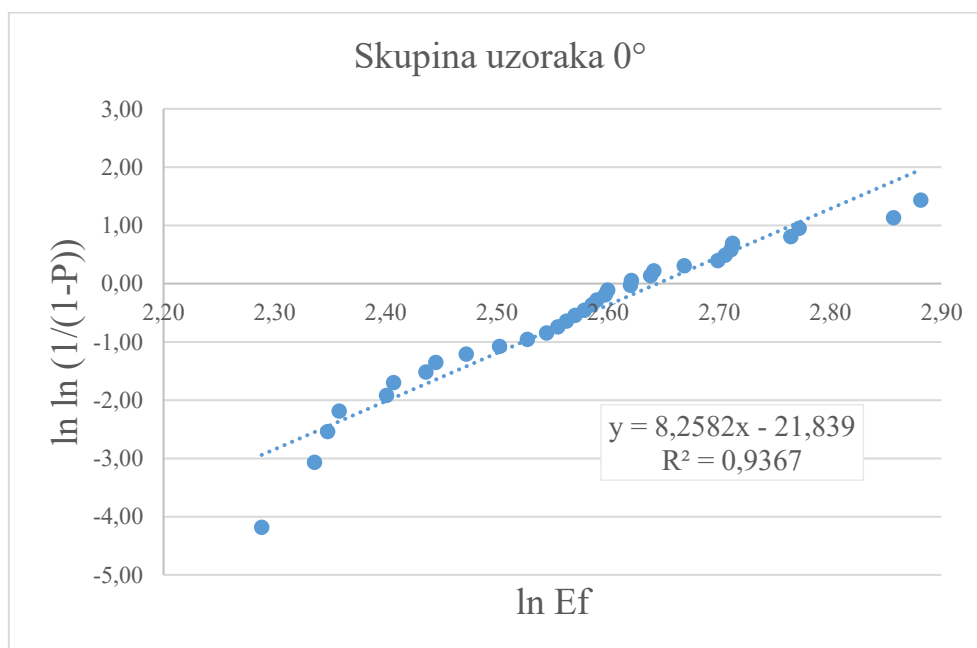
gdje je:

$f(x)$  – funkcija gustoće vjerojatnosti Weibullove raspodjele,

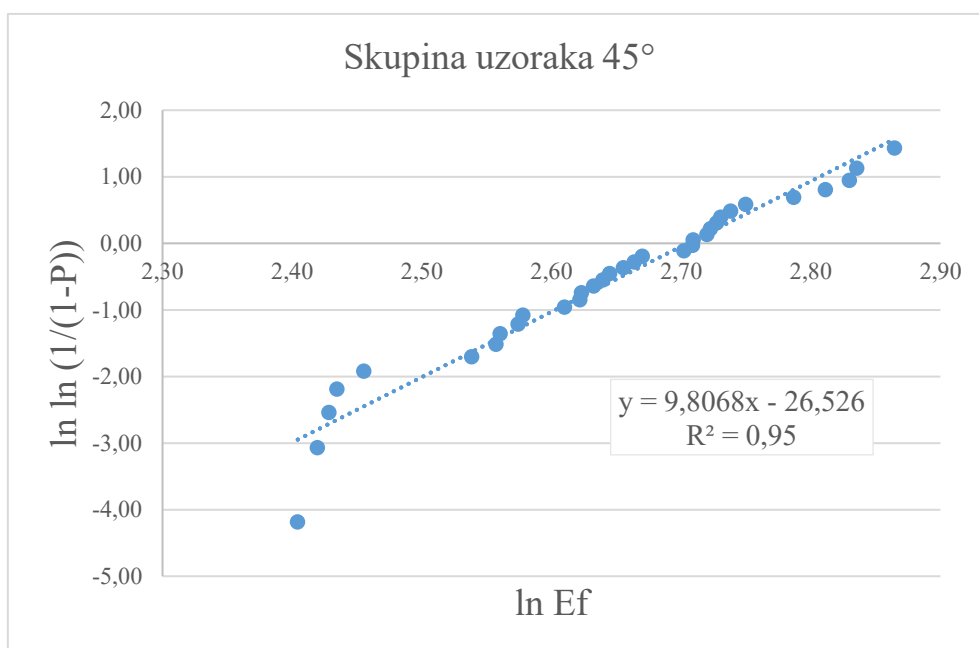
$x$  – promatrana veličina (slučajna varijabla) ( $x = \sigma/\sigma_0$ ),

$m$  – parametar oblika ili Weibullov modul, mjera rasipanja.

