

# Kemijsko i toplinsko modificiranje drva

---

Krijan, Ljubo

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:934262>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEU ILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ljubo Krijan**

Zagreb, 2015.

SVEU ILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **KEMIJSKO I TOPLINSKO MODIFICIRANJE DRVA**

Mentori:

Izv.prof. dr. sc. Krešimir Grilec, dipl. ing.

Student:

Ljubo Krijan

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se svom profesoru i mentoru dr. sc. Krešimiru Grilecu na prihvaćanju i vođenju ove teme te na danim uputama, smjernicama i stručnoj recenziji rada.

Zahvaljujem docentu Šumarskog fakulteta, dr. sc. Zoranu Vlaoviću, koji mi je bio na raspolaganju te me usmjeravao u ključnim trenucima izrade rada.

Zahvaljujem se tvrtki Frischeis d.o.o. iz Velike Gorice na termotretiranim uzorcima bez kojih ne bih mogao obaviti ova ispitivanja.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je omogućila ovaj studij i svojoj zaručnici Nikolini na pruženoj potpori tijekom cijelog studiranja.

Ljubo Krijan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa	
Ur broj	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LJUBO KRIJAN** Mat. br.: 0035169822

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **KEMIJSKO I TOPLINSKO MODIFICIRANJE DRVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CHEMICAL AND THERMAL MODIFICATION OF WOOD**

Opis zadatka:

Drvo u vanjskim konstrukcijama prolazi kroz niz kemijskih i fizikalnih promjena koje uzrokuju polaganu razgradnju njegove površine. Postupci poboljšanja trajnosti drva baziraju se na sprečavanju štetnog utjecaja vode i ultraljubičastog zračenja, bilo promjenom sastojaka drva kemijskom modifikacijom, bilo toplinskom obradom.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Navesti uzroke propadanja drva.
- 2) Opisati postupke kemijske i toplinske modifikacije drva.
- 3) Izraditi uzorke od nekoliko vrsta drva.
- 4) Kemijski ili toplinski modificirati uzorke te ispitati njihovo trošenje nekom od raspoloživih metoda.
- 5) Provesti prateća ispitivanja i dati zaključak.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

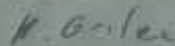
Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.


Predvideni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Zajner

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Op enito o drvu.....	2
1.2. Uzroci propadanja drva.....	4
1.3. Prirodna trajnost drva.....	6
2. MODIFICIRANJE DRVA .....	8
2.1. Toplinska modifikacija drva .....	9
2.2. Kemijska modifikacija drva .....	13
3. NANOMATERIJALI U POVRŠINSKOJ OBRADI DRVA .....	17
4. OPIS MATERIJALA ZA ISPITIVANJE.....	20
4.1. Drvo abachi .....	20
4.1.1. Termotretirano drvo abachi.....	21
4.2. Drvo borovina .....	21
4.2.1. Termotretirana borovina .....	23
4.3. Drvo jasenovina .....	23
4.3.1. Termotretirana jasenovina.....	24
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	26
5.1. Otpornost na trošenje .....	26
5.1.2. Rezultati ispitivanja .....	28
5.2. Ispitivanje tvrdo e drva.....	31
5.2.1. Tvrdo a drva .....	31
5.2.2. Postupak ispitivanja tvrdo e po Brinell-u.....	32
5.2.3. Postupak ispitivanja tvrdo e po Janki.....	33
5.2.4. Rezultati ispitivanja .....	33
6. ZAKLJU AK.....	42
7. LITERATURA .....	44
PRILOZI.....	47

## POPIS SLIKA

Slika 1. Presjek debla s makroskopskim elementima gra e drva. [6].....	2
Slika 2. Prosje ni kemijski sastav etinja a i lista a [8]. .....	3
Slika 3. Pukotine na drvu nastale pod dugotrajnim utjecajem atmosferskih uvjeta [9]. .....	4
Slika 4. Primjer biološke degradacije nezašti enog drva [9]. .....	5
Slika 5. Komora za toplinsko modificiranje drva [14]. .....	9
Slika 6. Faze toplinskog modificiranja [15]. .....	10
Slika 7. Promjena boje na uzorku od jelovine nakon toplinskog modificiranja [19]. .....	11
Slika 8. Dijagram gubitka mase pri odre enim temperaturama modifikacije [21]. .....	11
Slika 9. Komora za kemijsku modifikaciju drva [27]. .....	14
Slika 10. Reakcija drva s anhidridom octene kiseline [27]. .....	14
Slika 11. Utjecaj vode na kemijski modificirano i nemodificirano drvo borovine [30]. .....	15
Slika 12. Mojsijev most izra en od acetiliranog accoya drva u Nizozemskoj [31]. .....	16
Slika 13. Pove anje hidrofobnosti drva obra enog hidrofobnim imregnacijskim sredstvom (desno) u usporedbi s neobra enim drvom (lijevo) [10]. .....	18
Slika 14. Analiza elektronskom mikroskopom hidrofobnog premaza na drvu [10]. .....	18
Slika 15. Izgled uzorka od drva abachi [35]. .....	20
Slika 16. Izgled termotretiranog drva abachi [37]. .....	21
Slika 17. Izgled uzoraka od drva borovine [37]. .....	22
Slika 18. Izgled uzoraka od termotretirane borovine [37]. .....	23
Slika 19. Izgled uzorka od jasenovine [37]. .....	24
Slika 20. Izgled uzorka od termotretirane jasenovine [41]. .....	25
Slika 21. Ure aj za ispitivanje trošenja na abraziju [42]. .....	27
Slika 22. Prikaz raspored trošenja po presjecima: .....	28
Slika 23. Prikaz vrijednosti trošenja za neke vrste drva u odnosu na smrekovinu [4]. .....	28
Slika 24. Izgled uzoraka prije ispitivanja na abraziju: .....	29
Slika 25. Raspored trošenja modificiranih i nemodificiranih uzoraka. ....	30
Slika 26. Izgled uzoraka nakon ispitivanja na abraziju: .....	30
Slika 27. Mjerenje tvrdo e drva u odnosu na presjek [44]. .....	31
Slika 28. Postupak ispitivanja tvrdo e metodom po Brinell-u [37]. .....	32
Slika 29. Postupak ispitivanja tvrdo e metodom janka [44]. .....	33
Slika 30. Izgled uzoraka prije ispitivanja na tvrdo u po Brinell-u: .....	34
Slika 31. Mjerenje otiska kuglice digitalnim pomi nim mjerilom. ....	34
Slika 32. Izgled uzoraka nakon ispitivanja na tvrdo u: .....	35
Slika 33. Raspored tvrdo a po presjeku za ispitane uzorke .....	36
Slika 34. Shematski prikaz ure aja na erozijsko trošenje [45]. .....	36
Slika 35. Ure aj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje [45]. .....	37
Slika 36. Mjerenje uzoraka na analiti koj vagi Mettlers [37]. .....	37
Slika 37. Uzorak na drža u ure aja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje [45]. .....	38
Slika 38. estice erodenta SiO <sub>2</sub> snimljene pretražnim elektronskim mikroskopom [45]. .....	38
Slika 39. Izgled uzoraka prije ispitivanja na eroziju: .....	39
Slika 40. Izgled uzoraka nakon ispitivanja na eroziju: .....	40
Slika 41. Raspored trošenja uzoraka na eroziju .....	41
Slika 42. Izgled uzorka od modificirane borovine nakon erozijskog trošenja. ....	41

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Trajnost drva za neke doma e vrste [4].....	6
Tablica 2. Mehani ka svojstva uzoraka [4,34].....	25
Tablica 3. Vrijednost mase modificiranih uzoraka nakon trošenja materijala .....	29
Tablica 4. Vrijednost mase nemodificiranih uzoraka nakon trošenja materijala .....	29
Tablica 5. Vrijednosti najviše tvrdo e za neke doma e i egzoti ne vrsta drva [44]. .....	31
Tablica 6. Vrijednosti modificiranih uzoraka dobivenih nakon ispitivanja na tvrdo u. ....	35
Tablica 7. Vrijednosti nemodificiranih uzoraka dobivenih nakon ispitivanja na tvrdo u .....	35
Tablica 8. Vrijednosti mase modificiranih uzoraka nakon trošenja na eroziju. ....	39
Tablica 9. Vrijednosti mase nemodificiranih uzoraka nakon trošenja na eroziju .....	40



