

Utjecaj dielektričnih svojstava hrastovine (*Quercus robur* L.) na postupak savijanja masivnog drva

Pervan, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:847209>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-19**



Repository / Repozitorij:

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



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

**DIPLOMSKI STUDIJ
DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI**

DARIO PERVAN

**UTJECAJ DIELEKTRIČNIH SVOJSTAVA HRASTOVINE
(*QUERCUS ROBUR* L.) NA POSTUPAK SAVIJANJA MASIVNOG
DRVA**

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, RUJAN, 2024.

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

**UTJECAJ DIELEKTRIČNIH SVOJSTAVA HRASTOVINE
(*QUERCUS ROBUR L.*) NA POSTUPAK SAVIJANJA MASIVNOG
DRVA**

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Drvnotehnološki procesi

Predmet: Termohidromehanička Obrada Drva

Ispitno povjerenstvo: 1. (mentor) prof. dr. sc. Stjepan Pervan

2. (član) prof. dr. sc. Silvana Prekrat

3. (član) prof. dr. sc. Mladen Brezović

Student: Dario Pervan

JMBAG: 0068234868

Datum odobrenja teme: 26.04.2024

Datum predaje rada: 28.08.2024

Datum obrane rada: 25.9.2024

ZAGREB, RUJAN, 2024.

Dokumentacijska kartica

Naslov:	Utjecaj dielektričnih svojstava hrastovine (<i>Quercus robur</i> L.) na postupak savijanja masivnog drva
Autor:	Dario Pervan
Adresa autora:	Domobranska ulica 4, Zagreb
Mjesto izrade:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Diplomski rad
Mentor:	prof. dr. sc. Stjepan Pervan
Izradu rada pomogao:	/
Godina objave:	2024.
Opseg:	I-X + 48 stranica, 47 slika, 13 navoda literature
Ključne riječi:	dielektrična konstanta, hrast lužnjak, savijanje drva, mikrovalne frekvencije, hidrotermička obrada
Sažetak:	<p>U ovom diplomskom radu provesti će se istraživanje o utjecaju različitih karakteristika hrastovine (<i>Quercus robur</i> L.) na dielektričnu konstantu u električnom polju visoke frekvencije u laboratorijskim uvjetima. Karakteristike hrastovine koje će biti varirane su: tekstura drva, volumna masa drva, sadržaj vode i vlaga ravnoteže. Priprema uzoraka za mjerenje dielektrične konstante će biti obavljena u klima komori pri više različitih temperatura i vlaga ravnoteže. Navedeno istraživanje će u proizvodnim uvjetima poslužiti kao osnova za mjerenje zagrijavanja drvnog materijala koje je neophodno provesti pri savijanju masivnog drva.</p>

Documentation card

Naslov:	The influence of dielectric properties of oakwood (<i>Quercus robur</i> L.) on bending process of solid wood
Autor:	Dario Pervan
Adresa autora:	Domobranska ulica 4, Zagreb
Mjesto izrade:	Faculty of forestry and wood technology, University of Zagreb
Vrsta objave:	Master's thesis
Mentor:	Professor Stjepan Pervan, PhD
Izradu rada pomogao:	/
Godina objave:	2024.
Opseg:	I-X + 48 stranica, 47 slika, 13 navoda literature
Ključne riječi:	dielectric constant, pedunculate oak, wood bending, microwave frequencies, hydrothermal treatment
Sažetak:	<p>In this thesis, research will be conducted on the influence of different characteristics of oak wood (<i>Quercus robur</i> L.) on the dielectric constant in a high-frequency electric field in laboratory conditions. The characteristics of oak wood that will be varied are wood texture, wood volume, moisture content and equilibrium moisture content. The preparation of samples for measuring the dielectric constant will be done in a climate chamber at several different temperatures and equilibrium moisture contents. In industrial conditions, the mentioned research will serve as a basis for measuring the heating of wood material, which must be carried out when bending solid wood.</p>

	IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	OB FŠDT 05 07
		Revizija: 2
		Datum: 2.2.2021.

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

vlastoručni potpis

Dario Pervan

U Zagrebu, 25.9.2024

Sadržaj

Dokumentacijska kartica.....	I
Documentation card.....	II
Sadržaj	IV
Popis slika	VI
Popis tablica	IX
Predgovor.....	X
1. UVOD.....	1
1.1. Izolacijski materijali u električnome polju.....	2
1.2. Električna svojstva drva	4
1.2.1. Specifični električni otpor drva.....	4
1.2.2. Dielektrična konstanta drva	5
1.2.2.1. Određivanje dielektrične konstante pomoću istosmjerne struje	5
1.2.2.2. Određivanje dielektrične konstante pomoću izmjenične struje	6
1.3. Proces savijanja drva.....	8
1.3.1. Načini oblikovanja drva	8
1.3.2. Viskoelastična svojstva drva.....	9
1.3.3. Odabir vrste drva za savijanje.....	13
1.3.4. Predobrada drva prije savijanja.....	15
1.3.5. Plastifikacija drva.....	15
1.3.6. Savijanje drva.....	17
1.3.7. Završna obrada.....	20
1.3.8. Greške savijanja	20
1.4. Hrast lužnjak (<i>Quercus robur L.</i>)	21
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	23
3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	24

3.1. Dielektrična svojstva nekih vrsta listača na mikrovalnim frekvencijama.....	24
3.2. Utjecaj uvjeta obrade na kvalitetu savijenog drva hrasta	26
3.3. Savijanje i visokofrekventno zagrijavanje bukovine (<i>Fagus sylvatica</i> L.) ...	30
4. MATERIJALI I METODE	35
4.1. Materijali	35
4.2. Metode istraživanja	36
5. REZULTATI I DISKUSIJA	39
5.1. Rezultati dielektričnih svojstava	39
5.2. Diskusija	43
6. ZAKLJUČAK	46
7. POPIS LITERATURE	47
8. PRILOG	48

Popis slika

- Slika 1.** *Stvaranje induciranog naboja u izolatoru: a) električno polje između dvije nabijene ploče, b) inducirani naboj u izolatoru i njegovo polje, c) rezultirajuće polje (Berberović i sur.,1996)*
- Slika 2.** *Relativne permitivnosti (dielektrične konstante) i dielektrične čvrstoće nekih izolacijskih materijala (Berberović i sur.,1996)*
- Slika 3.** *Specifični električni otpor bora (Pinus elliotti) prikazan kao funkcija njegovog sadržaja vode (Glass i sur.,2010)*
- Slika 4.** *Ovisnost dielektrične konstante o sadržaju vode drva: topole (prikazane krugovima), bukve (prikazane trokutima) i joha (prikazane kvadratima). (Hamijet i Nurgul.,2003)*
- Slika 5.** *Ovisnost dielektričnog faktora gubitka o sadržaju vode drva: topole (prikazane krugovima), bukve (prikazane trokutima) i joha (prikazane kvadratima). (Hamijet i Nurgul.,2003)*
- Slika 6.** *Sastav stanične stijenke drvene tvari bora ,smreke, ariša, hrasta, breze i topole (Torgovnikov,1993)*
- Slika 7.** *Primjer elementa dobivenog tehnikom savijanja lameliranog spoja (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 8.** *Osnovne anatomske karakteristike drva (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 9.** *Elastična svojstva poznatijih vrsta drva (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 10.** *Odnos opterećenja i otklona od središnje osi drva tijekom ispitivanja čvrstoće na savijanje (Sedlar,n.d)*
- Slika 11.** *Deformacija i napetosti pri savijanju grede od hrasta: a) Neplastificirano drvo, b) Plastificirano drvo, c) Plastificirano drvo pod aksijalnim prednaprezanjem. (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 12.** *Najmanji mogući polumjeri zakrivljenja pri savijanju elementa debljine 25,4 mm. (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 13.** *Generator pare, dovod pare i sušionica (Milić,2020)*
- Slika 14.** *Prostor parionice u koji se postavljaju elementi za savijanje (Milić,2020)*
- Slika 15.** *Savijanje između muškog i ženskog kalupa (Taylor,2001)*
- Slika 16.** *Savijanje u oblik slova S (Taylor,2001)*
- Slika 17.** *Savijanje preko rotirajućeg valjka (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 18.** *Savijanje u dvije ravnine (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 19.** *Savijanje elementa u sinusoidan oblik (Sandberg i Parviz,2007)*
- Slika 20.** *Tipična pukotina na bukovom elementu nastala pri savijanju (Milić,2020)*
- Slika 21.** *Poprečni presjek hrasta lužnjaka (Todorović, 2020)*
- Slika 22.** *Ovisnost dielektričnog faktora gubitka i dielektrične konstante o sadržaju vode drva: topole (prikazane krugovima), bukve (prikazane trokutima) i joha (prikazane kvadratima). (Hamijet i Nurgul,2003)*

- Slika 23. Testni uzorci za provedbu eksperimenta (R-blistače, RT-polublistače, T-bočnice) (Straže i sur.,2023)*
- Slika 24. Opis procesa sušenja za svaku grupu po 30 uzoraka (Straže i sur.,2023)*
- Slika 25. Parenje uzoraka u parnome kotlu i postignuta površinska temperatura (Straže i sur.,2023)*
- Slika 26. Kalupna preša i postignute temperature u savijenim uzorcima (Straže i sur.,2023)*
- Slika 27. Određivanja prolaska brzine ultrazvuka kroz savijene uzorke (Straže i sur.,2023)*
- Slika 28. Uspješnost savijanja s obzirom na orijentaciju uzoraka (Straže i sur.,2023))*
- Slika 29. Drvni element u preši prije početka savijanja (Sandberg i Johansson,2005)*
- Slika 30. Rupe za izlaz vodene pare na metalnim ograničavajućim letvicama (Sandberg i Johansson,2005)*
- Slika 31. Kalup unutar preše (Sandberg i Johansson,2005)*
- Slika 32. Tlocrt linije za savijanje masivnog drva (Sandberg i Johansson,2005)*
- Slika 33. Vrijeme trajanja procesa (Sandberg i Johansson,2005)*
- Slika 34. Primjer parametara programa za savijanje bukovine (Sandberg i Johansson,2005)*
- Slika 35. Prikaz temperature drva, sadržaja vode drva i postotka odbačenih drvnih elemenata kroz vremensko trajanje procesa savijanja (Sandberg i Johansson,2005)*
- Slika 36. Primjer hrastovih lamela korištenih u eksperimentu (prve dvije lamele su tangენტnoga presjeka, dok su druge dvije radijalnoga presjeka)*
- Slika 37. Primjer širina godova hrastovih lamela korištenih u eksperimentu (prve dvije lamele su radijalnog presjeka, dok su druge dvije tangენტnoga presjeka)*
- Slika 38. Prikaz Agilent 4285 A LCR mjerača električnih svojstava*
- Slika 39. Hrastova lamela unutar ispitnog električnog polja*
- Slika 40. Vrijednosti unutar kondenzatora kada nije prisutan uzorak (C_s – kapacitet kondenzatora u pikofaradima, D – faktor gubitka)*
- Slika 41. Prikaz korisničkog sučelja mjernoga programa)*
- Slika 42. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti dielektrične konstante o frekvenciji električnog polja pri sadržajima vode hrastovih lamela od 5,2 do 7,7 %*
- Slika 43. Dijagram ovisnosti tangensa gubitka o frekvenciji električnog polja pri sadržajima vode hrastovih lamela od 5,2 do 7,7 %*
- Slika 44. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti dielektrične konstante o frekvenciji električnog polja do 1 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %*
- Slika 45. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti dielektrične konstante o frekvenciji električnog polja od 1MHz do 25 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %*

Slika 46. *Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti tangensa gubitka o frekvenciji električnog polja do 1 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %)*

Slika 47. *Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti tangensa gubitka o frekvenciji električnog polja od 1 do 25 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %*

Popis tablica

Tablica 1. Tehnički podaci ispitanih uzoraka hrastovih lamela

Tablica 2. Rezultati mjerenja dielektričnih svojstava uzoraka hrastovih lamela

Predgovor

Želim izraziti zahvalnost svom mentoru, prof. dr. sc. Stjepanu Pervanu, koji mi je omogućio realizaciju ovog rada te mi svojim brojnim stručnim savjetima pomogao pri pisanju i pronalaženju relevantne literature.

Posebno zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Alešu Stražeu i dr. sc. Juri Žigonu, koji su mi omogućili provedbu eksperimenta na Odjelu za lesarstvo Biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Ljubljani te me naučili kako koristiti ispitnu opremu, bez koje ovaj rad ne bi bio izvediv.

Posebnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima, koji su mi uvijek bili oslonac. Vaša ljubav, razumijevanje i neprestana podrška davali su mi snagu u trenucima kada mi je bila najpotrebnija.

Veliko hvala mojoj obitelji, koja je od samog početka studija bila uz mene, pružajući mi podršku i omogućivši ovaj uspjeh.

Na kraju, iskrena hvala mom pokojnom djedu, bez čije brige i ustrajnosti prema meni još od djetinjstva, ne bih bio ovdje gdje jesam danas. Znam da bi upravo on bio najponosniji u ovom trenutku.

Hvala vam.

1. UVOD

Drvo, kao prirodni kompozitni materijal, pokazuje raznolik raspon mehaničkih, toplinskih i električnih svojstava, što značajno utječe na raznolikost njegove uporabe u različitim industrijama. Među brojnim vrstama drva, hrast lužnjak (*Quercus robur* L.) ima poseban značaj zbog svojih estetskih svojstava, povijesne upotrebe i mehaničkih karakteristika. Razumijevanje odnosa između dielektričnih svojstava hrastovine i njegovog ponašanja unutar električnog polja ključno je za optimiziranje i povećanje uporabe procesa savijanja masivnog drva unutar drvne industrije.

Proces savijanja masivnog drva jedan je od osnovnih načina obrade drva, s primjenama koje se protežu od proizvodnje namještaja do konstrukcije građevinskih elemenata. Unatoč svojoj važnosti, temeljni mehanizmi koji upravljaju ponašanjem drva pri savijanju su izuzetno složeni. Istraživanja u znanosti o materijalima i tehnologiji pružila su nove uvide u ulogu dielektričnih svojstava u obradi drva, ističući potencijal za optimizaciju procesa savijanja kroz dublje razumijevanje tih svojstava.

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, u drvnu industriju je integrirana tehnologija mikrovalnog zagrijavanja. Pomoću mikrovalnog zračenja drvo se može zagrijavati, sušiti i međusobno spajati selektivnim zagrijavanjem ljepila unutar sljubnice. Ova metoda zagrijavanja drva nudi brojne potencijalne prednosti naspram klasičnih metoda zagrijavanja. Kada se koristi na pravilan način, omogućuje brže i ujednačenije zagrijavanje drva u odnosu na tradicionalne metode, uz to je ekonomičnije i omogućava jednostavniju kontrolu procesa zagrijavanja. Klasične (tradicionalne) metode oslanjaju se na prijenos energije materijalu putem konvekcije, kondukcije i zračenja topline s vanjskih površina materijala.

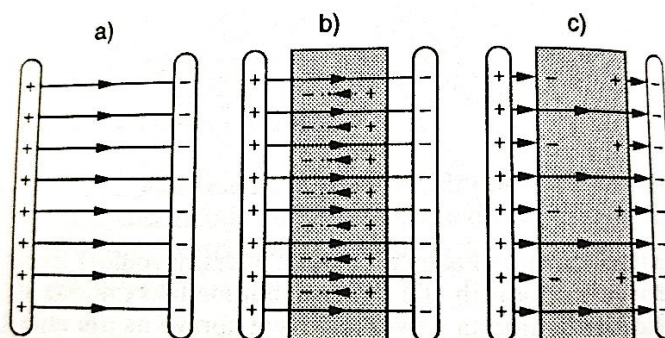
Električna svojstva, poput relativne permitivnosti (dielektrične konstante) i električne vodljivosti, predstavljaju inherentne karakteristike drva koje igraju ključnu ulogu u njegovoj interakciji s elektromagnetskim valovima. Na ove karakteristike utječu različiti faktori, među kojima su sadržaj vode, anatomska građa i kemijski sastav drva. Razumijevanje ovih obilježja i njihovih međusobnih djelovanja i utjecaja na proces savijanja drva je nužno neophodno za precizno predviđanje i efikasnu kontrolu ponašanja drva, posebno hrasta, tijekom procesa savijanja.

1.1. Izolacijski materijali u električnome polju

Izolacijski materijali ili izolatori su tvari koji, kada se nalaze unutar električnog polja, imaju izrazito malu električnu vodljivost (svojstvo tijela da propušta električnu struju). Izolatori se razlikuju od električnih vodiča po tome što nemaju slobodnih elektrona u strukturi, dok vodiči imaju.

Elektroni u izolatorima su čvrsto vezani uz atomsku jezgru, ali pod utjecajem električnog polja atomi se kreću u jednom smjeru, dok se elektroni kreću u suprotnom, uzrokujući promjenu u raspodjeli sila na negativni naboj. Ovaj proces, gdje se središta sila negativnog i pozitivnog naboja više ne podudaraju, nazivamo polarizacija dielektrika. Iako je ukupni naboj izolatora nepromijenjen i ostaje jednak nuli, određena područja pokazuju električni naboj koji se naziva inducirani naboj (Berberović i sur.,1996).

Pomaknuti naboj generira unutar izolatora električno polje čiji je smjer suprotan od smjera vanjskog polja. Snaga polja koju proizvodi premješteni naboj u izolatoru je manja od snage vanjskog polja. To rezultira induciranjem naboja suprotnog predznaka na površinama izolatora, koji je manji od naboja prisutnog na vodičima. Ponašanje izolatora u električnom polju prikazano je na slici 1.