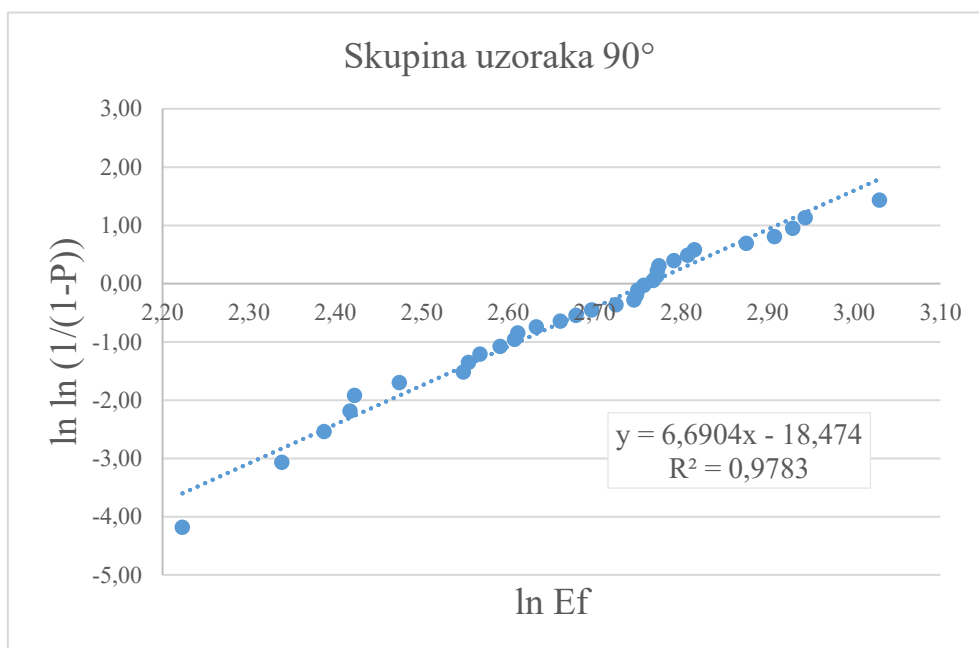
Gustoća vjerojatnosti je zvonolika krivulja slična Gaussovoj, ali je asimetrična. Weibullov modul  $m$  utječe na širinu krivulje: što je modul veći, to je krivulja uža. Weibullov modul je pokazatelj homogenosti materijala. Viša vrijednost Weibullovog modula znači veći stupanj homogenosti. Na slici 55., slici 56. i slici 57. grafom su predočene regresijske jednadžbe modula elastičnosti za sve tri skupine uzoraka po redu:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ .



**Slika 55. Kumulativna razdioba vrijednosti normaliziranog modula elastičnosti za skupinu  $0^\circ$**



Slika 56. Kumulativna razdioba vrijednosti normaliziranog modula elastičnosti za skupinu 45°



Slika 57. Kumulativna razdioba vrijednosti normaliziranog modula elastičnosti za skupinu 90°

Na tri prethodne slike nagib regresijskog pravca predstavlja Weibullov modul. Najviša vrijednost Weibullovog modula je kod skupine uzoraka 45°. Kod te skupine je najveća

homogenost mikrostrukture. Kod skupine uzoraka  $0^\circ$  Weibullov modul je viši, nego kod skupine uzoraka  $90^\circ$ .