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
d	mm	promjer otiska
D	mm	promjer kuglice
E	GPa	modul elasti nosti
F	N	sila pritiska
HB	MPa	tvrd o a po Brinell-u
H <sub>WC</sub>	N	tvrd o a po Janki
Hz	Hz	Hertz
K	-	koeficijent koji ovisi o dubini prodora kuglice
m <sub>1</sub>	g	masa uzorka prije trošenja
m <sub>2</sub>	g	masa uzorka poslije trošenja
T	°C	temperatura u Celzijevim stupnjevima
v	m/s	brzina rezanja metara po sekundi
m	g	ukupni gubitak mase
m <sub>SR</sub>	g	ukupna srednja vrijednost gubitka mase

## POPIS KRATICA

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
CO <sub>2</sub>	ugljik (II) oksid
SiO <sub>2</sub>	silicijev-oksidi
TiO <sub>2</sub>	titanov-oksidi
UV	ultraljubiasto zračenje
ZnO	cink-oksidi
WPG	povećanje mase nakon obrade

## **SAŽETAK**

Posljednjih godina intenzivno se radi na razvoju metoda poboljšanja svojstava i trajnosti drva i sustava prevlaka-drvo. Svojstva drva poput dimenzijske stabilnosti, vodonepropusnosti, otpornosti prema biološkoj razgradnji te otpornosti prema ultraljubičastoj i Sunjevoj svjetlosti, pa čak i mehanička svojstva drva mogu se poboljšati modifikacijskim (toplinskim i kemijskim) postupcima. Nadalje, uvođenjem novih materijala za površinsku obradu s nanostesticama može se povećati vodonepropusnost, a dodatno i otpornost prema ultraljubičastom zračenju. Postupci toplinske i kemijske modifikacije se u inozemstvu već komercijalno primjenjuju, dok se djelotvornost ostalih pokusnih postupaka, kao što je obrada površine nanopremazima, tek treba potvrditi u praktičnoj primjeni. Zbog poboljšanih svojstava drvo ostaje konkurentan materijal u graditeljstvu, posebno za drvena pročelja, ograde, prozore i vrata, vrtni namještaj, ali i kao materijal za podove i namještaj u interijeru.

Ključne riječi: modifikacija drva, pregrijano drvo, nanopremazi.

## **SUMMARY**

Lately, an intensive work is being made on development of methods to improve properties and durability of wood and also wood-coating systems. Properties like dimensional stability, water-tightness, resistance to biodegradability and resistance to UV and Sun light, even mechanical properties can be improved by applying various modification methods (including heat and chemical treatment). Furthermore, by implementing new materials for surface treatment with nano-particles, properties like water-tightness and resistance to UV light can be additionally improved. Heat and chemical modification methods are already commercially available abroad, while effectiveness of other experimental procedures, like nano surface treatment is still being evaluated in practical use. Because of its improved properties wood remains competitive material for civil engineering, especially for wooden entrances, railings, doors and windows, garden furniture but also for floors and interior furniture.

Keywords: wood modification, overheated wood, nano-coatings

## 1. UVOD

Iako su uvijek imali veliki značaj u izradi proizvoda, materijali su danas često kamen temeljac za uspješan proizvod u našem modernom svijetu visoke tehnologije. Jedan od najstarijih materijala koji se uopće pojavio u prapovijesna vremena bilo je drvo. Prva primjena drva bila je za gradnju skloništa za ljude, životinje te za izradu kuća. U razvoju napredne građevinske tehnike, građevinski materijal sve se više zamjenjuje novim materijalom, ali ipak drvo je zbog svojih dobrih osobina zadržalo važnu ulogu te mjesto i među novim materijalima te dokazalo svoju sposobnost za upotrebu u mnogim novim suvremenim konstrukcijama. Drvo se svrstava u najljepše građevinske materijale, a ako se stručno ugradi, ispravno zaštititi od utjecaja okoliša i štetočina, može biti vrlo dugotrajno. Ono diše, propusno je, osigurava prikladnu vlažnost i toplinu, dok je temperatura drvenih elemenata u unutrašnjosti objekta uvijek jednaka temperaturi zraka u prostorijama [1].

Ipak, drvo u vanjskim konstrukcijama prolazi kroz niz kemijskih i fizikalnih promjena koje uzrokuju polaganu razgradnju njegove površine, što se uobičajeno naziva starenjem drva. Voda, bilo u obliku vodene pare, bilo u tekućem obliku, i ultraljubičasti dio Sunčeve svjetlosti glavni su činitelji propadanja drva u vanjskim konstrukcijama. Izloženost drva vlažnosti, što potiče biološku razgradnju neposredno je glavni uzrok oštećenja drva. Oko 80% svih šteta u vanjskim drvnim konstrukcijama povezano je s vlagom. Tako se i svi postupci poboljšanja trajnosti osnivaju na sprječavanju štetnog utjecaja vode i ultraljubičastog zračenja na drvo, bilo promjenom sastojaka drva kemijskom modifikacijom, bilo toplinskom obradom. Nadalje, uvođenjem novih materijala za površinsku obradu, koji sadržavaju estice nano veličina, odnosno nano premaza, poboljšava se vodonepropusnost i postojanost površine na svjetlost [2].

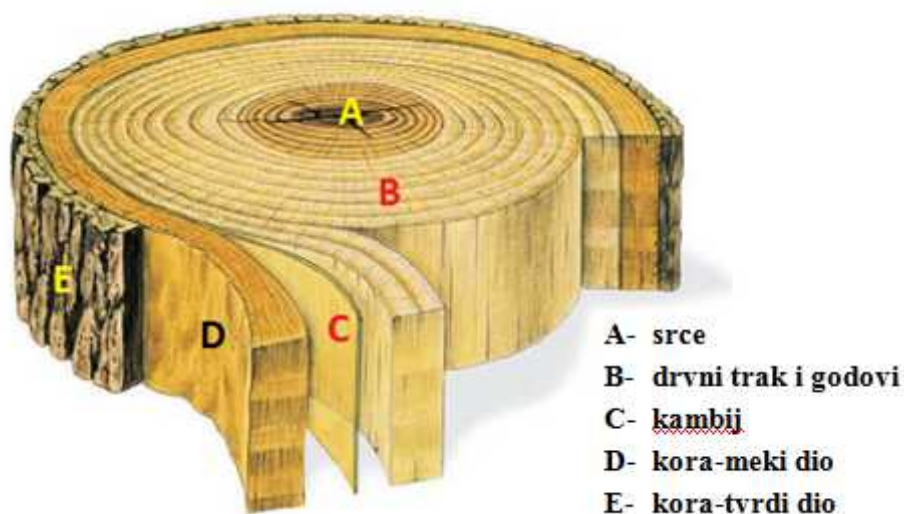
Pored izrazite funkcionalnosti i estetska je strana drva izrazito iskoristiva i prihvatljiva. Taj osjećaj zadovoljstva kojim zrače drvene konstrukcije u svakom se slučaju odražava i na cijeli objekt. Mnogi vole drvo dodirnuti, možda samo nakratko rukom kliznuti po njegovoj površini, uzimaju i pri tome nešto od njegove topline i njegova sjaja. Svaki je komad drva neponovljiv, individualan, kao i svatko od nas [3].

## 1.1. Općenito o drvu

Drvo je prirodni materijal koji se dobiva od drvenastih biljaka, uglavnom od debla stabla. Živa stanica sastoji se od stanične stijenke i protoplasti. Odumiranjem stanice postepeno nestaje sadržaj žive stanice, a ostaju njezine stijenke i stanična šupljina. Stanice drva imaju tri osnovne funkcije:

- provodnu,
- mehaničku i
- akumulacijsku.

Drvo je nehomogene građe, a raznolikost se očituje i u različitosti elemenata građe drva prikazano na slici 1. Elementi građe služe fiziološkom i mehaničkom zadatku. Drvo je jednostavnije je građe u odnosu na drvo lista, kod kojeg je broj elemenata građe veći, a raspored nepravilniji, što svakako ovisi i o klimi te o podneblju na kojem raste. Ove razlike u građi od praktične su važnosti za raspoznavanje vrsta drva i njegovu primjenu u izradi raznih drvnih proizvoda [4,5].