Slika 1. Stvaranje inducirano naboja u izolatoru: a) električno polje između dvije nabijene ploče, b) inducirani naboj u izolatoru i njegovo polje, c) rezultirajuće polje (Berberović i sur.,1996)

Karakteristika izolatora da omogućuje prolazak električnog polja poznata je kao dielektričnost. Dosad opisana svojstva izolatora izražavaju se putem mjerne veličine poznate kao relativna dielektrična konstanta materijala u električnom polju (ϵ).

Ukupna permitivnost ili dielektrična konstanta može se proračunati putem slijedeće jednadžbe (1):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Gdje je: ϵ = dielektrična konstanta materijala u električnom polju

ϵ_0 = dielektrična konstanta vakuuma

ϵ_r = relativna permitivnost ili dielektrična konstanta

Relativna permitivnost ili dielektrična konstanta je bezdimenzijska veličina koja opisuje odnos električne propusnosti tvari unutar električnog polja i dielektrične konstante vakuuma. Dielektrična konstanta također opisuje koliko je puta veći kapacitet električnog kondenzatora kada se između njegovih elektroda umjesto vakuuma postavi izolacijski materijal.

Svaki izolacijski materijal karakterizira specifična granica električnog polja koju može podnijeti bez oštećenja. Kada jakost električnog polja premaši tu kritičnu granicu, električne sile unutar izolatora mogu prisiliti vanjske elektrone da napuste svoje uobičajene putanje, rezultirajući naglim porastom broja slobodnih elektrona. Ovaj fenomen poznat je kao električni proboj. Granica jakosti električnog polja na kojoj se proboj događa naziva se dielektričnom čvrstoćom, što predstavlja ključnu karakteristiku izolacijskih materijala (Berberović i sur.,1996).

Na slici 2. prikazane su vrijednosti relativne permitivnosti (dielektrične konstante) i dielektrične čvrstoće nekih izolacijskih materijala.

RELATIVNE PERMITIVNOSTI I DIELEKTRIČNE ČVRSTOĆE NEKIH IZOLACIJSKIH MATERIJALA			
Materijal	Debljina (μm)	Relativna permitivnost	Dielektrična čvrstoća (kV/mm)
suhi zrak		< 1	2,1 – 3
mineralno ulje		5	12 – 20
kvarc taljeni		3,2 – 3,9	12 – 15
mramor		8,3 – 10,3	20 – 50
porculan		5 – 7,5	20
staklo borosilikatno		4,9 – 6	30
natron-papir	15 – 250	1,4 – 2,6	8 – 14
polietilen	25 – 500	2,2	80 – 200
linjac		6 – 7	25 – 200
izolacijski lak		3,5	>30

Slika 2. Relativne permitivnosti (dielektrične konstante) i dielektrične čvrstoće nekih izolacijskih materijala (Berberović i sur.,1996)

Iznos dielektrične čvrstoće i dielektrične konstante materijala izrazito ovise o temperaturi, sadržaju vode, nehomogenosti i debljini izolatora koji se nalazi u električnome polju. Što je veća vrijednost dielektričnih svojstava materijala, on je bolji izolator.

1.2. Električna svojstva drva

Električna svojstva drva obuhvaćaju niz parametara, uključujući specifični električni otpor, dielektričnu konstantu, faktor energije te otpornost prema radiofrekventnoj struji. Za mjerenje specifičnog električnog otpora i električne vodljivosti obično se koristi istosmjerna struja (DC), dok se dielektrična konstanta, faktor energije i otpornost na radiofrekventnu struju mjere upotrebom izmjenične struje (AC) na drvo.

Glavni parametar drva koji utječe na iznos njegovih električnih svojstava je trenutnaćan sadržaj vode u drvu, ali i volumna masa, frekvencija električne struje i karakteristike vrte drva također imaju bitan utjecaj na električna svojstva drva.

U ovom poglavlju se detaljno razmatra neka od električnih svojstava drva koja su bitnija za proces zagrijavanja drva prije savijanja, obrađujući ih pojedinačno.

1.2.1. Specifični električni otpor drva

Specifični električni otpor drva može se odrediti pomoću slijedeće jednadžbe (2):

$$r = R * \frac{A}{d} \quad (2)$$

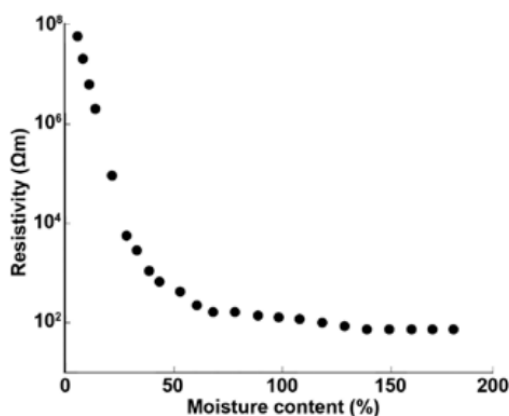
Gdje je: r = specifični električni otpor [Ω/cm]

R = električni otpor drva [Ω]

A = površina poprečnog presjeka otpornika [cm^2]

d = razmak elektroda [cm]

Specifični električni otpor drva izrazito ovisi o trenutnome sadržaju vode drva. Na slici 3. prikazan je odnos sadržaja vode drva i njegovog specifičnog električnog otpora.



Slika 3. Specifični električni otpor bora (*Pinus elliotti*) prikazan kao funkcija njegovog sadržaja vode (Glass i sur.,2010)

Kao što je vidljivo na slici 3, specifični električni otpor drva pada porastom njegovog sadržaja vode. U apsolutno suhom stanju specifični otpor drva je najveći. Porastom sadržaja vode do točke zasićenosti vlaknaca, specifični električni otpor drva eksponencijalno se smanjuje, dok porastom sadržaja vode iznad točke zasićenosti vlaknaca smanjenje specifičnog električnog otpora je mnogo manje izraženo.

Recipročna vrijednost specifičnog električnog otpora drva naziva se specifična električna vodljivost. Specifična električna vodljivost drva također ovisi o temperaturi, kutu vlaknaca. Za razliku od električne vodljivosti metala, vodljivost drva raste s povećanjem temperature. Električna vodljivost je veća duž vlaknaca nego poprečno na vlaknaca, te nešto veća u radijalnom smjeru nego u tangentskom. Relativne vrijednosti vodljivosti u uzdužnom, radijalnom i tangentskom smjeru odnose se približnim omjerom 1,0 : 0,55 : 0,50. Kada drvo sadrži velike količine vodotopivih soli ili drugih elektrolitskih tvari, kao što su konzervansi ili sredstva za usporavanje gorenja, ili je duže vrijeme u kontaktu s morskom vodom, njegova električna vodljivost može bitno porasti (Glass i sur.,2010).

1.2.2. Dielektrična konstanta drva

Dielektrična konstanta drva je omjer kapaciteta kondenzatora koji sadrži drvo kao dielektrični materijal i kapaciteta istog kondenzatora kada se u njemu nalazi vakuum. Postoje 2 načina određivanja dielektrične konstante drva. Prvi je način izlaganje drva istosmjernoj struji (DC), dok je drugi način izlaganje drva izmjeničnoj struji (AC).

1.2.2.1. Određivanje dielektrične konstante pomoću istosmjerne struje

Kada se električni potencijal ili napon V primijeni na savršeni izolator između dvije paralelne ploče, neće teći struja, već će se na pločama nakupiti naboj. Količina naboja po jedinici napona koju te ploče mogu pohraniti naziva se kapacitivnošću C i određena je slijedećom jednačinom (3):

$$C = \varepsilon * \varepsilon_0 * \frac{A}{d} \quad (3)$$

Gdje je: ε = dielektrična konstanta materijala u električnom polju

ε_0 = dielektrična konstanta vakuuma

A = površina poprečnog presjeka otpornika [cm^2]

d = razmak elektroda [cm]

Budući da drvo nije savršen izolator pri sadržajima vode iznad 0 %, dielektrična konstanta drva za istosmjernu struju nije dobro definirana i teoretski se ne može odrediti tehnikama mjerenja za istosmjernu struju. Unatoč tome, istraživanja su provedena s pokušajem izmjere ove veličine i došlo se do zaključka da je teško mjerljiva i da ovisi o metodama eksperimenta.

1.2.2.2. Određivanje dielektrične konstante pomoću izmjenične struje

Kada se drvo izloži izmjeničnoj struji, dielektrična konstanta više se ne može prikazati kao skalar, jer će odziv biti van faze s izvornim signalom. Dielektrična konstanta drva izloženog izmjeničnoj struji je kompleksan broj ($\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$), s realnom komponentom (ϵ'), imaginarnom komponentom (ϵ'' i j). Imaginarna komponenta također se naziva dielektričnim faktorom gubitka i ona predstavlja stopu gubitka električne energije u dielektriku. Umjesto prikazivanja realne i imaginarne komponente dielektrične konstante, u postojećoj literaturi o drvu uobičajeno je prikazati realnu komponentu dielektrične konstante i tangentu gubitka, koja je definirana slijedećom jednadžbom (4):

$$\tan(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

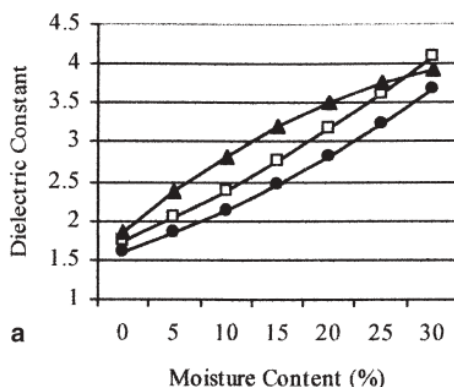
Gdje je: ϵ'' = imaginarna komponenta dielektrične konstante (dielektrični faktor gubitka)

ϵ' = realna komponenta dielektrične konstante

$\tan(\delta)$ = tangens gubitka

Realna komponenta dielektrične konstante tradicionalno se naziva „dielektrična konstanta“ u poštujućoj znanstvenoj literaturi o drvu. Dielektrična konstanta i tangens gubitka ovise nelinearno o frekvenciji struje na kojoj se mjere. Ovisnost o frekvenciji povezana je s mehanizmom električne vodljivosti u drvu. Na određenoj frekvenciji, dielektrična konstanta raste s povećanjem temperature drva i sadržaja vode. Na 20 Hz, dielektrična konstanta može varirati od otprilike 4 za suho drvo do blizu $1 \cdot 10^6$ za vlažno drvo. Na 1 kHz, može varirati od otprilike 4 kada je drvo suho do otprilike 5000 kada je vlažno i na 1 MHz dielektrična konstanta može varirati od otprilike 3 kada je drvo suho do otprilike 100 kada je vlažno. Dielektrična konstanta drva najveća je uzdužno naspram vlaknaca (Glass i sur.,2010).

Na slici 4. prikazan je odnos između sadržaja vode i dielektrične konstante drva mjereno u longitudinalnom smjeru pri frekvenciji izmjenične struje od 9,8 GHz.



Slika 4. Ovisnost dielektrične konstante o sadržaju vode drva: topole (prikazane krugovima), bukve (prikazane trokutima) i joha (prikazane kvadratima). (Hamiyet i Nurgul,2003)

Kada se drvo ili bilo koji dielektrični materijal nalaze u električnom polju izmjenične struje, ono će se zagrijavati. Ovo zagrijavanje nastaje zbog trenja između i unutar molekula dielektrika. Molekule se teže orijentirati na način da neutraliziraju električne naboje na pločama kondenzatora. Zbog ovog procesa zagrijavanja u dielektričnom materijalu dolazi do određenih gubitaka električne energije. Dio električne energije se pretvara u toplinsku energiju. Apsorbirana snaga u dielektričnom materijalu kada je podvrgnut izmjeničnom električnom polju može se izraziti pomoću faktora dielektričnog gubitka prikazanog pomoću slijedeće jednadžbe (5):

$$\varepsilon'' = \frac{P}{2\pi f E^2} \quad (5)$$

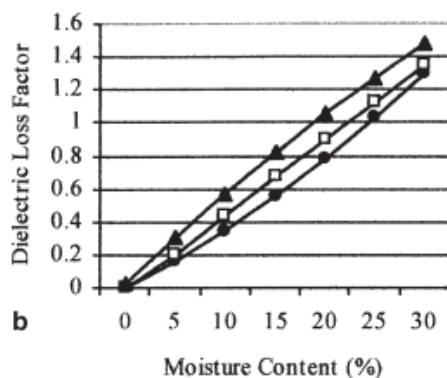
Gdje je: ε'' = dielektrični faktor gubitka

P = apsorbirana snaga [W/m^3]

f = frekvencija izmjenične struje električnog polja [Hz]

E = opseg električnog polja [V/m]

Odnos sadržaja vode drva i dielektričnog faktora gubitka mjenenog u longitudinalnome smjeru pri frekvenciji izmjenične struje od 9,8 GHz prikazan je na slici 5.



Slika 5. Ovisnost dielektričnog faktora gubitka o sadržaju vode drva: topole (prikazane krugovima), bukve (prikazane trokutima) i joha (prikazane kvadratima). (Hamijet i Nurgul,2003)

Dielektrični faktor gubitka drva je veći u usporedbi s inernim izolacijskim materijalima, no neki materijali, na primjer neke formulacije gume, imaju jednako velike faktore dielektričnog gubitka. Faktor snage drva varira od otprilike 0,01 za suha drva niske gustoće do čak 1,6 za vrste drva velike gustoće pri višim sadržajima vode. Dielektrični faktor gubitka obično, ali ne uvijek, veći je za električna polja duž drvnih vlaknaca nego okomito na vlakanca (Hamijet i Nurgul, 2003).

1.3. Proces savijanja drva

1.3.1. Načini oblikovanja drva

Činjenica da se vlažno drvo može oblikovati pod djelovanjem mehaničkih i toplinskih opterećenja poznata je već otprije. Oblikovanje drva zagrijanog parom praksa je koja datira još iz antike i provodila se na razne načine. Proces plastifikacije masivnog drva, s ciljem omogućavanja savijanja drvnog materijala bez nastanka pukotina, najčešći je način oblikovanja drvnih elemenata za namještaj i drvene brodove. Savijanje se može izvoditi u jednoj ili dvije ravnine te u različitim smjerovima unutar iste ravnine. Drvo se obično savija, nakon prethodne obrade parom, koristeći različite vrste uređaja za stezanje koji minimiziraju učinak napetosti na konveksnoj površini i maksimiziraju kompresijski učinak na konkavnoj površini, čime se smanjuje rizik od pucanja.

Na slici 6. prikazan je jedan od oblika koji je moguće postići savijanjem drvnih elemenata bukovine nakon prethodnog termo tretmana parom.



Slika 6. Savijeni elementi bukovine (*Fagus sylvatica* L.)

Drugi postupak koji uključuje oblikovanje drva savijanjem je tehnika lameliranja koja je prvenstveno usmjerena na savijanje furnira za mehanički neopterećene dijelove konstrukcije. U građevinarstvu se laminiranje piljenicama koristi za konstrukcijske elemente poput greda, stupova i panela zbog svoje visoke čvrstoće, stabilnosti i otpornosti na savijanje i pucanje. Osim toga, proizvodnja lameliranog drva omogućava bolje iskorištavanje drvnih resursa, jer se može proizvesti od manjih komada drva ili vrsta drva koje možda nisu pogodne za tradicionalne građevinske svrhe. Jedan od takvih lameliranih elemenata prikazan je na slici 7.



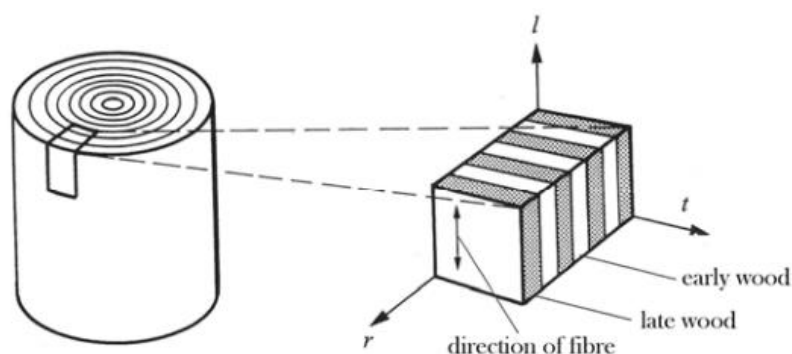
Slika 7. Primjer elementa dobivenog tehnikom savijanja lameliranog spoja (Sandberg i Parviz,2007)

1.3.2. Viskoelastična svojstva drva

Savijanje drvnog materijala u različite oblike moguće je zbog njegovih mehaničkih svojstava. Tijekom svog rasta, drvo razvija složenu i organiziranu strukturu koja mu omogućava da nosi vlastitu težinu, odolijeva unutarnjim napetostima uzrokovanim rastom i suprotstavlja se vanjskim silama. Osnovna svojstva drva direktno proizlaze iz njegove

mikrostrukture i sastavnih elemenata, što drvu daje izražene anizotropne karakteristike. To znači da su mehanička svojstva drva znatno izraženija u smjeru vlaknaca (uzdužno) u usporedbi s čvrstoćom okomitom na vlakanca. Mehanička svojstva drva se također razlikuju između radijalnog i tangენტnoga smjera unutar drva. Struktura debla, sa svojim približno cilindričnim oblikom, različitim udjelom ranog i kasnog drva unutar godova i uzdužno orijentiranim stanicama izrazito utječu na mehanička svojstva kasnije dobivenih elemenata iz svakog pojedinog drva. Ipak, treba imati na umu da drvo može sadržavati različite nedostatke i nesavršenosti poput kvrga, neujednačenog rasta i pukotina koje utječu na njegovu strukturu i mehanička svojstva.