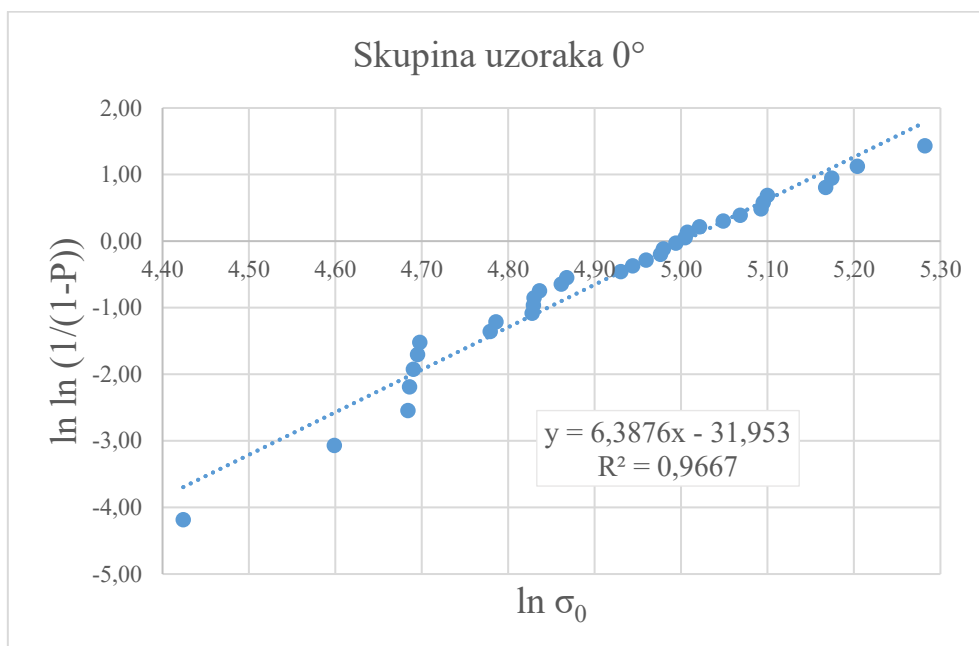
U tablici 7. nalaze se statistički podaci za rezultate svih triju skupina.

**Tablica 7. Statistički podaci za rezultate mjerenja savojnog modula elastičnosti za sve skupine**

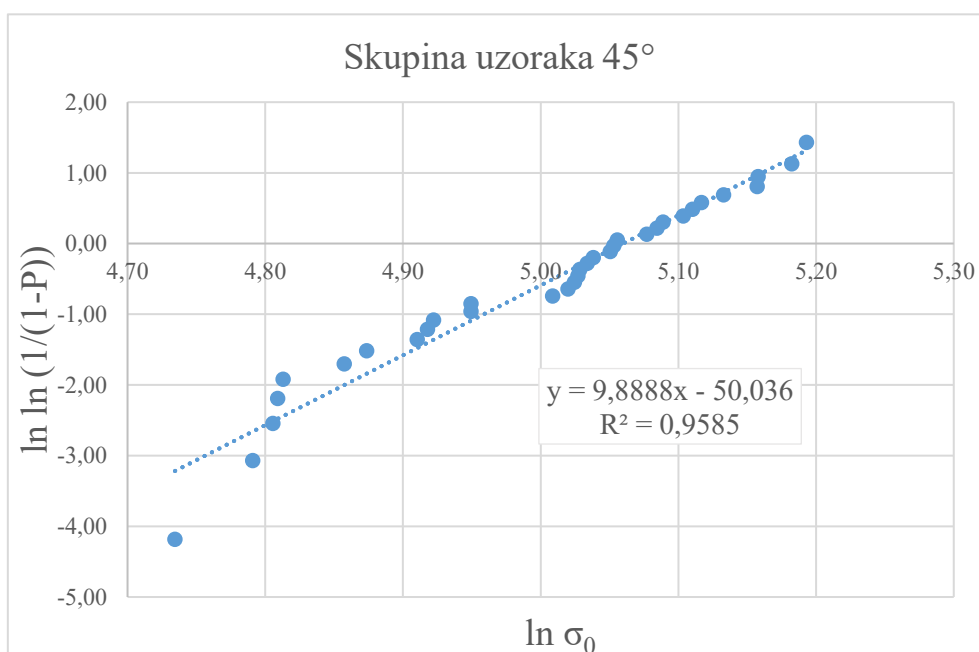
Skupina uzoraka	$E_f$ , min GPa	$E_f$ , max GPa	$E_f$ , sr. GPa	standardna devijacija	Weibullov modul	koeficijent varijacije, %
$0^\circ$	9,86	17,84	13,28	1,958	8,2582	14,74
$45^\circ$	11,07	17,54	14,22	1,737	9,8068	12,22
$90^\circ$	9,24	20,69	14,77	2,641	6,6904	17,88

Najveća srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti, 14,77 GPa, dobivena je kod skupine uzoraka kod koje je kut između savojne sile i tangente na godove iznosio  $90^\circ$ . Druge dvije skupine imaju niže vrijednosti modula elastičnosti i međusobno se vrlo malo razlikuju. Koeficijent varijacije za savojni modul elastičnosti po normi smije biti maksimalno 22 % [14]. Koeficijenti varijacije za sve tri skupine uzoraka su unutar te vrijednosti.