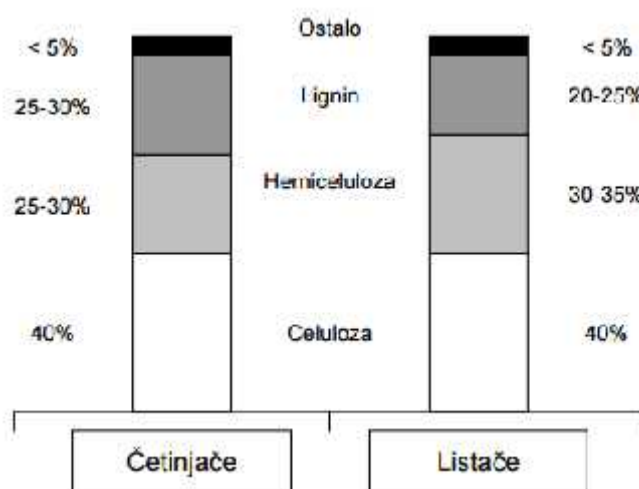
Slika 1. Presjek debla s makroskopskim elementima građe drva. [6]

U krajevima umjerenog pojasa rast drveća ograničen je uglavnom na ljetne mjeseci. Godišnjim prirastom nastaju godovi. U tropskim krajevima rast je manje ili više kontinuiran, ali zbog aktivnosti rasta nastaju koncentrične zone koje se zovu zone prirasta. God nije homogene građe. Tijekom debljanja unutarnji dijelovi drva prestaju biti fiziološki aktivni i zadržavaju mehaničku funkciju. Proljetni slojevi stanica su manje gustoće, mekši i svijetliji,

dok su ljetni i jesenji guš i, tvr i i tamniji, pa tako možemo i sami odrediti starost drva broje i tamne godove. Budu i da drvo deblja radijalno, u vanjskim se slojevima javljaju vla ne napetosti koje se smanjuju deformacijama i dijeljenjem stanica, dok se u kori javljaju napukline. Širina goda je pokazatelj odre enih fizi kih i mehani kih svojstava drva, odnosno kvalitete drva. Sastojci drvne tvari mogu se kemijski klasificirati:

- ugljikohidrati (celuloza, hemiceluloza),
- fenolne tvari (lignin), alifatske kiseline,
- terpeni i njima srodni sastojci (karakteristi no za etinjaje),
- alkoholi, proteini, anorganske tvari.

Suha drvna tvar sadržava 49,6% ugljika, 5,9% vodika, 44,0% kisika, 0,2% dušika i 0,3% pepela. Prosje ni kemijski sastav drva etinjaje i lista e (crnogorica i bjelogorica) prikazan je na slici 2. [7].



Slika 2. Prosje ni kemijski sastav etinjaja i lista e [8].

Stani nu stijenku ine celuloza, hemiceluloza i lignin koji su odgovorni za ve inu fizikalnih i mehani kih svojstava drva. Drvo kao prirodan, obnovljiv, ekonomski opravdan, estetski specifi an i energetski povoljan materijal, u odnosu na neke druge materijale (PVC, aluminij) nudi velike ekonomske i tehni ke prednosti:

- drvo je materijal koji se sam obnavlja prirodnim putem,
- relativno je jeftin,
- lako se i jednostavno obra uje i sastavlja,

- podnosi velika tla na, vla na i posmi na naprezanja,
- ima dobru vrsto u i elasti nost,
- ima malu težinu u odnosu na elik i beton,
- dobar je toplinski i zvu ni izolator,
- ugodno djeluje bojom i teksturom.

Uz navedene prednosti drvo tako er ima i nedostataka:

- drvo je podložno razgradnji djelovanjem atmosferskih uvjeta,
- drvo je podložno biološkoj razgradnji (djelovanju mikroorganizama, gljiva, insekata i štetnika),
- drvo je lako zapaljiv materijal,
- drvo je anizotropno te mijenja dimenzije s promjenama sadržaja vode.

Navedeni nedostaci ograni avaju uporabu drva u odnosu na neke druge nove materijale. Istraživanja ovih nedostataka, kao i njihovo uklanjanje ili ublažavanje pridonosi uvažavanju drva kao materijala [8].

## 1.2. Uzroci propadanja drva

Za vrijeme rasta, tokom prerade i u upotrebi, drvo je izloženo brojnim uzrocima propadanja (slika 3). Podložno je štetnom djelovanju abiotskih i biotskih uzro nika razaranja. Abiotski uzro nici razaranja koji razaraju drvo su:

- nagle promjene temperature,
- vjetar,
- UV zrake sun evog spektra,
- voda u sva tri agregatna stanja (krutom, teku em i plinovitom).



**Slika 3. Pukotine na drvu nastale pod dugotrajnim utjecajem atmosferskih uvjeta [9].**



Stalnim promjenama vlage u drvu (ubrzanim sušenjem i kvašenjem drva) postepeno dolazi do promjene u mikro-pukotinama, makro-pukotinama, do uvijanja i izvijanja, neto nosti obrade mjera i oblika te ostalih grešaka. UV zrake sun evog zra enja prvenstveno razgra uju lignin, slabije drvne polioze (hemiceluloze), a najmanje celulozu. U po etku drvo poprima sme u boju, a postepenim izlu ivanjem izazvanih hidrolizom, drvo poprima sivkastu boju. Kroz duži period dolazi do znatne razgradnje drvne tvari i potpunog narušavanja postojanosti drva (Slika 4). Biotski uzro nici razaranja drva su:

- anaerobne i aerobne bakterije,
- gljive plijesni,
- gljive promjene boje,
- gljive uzro nici truleži,
- insekti i marinski štetnici [10].



**Slika 4. Primjer biološke degradacije nezašti enog drva [9].**

Drvo najprije napadaju bakterije a potom plijesni. Neke vrste plijesni u kasnijim stadijima razvoja mogu uzrokovati promjene boje. Promjena boje je sljede a pojava koja se uo ava na zaraženom drvu, a uzrokuju je takozvane gljive plavila. U posljednjem stadiju truljenja drvo razaraju „prave gljive“ poznate kao *Basidiomycotina*. Drvo inficirano gljivama je permeabilnije (svojstvo prerade i stabilizacije drva). Me utim, pove anjem permeabilnosti dolazi do narušavanja mehani kih svojstava drva. Infekcijom nekih bakterija znatno se pove ava permeabilnost drva, a pri tome se neznatno narušavaju mehani ka svojstva. Eliminacijom vode u drvu, odnosno sušenjem, drvo se može zaštititi od infekcija gljivama, ali sušenjem se katkad pospešuje napad nekih insekata (*Lyctidae*). Neki insekti (*Anobidae*)

tako er lakše i brže razaraju drvo napadnuto ksilofagnim gljivama. Razara i drva u moru naj eš e napadaju brodsku drvenu gra u. Svaka od ovih vrsta štetnika ošte uje drvo na specifi an na in. U drvo prodiru duboko (*Molusca*) ili ga izjedaju površinski (*Crustaceae*). Iz tih razloga je potrebno zaštititi drvo protiv svih biotskih uzro nika destrukcije drva [11].

### 1.3. Prirodna trajnost drva

Trajnost drva je sposobnost da se ono odupire promjenama i razaranjima uslijed djelovanja atmosferilija, raznih kemijskih tvari i štetnika biljnog ili životinjskog porijekla. Na trajnost drva nepovoljno djeluju este promjene vlage i temperature zraka.