Na slici 8. prikazane su osnovne anatomske karakteristike drva.



Slika 8. Osnovne anatomske karakteristike drva (Sandberg i Parviz,2007)

Mehanička svojstva drva dolaze do izražaja kada na drvo djeluju vanjske mehaničke sile koje teže promijeniti njegov prirodni oblik i dimenzije. Te promjene, poznate kao deformacije, mogu biti privremene, odnosno elastične, kada se drvo vraća u svoj izvorni oblik i dimenzije nakon prestanka djelovanja sile, ili trajne, tj. plastične, kada drvo zadržava promijenjeni oblik i dimenzije čak i nakon što sila prestane djelovati. Otpor koji drvo pruža djelovanju vanjskih mehaničkih sila poznat je kao unutarnje naprezanje, koje se manifestira na tri osnovna načina: vlačno, tlačno, i posmično naprezanje. Vlačna i tlačna naprezanja su rezultat djelovanja sile okomitih na površinu, dok je posmično naprezanje posljedica djelovanja sile paralelnih s površinom. Ove vrste naprezanja mogu zajedno djelovati i stvarati složena naprezanja, kao što je to slučaj pri savijanju. Mjera naprezanja određuje se kao količnik sile i površine na koju ta sila djeluje, dok se deformacije mogu kvantificirati apsolutno, u centimetrima, ili relativno izraženo u centimetrima po centimetru. Za svaku vrstu naprezanja postoji odgovarajuća deformacija, pri čemu su, unutar određenih granica, deformacije direktno proporcionalne intenzitetu naprezanja. Ovisnost deformacije i naprezanja opisana je Hookeovim zakonom, a izražava se slijedećom jednačbom (6):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

Gdje je: σ = opterećenjem izazvano naprezanje [N/mm²]

E = modul elastičnosti [N/mm²]

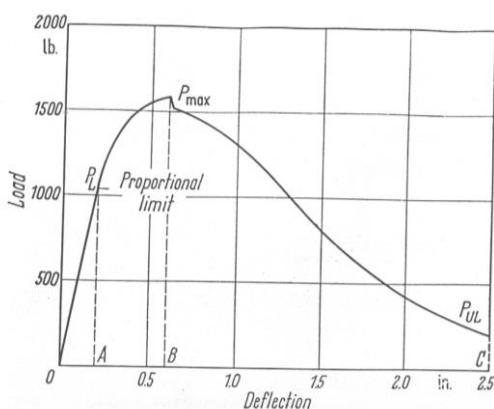
ε = relativno produljenje ili skraćenje

Modul elastičnosti ovisi o vrsti drva, anatomskoj građi, sadržaju vode, smjeru vlakanca, obliku presjeka i temperaturi. Na slici 9. prikazane su brojčane vrijednosti modula elastičnosti u sva tri anatomska smjera nekih poznatijih vrsta drva.

Elastic constants	Spruce (Pieca sitchensis)	Douglas (Pseudotsuga menziesii)	Fir (abies)	Poplar (Populus alba)	Oak (Quercus rubra)	Beech (Fagus silvatica)
Moisture content (u)%	12	12	13	14	12	11
Density (kg/m ³)	360	590	310	400	600	740
E_t (N/mm ²)	10 700	16 550	8 020	6 830	14 800	14 000
E_r (N/mm ²)	649	1 300	816	1 190	1 500	2 280
E_l (N/mm ²)	348	900	304	493	828	1 160

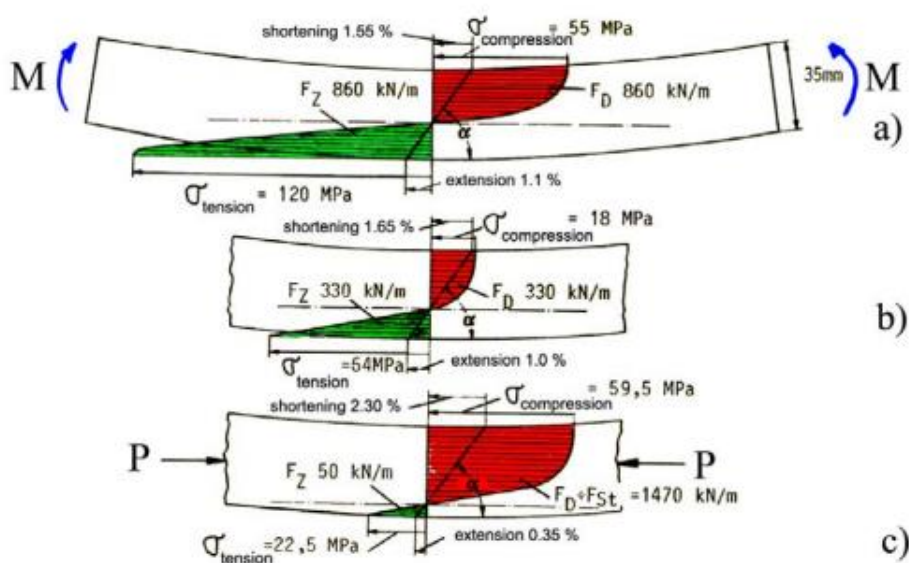
Slika 9. Elastična svojstva poznatijih vrsta drva (Sandberg i Parviz,2007)

Hookeov zakon opisuje samo onu deformaciju tijela koja se nalazi u elastičnome području. Kada naprezanje koje djeluje na tijelo prijeđe granicu elastičnosti, deformacija postaje plastična ili ireverzibilna. Najveće unutrašnje naprezanje neposredno prije loma naziv se čvrstoća. Na slici 10. prikazan je odnos opterećenja koje djeluje na drvo i njegovog otklona pri ispitivanja njegove čvrstoće na savijanje. P_{max} predstavlja čvrstoću drva na savijanje (točka loma), dok P_L predstavlja granicu elastičnosti drva. Područje naprezanja do granice elastičnosti predstavlja elastično područje, dok područje naprezanja nakon granice elastičnosti do točke loma predstavlja plastično područje.



Slika 10. Odnos opterećenja i otklona od središnje osi drva tijekom ispitivanja čvrstoće na savijanje (Sedlar,n.d)

Savijanje materijala je oblik mehaničkog naprezanja koje se javlja kada vanjska sila djeluje na materijal uzrokujući da se isti savije ili zakrivljuje, umjesto da se samo istegne ili stisne. Kod savijanja, dio materijala koji se nalazi na vanjskom radijusu savijanja rasteže se i podliježe vlačnim napetostima, dok se dio na unutarnjem radijusu komprimira i podliježe tlačnim napetostima. Između ova dva područja nalazi se neutralna os, gdje su napetosti minimalne ili nema deformacije. Savijanje može biti jednostavno ili složeno, ovisno o obliku i vrsti primijenjenih sila, kao i o karakteristikama materijala koji se savija. Razmotrimo što se događa s deformacijom i napetostima kada se na drvenu gredu primijeni savijajući moment, kako je prikazano na slici 11.



Slika 11. Deformacija i napetosti pri savijanju grede od hrasta: a) Neplastificirano drvo, b) Plastificirano drvo, c) Plastificirano drvo pod aksijalnim prednapretnjem. (Sandberg i Parviz,2007)

Dokle god se tlačna i vlačna naprezanja u savijenoj gredi drže ispod granice elastičnosti, neutralna os nalazi se u sredini grede. Međutim, ako se savijanje povećava, granica elastičnosti će uskoro biti premašena na strani grede na koju djeluju tlačna naprezanja i neutralna os (ili elastična linija) pomaknut će se prema strani grede na koju djeluju vlačna naprezanja. Tada je dostignuta situacija napetosti i savijanja kako je prikazano na slici 11 a), koja pokazuje da drvo počinje teći prilično brzo dok napetost na strani grede pod utjecajem vlačnih naprezanja raste. Budući da je deformacija do loma veća na strani grede pod tlakom nego na strani na koju djeluju vlačna naprezanja, materijal puca na strani grede na koju djeluju vlačna naprezanja mnogo prije nego što je materijalna plastičnost u potpunosti iskorištena na strani pod tlakom (Sandberg i Parviz,2007).

Kako bi se bolje mogla iskoristiti plastičnost materijala, neutralna os grede mora biti pomaknuta bliže strani pod vlačnim naprezanjem. To se u principu može postići na tri različita načina:

1. Promjenom presjeka nosača tako da veća količina materijala bude na strani pod djelovanjem vlačnih sila.
2. Plastifikacijom drva, posebno na strani koja je pod kompresijom, što se postiže tretmanom drva, na primjer u pari. Kada se drvo plastificira na ovaj način, deformacija do loma na strani grede na koju djeluju tlačna naprezanja drastično se povećava, ali povećanje deformacije do loma u strani grede na koju djeluju vlačna naprezanja je vrlo umjereno. Kod savijanja plastificirane drvene grede, dijagram naprezanja i deformacije je u principu prikazan na slici 11 b).
3. Izlaganjem drva aksijalnom prenaprezanju. Teoretski i praktično je pokazano da čak i kada je drvo plastificirano, lom se događa na strani pod djelovanjem vlačnog naprezanja prije nego što se plastičnost materijala na strani pod tlačnim naprezanjem u potpunosti iskoristi, ali to se može spriječiti aksijalnim prenaprezanjem. To se može postići postavljanjem fleksibilne metalne trake duž komada drvene grede na konveksnoj strani pod napetostima. Takva situacija prikazana je na slici 11 c). Varijacijom stupnja prenaprezanja, neutralna os se u teoriji može postaviti na bilo koju željenu poziciju (Sandberg i Parviz,2007).

1.3.3. Odabir vrste drva za savijanje

Jedan od ključnih parametara u procesu savijanja drva je najmanji mogući polumjer na koji se element drva može saviti bez oštećenja. Ova granica polumjera postiže se kada je drvo prethodno napeto do te mjere da se točka loma zbog vlačnih i tlačnih naprezanja jednako postiže na obje strane drvnog elementa na koje djeluju naprezanja. Vrijednost najmanjeg polumjera na koje se drvo može saviti razlikuje među različitim vrstama drva. Listače su generalno prikladnije za savijanje od četinjača. Također, prstenasto porozne listače su kvalitetnije za savijanje od difuzno poroznih listača. Jedan od razloga zašto četinjače pokazuje slabije performanse pri savijanju u odnosu na listače jest značajna razlika u mehaničkim svojstvima između ranog drva i kasnog drva kod četinjača. Gustoća također igra bitnu ulogu kod odabira vrste drva za savijanje. Listače veće gustoće pokazuju bolja svojstva kod savijanja naspram listača manjih gustoća. Na slici 12. prikazani su najmanji mogući polumjeri na koje je moguće saviti 25,4 mm debele elemente od različitih vrsta drva.

Najmanji polumjer savijanja definira se kao polumjer pri kojem dolazi do loma u ne više od 5 % svih testiranih uzoraka drva.

Species	Latin name	Smallest bending radius	
		Restrained (mm)	Unrestrained (mm)
Elm (Dutch)	<i>Ulmus hollandica</i>	13	240
Elm (English)	<i>Ulmus procera</i>	38	340
Ash	<i>Fraximus excelsior</i>	64	300
Birch (Canadian yellow birch)	<i>Betula alleghaniensis</i>	76	430
Beech (English)	<i>Fagus sylvatica</i>	38	330
Beech (Danish)	<i>Fagus sylvatica</i>	43	370
Douglas fir	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	460	840
Oak (European)	<i>Quercus robur</i>	51	330
Pine (Corsican)	<i>Pinus nigra</i>	860	740
Spruce	<i>Picea abies</i>	940	740
Hickory	<i>Carya sp.</i>	46	380
Iroko	<i>Chlorophora excelsa</i>	380	460
Larch	<i>Larix decidua</i>	330	460
Poplar	<i>Populus sp.</i>	810	660
Teak	<i>Tectona grandis</i>	460	890
Walnut (African)	<i>Lovoa trichilioides</i>	460	810

Slika 12. Najmanji mogući polumjeri zakrivljenja pri savijanju elementa debljine 25,4 mm. (Sandberg i Parviz,2007)

Kod odabira vrste drva, potrebno je znati kako uvjeti u kojima stablo raste utječu na njegove sposobnosti savijanja, te iz kojeg dijela debla bi trebalo uzeti elemente za naknadno savijanje. Primarno je važno odabrati drvo koje ima ravna vlakanca i koje ne sadrži nikakve ozbiljnije greške. Drvo namijenjeno savijanju ne smije imati kvрге, iako se manje kvрге mogu u određenim okolnostima tolerirati na strani koja se komprimira, osim ako nije riječ o vrlo malom radijusu savijanja. Kvrрге na strani drva na koju djeluju vlačna naprezanja imaju razoran učinak na njegovu strukturalnu čvrstoću (Sandberg i Parviz, 2007).

Pri izboru vrste drva, neophodno je razmotriti ne samo karakteristike pri savijanju, već i estetske karakteristike, mehanička svojstva materijala nakon oblikovanja, kao i dostupnost određene vrste drva. Na tržištu prevladavaju neke vrste, pri čemu je bukva najzastupljenija, a zatim slijede hrast i breza. Za specijalizirane primjene, poput izrade

sportske opreme, koriste se jasen i brijest. Odabir drvnih elemenata sa zadovoljavajućim svojstvima od najveće je važnosti za cijeli proizvodni proces. Za proizvode koji zahtijevaju savijanje na vrlo mali radijus, odabiru se ravna stabla s okruglim poprečnim presjekom. Stabla s nepravilnom poprečnim presjekom sadrže reakcijsko drvo, koje nije prikladno za upotrebu. Unutar svakog stabla treba birati dijelove s ravno raspoređenim i dugim vlakancima. Drvo u neposrednoj blizini srži, poznato kao juvenilno drvo, nije prikladno za upotrebu. Drvo koje pokazuje znakove propadanja ili ima plavu diskoloraciju potpuno je neupotrebljivo (Sandberg i Parviz,2007).

1.3.4. Predobrada drva prije savijanja

Iako je potrebno puno manje sile za savijanje vlažnog drva naspram suhog, elementi koji ulaze u proces savijanja moraju imati sadržaj vode ispod točke zasićenosti vlakanaca. Postoje 4 glavna razloga zašto savijanje vlažnog drva nije preporučljivo:

1. Postoji opasnost od pucanja drva uslijed hidrauličnog pritiska tekućine u ispunjenim staničnim šupljinama.
2. Skladištenje vlažnog drva je problematično zbog rizika od zaraze gljivama truležnicama i plijesni
3. Obrada vrlo vlažnog drva često ne daje zadovoljavajuće rezultate.
4. Preporučuje se sadržaj vode drva od 10 do 16 %, pošto pri nižim sadržajima vode drvo gubi svoju deformabilnost

Kvaliteta površine elementa za savijanje također je bitna karakteristika za proces savijanja. Neravnine na površini mogu uzrokovati nejednak raspored naprezanja pri savijanju što može dovesti do pucanja na tenzijskoj strani elementa.

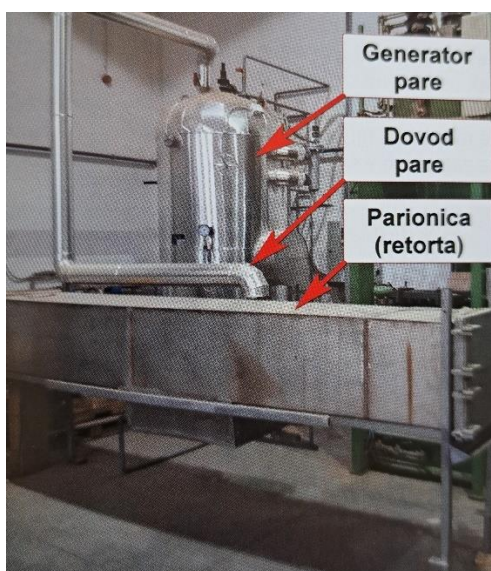
1.3.5. Plastifikacija drva

Plastifikacija ili omekšavanje drva ključan je korak u procesu savijanja drva. U osnovi, različite amorfne komponente drva poput lignina, hemiceluloze i dijelova celuloze imaju svoje specifične temperature staklastog prijelaza. Kada temperatura premaši te vrijednosti, elastičnost materijala znatno opada. Uvođenjem plastifikatora, poput vode, koja je ujedno i najučinkovitiji plastifikator za drvo, smanjuje se temperatura prijelaza. Za celulozu je temperatura staklastog prijelaza 230°C, za lignin 205°C, a za hemicelulozu oko 170°C. S vlagom od 20-25%, plastifikacija se postiže na mnogo nižim temperaturama, ispod

100°C. Plastifikacija se u praksi najčešće provodi zasićenom vodenom parom na temperaturi od oko 100°C i tlakom u parnoj komori od 0,2 bara. Dovoljno je zagrijati drvo na oko 100°C s 25% vlage, koristeći paru kako bi se spriječilo isušivanje. Potrebno je određeno vrijeme da se materijal temeljito zagrije, pri čemu je dobro pravilo omogućiti 2 minute po milimetru debljine materijala. Duže izlaganje pari ili veći tlak pare ne donose poboljšanja, što se poklapa i s teorijskim znanjima i praksom (Sandberg i Parviz,2007).