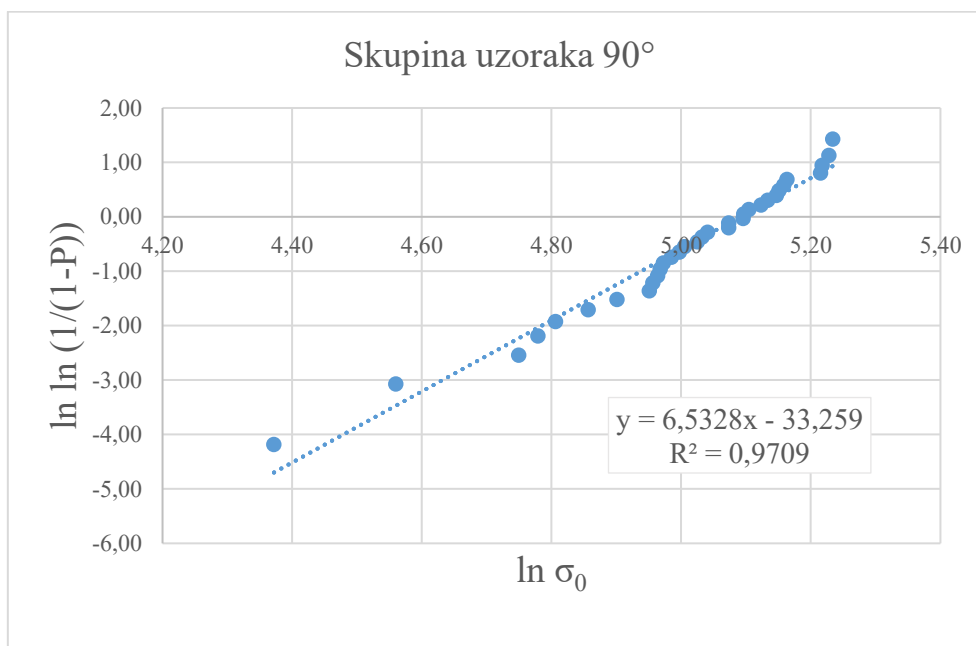
Na slici 58., slici 59., slici 60. grafom su prikazane regresijske jednadžbe savojne čvrstoće za sve tri skupine uzoraka po redu:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ . Weibullov modul najviši je kod skupine uzoraka  $45^\circ$ , dok su kod skupina  $0^\circ$  i  $90^\circ$  moduli podjednaki.



Slika 58. Kumulativna razdioba vrijednosti normalizirane savojne čvrstoće za skupinu 0°



Slika 59. Kumulativna razdioba vrijednosti normalizirane savojne čvrstoće za skupinu 45°



Slika 60. Kumulativna razdioba vrijednosti normalizirane savojne čvrstoće za skupinu 90°

U tablici 8. su statistički podaci za rezultate mjerenja savojne čvrstoće svih triju skupina.

Tablica 8. Statistički podaci za rezultate mjerenja savojne čvrstoće za sve skupine

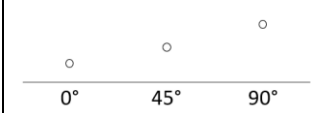


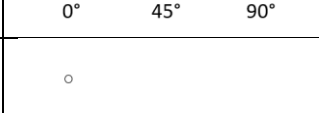
Skupina uzoraka	$\sigma_r$ , min MPa	$\sigma_r$ , max MPa	$\sigma_r$ , sr. MPa	standardna devijacija	Weibullov modul	koeficijent varijacije, %
0°	83,4	196,8	138,5	26,10	6,3876	18,84
45°	113,8	180,0	149,9	18,08	9,8888	12,06
90°	79,2	187,5	151,4	25,35	6,5328	16,74

Najveća srednja vrijednost savojne čvrstoće izmjerena je kod skupine uzoraka 90° i iznosi 151,4 MPa. Kod druge dvije skupine vrijednosti savojne čvrstoće su nešto manje. Prema normi, koeficijent varijacije za vrijednosti savojne čvrstoće ne smije biti veći od 16 % [14]. Vrijednosti koeficijenta varijacije za skupinu 0° i 90° više su od dopuštene vrijednosti. Skupina uzoraka 45° jedina ima koeficijent varijacije manji od 16 %.