**Tablica 1. Trajnost drva za neke doma e vrste [4].**

Vrste drva	Trajnost drva u godinama		
	na slobodnom prostoru nezašti eno	na slobodnom prostoru pod krovom	stalno u suhom
Ariševina	40...65...90	90...120...150	1800
Borovina	40...60...85	90...100...120	120...1000
Brezovina	3...20...40	3...20...40	500
Brijestovina	60...80...100	80...130...180	1500
Bukovina	10...35...60	5...50...100	300...800
Hrastovina	50...85...120	100...150...200	300...800
Jelovina	50	50	900
Smrekovina	40...55...70	50...60...75	120...900
Topolovina	3...20...40	3...20...40	500
Vrbovina	5...15...30	5...20...40	600

Vlaga, koja sama po sebi ne bi djelovala nepovoljno na trajnost drva, u kombinaciji sa zrakom i toplinom postaje odlu an faktor razaranja drva, jer se stvaraju povoljni uvjeti za razvoj mikroorganizama koji napadaju i uništavaju drvo (truljenje, crvoto ina, gljivi avost). Time mehani ka vrsto a materijala brzo opada, a nosivost konstrukcije potpuno prestaje. Ako se drvo upotrijebi u zatvorenoj, vlažnoj prostoriji bez prozra ivanja ili ako je izloženo promjenama vlage i suho e, male je trajnosti. Najbrže propada drvo koje se nalazi u

površinskome sloju zemlje (stupovi, željezni ki pragovi). Ako se sprije i rad drva uslijed stalne promjene vlage te se uklone uvjeti za razvoj nametnika (gljiva i insekata), trajnost drva višestruko se poveća, čak i do nekoliko stotina godina (tablica 1) [4].

Hemiceluloze su glavni izvor hrane organizmima koji doprinose raspadanju i truljenju drva. Termički tretirano drvo je otporno na većinu insekata koji napadaju drvo, zbog procesa raspadanja hemiceluloze pri temperaturi od 212°C. Na alge koje rastu na površini drveta, termički tretirano drvo nije otporno. Alge ne utječu na kvalitetu, ne uništavaju ga i ne oštećuju, a drvo im daje samo mehaničko uporište. Jedini problem je estetske prirode i možemo ga riješiti upotrebom površinske zaštite. Termički tretirano drvo ima veću stabilnost nego termički neobrađeno drvo. Higroskopski gledano, drvo nakon termičke obrade manje ispušta i veće vlagu na sebe [12].

Međutim, isto tako se pravilno zaštićeno drvo može smatrati vrlo trajnim materijalom. Stoga se za zaštitu drva koriste impregnacije, drvena ulja i epoksidne smole poput katrana, bitumena i umjetnih smjesa.

## 2. MODIFICIRANJE DRVA

Smanjenjem koli ine trajnih i kvalitetnijih vrsta drva, sve se više u drvnoj industriji koriste one manje trajne i manje kvalitetne. Logi no je da upravo te manje trajne i nekvalitetne vrste drva iziskuju sve ve u upotrebu zaštitnih sredstava. U današnje vrijeme ovjek mora sve više razmišljati o ekološki prihvatljivijim metodama zaštite te metode o uvanja zaštitnim sredstvima svesti na minimum. Kao rješenje name e se modifikacija drva. Pojam modifikacije drva ozna va proces kemijske obrade u kojoj se mijenja kemijska struktura drva. Cilj modifikacije drva je dobiti modificirano drvo stabilnih dimenzija, otporno na djelovanje mikroorganizama, trajno sa što manjim gubitkom vrsto e. Osnovna podjela modifikacije drva je na:

- termi ku modifikaciju drva i
- kemijsku modifikaciju drva [13].

Modifikacija drva bilo ona termi ka ili kemijska danas ini veliki svjetski trend. Ve ina ljudi ima u svojim domovima drvo kao sirovinu prera enu u gotovi proizvod, bilo da se radi o obi nom krevetu, stolu, ormaru ili o drvu upotrijebljenom u gra evini kao nosive grede i sli no. Tako er drvo koristimo u obliku stupova za razli ite elektri ne vodove, stupova postavljenih u vinogradima, drvene ograde, i tako dalje. Ovime se pokušava približiti koliko ljudi u stvari koriste drvo i kako je ponekad po svojoj kvaliteti drvo nezamjenjiva sirovina. Samom spoznajom o važnosti drva kroz povijest pronalazili su se razli iti na ini zaštite drva. Ako odemo daleko u prošlost, stari Grci, Etruš ani, Kinezi pa ak i Abori ini, od raznih sastojaka slagali su sredstva za zaštitu drva. Kako vrijeme polako odmi e, civilizacije postaju sve suvremenije i napredak znanosti jednostavno je nemogu e zaustaviti, jer i sam ovjek, po svojoj suštini uvijek teži ne emu boljem.

Danas koristimo razli ita sredstva za zaštitu drva, u svim oblicima, jer kako je poznato, drvo je anizotropan i higroskopan materijal. Tako er budu i da se drvo kao sirovina iskorištava u velikim koli inama, polako nestaje kvalitetnijih vrsta drva, stoga se nastoji poboljšati svojstva manje otpornim i manje kvalitetnim vrstama. Modificiranom se drvu mijenjaju njegova unutarnja struktura i svojstva. Težnja je posti i stabilnost njegovih dimenzija, o uvati mehani ka svojstva i posti i otpornost na biološke imbenike. Modifikacija drva ve se u praksi pokazala kao uspješna alternativa u zaštiti drva, dala je manje ili više pozitivne

rezultate kao ekološki i ekonomski prihvatljivija te kao rješenje na nedostatak kvalitetnijih i otpornijih vrsta drva [13].

## 2.1. Toplinska modifikacija drva

Toplinska obrada ili pregrijavanje drva postupak je kojim se, bez unošenja dodatnih kemikalija, samo pod utjecajem topline, tlaka i vlage, mijenja kemijska struktura stani ne stijenke drva [11]. Promjenom stani ne stijenke smanjuje se njezin afinitet prema vodi, te poboljšava dimenzijska stabilnost drva. Toplinska obrada provodi se u takozvanim komorama za modificiranje (slika 5.), u tri faze prikazanoj na slici 6. naj eš e pri temperaturama od 120 °C do 280 °C, bez prisutnosti kisika, u trajanju 15 minuta do 36 sati.

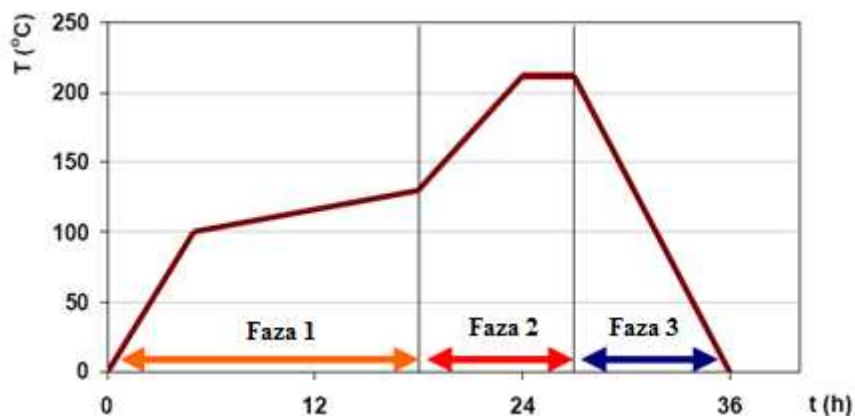
Toplinska obrada ovisi o:

- vrsti procesa,
- vrsti drva,
- dimenzijama proizvoda,
- sadržaju vode u drvu,
- ciljanim svojstvima proizvoda,
- mehani kim svojstvima,
- željenoj otpornosti prema biološkoj razgradnji,
- dimenzijskoj stabilnosti proizvoda,
- ja ini promjene boje.



Slika 5. Komora za toplinsko modificiranje drva [14].

U prvoj fazi dolazi do povećanja temperature u komori do temperature 100°C te se polagano podiže do temperature 130°C, što utječe na prirodni sastav drva. U ovoj fazi moguće je koristiti vodenu paru kako bi se sprijeilo zapaljenje drva. Sadržaj vlage u drvu je znatno smanjen (za 15 - 20%) te se pri temperaturi od 130°C teži da je približno jednak nuli.



Slika 6. Faze toplinskog modificiranja [15].

U drugoj fazi temperatura se povećava do ciljane razine (oko 215°C, može biti viša ili niža, ovisno od vrsti drva). Što je viša temperatura, to drvo tijekom procesa postaje tamnije. I u ovoj fazi koristi se vodena para kako bi se sprijeilo izgaranje drva na visokim temperaturama.

U trećoj fazi temperatura u peći se naglo smanjuje. Drvo se dodatno prska vodenom parom kako bi sadržaj vlage u drvu na kraju procesa iznosio oko 4 do 6% [16].