Parionice koje se koriste za plastifikaciju najčešće su oblika valjka ili prizme, kapaciteta od 0,1 m³ do 1 m³. Često ih poduzeća sama izrađuju. Takve parionice vrlo su rijetko automatizirane i moraju biti opremljene otvorima za izlaz viška pare i kondenzata.

Na slici 13. prikazana je izvedba parionice za plastifikaciju elemenata prije savijanja.



Slika 13. Generator pare, dovod pare i sušionica (Milić,2020)

Drvni elementi se u parionice slažu sa vertikalnim i horizontalnim razmacima kako bi se omogućilo ravnomjerno parenje u kratkom periodu. Unutarnji prostor parionice prikazan je na slici 14.



Slika 14. *Prostor parionice u koji se postavljaju elementi za savijanje (Milić,2020)*

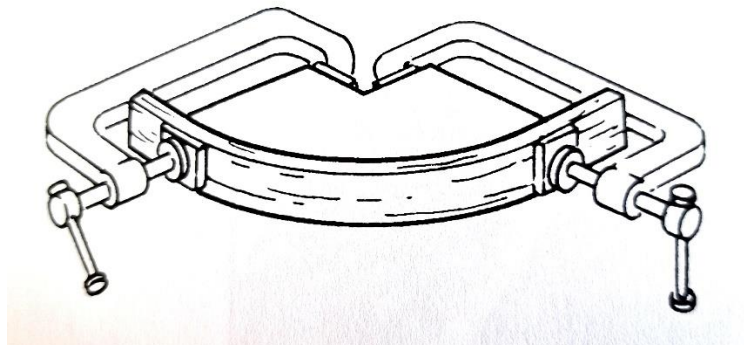
Ponekad se koriste alternativne metode grijanja, kao što su grijanje iznad otvorene vatre ili u vrućem, vlažnom pijesku, a primjenjuje se i grijanje u kipućoj vodi. Međutim, ova posljednja metoda može uzrokovati probleme s ispiranjem ekstraktivnih tvari koje mogu obojiti drvo. Tehnologije grijanja visokofrekventnim valovima i mikrovalovima također se koriste u istraživanjima. Iako su se ranije javljali problemi s nejednakim zagrijavanjem, danas se smatra da je uz poboljšano razumijevanje o mikrovalovnom zagrijavanju moguće postići ujednačeno grijanje drvnog elementa. Istraživanja plastifikacije s različitim kemikalijama su pokazala da je amonijak posebno obećavajuće sredstvo zbog svoje sposobnosti brze i efikasne plastifikacije kada djeluje na drvo. Osim što djeluje kao omekšivač, amonijak također razgrađuje dio kristalne strukture drva, što bi moglo biti značajno za budućnost obrade visoko kvalitetnih objekata, posebice za vrste drva koje su otporne na tradicionalne metode parnog tretmana (Sandberg i Parviz, 2007).

1.3.6. Savijanje drva

Savijanje drvnih elemenata nakon plastifikacije može se provesti na razne načine. Ako su dimenzije malene i broj uzoraka je ograničen, savijanje se može izvršiti jednostavnim ručnim alatima. Međutim, kada se radi o debljim dimenzijama drva i velikim serijama, koriste se strojevi. Bez obzira oblikuje li se materijal ručno ili uz pomoć stroja, načela rada su ista. Budući da je drvo nakon parenja još uvijek viskoelastično, rizik od pucanja značajno raste s povećanjem brzine savijanja. Stoga je važno održavati sporu brzinu savijanja, čak i kada se koriste strojevi. Važno je napomenuti da je preporučljivo tijekom savijanja podesiti stroj tako da se element savije za 5 do 10 % više od potrebnog, pošto tijekom micanja elementa iz kalupa dolazi do male relaksacije naprezanja.

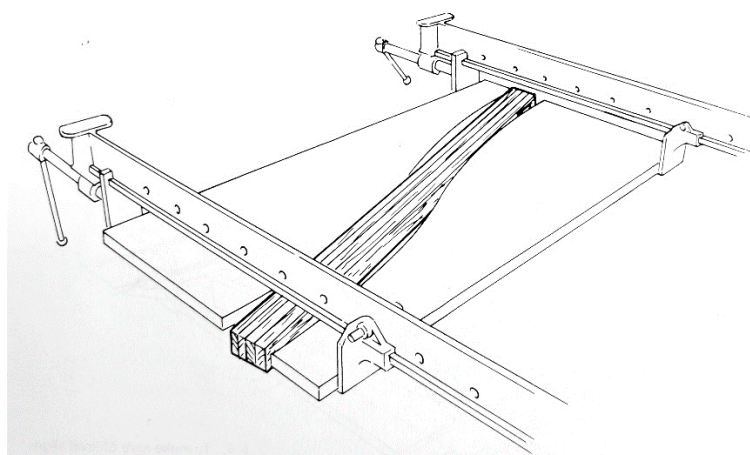
Općenito se može reći da su strojevi i oprema za savijanje tehnički relativno jednostavni. Iako su strojevi često posebno dizajnirani za proizvod koji se treba proizvesti, mogu se spomenuti sljedeće osnovne metode.

Savijanje između muškog i ženskog kalupa kako je prikazano na slici 15.



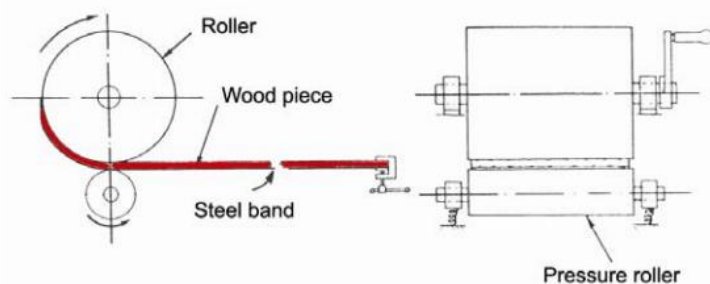
Slika 15. Savijanje između muškog i ženskog kalupa (Taylor,2001)

Savijanje u oblik slova S bez ograničavajuće trake kao je prikazano na slici 16.



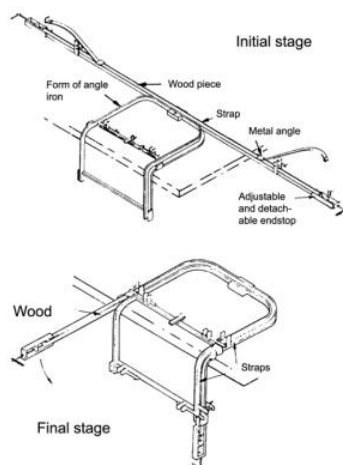
Slika 16. Savijanje u oblik slova S (Taylor,2001)

Savijanje pomoću rotirajućeg valjka. U ovom slučaju, cilindar pritišće drvo, koje je prethodno opterećeno metalnom ograničavajućom trakom, na oblikovni valjak kako je prikazano na slici 17. Debljina ograničavajuće trake mora biti prilagođena dimenzijama elementa drva. Obično se koristi metalna traka debljine oko 0,8 mm.

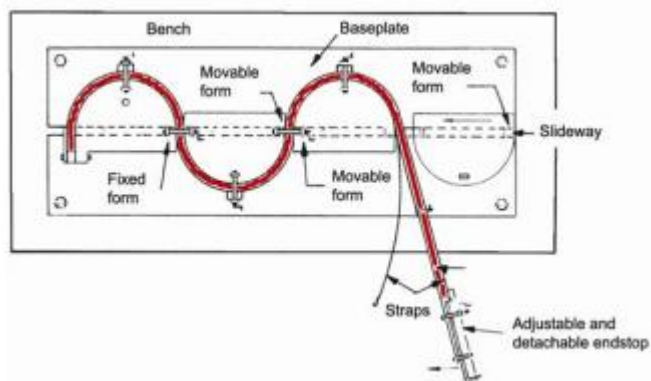


Slika 17. Savijanje preko rotirajućeg valjka (Sandberg i Parviz,2007)

Slika 18 prikazuje savijanje u dvije ravnine, dok slika 19 prikazuje savijanje u istoj ravnini, ali u različitim smjerovima. U oba slučaja koriste se dvije ograničavajuće trake s podesivim prihvaticima. Nikada se ne koristi više od jedne ograničavajuće trake odjednom. Kada se savijanje završi, drvo se fiksira u kalup, a ograničavajuća traka na strani na koju djeluju vlačna naprezanja se popušta.



Slika 18. Savijanje u dvije ravnine (Sandberg i Parviz,2007)



Slika 19. Savijanje elementa u sinusoidan oblik (Sandberg i Parviz,2007)

1.3.7. Završna obrada

Nakon savijanja, postignute deformacije moraju se napraviti stalnima prije nego što drveni element poprimi zadani oblik. To se postiže konačnim sušenjem materijala, koji je stegnut u kalupu ili nekom drugom držaču, do sadržaja vode od 7 do 12 %. Sušenje traje od 1 do 14 dana, ovisno o vrsti drva, temperaturi sušenja, dimenzijama drva te o tome koliko dobro kalup obuhvaća elemente drva i time otežava proces sušenja. Vrijeme sušenja može se znatno smanjiti korištenjem mikrovalnog i visokofrekventnog sušenja. Međutim, ne smije se sušiti previše intenzivno jer postoji rizik da će stvorena para dovesti do kolapsa stanične stijenke. Nakon sušenja, koje se odvija na temperaturi od 65 do 70°C ako se koristi ograničavajuća traka, drvo se mora ostaviti da se ohladi i kondicionira 24 do 48 sati dok je radijus savijanja još uvijek pod kontrolom, često uz upotrebu stezaljka ili sličnog uređaja. Gradijent sušenja mora biti nizak kako bi se izbjegle pukotine i druga oštećenja. Nakon kondicioniranja, provodi se završni proces koji uključuje piljenje do željenog oblika, popravke, brušenje, sastavljanje i obradu površine (Sandberg i Parviz, 2007).

1.3.8. Greške savijanja

Tipične greške koje se javljaju pri savijanju drva često su posljedica neadekvatne pripreme za proces savijanja. Ovi problemi mogu uključivati neodgovarajući toplinski tretman, kao što je preniska ili previsoka temperatura, ili neprimjereno trajanje tretmana. Nedostatak pare ili nejednolika raspodjela temperature unutar parionice također su česti uzroci problema. Još jedan važan faktor je neodgovarajući sadržaj vlage u drvu. Previsoka vlažnost može dovesti do kolapsa stanične stijenke, što uzrokuje naboranost površine drva na tlačnoj strani elementa, a može biti posljedica i predugog procesa parenja. S druge strane, preniska vlažnost može uzrokovati pucanje drva na strani koja je izložena vlačnim naprezanjima, što je prikazano na slici 20. Također, kod vrsta drva bogatih taninom, moguća je pojava diskoloracije uslijed kontakta s metalnom ograničavajućom trakom. Pravilna priprema i pažljiva kontrola uvjeta tijekom procesa savijanja ključni su za izbjegavanje ovih grešaka.



Slika 20. Tipična pukotina na bukovom elementu nastala pri savijanju (Milić, 2020)

1.4. Hrast lužnjak (*Quercus robur* L.)

Hrast lužnjak veliko je, listopadno širokolisno drvo, autohtono u većini Europe. Primjerci ove vrste mogu biti vrlo dugovječni, neki premašuju 1000 godina, i prilično veliki, dosežući visinu preko 40 metara i promjere od tri do četiri metra. Češće, ovi hrastovi postižu visinu oko 30 metara i promjere do jednog metra. Deblo hrasta lužnjaka obično nestaje u krošnji, razvijajući nepravilne grane. Kora je siva, ispucala i formira pravokutne produžene blokove koji su deblji od onih kod ostalih vrsta hrasta. Listovi hrast lužnjaka su jednostavni, jajoliko-duguljasti i duboko i nepravilno režljani, s kratkom peteljkom koja se kreće od 2 do 7 mm. Žirevi hrasta lužnjaka često su u parovima i nalaze se u ljuskastim čašicama na krajevima dugih stapki, vrlo su promjenjivi po veličini i obliku, ali su obično manji i zaobljeni s maslinasto zelenim uzdužnim prugama vidljivim kad su svježi (Eaton i sur., 2016)

Hrast lužnjak kategoriziran je kao prstenasto porozna vrsta drva s visokom gustoćom. Odlikuje se izvrsnom tvrdoćom, zbog čega je vrlo poželjan za tehnološku upotrebu. Drvo nudi dobru savitljivost i zadovoljavajuću dimenzijsku stabilnost, iako nije pogodno za impregnaciju. Kao trajna vrsta drva, zbog svoje privlačne teksture i svojstava, omogućuje širok raspon upotreba. Lužnjak se uglavnom prodaje kao trupci, rezana građa ili furnir. Sorte s uskim godovima obično se koriste u dekorativne svrhe ili kao furnir za uređenje interijera. Drvo s širim godovima izrađuje se u proizvode koji zahtijevaju visoku tvrdoću, čvrstoću i izdržljivost, kao što su mostovi, stepenice i parketi. Zbog svoje anatomske strukture, osobito prisutnosti tila u lumenima traheja, posebno je cijenjeno za izradu bačava i buradi za alkoholna pića. Kao cijenjeno tehničko drvo, koristi se za proizvodnju namještaja, rezanog furnira, stepenica, ručki za alate, građevinske stolarije, željezničkih pragova i elemenata za brodove (Todorović, 2023).

Na slici 21. prikazan je poprečni presjek hrasta lužnjaka



Slika 21. *Poprečni presjek hrasta lužnjaka (Todorović, 2020)*

Odabir hrastovine kao teme ovog diplomskog rada nije bio slučajan. U Hrvatskoj se hrastovina kao vrsta drva za savijanje ne koristi često i samim time njezine karakteristike pri savijanju nisu najbolje poznate. Drvo bukve (*Fagus sylvatica* L.) najviše je zastupljeno u procesu savijanja drva u Hrvatskoj i u ostatku svijeta. Razlog tome je su njegova dobra svojstva pri savijanju.

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj ovoga diplomskoga rada je istražiti utjecaj svojstava drva hrasta (*Quercus robur L.*) na iznos njegove dielektrične konstante u električnome polju kako bi se procijenila učinkovitost zagrijavanja hrastovih elemenata u električnome polju za potrebe procesa savijanja drva s fokusom na razumijevanje temeljnih mehanizama i optimizaciju parametara obrade. Kroz kombinaciju laboratorijskog mjerenja dielektrične konstante elemenata drva hrasta (*Quercus robur L.*) i eksperimentalne analize rezultata ovaj diplomski rad nastoji razjasniti odnos između dielektričnih svojstava i ponašanja pri savijanju, pružajući sistematizirani uvid kako korisnicima u industriji tako i istraživačima.

Sva mjerenja provedena su na Odsjeku za lesarstvo Biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Ljubljani u Laboratoriju za drvene kompozite. Pri provedbi rada korišteni su elementi drva hrasta (*Quercus robur L.*) koje je ustupila tvrtka Spin Valis d.d..

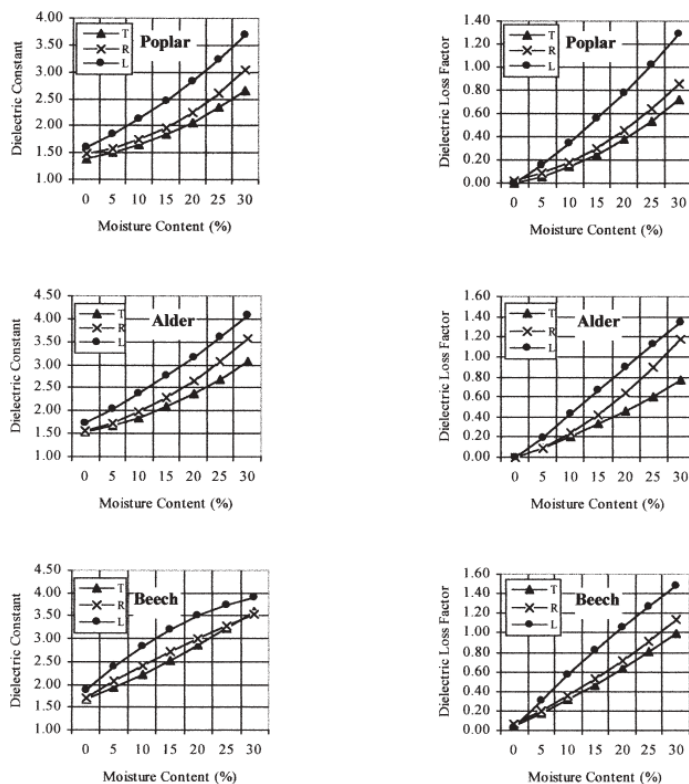
Značaj ovog istraživanja jest u njegovom potencijalu za povećanje učinkovitosti i održivosti procesa prerade drva, čime se pridonosi napretku drvoprerađivačke industrije. Razjašnjavanjem uloge dielektričnih svojstava u procesu savijanja hrastovine, ovaj rad ima za cilj pomoći razvoju inovativnih tehnika i tehnologija za izradu i korištenje drva.