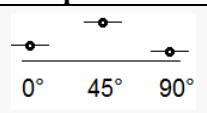
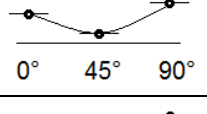
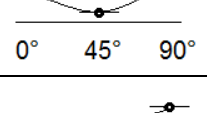
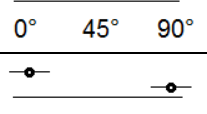
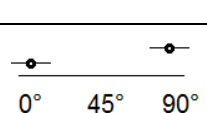
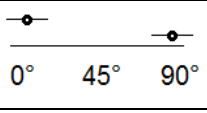
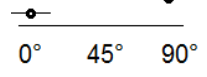

U Tablica 9. prikazan je kvalitativni trend promjene savojnog modula elastičnosti u ovisnosti o kutu između savojne sile i tangente na godove, koji su dobiveni pri ispitivanju različitih vrsta drva na Zavodu za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje [29–31]. Zbog usporedbe, u tablicu su uvršteni i rezultati za tikovinu, dobiveni u ovom radu.

U tablici 10. prikazani su isti rezultati iz recentne znanstvene literature [32–37].

Tablica 9. Sažetak radova o savojnom modulu elastičnosti različitih vrsta drva

Vrsta drva	Literatura	Vrsta opterećenja	Shematski prikaz
Tikovina	ovaj rad	savojno	
Subfosilni brijest	Balaton, 2016	savojno	
Jela	Mrvelj, 2022	savojno	
Hrast lužnjak	Strunje, 2018	savojno	

Tablica 10. Sažetak istraživanja o savojnom modulu elastičnosti različitih vrsta drva [32–37]

Vrsta drva	Literatura	Vrsta opterećenja	Shematski prikaz
<i>Ulmus minor</i> (subfossil)	Essert et al. 2017.	savojno	
<i>Picea abies</i>	Mikšić et al. 2013.	tlačno	
<i>Picea abies</i>	Garab et al. 2010.	tlačno	
<i>Taxus baccata L.</i>	Garab et al. 2010.	tlačno	
<i>Eucalyptus tereticornis</i> and <i>Cassia ferruginea</i>	Lahr et al. 2014.	savojno	
<i>Erismia uncinatum</i> , <i>Aspidosperma polyneuron</i> , <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	Lahr et al. 2014.	savojno	
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Grotta et al. 2005.	savojno	
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Adamopoulos 2002.	savojno	

Pregledom dostupne recentne literature uočen je sličan utjecaj kuta između savojne sile i tangente na god na vrijednosti savojnog modula elastičnosti, kod tikovine i nekih južnoameričkih vrsta [34]. Sličan trend zabilježen je i kod bagrema [36]. Treba napomenuti da za ove vrste nema podataka za kut od 45°.

U tablici 11. kvalitativno su prikazane savojne čvrstoće iz završnih i diplomskih radova sa Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje [29,38,39].

**Tablica 11. Sažetak radova o savojnoj čvrstoći različitih vrsta drva**

Vrsta drva	Literatura	Vrsta opterećenja	Shematski prikaz
Tikovina		Savojno	
Subfossilni brijest	Balaton, 2016	Savojno	
Jela	Matić, 2022	Savojno	
Hrast lužnjak	Špiranec, 2018	Savojno	



## 8. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih vrijednosti može se zaključiti sljedeće:

1. Analizom mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu i računalnom tomografijom utvrđeno je da tikovina ima prstenasto poroznu mikrostrukturu.
2. Gustoća tikovine iznosila je  $0,67 \text{ g/cm}^3$  uz udio vlage od 6,56 %.
3. Kut između savojne sile i tangente na god utječe na vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće u longitudinalnom smjeru. Najviše vrijednosti izmjerene su kod kuta od  $90^\circ$ , a najniže kod kuta od  $0^\circ$ .
4. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti tikovine u longitudinalnom smjeru iznose 13,28 GPa za kut od  $0^\circ$ , 14,22 GPa za kut od  $45^\circ$  i 14,77 GPa za kut od  $90^\circ$ . Rasipanja rezultata su velika, ali je koeficijent varijacije u dopuštenim granicama.
5. Vrijednosti savojne čvrstoće tikovine u longitudinalnom smjeru iznose 138,53 MPa za kut od  $0^\circ$ , 149,86 MPa za kut od  $45^\circ$  i 151,41 MPa za kut od  $90^\circ$ . Rasipanja rezultata su velika, za kut od  $0^\circ$  i  $90^\circ$  prelaze normom dopuštene vrijednosti.
6. Sve dobivene vrijednosti za savojni modul elastičnosti i savojnu čvrstoću mogu se dobro opisati Weibullovom distribucijom. Najveći Weibullov modul je kod uzoraka gdje je kut između savojne sile i tangente na godove  $45^\circ$ . Koeficijent determinacije za sve kutove je vrlo visok (veći od 0,94).