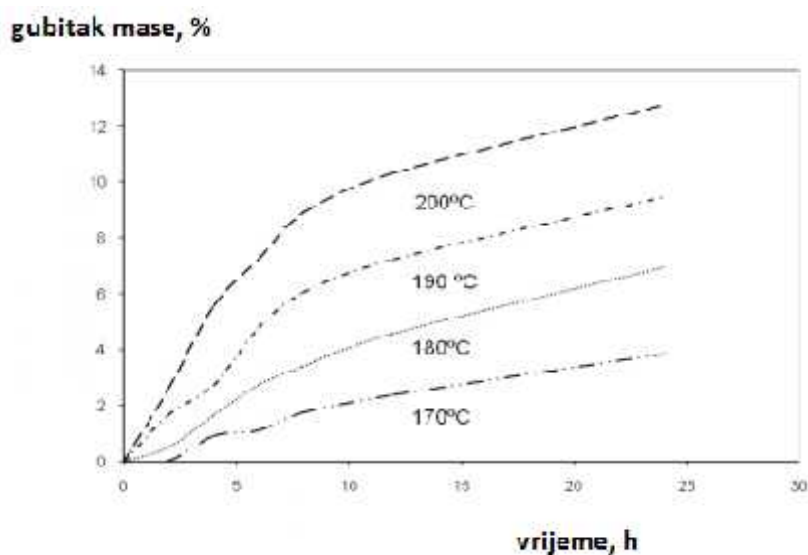
Uloga vode u procesu toplinske modifikacije je značajna jer je njena uloga dvostruka. Voda se upotrebljava u svrhu kontroliranog isušivanja drva za vrijeme odvijanja procesa, gdje drvo, upijajući i isparenu vodu stabilnije podnosi visoke temperature. Ubrizgavanjem vode u komoru na kraju ciklusa sušenja postiže se brže i ravnomjernije hlađenje drva. Ubrizgana voda na sebe preuzima toplinu iz zraka koja vodu trenutno pretvara u vodenu paru i zatim se u takvoj parnoj fazi ispušta u atmosferu kroz ispušne otvore na komori [17].

Nadalje, duljinom trajanja procesa i temperaturom definira se stupanj modifikacije drva. Što je trajanje dulje, to su dimenzijska stabilnost i trajnost modificiranog drva veći, a gustoća i mehanička svojstva se smanjuju. Produljenjem vremena modifikacije mijenja se i boja drva, posebno svjetlina boje (slika 7.) [18].



Slika 7. Promjena boje na uzorku od jelovine nakon toplinskog modificiranja [19].

Primjerice, letinja se prilikom zagrijavanja na  $240^{\circ}\text{C}$  postaju tamnosmeđe, dok je kod lista ta promjena boje smanjena. U početku primjene metode toplinske modifikacije promjena boje se smatrala nedostatkom, ali danas je ona jedan od razloga primjene, jer je moguće postići boju drugih vrsta drva po cijelom poprečnom presjeku elementa [20]. Isto tako, osim promjene boje znatno se smanjuje i masa modificiranog drva (slika 8). Ispitivanja su pokazala da pri temperaturama višim od  $170^{\circ}\text{C}$  dolazi do naglog smanjenja mase.



Slika 8. Dijagram gubitka mase pri određenim temperaturama modifikacije [21].

Me utim, da bi se zadržao željeni estetski izgled površine toplinski modificiranog drva, nužno je nanijeti zaštitne prevlake jer je toplinski obrađeno drvo podložno promjenama boje. Iako se prirodna boja drva toplinskom obradom ujedna i, njezin ton nije postojan na svjetlost te ga treba stabilizirati. Praktično iskustvo govori da smeđa boja nezaštićene površine pregrijanog drva etinja a tijekom vanjskog izlaganja u trajanju od 3 do 6 mjeseci jako izbledi [22].

Rezultati desetogodišnjeg izlaganja toplinski modificiranog drva vanjskim vremenskim utjecajima pokazali su vrlo male dimenzijske promjene na modificiranim uzorcima u usporedbi s nemodificiranim. Ravnotežni je sadržaj vode i nakon tri godine izlaganja bio 40 do 60% manji nego na nemodificiranim uzorcima, bez obzira na sustav površinske obrade. To znači i da pri jednakoj relativnoj vlažnosti zraka drvo higroskopski primi gotovo dvostruko manje vode, što utječe na smanjenje promjena dimenzija utezanjem. Pregrijana se bukovina tako uteže do 13% manje od normalne, dok se u etinja a to smanjenje kreće oko 40%. Sve navedeno ipak ne sprečava stvaranje pukotina na modificiranom drvu [23,24].

Štoviše, krhkost i naprezanja u pregrijanom drvu u uporabi dovode do finih površinskih pukotina, čak i pri niskim sadržajima vode. Nezaštićena površina pregrijanog drva nešto se brže troši nego površina zaštićenog drva, osobito na zonama ranog drva, što je posljedica razgradnje hemiceluloze tijekom procesa obrade te povećanog udjela lignina na izloženoj površini. Me utim, ako se pregrijano drvo zaštiti slabom permeabilnom troslojnom prevlakom, pojava pukotina se sprječava. Istraživanja su pokazala da su mehanička svojstva toplinski modificiranih uzoraka drva nakon desetogodišnjeg izlaganja smanjila bez obzira na parametre procesa. Drvo je postalo krhko, smanjena je vlažna i suva savijanja, zabilježen je gubitak mase od 15% i intenzivna promjena boje, to veća što je temperatura bila viša. Obradom na temperaturama do 190°C, dinamička savijanja smanjuje od 5 do 18%, a pri temperaturama višim od 200°C suva savijanja se smanjuje i preko 50% (osobito suva savijanja) te drvo postaje vrlo krhko, što mu ograničava uporabu za ne nosive građevne elemente. Takve promjene krhkosti doprinose i nepovoljnijim tehnološkim obilježjima. Pri obradi se razvija finija prašina, površina pregrijanog drva je iglasta i hrapava, lako se zacjepljuje i odvaja u obliku oštih rubova [23,24].

Kombinacijom različitih parametara toplinske modifikacije i njihovom pažljivom kontrolom, neželjene posljedice modifikacije mogu se smanjiti. Tako je vrlo visoka temperatura na kraju procesa osigurati visoku trajnost proizvoda, ali mehanička svojstva takvog drva bit će uvelike smanjena. Osim toga, niska temperatura na kraju procesa samo će malo produljiti



trajnost proizvoda, ali e i samo malo smanjiti mehani ka svojstva. Istraživanja su pokazala da se otpornost pregrijanog drva prema gljivama truležnicama pove aava s pove anjem stupnja modifikacije [25].

Me utim, toplinski obra eno drvo ipak nije toliko otporno na gljive plavila i plijesni da se može upotrebljavati na otvorenome bez kemijske ili površinske zaštite. Procesi toplinske modifikacije drva i dalje se istražuju. Toplinska obrada drva pridonosi:

- manjem upijanju vode,
- poboljšava dimenzijsku stabilnost,
- pove aava otpornost drva prema biološkoj razgradnji,
- pridonosi dubinskim, ravnomjernim promjenama boje u tamnije tonove.

Iako pregrijano drvo pokazuje izuzetne prednosti u smislu estetskih svojstava (jednoli na i efektna promjena boje) te nekih tehni kih odrednica (znatno smanjeno bubrenje i utezanje te poboljšana otpornost na gljive), treba biti svjestan i njegovih nedostataka u usporedbi s normalnim drvom. Mehani ka svojstva bitno se smanjuju, tako da se taj materijal uglavnom koristi za ne nosive konstrukcije, a površina je osjetljiva na izbjeljivanje pri svjetlosti i pojavu pukotina [11]. U svakom slu aju, potrebno je ste i iskustva o reakciji svake vrste drva na pregrijavanje, jer se pokazalo da razli ite vrste drva reagiraju vrlo razli ito te istražiti odnos fizikalnih odrednica postupka obrade i posljedih promjena na drvu. Najve i izazov u tim istraživanjima jest kako zadržati smanjenje mehani kih svojstava modificiranog drva pod nadzorom, uz istodobno poboljšanje trajnosti sustava drvo – prevlaka.