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

3.1. Dielektrična svojstva nekih vrsta listača na mikrovalnim frekvencijama

Cilj istraživanja autora Hamiyet i Nurgul (2003) bio je determinirati dielektrična svojstva drva crne topole (*Populus nigra* L.), bukve (*Fagus sylvatica* L.) i johe (*Alnus glutinosa* L.). Navedene vrste drva su izabrane pošto se najčešće upotrebljavaju u industrijskoj upotrebi u Turskoj. Mjerenja su bila provedena na frekvencijama od 9,8 GHz i 2,45 GHz. Dimenzije uzoraka za mjerenje dielektričnih svojstava pri 2,45 GHz bile su 8,55 x 4,25 x 4,385 cm. Dimenzije uzoraka za mjerenje dielektričnih svojstava pri 9,8 GHz bile su 2,28 x 1,02 x 1,03 cm. Za određivanje vrijednosti dielektrične konstante pri različitim sadržajima vlage, u rasponu od oko 0% do točke zasićenosti vlaknaca, pripremljeni su uzorci sa tangentnim, radijalnim i poprečnim presjekom. Sadržaji vode uzoraka varirali su od 0 do 28 %. Za svaku vrst drva pripremljeno je po 5 uzoraka. Mjerenja su provedena Von Hippelovom metodom.

Izmjerene vrijednosti dielektrične konstante i dielektričnog faktora gubitka prikazane su na slici 22.



Slika 22. Ovisnost dielektričnog faktora gubitka i dielektrične konstante o sadržaju vode drva: topole (prikazane krugovima), bukve (prikazane trokutima) i johe (prikazane kvadratima). (Hamiyet i Nurgul,2003)

Rezultati pokazuju da se dielektrična svojstva povećavaju s porastom sadržaja vode unutar raspona korištenog u ovome radu. Taj je trend bio sličan za tri vrste drva. Za obje frekvencije, jednadžbe drugog reda dale su najbolje prilagođene krivulje za eksperimentalne podatke za dielektričnu konstantu i faktore dielektričnih gubitaka.

Povećanje dielektričnih svojstava drva može se objasniti kombinacijom dvije činjenice. Prvo, s povećanjem udjela vlage, količina vode unutar drvene matrice raste. Budući da dielektrična konstanta i faktor gubitka vode znatno nadmašuju one kod drva, očekuje se trend povećanja dielektričnih svojstava drva. Štoviše, kako udio vlage raste od apsolutno suhog stanja, polarne molekule vode koje se nalaze u drvu dobivaju veću slobodu rotacije pri višim udjelima vlage, što dodatno doprinosi izraženijem dielektričnom ponašanju. U potpuno suhom stanju, makromolekule celuloze u drvu međusobno su vezane sekundarnim valentnim silama koje sprječavaju premještanje dipola molekula pod utjecajem elektromagnetskog polja. Proces ovlaživanja omogućuje prodiranje molekula vode u celulozu i oslabljivanje poprečnih veza, što rezultira povećanom pokretljivošću dipola.

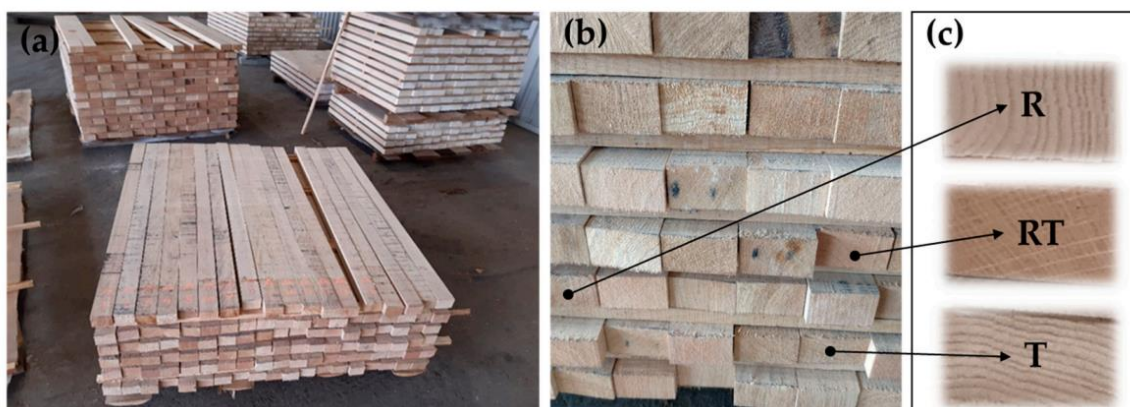
Drugi važan rezultat ovog istraživanja je odnos između anatomskega smjera drva i dielektrične konstante te faktora gubitka. Prema tom odnosu, dielektrični parametri tri vrste drva u longitudinalnome smjeru značajno su viši nego u tangentnome smjeru. Za topolu, johu i bukvu, vrijednosti dielektrične konstante na frekvencijama od 2,45 GHz i 9,8 GHz bile su 1,3, 1,3 i 1,2 te 1,3, 1,2 i 1,2 puta veće od vrijednosti u tangentnome smjeru. Također, vrijednosti faktora gubitka dielektriciteta u longitudinalnome smjeru na frekvencijama od 2,45 GHz i 9,8 GHz bile su 2,0, 2,1 i 2,0 te 1,3, 1,2 i 1,2 puta veće od onih u tangentnome smjeru, respektivno. S povećanjem frekvencije, koeficijenti su pokazali zanemarivo smanjenje. Radijalne vrijednosti bile su nešto veće od tangentnih, no ta razlika je zanemariva u usporedbi s razlikom između longitudinalnom i tangentnog smjera. Razlika u dielektričnim svojstvima između uzdužnog, radijalnog i tangentnog smjera može se pripisati razlikama u rasporedu stanične stijenke i lumena, specifičnoj molekularnoj strukturi stanične stijenke te anizotropiji supstanci stanične stijenke.

U cijelom rasponu sadržaja vode do 25 %, topola i bukva pokazuju najniže, odnosno najviše vrijednosti dielektrične konstante i faktora gubitka. Nakon sadržaja vode od 25 %, krivulja dielektrične konstante johe premašuje onu bukve, no ova situacija nije zabilježena za faktor gubitka. Razlike u dielektričnom ponašanju među vrstama drva povezane su s jednom ili više njihovih specifičnih karakteristika. Među njima, faktori koji upravljaju sorpcijskim ponašanjem drva i strukturom svake vrste, određujući specifičnu gustoću i

propusnost, mogu biti odlučujući. Prosječne gustoće topole, johe i bukve iznose 0,363, 0,475 i 0,658 g/cm³. Kada se na dielektrik primijeni izmjenični napon, molekule se teže uskladiti s poljem, a kretanje ovisi o unutarnjim vezivnim silama u materijalu. Prema tome, u vrstama drva manje gustoće postoji manje polarnih skupina koje prate dielektričnu polarizaciju, što znači da su dielektrična svojstva vrsta drva manje gustoće niža od onih veće gustoće. Iz tog razloga može se tvrditi da razlike u dielektričnim svojstvima vrsta drva analiziranih u ovome radu koreliraju sa gustoćom i sorpcijskim svojstvima svake vrste drva.

3.2. Utjecaj uvjeta obrade na kvalitetu savijenog drva hrasta

U ovome radu autori Straže i sur. (2023) istražuju utjecaj sadržaja vode i krutosti drva hrasta (*Quercus robur* L.) na njegova svojstva pri savijanju. Uzorci hrasta korištenih u ovome istraživanju dobiveni su piljenjem trupaca više klase kvalitete. Testni uzorci bili su 1300 mm dugi, 60 mm široki i 38 mm debeli te su imali ravna vlakna i piljeni su iz srži drva. Ukupno je izrađeno 120 uzoraka pri čemu su 40 % uzoraka bile blistače i polublistače, dok su preostalih 20 % uzoraka bile bočnice. Uzorci su prikazani na slici 23. Prosječni početni sadržaj vode uzoraka iznosio je 56,3% .



Slika 23. Testni uzorci za provedbu eksperimenta (R-blistače, RT-polublistače, T-bočnice) (Straže i sur.,2023)

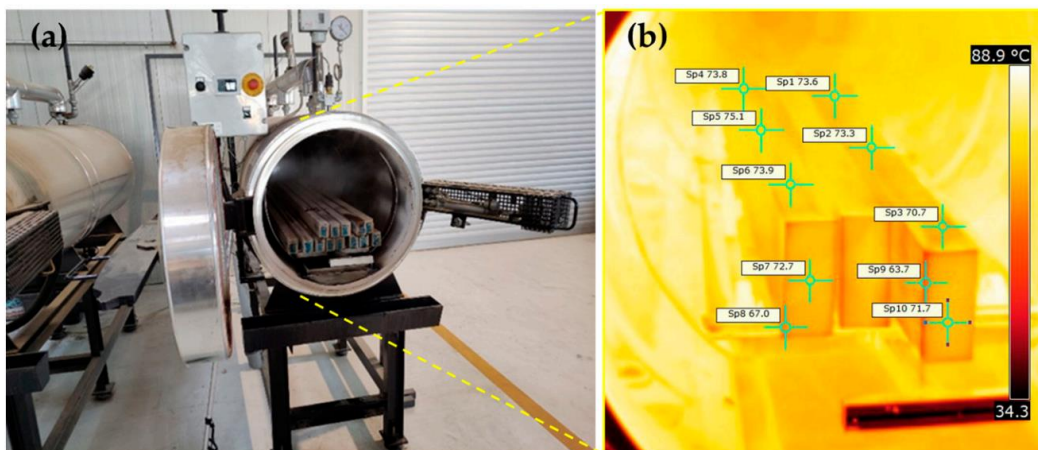
Za optimizaciju organizacije industrijskog proizvodnog procesa, u istraživanje su uključene tri različite tehnike sušenja piljene građe: prirodno sušenje (AD), konvekcijsko sušenje (KD) i vakuumsko sušenje (VD). Kako bi se postigla dovoljno kratka vremena obrade, autori su kombinirali ove dostupne industrijske tehnike sušenja. Autori su testirali mogućnost jednofazne obrade hrastovih elemenata do konačnog sadržaja vlage (MC) od 8% prije savijanja (G1, G2) i dvofazne obrade (G3, G4). U potonjem slučaju, faza 1 se provodi do sadržaja vlage drva od 16%, pri čemu se drvo savija. Za visoke početne sadržaje vode drva korištene su samo metode prirodnog sušenja i konvekcijskog sušenja, dok je za sušenje

Pervan D., 2024. : Utjecaj dielektričnih svojstava hrastovine (*Quercus robur* L.) na postupak savijanja masivnog drva pri niskim sadržajima vode (<16%) dodatno testirano vakuumsko sušenje. Kombiniranjem različitih tehnika sušenja (AD, KD, VD) i konačnog sadržaja vode postignutog prije procesa savijanja (16% i 8%), formirane su 4 testne skupine (G1, G2, G3, G4) koje su prikazane na slici 24.

Test Group	Processing Procedure	No. of Samples
G ₁	Air drying (20...25%) → Kiln drying (8%) → Bending	30
G ₂	Kiln drying (20...25%) → Vacuum drying (8%) → Bending	30
G ₃	Kiln drying (16%) → HF Bending → Kiln drying (8%)	30
G ₄	Kiln drying (16%) → Bending → Kiln drying (8%)	30

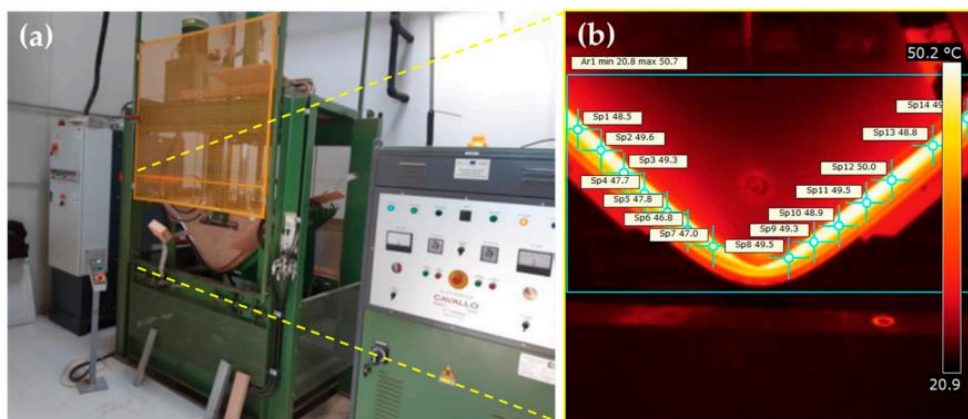
Slika 24. Opis procesa sušenja za svaku grupu po 30 uzoraka (Straže i sur.,2023)

Prije savijanja, sušeni uzorci su bili pareni. Uzorci su postavljeni u kotlove zagrijane parom na 130 ± 3 °C i tlakom od 1,8 bara. Proces je trajao u prosjeku 3,5 h ($\pm 0,5$ h). Temperatura na kraju parenja, neposredno prije nego što su uzorci stavljani u prešu za savijanje, provjeravana je bez kontaktnom termalnom kamerom. Površinska temperatura uzoraka bila je iznad 70 °C, dok je temperatura unutar uzoraka bila još viša (Slika 25).



Slika 25. Parenje uzoraka u parnome kotlu i postignuta površinska temperatura (Straže i sur.,2023)

Savijanje hrastovih uzoraka grupa G1, G2 i G4 provedeno je klasično u preši za savijanje, koristeći metalnu traku s krajnjim zaustavljanjem na konveksnoj strani uzoraka. Za savijanje je korišten kalup s radijusom od 150 mm. U prešu za savijanje postavljena su po tri uzorka. Kut između dvaju ravnih dijelova savijenog uzorka iznosio je 105°, što je odgovaralo željenoj geometriji (Slika 26). Vrijeme prešanja trajalo je 30 minuta. Nakon toga, savijeni uzorci su bili postavljeni u složajevе, ili za daljnju mehaničku obradu (G1 i G2) ili za dodatno sušenje (G4).



Slika 26. Kalupna preša i postignute temperature u savijenim uzorcima (Straže i sur.,2023)

Kako bi se povećala produktivnost, uzorci iz skupine G3 su savijani pomoću visokofrekventnog zagrijavanja (HF). Korištena je ista preša i kalup za HF savijanje kao i za konvencionalno savijanje. Uz 20 kW HF generator, drvo je savijano na 10 MHz, grijano i konačno osušeno do sadržaja vlage od 8%. Vrijeme prešanja bilo je u prosjeku 30 minuta.

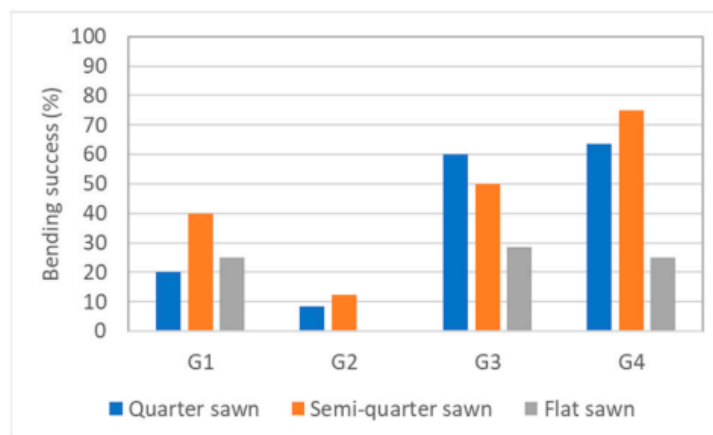
Kvaliteta savijenog hrasta prvenstveno je određena vizualno. Na području savijanja, testirani uzorci su pažljivo pregledani u svim ravninama. Savijanje je smatrano uspješnim kada uzorci nisu pokazivali pukotine i greške na konveksnoj strani te su imali homogenu strukturu na konkavnoj strani. Uzorci s lokalnim savijanjem, savijanjem vlakana i zgušnjavanjem vlakana na konkavnoj strani također su bili odbačeni.

Brzina ultrazvuka dodana je procjeni kvalitete savijenih uzoraka hrasta s dvostrukim mjerenjem po komadu vremena prolaska u uzdužnom smjeru pomoću impulsnog ultrazvučnog uređaja. Korišteni su eksponencijalni pretvarači s radnom frekvencijom od 54 kHz (Slika 27).



Slika 27. Određivanja prolaska brzine ultrazvuka kroz savijene uzorke (Straže i sur.,2023)

Rezultati su pokazali da su stope uspješnosti savijanja bile najviše za grupe G3 (60,9%) i G4 (42,9%) kada su uzorci savijani pri višim sadržajima vlage (>16%). U ove dvije grupe, uzorci G3 su pokazali nešto manji uspjeh zbog HF savijanja (Slika 7). Prekomjerni unos energije HF zagrijavanja u savijene uzorke može dovesti do povećanja temperature i, zbog vlage u uzorcima, povećanja tlaka pare što može dovesti do kolapsa stanične stijenke drva. Posebno kod nepropusnih vrsta drva kao što je hrast, to može dovesti do visokih unutarnjih napreznja i mogućih pucanja.



Slika 28. Uspješnost savijanja s obzirom na orijentaciju uzoraka (Straže i sur.,2023)

Autori nisu uspjeli uspješno saviti uzorke iz grupa G1 (28,6%) i G2 (8,3%). Nizak sadržaj vode u savijenim uzorcima (G1 = 8,7%; G2 = 8,6%) ne omogućuje potrebnu plastičnu deformabilnost koja se postiže kada materijal premaši temperaturu staklastog prijelaza. Istovremeno, pokazalo se da ubrzano vakuumsko sušenje u fazi 2, s 20,8 na 8,6% vlage (G2 grupa), može uzrokovati visoka unutarnja napreznja zbog slabe propusnosti tkiva hrastovog drva. To može dovesti do dodatnih mikrostukturalnih defekata, što uzrokuje pucanje materijala tijekom savijanja. To se odražava u većoj stopi odbijanja uzoraka grupe G2 u usporedbi s grupom G1.