**LITERATURA**

- [1] Rede V. Drvo - tehnički materijal. 2017.
- [2] Pinus sylvestris. Scots pine. Stem. Transverse section. 64X - Histological sections - Pinus sylvestris (Scots pine) - Pinus (Pine) - Pinaceae - Pinophyta (Conifers) - Botany - Photos [Internet]. (pristupljeno: 2023-10-17). Dostupno na: <https://www.nature-microscope-photo-video.com/en/photos/botany/pinophyta-conifers/pinaceae/pinus-pine/pinus-sylvestris-scots-pine/histological-sections/0104090105150707z47-pinus-sylvestris-scots-pine-stem-transverse-section-64x.html>
- [3] Oak Wood Cross Section - Science in the News [Internet]. (pristupljeno: 2023-10-17). Dostupno na: <https://sitn.hms.harvard.edu/art/2017/oak-wood-cross-section/>
- [4] de Geus AR, Silva SF da, Gontijo AB, Silva FO, Batista MA, Souza JR. An analysis of timber sections and deep learning for wood species classification. *Multimed Tools Appl.* 27. prosinac 2020.;79(45–46):34513–29. doi: 10.1007/s11042-020-09212-x
- [5] Forest Service U, Products Laboratory F. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material [Internet]. 2010. Dostupno na: [www.fpl.fs.fed.us](http://www.fpl.fs.fed.us).
- [6] Rede V. Autorizirane vježbe iz kolegija „keramika, beton, drvo“. Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb. 2015.
- [7] Mathews SL, Pawlak J, Grunden AM. Bacterial biodegradation and bioconversion of industrial lignocellulosic streams. *Appl Microbiol Biotechnol.* 27. travanj 2015.;99(7):2939–54. doi: 10.1007/s00253-015-6471-y
- [8] Traheje i traheide. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje [Internet]. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. 2021 (pristupljeno: 2023-10-20). Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=61979>
- [9] Parham RA, Gray RL. Formation and Structure of Wood [Internet]. 1984. Dostupno na: <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- [10] Janušić V. Predtretmani u proizvodnji bioetanolu iz lignocelulozne biomase. Tajana Krička. (1).
- [11] Sjöström E, Alén R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Sjöström E, Alén R, urednici. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1999. doi: 10.1007/978-3-662-03898-7
- [12] Nairn JA. A numerical study of the transverse modulus of wood as a function of grain orientation and properties. *Holzforschung.* 01. lipanj 2007.;61(4):406–13. doi: 10.1515/HF.2007.079