## **2.2. Kemijska modifikacija drva**

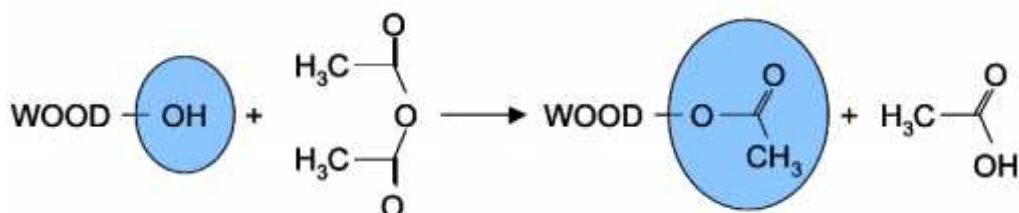
Od svih postupaka kemijske modifikacije drva acetilacija je naj eš e istraživana. Otkrivena je po etkom 20. stolje a, ali širu prakti nu primjenu tog izuzetnog postupka ograni avali su visoki troškovi postupka [26].

Glavna zada a acetilacije drva jest poboljšanje dimenzijske stabilnosti drva i njegove otpornosti protiv biološke razgradnje. Drvo se u komori (slika 9.) impregnira teku im anhidridom octene kiseline, zagrijava do 120°C i odre eno vrijeme drži na toj temperaturi.



Slika 9. Komora za kemijsku modifikaciju drva [27].

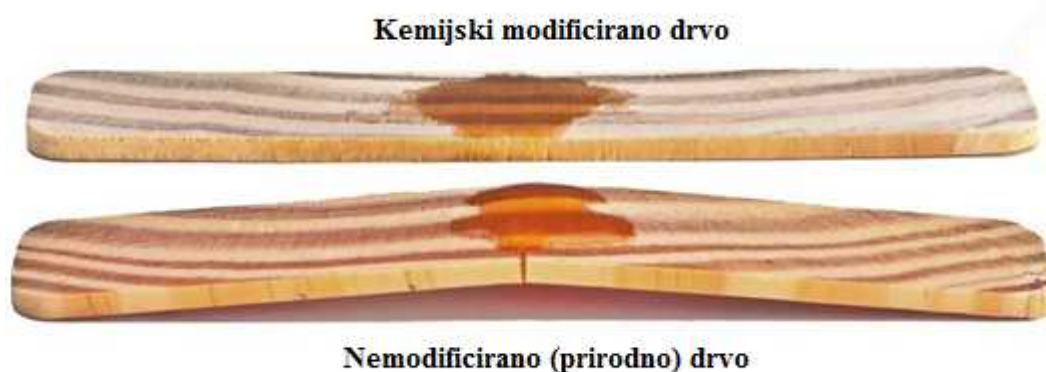
Pri tome se hidroksilne grupe polimera (dio molekule sastavljeni od jednog atoma vodika i jednog atoma kisika) stani ne stijenke (celuloze, polioza i lignina) zamjenjuju acetilnim grupama (slika 10). Kovalentne veze acetilnih grupa otporne su na hidroliti ku razgradnju, pa drvo upija manje vode te se smanjuje ravnotežni sadržaj vode. Kao sporedni produkt reakcije nastaje octena kiselina, koja se zajedno s viškom anhidrida octene kiseline dodatnim vakuumom mora ukloniti iz drva.



Slika 10. Reakcija drva s anhidridom octene kiseline [27].

Nakon tog vakuumskeg postupka drvo još uvijek sadržava octenu kiselinu, tako da je potrebna i dodatna obrada vodenom parom. Acetilacija je u laboratorijskim uvjetima relativno jednostavan proces, jer se radi s malim uzorcima. Vrste drva koje se teško impregniraju poput smrekovine i duglazijevine, nisu pogodne za acetilaciju ako je rije o ve im dimenzijama [26]. Da bi se postigla dovoljno velika brzina acetiliranja, drvo impregnirano anhidridom octene kiseline treba zagrijati u zatvorenoj komori, na temperaturu ve u od 100°C. Toplina se obi no dovodi izvan komore i prenosi na drvo konvekcijom (usmjerenim gibanjem),

što dosta produljuje proces i može negativno utjecati na kvalitetu gotovog proizvoda zbog odredene toplinske razgradnje drva. Uporabom energije mikrovalova, toplina prolazi kroz cijeli impregnirani element, no u tom je slučaju potrebno utvrditi sposobnost apsorpcije mikrovalova i dubinu penetracije sredstva ovisno o temperaturi tijekom procesa [28]. Polje mikrovalova pri frekvenciji od 2450 MHz širi se punom snagom do dubine 100 mm, što znači da je takav proces primjenjiv na uzorcima poprečnog presjeka od minimalno 200 mm × 200 mm. Energija mikrovalova pokazala se vrlo efikasnom i pri zagrijavanju anhidrida octene kiseline i njome impregniranog drva, jer omogućuje brzo zagrijavanje cijelog presjeka uzorka na željenu temperaturu (120 do 130°C). Također je učinkovita i pri uklanjanju viška anhidrida octene kiseline i njezinih nusprodukata, uz djelovanje vakuuma, pri čemu se tijekom prvih 30 minuta može ukloniti oko 70% preostalih kemikalija. Acetiliranjem se povećava sadržaj acetilnih skupina u drvu za oko 20%, dok u nemodificiranom drvu on iznosi 1 do 2%. Unošenje novih acetilnih skupina u drvo uzrokuje promjene hemiceluloze te bubrenje staničnih stijenki i stanične lamele, što u kombinaciji sa smanjenom mogućnošću vezanja molekula vode rezultira povećanjem dimenzijske stabilnosti (slika 11.) [29].



**Slika 11. Utjecaj vode na kemijski modificirano i nemodificirano drvo borovine [30].**

Postojanost prema gljivama razara ima drva znatno se poboljšava te je usporediva s drvom impregniranim solima bakra, kroma ili arsena. Bitno je još naglasiti kako se poboljšanja tih svojstava postižu bez negativnih utjecaja na mehanička svojstva drva. Djelotvornost postupka ovisi o stupnju acetilacije koji se mjeri postotnim povećanjem mase nakon obrade (WPG%). Ako je WPG 20% ili više, postižu se izvanredna svojstva modificiranog drva. Mehanička svojstva, za razliku od svojstava pregrijanog drva, bitno se ne smanjuju, dok se tvrdoća i vrstoća na savijanje, štoviše, mogu i povećati do 20%. Na slici 12. prikazan je Mojsijev most

izrađen od acetiliranog egzotičnog drva accoya, gdje je ograda mosta zbog utjecaja vode opterećena savijanjem.



**Slika 12. Mojsijev most izrađen od acetiliranog accoya drva u Nizozemskoj [31].**

Međutim, to ovisi svakako i o vrsti drva i njegovim postupkom izrade. Iako se acetilacijom prirodna boja drva bitno ne mijenja, što je glavna razlika tog postupka modifikacije od postupka pregrijavanja, ipak acetilirano drvo s vremenom posivi, što je u skladu s činjenicom da acetilacija stabilizira celulozu, a mnogo slabije lignin. Nakon nekog vremena promjena boje razlikuje se od boje prirodnog drva, po tome što je u početku vrlo slaba i spora, no nakon dužeg izlaganja sive površine postaju neizbježne. Kako god, pri vanjskom izlaganju drvo acetilirano do 20% WPG pokazalo se stabilnijim, uz manju eroziju i gubitak mase nego od prirodnog drva [29].

### 3. NANOMATERIJALI U POVRŠINSKOJ OBRADI DRVA

Usprkos poboljšanim svojstvima u odnosu na nemodificirano drvo, toplinski modificirano drvo još je uvijek podložno površinskoj razgradnji uslijed djelovanja vanjskih utjecaja i stoga ga je potrebno zaštititi premazima. Promjena boje drva prvi je znak propadanja, a proizvođači drvnih proizvoda često je u interesu da drvo što duže zadrži svoju prirodnu boju, kako bi se izbjeglo razaranja kupaca. Dodavanjem nano estica u premaz može se značajno utjecati na njegova svojstva. Nano estice zbog svoje male veličine znatno smanjuju raspršivanje svjetlosti te na taj način zadržavaju prozirnost premaza [32].