Na temelju rezultata autori dolaze do slijedećih zaključaka:

- Kako bi se postigla niska stopa odbacivanja elemenata u procesu savijanja, parametri procesa, tj. vrijeme i konačni sadržaj vode drva za različite faze obrade, moraju biti dobro kontrolirani, jer je margina između vremena i sadržaja vlage za optimalno savijanje vrlo uska.
- Metoda u kojoj se hrastovo drvo preduši u do nominalnog konačnog sadržaja vlage od 8%, a zatim se uzorci savijaju, nije praktična zbog niske deformabilnosti pri savijanju i niske kompresibilnosti na konkavnoj strani te zatezne duktilnosti na konveksnoj strani.

- Studija je pokazala da je niži početni sadržaj vode drva, uz odgovarajući sadržaj vode prije savijanja ($MC \geq 16\%$), značajno utjecao na savitljivost i stopu prihvaćanja hrastovih uzoraka.

3.3. Savijanje i visokofrekventno zagrijavanje bukovine (*Fagus sylvatica* L.)

Autori Sandberg i Johansson (2005) u ovom radu opisuju metodu savijanja masivnog drva. Metoda se temelji na korištenju visokofrekventne tehnike za zagrijavanje, plastificiranje i sušenje drva u jednom slijedu. Jedan od ciljeva korištenja visokofrekventnog zagrijavanja je smanjenje vremena procesa savijanja. U praksi to znači smanjenje vremena za savijanje i sušenje elementa drva sa sadržaja vode od oko 25% do 6-8% s otprilike 24 sata na oko 10 minuta. To postavlja visoke zahtjeve na kontrolu sadržaja vode, temperature i naprezanja koja se javljaju u drvu tijekom savijanja.

U ovom procesu savijanja bukovog drva (*Fagus sylvatica* L.), drvo s sadržajem vode od 20–25% zagrijava se, savija i suši u jednom slijedu. Toplina se generira pomoću visokofrekventne opreme unutar koje se drvo postavlja, a zatim savija u kalupu. Drvni elementi korišteni u ovim ispitivanjima imali su početne dimenzije 35 x 52 x 452 mm i bili su savijeni do radijusa od 486 mm pri sadržaju vode od oko 6%.

Kalup za savijanje je muškog i ženskog tipa, izrađen od furnirske ploče i obložen aluminijem i plastikom debljine 2 mm (Slika 29). Alat može istovremeno savijati maksimalno 22 drvna elementa.



Slika 29. Drvni element u preši prije početka savijanja (Sandberg i Johansson,2005)

Drvo se postavlja u metalni lim s metalnim krajnjim ograničavajućim letvicama, kako bi se spriječilo da naprezanje u drvu tijekom savijanja ne premaši 1%. Kako bi se

Pervan D., 2024. : Utjecaj dielektričnih svojstava hrastovine (*Quercus robur* L.) na postupak savijanja masivnog drva

omogućilo isparavanje pare u drvu u uzdužnom smjeru, u metalnim letvicama su izbušene rupe za izlaz vodene pare (Slika 30).



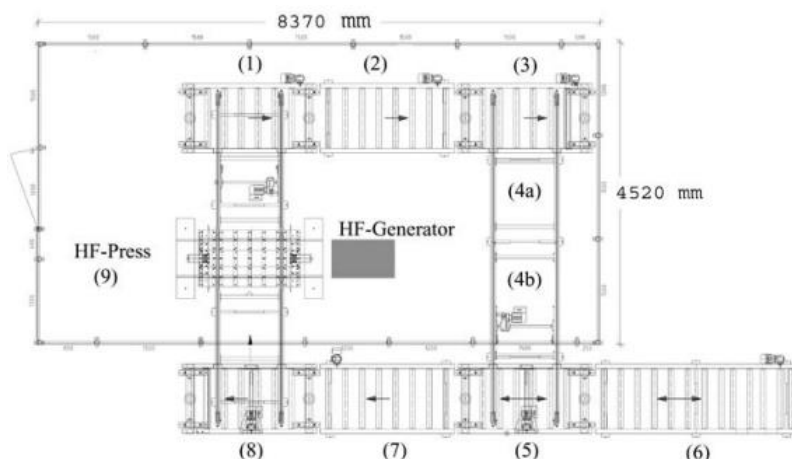
Slika 30. Rupe za izlaz vodene pare na metalnim ograničavajućim letvicama (Sandberg i Johansson,2005)

Tijekom savijanja kalup se postavlja u prešu od 80 tona (Slika 31), opremljenu visokofrekventnim (HF) generatorom. Snaga HF generatora iznosi 33 kW, a frekvencija 13,56 MHz.



Slika 31. Kalup unutar preše (Sandberg i Johansson,2005)

Slika 32 prikazuje raspored linije za savijanje drva i različite pozicije kalupa. Kalup je napunjen drvnim elementima s sadržajem vode od oko 25% (7). Zatim se alat transportira preko transportera (8) do HF preše (9). U preši se drvo zagrijava, savija i suši do sadržaja vode od oko 6%. Nakon savijanja, kalup se transportira između stanica (2) i (4b) tijekom kondicioniranja i hlađenja drvnih elemenata unutar kalupa. Na poziciji (5) se kalup otvara i savijeno drvo se vadi iz njega, provjerava se za oštećenja i slaže za daljnju obradu.



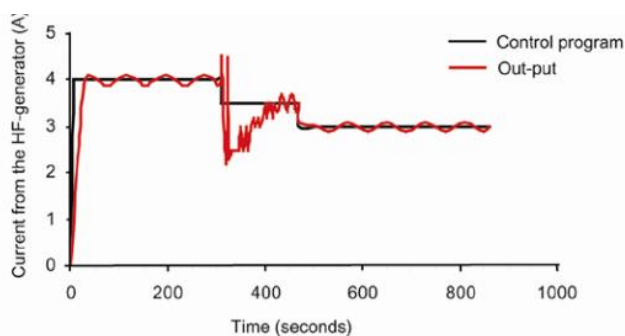
Slika 32. Tlocrt linije za savijanje masivnog drva (Sandberg i Johansson,2005)

Na slici 33 prikazana su vremena obrade na različitim pozicijama. Ukupno vrijeme od utovara nesavijenog drva do istovara savijenog i osušenog drva je 26 minuta. Savijanje traje ukupno 10 minuta, što znači da se mogu koristiti tri kalupa istovremeno.

Position		Cycle time (seconds)	Total time (seconds)
7	Wood pieces in the closed form tool	0	0
8	Transportation to pos. 8	11	11
9	Transportation to pos. 9	40	51
9	The press is waiting for the start of the computer program	20	71
9	Bending process: heating, bending and drying	620	691
9	End of program and start of transportation	21	712
1	Transportation to pos. 1	33	745
2	Transportation to pos. 2	26	771
3	Waiting at pos. 2 and transport to pos. 3	190	961
4a	Waiting at pos. 3 and transport to pos. 4a	200	1 161
4b	Waiting at pos. 4a and transport to pos. 4b	190	1 351
5	Waiting at pos. 4b and transport to pos. 5	190	1 541
5-7	Place for loading and unloading of the form tool	-	-
Total process time:		26 minutes	

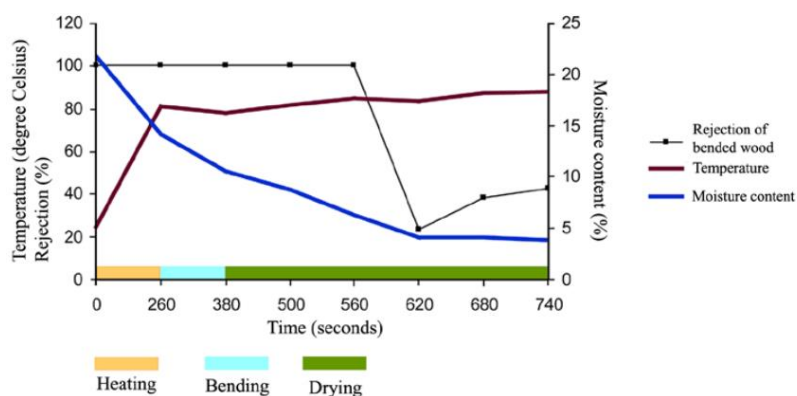
Slika 33. Vrijeme trajanja procesa (Sandberg i Johansson,2005)

Proces savijanje drva u HF-preši sastoji se od tri faze: zagrijavanja, savijanja i sušenja drva. U svakoj fazi mogu se regulirati snaga (intenzitet struje) i vrijeme trajanja struje prema kalupu. U fazi savijanja može se regulirati brzina opterećenja. Svaka faza regulirana je kontrolnim programom koji omogućuje prilagodbu za specifične svrhe. Slika 34 prikazuje primjer programa za savijanje bukve, s podešenim vrijednostima u kontrolnom programu i stvarnom strujom iz HF-generatora. U prvih 30 sekundi struja raste do podešene vrijednosti i održava se na toj razini s preciznošću od $\pm 0,1$ A za ostatak faze zagrijavanja (0–310 s). Temperatura u drvu obično raste na 80–100°C tijekom ove faze. Na kraju zagrijavanja, važno je da drvo nema prenisku temperaturu ili prenizak sadržaj vode, inače ne dolazi do efekta plastifikacije.



Slika 34. *Primjer parametara programa za savijanje bukovine (Sandberg i Johansson,2005)*

Slika 35 prikazuje temperaturu i sadržaj vode u bukvi tijekom procesa savijanja. Krivulje prikazuju srednje vrijednosti sadržaja vode za 21 korištenih elemenata, a temperatura je mjerena u središtu svakog elementa. Na slici 34 također je prikazano postotno odbijanje savijenih elemenata. To je udio ukupnog broja savijenih elemenata koji ne zadovoljavaju zahtjeve u radijusu savijanja ili sadrže neke greške i oštećenja. Kada se drveni elementi zagrijevaju, temperatura raste s oko 25°C na 80°C, a sadržaj vode drva se istovremeno smanjuje s 22% na 14%. Tijekom faze zagrijavanja, odbijanje iznosi 100% jer elementi još nisu savijeni. Tijekom faze savijanja, temperatura se snižava za nekoliko stupnjeva i sadržaj vode drva brzo opada. Na kraju ove faze, sadržaj vode iznosi oko 10%. Ako bi se proces zaustavio u tom trenutku, odbijanje bi iznosilo 100% kao posljedica vraćanja savijenih komada u prvobitni oblik. Tijekom faze sušenja, sadržaj vode drvnih elemenata mora se smanjiti na razinu gdje će zakrivljeni oblik elemenata biti fiksiran na potrebnom radijusu. Na slici 35 jasno je da sadržaj vode drvnih elemenata opada dok god sušenje traje, sve dok u drvu ne ostane vode. Temperatura raste s 80°C na oko 90°C tijekom 360 sekundi. Postotak odbacivanja pada sa 100% na 20% tijekom razdoblja od oko 60 sekundi, a zatim ponovno raste. Kada je proces savijanja završen, postotak odbacivanja iznosio je 40%. Rezultati na slici 35 pokazuju da postoji relativno kratak vremenski raspon tijekom kojeg bi proces trebalo zaustaviti kako bi se osiguralo nisko odbacivanje savijenih elemenata i ne previše nizak sadržaj vode drvnih elemenata.



Slika 35. Prikaz temperature drva, sadržaja vode drva i postotka odbačenih drvnih elemenata kroz vremensko trajanje procesa savijanja (Sandberg i Johansson,2005)

Prema dobivenim rezultatima autori dolaze do zaključka da se visokofrekventno zagrijavanje može koristiti za plastificiranje i sušenje bukovine u procesu brzog savijanja masivnog drva. Međutim, potrebno je dobro kontrolirati sadržaj vode drvnih elemenata u sirovom stanju, a oprema za savijanje mora biti dizajnirana kako bi se spriječilo izbijanje iskrica u elektromagnetskom polju i kako bi se spriječilo pucanje stanične stijenke uzrokovano izlaskom vodene pare iz drvnih elemenata parom u drvetu. Kako bi se postigla niska razina odbacivanja drvnih elemenata u procesu savijanja, procesni parametri, tj. ulazna energija i vrijeme za različite faze obrade, moraju biti dobro kontrolirani jer je vremenski raspon za optimalno savijanje vrlo mali. Daljnji razvoj procesa savijanja masivnog drva i usavršavanje programa kontrole rezultirat će manjim odbacivanjem savijenog drva i kraćim vremenom obrade.

4. MATERIJALI I METODE

4.1. Materijali

Za potrebe eksperimenta korišteni su uzorci hrastovih lamela (*Quercus robur* L.) nazivnih debljina 2,9 mm. Piljenice iz kojih su dobivene lamele su osušene na sadržaj vode prikazan u tablici 1. Nakon ispiljivanja lamela iz piljenica slijedio je proces kondicioniranja u klima komori na 20 °C i pri vlagama zraka od 40 % i 90 %. Lamele su zatim podijeljene u dvije grupe, kao što je vidljivo na slici 36. Prva grupa se sastojala od lamela sa tangentnim presjekom, a druga od lamela sa radijalnim presjekom. Ostali bitni tehnički podaci prikazani su u tablici 1.



Slika 36. *Primjer hrastovih lamela korištenih u eksperimentu (prve dvije lamele su tangentnoga presjeka, dok su druge dvije radijalnoga presjeka)*

Hrastove lamele su također podijeljene prema širini njihovih godova. Na slici 37. prikazan je izgled širine godova različitih lamela.



Slika 37. *Primjer širina godova hrastovih lamela korištenih u eksperimentu (prve dvije lamele su radijalnog presjeka, dok su druge dvije tangentnoga presjeka)*

Tablica 1. Tehnički podaci ispitanih uzoraka hrastovih lamela

Oznaka lamele	Smjer vlaknaca	Širina godova	l [mm]	b [mm]	d [mm]	m [g]	φ [kg/m ³]	u [%]
R-ob-1	Radijalni	Uski	400	79,73	3,12	63,506	638,2	15,6
R-ob-3	Radijalni	Uski	400	78,64	2,97	58,754	628,9	5,2
R-sb-1	Radijalni	Široki	400	79,77	3,1	70,975	717,5	16,2
R-sb-3	Radijalni	Široki	400	78,27	2,97	63,215	679,8	7,7
T-ob-1	Tangentni	Uski	400	81,67	3,04	65,664	661,2	15,04
T-ob-3	Tangentni	Uski	400	79,91	2,99	59,735	625,0	5,5
T-sb-1	Tangentni	Široki	400	81,14	3,03	64,181	652,6	15,0
T-sb-3	Tangentni	Široki	400	79,12	2,96	58,558	625,1	7,7

4.2. Metode istraživanja

Određivanje dielektrične konstante i dielektričnog faktora gubitka hrastovih lamela napravljeno je pomoću Agilent 4285 A LCR mjerača prikazanog na slici 38.



Slika 38. Prikaz Agilent 4285 A LCR mjerača električnih svojstava

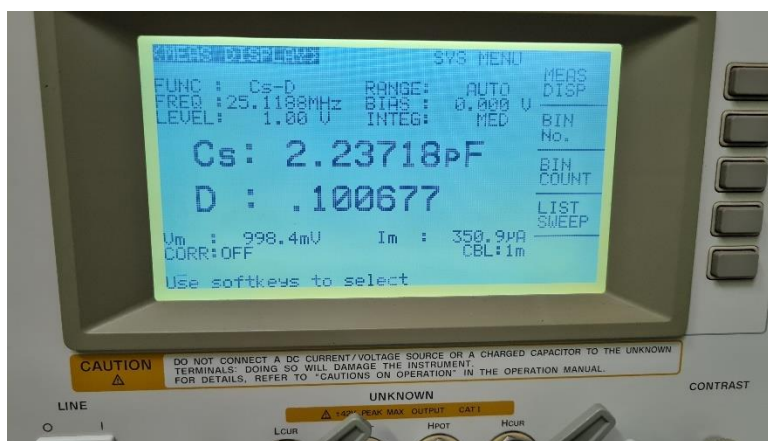
LCR mjerač ima mogućnost rada na frekvencijama od 75 kHz do 30 MHz sa razmacima ispitnih frekvencija od 100 Hz. Brzina mjerenja uređaja je 30 ms po uzorku. Za potrebe ovog eksperimenta korištene su frekvencije električnog polja u rasponu od 0,079 MHz do 25,119 MHz.

Uzorci hrastovih lamela postavljaju se između dvije ispitne ploče kondenzatora kao što je prikazano na slici 39.



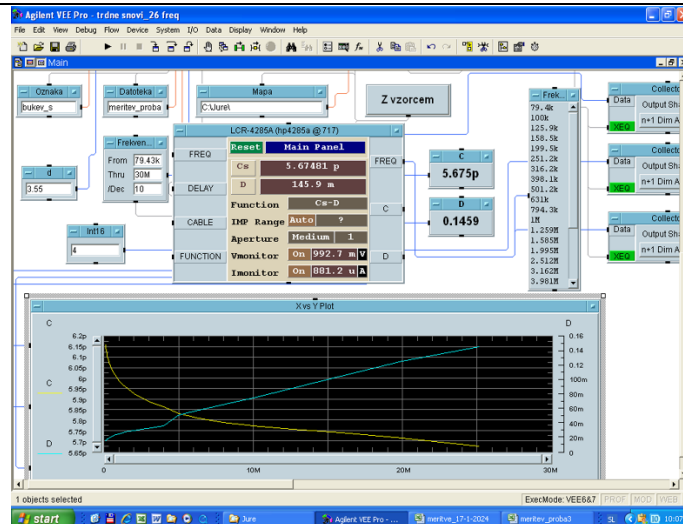
Slika 39. Hrastova lamela unutar ispitnog električnog polja

Razmak između hrastove lamele i gornje ploče kondenzatora iznosio je 0,5 mm. Postavljanjem hrastove lamele unutar ploča kondenzatora dolazi do promjene iznosa njegovog kapaciteta prema čemu se onda dobivaju vrijednosti dielektrične konstante i faktora dielektričnog gubitka hrastove lamele. Na svakoj hrastovoj lameli korištenoj u ovome eksperimentu provedena su 3 mjerenja i zatim se iz dobivenih vrijednosti izvela srednja vrijednost dielektrične konstante i tangente gubitka. Vrijednosti kapaciteta kondenzatora i faktora gubitka kada unutar ploča kondenzatora nije prisutan uzorak prikazane su na slici 40.