- [13] Strunje K, Gojanović-Rakić M, Essert S, Rede V. Effects of microstructural orientation on bending modulus of elasticity of oak trunks in the longitudinal direction. 2018.
- [14] Green DW, Winandy JE, Kretschmann DE. Mechanical Properties of Wood.
- [15] Rede V, Essert S, Kodvanj J. Annual ring orientation effect on bending strength of subfossil elm wood. *Journal of Wood Science*. 01. veljača 2017.;63(1):31–6. doi: 10.1007/s10086-016-1596-x
- [16] Essert S, Rede V, Švagelj Z. The bending modulus of elasticity of subfossil elm wood.
- [17] Wang T, Wang Y, Crocetti R, Wålinder M. Influence of face grain angle, size, and moisture content on the edgewise bending strength and stiffness of birch plywood. *Mater Des. studeni 2022.*;223:111227. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111227
- [18] Kaosa-ard A. Its natural distribution and related factors. Sv. 29. 1989.
- [19] Rizanti DE, Darmawan W, George B, Merlin A, Dumarcay S, Chapuis H, i ostali. Comparison of teak wood properties according to forest management: short versus long rotation. *Ann For Sci*. 01. lipanj 2018.;75(2). doi: 10.1007/s13595-018-0716-8
- [20] Bhat KM, Priya PB. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat region in India\*. Sv. 25, *IAWA Journal*. 2004.
- [21] Lengowski EC, Bonfatti EA, Nisgoski S, Bolzon de Muñiz GI, Klock U. Properties of thermally modified teakwood. *Maderas Ciencia y tecnología. studeni 2020.*;23. doi: 10.4067/S0718-221X2021000100410
- [22] Jain P, Srivastava AK, Rathore JS, Shrivastava S. An evaluation of tactile frictional behavior of the wooden material. *J Phys Conf Ser*. 01. srpanj 2019.;1240(1):012120. doi: 10.1088/1742-6596/1240/1/012120
- [23] Meier E. *WOOD! Identifying and Using Hundreds of Woods Worldwide*. 2015.
- [24] Martha R, Mubarak M, Batubara I, Rahayu IS, Setiono L, Darmawan W, i ostali. Effect of furfurylation treatment on technological properties of short rotation teak wood. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021.;12:1689–99. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.03.092
- [25] Tripati S, Shukla SR, Shashikala S, Sardar A. Teak: A Preferred Timber for Shipbuilding in India as Evidenced from Shipwrecks. *Curr Sci*. 10. lipanj 2016.;110(11):2160. doi: 10.18520/cs/v110/i11/2160-2165
- [26] International Organization for Standardization. ISO 13061 - Physical and mechanical properties of wood.

- [27] Muslić M. Poboljšanje svojstava kompozita na bazi aluminijske i lebdjećeg pepela postupkom kutnoga istiskivanja. 2023.
- [28] Kocijan M, Vukšić M. Vježba 4: Weibullova raspodjela, Kolegij: Keramika, beton, drvo. 2019.
- [29] Balaton A. Utjecaj usmjerenosti strukture na savojnu čvrstoću drva [Diplomski rad]. Zagreb; 2016.
- [30] Mrvelj N. Utjecaj usmjerenosti strukture na savojni modul elastičnosti drva jele u longitudinalnom smjeru [Završni rad]. [Zagreb]: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2022.
- [31] Strunje K. Savojni modul elastičnosti drva hrasta u longitudinalnom smjeru [Završni rad]. [Zagreb]: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [32] Miksic A, Myntti M, Koivisto J, Salminen L, Alava M. Effect of fatigue and annual rings' orientation on mechanical properties of wood under cross-grain uniaxial compression. *Wood Sci Technol.* 26. studeni 2013.;47(6):1117–33. doi: 10.1007/s00226-013-0561-8
- [33] Garab J, Keunecke D, Hering S, Szalai J, Niemz P. Measurement of standard and off-axis elastic moduli and Poisson's ratios of spruce and yew wood in the transverse plane. *Wood Sci Technol.* 11. kolovoz 2010.;44(3):451–64. doi: 10.1007/s00226-010-0362-2
- [34] Antonio Rocco Lahr F, Luis Christoforo A, Hallak Panzera T, Aparecido Lopes Silva D, Gonçalves D. Anisotropy Influence in Obtaining Stiffness Property in Bending of Brazilian Wood Species. *International Journal of Materials Engineering.* 01. lipanj 2014.;4(3):92–6. doi: 10.5923/j.ijme.20140403.04
- [35] Grotta A, Leichti R, Gartner B, Johnson GR. Effect of growth ring orientation and placement of earlywood and latewood on MOE and MOR of very-small clear douglas-fir beams. 2004.;
- [36] Adamopoulos S. Flexural properties of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) small clear wood specimens in relation to the direction of load application. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 01. listopad 2002.;60(5):325–7. doi: 10.1007/s00107-002-0328-7
- [37] Essert S, Rede V, Švigelj Z. The bending modulus of elasticity of subfossil elm wood.
- [38] Matić EB. Utjecaj usmjerenosti strukture na savojnu čvrstoću drva jele u longitudinalnom smjeru [Završni rad] [Internet]. Zagreb; 2022. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:904757>

- [39] Špiranec R. Savojna čvrstoća drva hrasta u longitudinalnom smjeru [Završni rad].  
Zagreb; 2018.