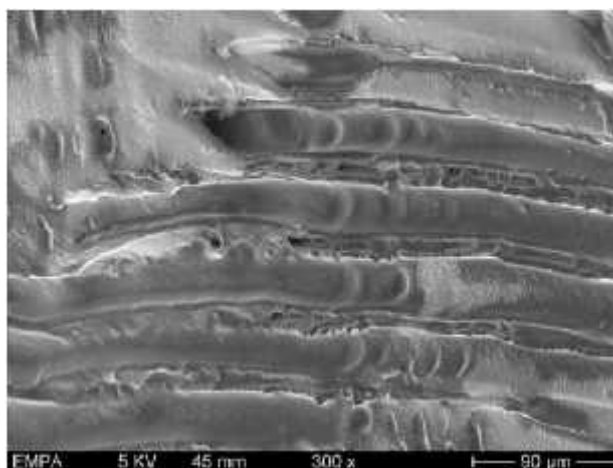
Pojam nanostrukturirani materijali ili nanofazni materijali odnose se na materijale čije su dimenzije faza (estica praška, zrna strukture ili proizvedenih slojeva) reda veličine od nekoliko do stotinjak nanometara. U skladu s tim, razvoj nanolakova temelji se na nano esticama, nanoslojevima, nanostrukturama. Krute estice nanometarskih veličina (na primjer  $\text{SiO}_2$ ) mogu se dispergirati u laku i poboljšati njegova svojstva, a da one same zbog svojih dimenzija ostanu nevidljive. Primjena nano estica u prozirnim materijalima zasniva se na fizikalnoj pojavi prema kojoj ona komponenta u sustavu (na primjer u laku) koja ima dimenzije manje od jedne desetine valne duljine svjetlosti ne pridonosi raspršivanju svjetlosti i ne mijenja refrakcijski indeks. Ako su estice manje od približno 40 nm, one neće biti vidljive u optičkom dijelu spektra. Primjenom nano estica moguće je povećati otpornost lakova na ogrebotine i abraziju. Na tržištu već postoje razvijeni materijali za lakiranje parketa i namještaja koji imaju posebnu otpornost na ogrebotine izazvane čeličnom vunom. Sve više se rade istraživanja na mogućnostima zaštite drva od svjetlosnog zračenja uklapanjem anorganskih nanometarskih estica pigmentata (na primjer  $\text{ZnO}$  ili  $\text{TiO}_2$ ) ili nano estica metalnog oksida, veziva pogodna za premaz drva [33].

Za zaštitu površine drva od tekućine i vode posebno su zanimljivi hidrofobni (vodonepropusni) slojevi debljine 0,03 - 0,1  $\mu\text{m}$ , koji smanjuju primanje tekućine i vode, a ujedno štite drvo od promjene boje. Hidrofobne supstancije nove generacije temelje se na uljima i voskovima kao prijašnje, nego na spojevima silicija. Većina tih materijala zahtijeva primjenu tehničkih impregnacijskih postupaka koji se ne ubrajaju u sredstva za klasičnu površinsku obradu drva. Hidrofobni premazi za drvo prikazuju kako voda uopće ne kvasi tako obradeno drvo, pa se kuglaste kapljice, s kutem kvašenja i većim od  $150^\circ$ , samo otkotrljaju s površine drva (slika 13).



**Slika 13. Povećanje hidrofobnosti drva obrađenog hidrofobnim impregnacijskim sredstvom (desno) u usporedbi s neobrađenim drvom (lijevo) [10].**

Međutim treba napomenuti da površina tako obrađenog drva ostaje paropropusna, pa drvo, iako je vodonepropusnost površine velika, u duljem razdoblju izlaganja higroskopski ipak može primiti vlagu, ponajprije na vodoravnim i koso izloženim ploham [10]. Na vertikalnim ploham i onim drvnim građevnim elementima koji su fizički zaštićeni od velike količine vode, na primjer na prozorima, primjena hidrofobnih impregnacijskih slojeva vrlo je zanimljiva, jer na drvu obrađenom na taj način ostaju otvorene pore pa ono djeluje kao da nije površinski obrađeno (slika 14).



**Slika 14. Analiza elektronskom mikroskopom hidrofobnog premaza na drvu [10].**

Hidrofobni nanopremazi čine drvo odbojnim za kapljice vode, ali struktura ostaje otvorena za higroskopsko upijanje vodene pare. Hidrofobni, vodoodbijaju i u inak takve obrade djeluje nekoliko godina, a nakon toga se drvo na jednostavan način ponovno obradi istim sredstvom.

Promjena boje zbog vremenskih utjecaja ne može se spriječiti vodoodbijajućim impregnacijskim sredstvom, ali se može usporiti. Obrada samo hidrofobnim impregnirajućim sredstvima nije dovoljna za drvene elemente od kojih se očekuje dimenzijska stabilnost, jer ne postoji zaštita od difuzije vodene pare. Kombinacija hidrofobnih materijala sa svjetlosno zaštitnim dodacima osigurala bi produljenje trajnosti drvenih elemenata i povećala intervale između obnavljanja elemenata bez filmogenog premaza. Stoga se u mnogim istraživačkim centrima na tome intenzivno radi, a na tržištu su već neka sredstva koja služe kao hidrofobni impregnacijski slojevi s UV zaštitom. S druge strane, povećanje hidrofobnosti samih filmova ili njihova naknadna obrada tankim vodoodbojnim slojevima, osiguravaju dugotrajnost transparentne prevlake i njezinu uinkovitost u osiguranju postojanosti drva na svjetlost [10].

Na tržištu nekih europskih zemalja već se nalaze sredstva koja služe kao temeljni hidrofobni impregnacijski slojevi ili kao UV zaštita. Sol-gel procesima moguće je pri niskim temperaturama stvoriti sasvim nove anorganske ili organsko-anorganske (nanokompozitne) materijale različitih svojstava i struktura. Organsko-anorganske hibridne prevlake mogu poboljšati površinska svojstva mnogih površina, uključujući i drvo.

Osim povećane mehaničke i kemijske otpornosti podloge, na površini se mogu postići i različite kombinacije svojstava kao na primjer:

- otpornost na abraziju i struganje,
- korozijska postojanost,
- kemijska stabilnost,
- antirefleksna svojstva,
- antibakterijska svojstva,
- antistatičko djelovanje [32].

Postoji još niz drugih prevlaka koje se koriste za zaštitu drva poput:

- NC premazi (celulozno nitrirani premazi),
- SH premazi (kiseloočvršćavajući premazi),
- 2K PU premazi (dvokomponentni poliuretanski premazi),
- PE premazi (nezasićeni poliestarski premazi),
- ulja i voskovi,
- vodeni premazi (1K/2K vodeni premazi),
- baje za drvo [37].

## 4. OPIS MATERIJALA ZA ISPITIVANJE

### 4.1. Drvo abachi

Drvo abachi je tropsko drvo vrste *Triplochiton scleroxylon* iz botaničke porodice *Sterculiaceae*. Raste u zapadnoj Africi zajedno s limbom (*Terminalia superba*) u tropskim kišnim šumama. Promjer debla kreće se između 50, 120 i 180 cm, rjeđe dosegne i 200 cm. Debla su cilindrična, obično vrlo visoka, što omogućuje dobivanje trupaca velike tehnike duljine [34]. Kora debla je glatka, a sa starenjem stabla postaje plošasta i ljušti se. Drvo abachi je boje slonova i do boje slame, žutosmeđe, a ponekad može biti i maslinaste boje (slika 15). Bjeljika je široka, katkada i do 15 cm, drvo je vrlo mekano, lijepo i ujednane teksture.



Slika 15. Izgled uzorka od drva abachi [35].

Drvo abachi je rastresito porozno, lako se obrađuje ručnim i strojnim alatima. Preporučuje se uporaba oštrog alata s tankim bridovima kako bi se izbjeglo upanje i mrvljenje drva. Drvo abachi izvrsno se brusi, ljušti, lijepi, pjeskari i lakira. Pri spajanju se preporučuje lijepljenje, premda drvo dobro drži vijke i čavle te ne puca. Drvo se vrlo brzo suši, uz vrlo malo grešaka ili bez njih. Drvo abachi se upotrebljava za proizvodnju:

- furnira i furnirskih ploča,
- ploča iverica,
- za obloge, unutarnje konstrukcije,
- za izradu namještaja i dijelova namještaja,



- za izradu sauna,
- amaca za spašavanje,
- drvenih kutija.