Slika 40. Vrijednosti unutar kondenzatora kada nije prisutan uzorak (C_s – kapacitet kondenzatora u pikofaradima, D – faktor gubitka)

Nakon provedbe mjerenja na korisničkom sučelju računalnog programa (slika 41.) dobiju se vrijednosti promjene kapaciteta kondenzatora i iznos dielektrične konstante preko kojega se izvede iznos tangente dielektričnog gubitka hrastovih lamela.



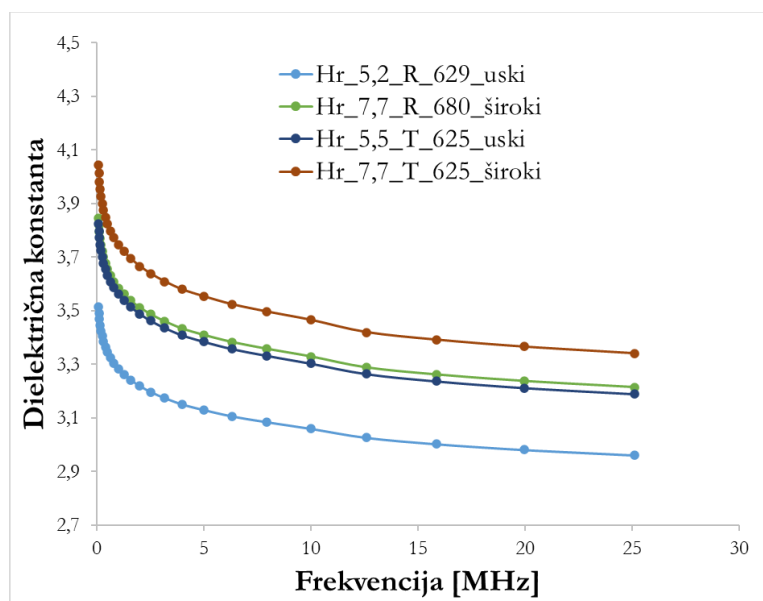
Slika 41. Prikaz korisničkog sučelja mjernoga programa

Dobivene vrijednosti izvele su se iz mjernog programa u Microsoft Excel gdje je bila odrađena daljnja obrada dobivenih podataka.

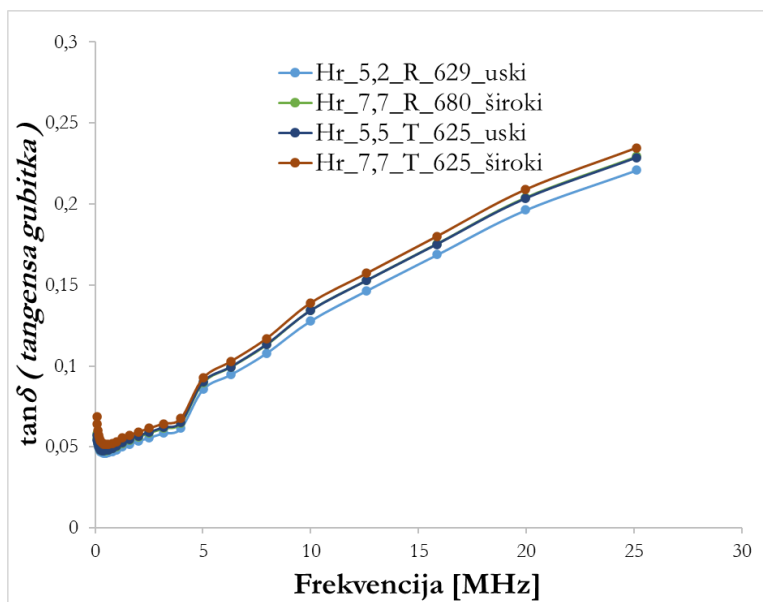
5. REZULTATI I DISKUSIJA

5.1. Rezultati dielektričnih svojstava

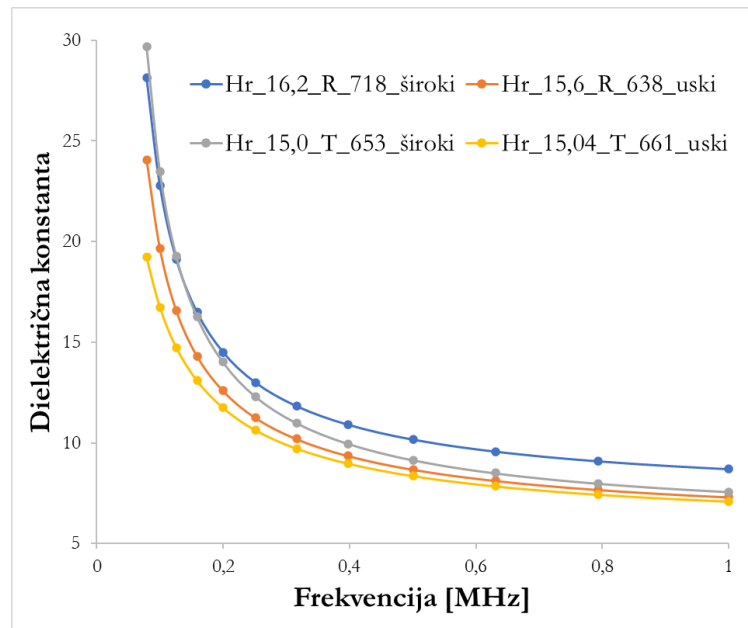
Na slikama 42 do 47 prikazani su dijagrami ovisnosti srednje vrijednosti dielektrične konstante i faktora gubitka o frekvenciji električnog polja uzorka hrastovih lamela tangentsnog i radijalnog presjeka.



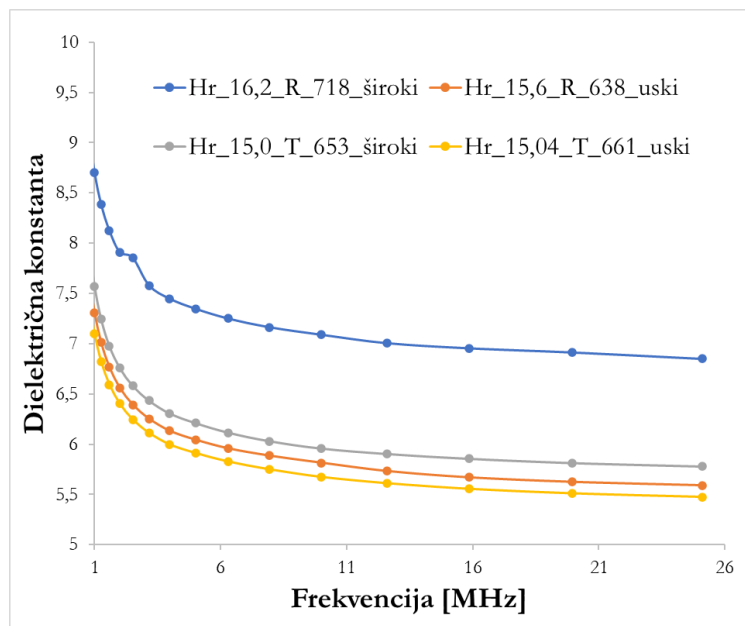
Slika 42. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti dielektrične konstante o frekvenciji električnog polja pri sadržajima vode hrastovih lamela od 5,2 do 7,7 %



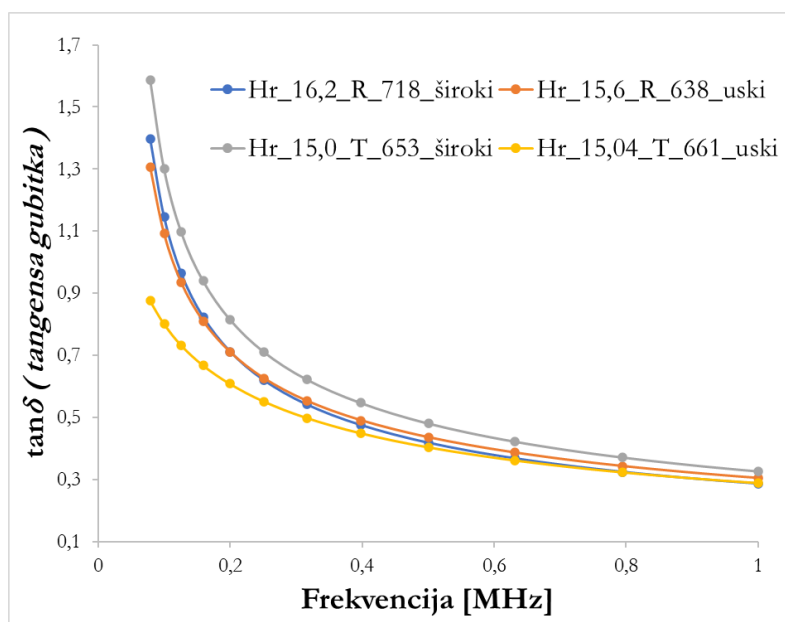
Slika 43. Dijagram ovisnosti tangensa gubitka o frekvenciji električnog polja pri sadržajima vode hrastovih lamela od 5,2 do 7,7 %



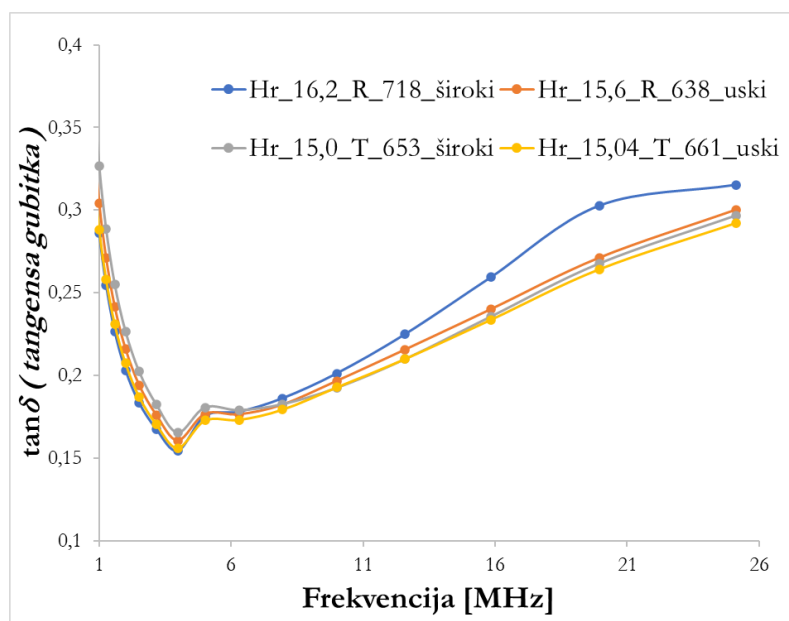
Slika 44. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti dielektrične konstante o frekvenciji električnog polja do 1 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %



Slika 45. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti dielektrične konstante o frekvenciji električnog polja od 1 MHz do 25 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %



Slika 46. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti tangensa gubitka o frekvenciji električnog polja do 1 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %



Slika 47. Dijagram ovisnosti srednje vrijednosti tangensa gubitka o frekvenciji električnog polja od 1 do 25 MHz pri sadržajima vode hrastovih lamela od 15 do 16,2 %

Vidljivo je da su vrijednosti dielektrične konstante bile u prosjeku znatno veće kod uzoraka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) naspram uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %). Kod svih uzoraka zabilježen je početni eksponencijalan pad vrijednosti dielektrične konstante sa povećanjem frekvencije električnoga polja nakon kojega dolazi do linearnog smanjenja vrijednosti dielektrične

konstante. Taj pad je mnogo izraženiji kod uzoraka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %).

U slučaju uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %) najveće prosječne vrijednosti izmjerene su kod uzorka hrastove lamele tangენტnoga presjeka sa sadržajem vode od 7,7 %. Najmanje prosječne vrijednosti izmjerene su kod uzorka hrastove lamele radijalnog presjeka sa sadržajem vode od 5,2 %. Uzorak hrastove lamele tangენტnoga presjeka sa sadržajem vode 5,5 % i uzorak hrastove lamele radijalnoga presjeka sa sadržajem vode od 7,7 % imali su pri nižim vrijednostima frekvencije električnoga polja gotovo iste iznose dielektrične konstante, dok povećanjem frekvencije električnog polja iznad 1 MHz dolazi do primjetne razlike u iznosima dielektrične konstante gdje uzorak hrastove lamele radijalnog presjeka sa sadržajem vode od 7,7 % ima u prosjeku manji iznos od uzorka hrastove lamela tangენტnoga presjeka sa sadržajem vode od 5,5 %.

Kod uzoraka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) vrijednosti dielektrične konstante znatno su više pri frekvenciji električnog polja do 1 MHz u usporedbi sa uzorcima hrastovih lamela sa nižim sadržajima vode (5,5 do 7 %) pri istim frekvencijama električnoga polja. Također, zabilježen je mnogo znatniji početni pad vrijednosti dielektrične konstante pri frekvencijama električnog polja do 1 MHz uzoraka hrastove lamele sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) u usporedbi sa uzorcima hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %). Pri frekvenciji električnog polja do 1 MHz vrijednosti dielektričnih konstanti uzoraka hrastovih lamela bile su u prosjeku slične, dok se povećanjem frekvencije električnog polja iznad 1 MHz jasno ističe uzorak hrastove lamele radijalnog presjeka sa sadržajem vode od 16,2 % koji je u prosjeku imao najveće vrijednosti dielektrične konstante. Ostali uzorci imali su u prosjeku slične vrijednosti. Uzorak hrastove lamele tangენტnoga presjeka sa sadržajem vode od 15,04 % imao je najmanje prosječne vrijednosti dielektrične konstante. Također je vidljivo da gustoće uzoraka hrastovih lamela nisu znatno utjecale na vrijednosti dielektričnih konstanti.

Kod vrijednosti tangensa gubitka ($\tan \delta$) prisutne su znatne razlike između uzoraka hrastove lamele sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) naspram uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %). U slučaju uzoraka hrastovine sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) prisutan je značajan pad vrijednosti tangensa gubitka pri frekvenciji električnog polja do 1 MHz naspram uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %). Najveća razlika vidljiva kod frekvencija iznad 1 MHz. U slučaju uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem (5,5 do 7 %) dolazi do linearnog

povećanja vrijednosti tangensa gubitka, gdje su njezine vrijednosti znatno veće pri višim frekvencijama električnoga polja naspram vrijednostima faktora gubitka na frekvencijama električnoga polja do 1 MHz. Kod uzoraka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) također je prisutno povećanje vrijednosti tangensa gubitka pri povećanju frekvencije električnoga polja, ali je ono mnogo manje i ne dostiže vrijednosti faktora gubitka pri frekvencijama do 1 MHz.

Unutar skupine uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %) najveće prosječne vrijednosti tangensa gubitka zabilježene su kod uzorka hrastove lamele tangentnoga presjeka sa sadržajem vode od 7,7 %, dok su najmanje vrijednosti zabilježene kod uzoraka hrastove lamele radijalnoga presjeka sa sadržajem vode od 5,2 %. Razlike među prosječnim vrijednostima tangensa gubitka između uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %) su mnogo manje izraženije naspram razlika između njihovih prosječnih vrijednosti dielektričnih konstanti.

U slučaju prosječnih vrijednosti tangensa gubitka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) pri frekvencijama do 1 MHz uzorak hrastove lamele tangentnog presjeka sa sadržajem vode od 15 % imao je najveće prosječne iznose tangensa gubitka, dok je na višim frekvencijama električnoga polja uzorak hrastove lamele radijalnog presjeka sa sadržajem vode od 16,2 % imao prosječno najveće vrijednosti tangensa gubitka i najveću stopu rasta pri povećanju frekvencije električnoga polja. Najmanje prosječne vrijednosti tangensa gubitka kroz sve frekvencije električnog polja koje su se koristile pri ispitivanju izmjerene su kod uzorka hrastove lamele tangentnoga presjeka sa sadržajem vode od 15,04 %.

5.2. Diskusija

Dobiveni rezultati dielektrične konstante uzoraka hrastovih lamela odgovarali su dosadašnjim saznanjima o ponašanju drvnih materijala unutar električnoga polja. Uzorci hrastove lamele sa većim sadržajem vode imali su i veći iznos dielektrične konstante. Takav rezultat odgovara dosadašnjim istraživanjima dielektrične konstante listača (Hamiyet i Nurgul,2003) i prema autoru Torgovnikov (1993) razlog tome je to što na frekvencijama iznad 1 MHz, električno polje brzo oscilira. Kada se na materijal primijeni vanjsko električno polje, ono inducira dipolne momente unutar atoma i molekula drva. To se događa jer polje uzrokuje razdvajanje naboja unutar atoma i molekula, što dovodi do pomaka raspodjele elektronskog oblaka u odnosu na jezgru. Taj pomak stvara inducirani dipolni moment. Drvo sadrži molekule vode, od kojih su neke nevezane (nisu čvrsto povezane s drvnim vlaknima).

Te molekule vode imaju trajne dipolne momente zbog polarne prirode vode (s pozitivnim nabojem blizu atoma vodika i negativnim nabojem blizu atoma kisika). Kada su molekule vode izložene oscilirajućem električnom polju na frekvencijama iznad 1 MHz, ti trajni dipoli pokušavaju se poravnati s poljem. Međutim, zbog visoke frekvencije, poravnanje tih dipola nije trenutno i zaostaje za oscilacijama polja. Ovo zaostajanje rezultira apsorpcijom energije iz polja, što dovodi do dielektričnih gubitaka, koji su značajan faktor u dielektričnim svojstvima drva na tim frekvencijama.

Na frekvencijama ispod 1 MHz zabilježene su višestruko veće vrijednosti dielektrične konstante naspram njihove vrijednosti iznad 1 MHz, što je također očekivano. Pri nižim frekvencijama električnog polja fiksni dipoli i međupovršinske polarizacije mogu učinkovito pratiti sporo oscilirajuće električno polje, što dovodi do značajnog povećanja dielektrične konstante.

Smjer drvnih vlakana uzoraka hrastovih lamela također je utjecao na iznos dielektrične konstante. U postojećoj literaturi (Norimoto, 1976) poznato je da je iznos dielektrične konstante u radijalnome smjeru pri istom sadržaju vode veći ili jednak iznosu dielektrične konstante u tangentialnome smjeru iste vrste drva pri istom sadržaju vode. Kod uzoraka hrastovih lamela nižeg sadržaja vode (5,5 do 7 %) vidljivo je da pri istim ili sličnim sadržajima vode, uzorci radijalnog presjeka su u prosjeku imali veći iznos dielektrične konstante. U slučaju uzoraka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) takva korelacije nije prisutna.

Uzorci hrastovih lamela, također su imali različite širine godova. Poznato je da povećanjem širine godova kod prstenasto poroznih listača dolazi do povećanja udjela kasnog drva unutar goda. Zbog veće gustoće, kasno drvo u prosjeku ima veći iznos dielektrične konstante od ranog drva. U dobivenim rezultatima može se uočiti da kod uzoraka hrastovih lamela sa sličnim sadržajem vode (15 %, 15,04 % i 15,6 %) najveću prosječnu vrijednost dielektrične konstante ima uzorak sa širokim godovima.

Prema dobivenim rezultatima dielektrične konstante i tangensa gubitka može se vidjeti više stvari. Pri nižim sadržajima vode (5,5 do 7 %) uzoraka hrastovih lamela povećanjem frekvencije električnoga polja dolazi do smanjenje dielektrične konstante i povećanja tangensa gubitka. Pošto rast vrijednosti tangensa gubitka govori da se drvo više zagrijava povećanjem frekvencije, vidljivo je da pri početnim visokim vrijednostima dielektrične konstante (ispod frekvencije električnog polja od 1 MHz) materijal slabo zagrijava što bi značilo da je pri frekvencijama ispod 1 MHz iznos faktora dielektričnog

gubitka nizak (mala količina električne energije se pretvara u toplinu). U slučaju vrijednosti tangensa gubitka i dielektrične konstante uzoraka hrastove lamele s većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) situacija je nešto drugačija. Pri frekvencijama električnoga polja do 1 MHz, vrijednosti tangensa gubitka i dielektrične konstante su izrazito velike naspram njihovih vrijednosti iznad frekvencije električnoga polja iznad 1 MHz. Taj podatak bih ukazivao na to da se najveće zagrijavanje uzoraka hrastovih lamela događa na frekvencijama ispod 1 MHz. Povećanjem frekvencija električnoga polja iznad 1 MHz početno dolazi do pada tangensa gubitka, a zatim je vidljiv blagi rast kod kojeg prosječne vrijednosti tangensa gubitka ne dostižu vidljive u rasponu frekvencije električnoga polja ispod 1 MHz.

Iako povećanjem gustoće drva dolazi do većih vrijednosti njegove dielektrične konstante, u rezultatima nije vidljiv utjecaj gustoće kao parametara koji utječe na iznos dielektrične konstante i faktora gubitka, pošto nije bilo znatne razlike u gustoćama ispitanih uzoraka hrastovih lamela.

Sa industrijske strane, ovaj rad je pokazao izrazitu veliku bit poznavanja sadržaja vode drvnog materijala nakon procesa sušenja. Kao što je vidljivo, sadržaj vode direktno utječe na frekvenciju električnog polja koja se može koristiti tijekom procesa mikrovalnog zagrijavanja za optimalnu brzinu zagrijavanja. Dobro poznavanje sadržaja vode materijala direktno utječe na jačinu mikrovalnog grijača kojega jedan pogon koji se bavi savijanjem drva mora nabaviti.

U budućnosti bilo bi potrebno provesti dodatna istraživanja kako bi se bi se još bolje shvatio utjecaj raznih parametara na dielektrična svojstva hrastovih lamela. Kod frekvencija električnog polja od 1 do 6 MHz dolazi do pada, pa rasta i ponovo pada tangensa gubitka. Takva pojava je neočekivana i trebala bi se detaljnije proučiti u nekome budućem istraživanju. Također, za potpuno razumijevanje dielektričnih svojstava hrastovih lamela potrebno bi bilo provesti istraživanje sa uzorcima hrastovih lamela sa sadržajem vode od 8 do 14 %.

6. ZAKLJUČAK

Prema rezultatima dobivenim u provedenom istraživanju može se zaključiti sljedeće:

- Povećanjem sadržaja vode hrastovih lamela dolazi do povećanja iznosa njihove dielektrične konstante
- Početni pad vrijednosti dielektrične konstante je mnogo izraženiji kod uzoraka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) naspram uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %)
- Povećanjem frekvencije električnog polja dolazi do pada prosječnih vrijednosti dielektrične konstante uzoraka hrastovih lamela
- Uzorci hrastovih lamela radijalnog presjeka u prosjeku imaju veću ili istu vrijednost dielektrične konstante u usporedbi sa uzorcima hrastovih lamela tangentnog presjeka pri istim ili sličnim sadržajima vode
- Uzorci hrastovih lamela širokih godova u prosjeku imaju veću vrijednost dielektrične konstante od uzoraka hrastovih lamela uskih godova istim ili sličnim sadržajima vode
- Povećanjem frekvencije električnog polja dolazi do povećanja tangensa gubitka u slučaju uzoraka hrastovih lamela sa nižim sadržajem vode (5,5 do 7 %) što dovodi do bržeg zagrijavanja pri većim frekvencijama električnog polja korištenih u ovome radu, pa bi se u slučaju brzog zagrijavanja prije savijanja hrastovih lamela sa sadržajima vode od 5,5 do 7 % preporučile frekvencije od 5 do 25 MHz za vremenski efektivno zagrijavanje
- Povećanjem frekvencije električnog polja dolazi do smanjenja tangensa gubitka u slučaju uzoraka hrastovih lamela sa većim sadržajem vode (15 do 16,2 %) što dovodi do bržeg zagrijavanja pri nižim frekvencijama električnog polja korištenih u ovome radu, pa bi se u slučaju brzog zagrijavanja prije savijanja hrastovih lamela sa sadržajima vode od 15 do 16,2 % preporučile frekvencije ispod 1 MHz za vremenski efektivno zagrijavanje

7. POPIS LITERATURE

1. Berberović. S. i sur. (1996) *Inženjerski priručnik*, Zagreb: Školska knjiga
2. Eaton. E. i sur. (2016) *European atlas of Forest Tree Species*, Luxembourg: Publication office of the European Union
3. Glass. S. V. i sur. (2010) *Wood Handbook*, Madison: United States Department of Agriculture Forest Service
4. Hamiyet. S. i Nurgul. A. (2003) *Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies*, Journal of Wood Science, 50(1), pp. 375 – 380.
5. Milić. G. (2020) *Hidrotermička obrada drveta*, Beograd: Univerzitet u Beogradu
6. Norimoto. M. (1976) *Dielectric properties of wood*, Kyoto: Kyoto univeristy
7. Sandberg. D. i Johansson J. (2005) *A new method for bending solid wood – high frequency heating of beech*, European Conference on Hardwood, pp. 156 – 161
8. Sandberg. D. i Parviz. N. (2007) *Introduction to Thermo – Hydro – Mechanical Wood Processing*, Vaxjo: Vaxjo university
9. Sedlar. T. (2020) *Materijali sa predavanja*, Merlin 2020/2021
10. Straže. A. i sur. (2023) *The Influence of Processing Conditions on the Quality of Bent Solid Wood from European Oak*, Forests, 14(5), 1047
11. Taylor. Z. (2001) *Wood benders handbook*, New York: Sterling Publishing
12. Todorović. V. N. (2023) *Anatomija drveta*, Beograd: Univerzitet u Beogradu
13. Torgovnikov. G. I. (1993) *Dielectric Properties of Wood and Wood Based Materials*, Berlin: Springer-Verlag

8. PRILOG

Tablica 2. Rezultati mjerenja dielektričnih svojstava uzoraka hrastovih lamela

Measuring Frequency [MHz]	Dielectric value	Thickness [mm]	0.079	0.1	0.126	0.159	0.2	0.251	0.316	0.398	0.501	0.631	0.794	1	1.259	1.585	1995	2.512	3.162	3.981	5.012	6.31	7.943	10	12.589	15.849	19.953	25.119			
hrast_80_U-ob-1-2	2.9	29.0886	23.354	19.435	16.641	14.565	12.9947	11.7751	10.813	10.0504	9.4397	8.9445	8.54835	8.2278	7.96204	7.7442	7.5638	7.4134	7.28059	7.18053	7.08579	6.99753	6.92492	6.85734	6.79466	6.73596	6.68101	6.62966	6.58163		
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	45.6043	1.88711	0.99585	0.73368	0.63794	0.5568	0.49228	0.43776	0.39039	0.35236	0.32182	0.29554	0.26071	0.23158	0.20707	0.1869	0.16967	0.15611	0.14607	0.13916	0.13392	0.12931	0.12522	0.12166	0.11856	0.20017	0.12238	0.11856		
hrast_80_U-ob-3-2	2.9	26.8807	21.9934	18.9276	16.0649	14.742	12.7981	11.5855	10.6856	9.96341	9.38379	8.91382	8.53432	8.22936	7.95622	7.72626	7.52864	7.34784	7.1791	7.02102	7.11489	7.05064	6.98827	6.92819	6.86953	6.81249	6.75694	6.70294	6.64944	6.59644	
hrast_80_U-ob-3-1	2.9	28.3808	23.0824	19.3642	16.7463	14.7912	13.3081	12.1459	11.2257	10.4487	9.78474	9.21413	8.74065	8.34427	8.28219	8.14933	8.01975	7.89387	7.75351	7.65049	7.53141	7.40159	7.38868	7.31687	7.26291	7.2181	7.18281	7.14831	7.11481	7.08231	
hrast_16.2_R-718 štokli	1.9972	1.14658	0.96403	0.82394	0.71996	0.63966	0.57123	0.51479	0.46829	0.43051	0.39854	0.37222	0.35118	0.33392	0.32042	0.30972	0.30074	0.29327	0.28706	0.28196	0.27786	0.27386	0.27006	0.26636	0.26276	0.25926	0.25586	0.25246	0.24906	0.24566	
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	21.4117	18.0337	15.8908	13.5848	12.0779	10.8782	9.91719	9.13799	8.50118	7.98138	7.55521	7.2057	6.94919	6.68387	6.48071	6.33301	6.23975	6.15615	6.08245	6.01875	5.96485	5.91095	5.85705	5.80315	5.74925	5.69535	5.64145	5.58755	5.53365	
hrast_80_U-ob-1-2	2.9	14.7322	0.98766	0.86102	0.75776	0.67088	0.59581	0.52997	0.47316	0.42483	0.38228	0.34528	0.31328	0.28528	0.26028	0.23728	0.21628	0.19728	0.18028	0.16528	0.15228	0.14028	0.12928	0.11928	0.11028	0.10228	0.09428	0.08628	0.07828	0.07028	
hrast_80_U-ob-1-3	2.9	19.3703	16.4948	14.3261	12.6566	11.315	10.2539	9.40112	8.73765	8.14373	7.66833	7.28573	6.96938	6.71006	6.49508	6.31639	6.16208	6.02029	5.927	5.85033	5.77221	5.70475	5.63619	5.56763	5.50117	5.43571	5.37025	5.30479	5.23933	5.17387	
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	14.0009	0.90617	0.79079	0.70484	0.62677	0.55815	0.49754	0.44339	0.39366	0.34312	0.29285	0.25042	0.22239	0.20003	0.18127	0.16499	0.15124	0.13815	0.12656	0.11561	0.10555	0.09639	0.08793	0.07997	0.07241	0.06485	0.05729	0.05003	0.04287	
hrast_80_U-ob-1-3	2.9	31.4252	24.4439	19.8705	16.6729	14.5672	12.6217	11.2836	10.2307	9.39577	8.72098	8.20018	7.75468	7.40709	7.11906	6.88426	6.69253	6.53686	6.40923	6.30513	6.21936	6.14804	6.08706	6.03144	5.97976	5.93144	5.88644	5.84344	5.80144	5.76044	5.72044
hrast_15.6_R-638 uski	2.9	1.43567	1.36838	1.1448	0.66991	0.83563	0.7239	0.65263	0.58952	0.53437	0.48617	0.44307	0.40417	0.36947	0.33887	0.31187	0.28817	0.26747	0.24877	0.23187	0.21657	0.20247	0.18937	0.17727	0.16617	0.15597	0.14627	0.13707	0.12837	0.11997	
hrast_80_U-ob-1-2	2.9	1.38882	1.17443	1.87899	15.2878	13.3132	11.7891	10.597	9.65102	8.89927	8.3007	7.8935	7.43335	7.1221	6.87178	6.66445	6.49351	6.35221	6.23961	6.15111	6.08431	6.03721	5.99861	5.96661	5.93961	5.91661	5.89461	5.87461	5.85661	5.83961	
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	26.1238	21.3333	17.8789	15.2878	13.3132	11.7891	10.597	9.65102	8.89927	8.3007	7.8935	7.43335	7.1221	6.87178	6.66445	6.49351	6.35221	6.23961	6.15111	6.08431	6.03721	5.99861	5.96661	5.93961	5.91661	5.89461	5.87461	5.85661	5.83961	
hrast_80_U-ob-1-3	2.9	18.0639	15.9416	14.1376	12.6652	11.4108	10.3707	9.49888	8.76714	8.16083	7.66165	7.24735	6.90869	6.63146	6.40293	6.21214	6.05426	5.92213	5.81066	5.71919	5.64349	5.58229	5.53369	5.49449	5.46189	5.43449	5.41189	5.39389	5.38089	5.37189	5.36689
hrast_15.0_T-653 štokli	2.9	2.02938	1.58153	1.28812	1.0784	0.91847	0.79085	0.68508	0.59701	0.52314	0.45629	0.39699	0.35046	0.30901	0.27246	0.24122	0.21494	0.19334	0.17502	0.18975	0.18782	0.19098	0.20062	0.21836	0.24465	0.27748	0.30707	0.33666	0.36625	0.39584	
hrast_15.0_T-661 uski	2.9	0.87608	0.80172	0.72723	0.66818	0.6082	0.55161	0.49832	0.44903	0.40232	0.35842	0.31742	0.27902	0.24302	0.20902	0.17702	0.14702	0.11902	0.09302	0.06902	0.04702	0.02702	0.00902	0.00102	0.00202	0.00302	0.00402	0.00502	0.00602	0.00702	0.00802
hrast_40_U-ob-1-1	2.9	20.3753	17.1443	15.2733	13.4702	12.0223	10.8469	9.89909	9.1222	8.49103	7.97529	7.55788	7.21779	6.94084	6.71364	6.52346	6.36604	6.23311	6.11743	6.02322	5.94883	5.87711	5.79755	5.70486	5.64931	5.60629	5.57156	5.54366	5.51946	5.49746	5.47746
hrast_40_U-ob-1-2	2.9	19.2115	16.7731	14.7714	13.1358	11.8044	10.7024	9.79649	9.05678	8.43043	7.92388	7.51441	7.11231	6.71985	6.63929	6.47019	6.31093	6.17616	6.05885	5.9719	5.88638	5.80483	5.72622	5.67108	5.62516	5.58276	5.54376	5.50776	5.47476	5.44376	5.41476
hrast_40_U-ob-1-3	2.9	18.0639	0.79446	0.72573	0.66153	0.60227	0.54618	0.49348	0.44448	0.39965	0.35871	0.32041	0.28469	0.25147	0.22093	0.19293	0.16713	0.14313	0.12093	0.10093	0.08293	0.06693	0.05293	0.04093	0.03093	0.02293	0.01693	0.01293	0.00993	0.00793	0.00693
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-2	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-3	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-2	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-3	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-2	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-3	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.04344	0.04328	0.04312	0.04296	0.0428	0.04264	0.04248	0.04232	0.04216	0.042	0.04184	0.04168	0.04152	0.04136
hrast_80_U-ob-1-1	2.9	0.65701	0.05571	0.05114	0.04911	0.04772	0.0467	0.04609	0.04565	0.04521	0.04482	0.04448	0.04424	0.04408	0.04392	0.04376	0.0436	0.													