Odlučujuće je stolarsko drvo za unutrašnje radove, a trupci većih dimenzija prikladni su za masovnu proizvodnju namještaja. Cijena trupaca smatra se povoljnom.

#### 4.1.1. Termotretirano drvo abachi

Termotretirano drvo abachi, poznato je kao (Wawa, Samba, Ayous) a primjenjuje se ponajviše za vanjske obloge. Termotretirano drvo abachi nema čvorove (kvrge), izuzetno je isto drvo i ima lijepu glatku i finu strukturu. To je najlakše tvrdo drvo u upotrebi, prilično je elastično i otporno na visoke temperature. Izuzetno je cijenjeno zbog svoje niske toplinske vodljivosti i svojstva upijanja vode. Toplinskom modifikacijom drvu se značajno poboljšava otpornost na truljenje, dimenzijska stabilnost i otpornost na vremenske uvjete. Ta svojstva čine ga prikladnim proizvodom za najzahtjevnije vremenske uvjete [36]. Prilikom toplinske modifikacije drvo poprimi izrazitu smeđu boju (slika 16).



Slika 16. Izgled termotretiranog drva abachi [37].

#### 4.2. Drvo borovina

Borovina *Pinus sylvestris* je crnogorična vrsta drveća iz porodice Pinaceae. Rasprostranjenost borovine je dosta široka i obuhvaća područje Europe i sjeverne Azije. Njegova visinska rasprostranjenost je od 700 metara nadmorske visine na sjevernim planinama do oko

1600 metara nadmorske visine na južnim planinama [38]. Stablo borovine je zimzeleno, visine 10 do 30 m, dužine debla do 20 m i opsega do 1 m. Borovina spada u jedri ave vrste drve a. Bjeljika je žu kasto-bijela ili crvenkasto-bijela, a sr ika, u svježem stanju je sli na bjeljici, dok na zraku kasnije postaje crvenkasto-sme a. Granice prirasta su jasne i izrazito tamnije boje (slika 17).



**Slika 17. Izgled uzoraka od drva borovine [37].**

Borovina se lako reže, buši i brusi. Optimalne brzine rezanja su oko 33 m/s. Drvo se dobro suši, a kod vlažnosti iznad 25% i temperaturi od 20 do 30°C, sklono je pojavi plavetnila. Drvo se dobro lijepi, površinski se dobro obra uje, ali kod velikog sadržaja smole se teško bajca (li i) i lakira. Trajnost drva je velika, naro ito prilikom upotrebe pod vodom.

Borovina se upotrebljava za proizvodnju:

- sje enog furnira,
- za proizvodnju furnirskih plo a i za furniranje iverica,
- za proizvodnju vrata i prozora,
- za proizvodnju podova i
- krovnih konstrukcija i sli no.

Upotrebljava se kao specijalno drvo za papirnu i celuloznu industriju, za proizvodnju iverica i vlaknatica, u proizvodnji drvne vune, drvnog ugljena i sli no [38].

#### 4.2.1. Termotretirana borovina

Zahvaljujući termičkoj obradi, borovina preuzima topliju boju, sličnu boji karamela (slika 18). Upotrijebljena kao podnice za terase, svakom ambijentu daje ugodan izgled. Termičkom obradom borovina postaje otporna na vremenske utjecaje i pogodna za dugotrajnu vanjsku upotrebu, zadržavajući postojanost.

Prolaskom vremena i utjecajem svjetlosti, termički obrađena borovina poprima lijepu srebrnosivu boju, koju je zadržati redovitim nanošenjem zaštitnog uljnog premaza. S ekološkog stajališta, ova vrsta drva se svakako preporučuje, jer raste u domaćim i europskim šumama [39].



Slika 18. Izgled uzoraka od termotretirane borovine [37].

#### 4.3. Drvo jasenovina

Jasenovina je bjelogorično drvo koje možemo naći diljem Europe. Raste uglavnom u nizinskim poplavnim šumama, a doseže visinu do otprilike 30 metara. Zbog svoje prilagodljivosti i izdržljivosti uspijeva u skoro svim krajevima Hrvatske. Poznata je po svojoj elastičnosti, što znači da posjeduje osobinu drva koje mijenja svoju dimenziju pod utjecajem vanjskih uvjeta, ali s prestankom njihovog djelovanja ponovno se vraća u svoj prvobitni oblik. Kada gledamo karakteristike poput tvrdoće, vrstoće i trajnosti, jasenovina je najslabija u odnosu na hrastovinu. Osim karakteristika, s hrastovinom se podudara i u tome što je glavna domaća vrsta drva koja se koristi za proizvodnju parketa [40].

Najvažnija osobina jasenovine je njezina svijetla boja (slika 19). Ako se primjerice u prostoriju, kojoj se namijeni promjena, postavi parket od jasenovine, ona postaje svijetlija i prozra nija od svih ostalih.



**Slika 19. Izgled uzorka od jasenovine [37].**

Jasenovina je drvo koje pripada u tvr e vrste te je otporna na trošenje. Da bi se mogla pove ati otpornost na vlagu, potrebno je jasenovinu dodatno zaštititi uljima i lakovima. Nakon takvog postupka, mo i e se ugraditi u prostori je gdje bi mogla do i u kontakt s vodom, što su naj eš e kuhinja ili kupaonica. Osim od vlage, ulja i lakovi štite od insekata i nametnika, kao i od isušivanja drva te izbjeljivanja na suncu [40].

#### **4.3.1. Termotretirana jasenovina**

Termotretirana jasenovina je jedina doma a vrsta od koje se uspješno rade podnice. Radi se o kontroliranom postupku grijanja drva pri temperaturi od oko 220°C. Na taj na in dolazi do procesa promjene tehni kih svojstava jasenovine. Podnice obra ene na ovaj na in tvr e su, stabilnije i otpornije na vremenske utjecaje. Uz to, drvo dobije i privla nu okoladnu boju (slika 20). Nedostaci ovog postupka su krhkost drva, stoga treba izbjegavati upotrebu tamo gdje je elasti nost važna [41].



Slika 20. Izgled uzorka od termotretirane jasenovine [41].

U tablici 2. prikazana su mehani ka svojstva ispitanih nemodificiranih uzoraka.

Tablica 2. Mehani ka svojstva uzoraka [4,34].

Opis	Abachi	Borovina	Jasenovina
vrsto a na tlak	24...40...50,5 MPa	35...55...94 MPa	23...52...80 MPa
vrsto a na vlak, paralelno s vlakancima	11...49,5...79,5 MPa	35...104...196 MPa	70...165...293 MPa
vrsto a na savijanje	30...73,5...110 MPa	41...100...206 MPa	58...120...210 MPa
vrsto a na smik	-	6.1...10...14 MPa	9...12.8...14.6 MPa
Tvrdo a (po Brinellu), paralelno s vlakancima okomito na vlakanca	oko 25 MPa oko 13 MPa	63...71 MPa oko 28 MPa	oko 53 MPa oko 19 MPa
Modul elasti nosti	4,9...8,7 GPa	6.9...12...20.1 GPa	4.4...13,4...18.1 GPa

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Zadatak ovog rada je izraditi uzorke od toplinski modificiranog i nemodificiranog (prirodnog) drva te ispitati njihovo trošenje na abraziju, eroziju i tvrdo u nekom od raspoloživih metoda. Postupak termičke modifikacije kojim su opisani uzorci tretirani ist je i ekološki na in za poboljšanje svojstava drva. Samo visoke temperature i vodena para se koriste u procesu, što ini kona ni proizvod potpuno prirodnim i bez ikakvih štetnih kemikalija. U slu aju zapaljenja ne e imati nikakav štetan utjecaj po okoliš niti po zdravlje ljudi. Uzorci su nabavljeni iz tvrtke Frischeis d.o.o. koja se nalazi u Velikoj Gorici. To ne temperature pri kojoj su uzorci modificirani nisu poznate, zbog toga što je uzorke mogu e modificirati na više na ina i svaki proizvo a drži se svoje formule. Za ispitivanje su izra eni uzorci od svake skupine drva, pa se tako od drva etinja a uzeta borovina, od lista a jasenovina i tropsko drvo abachi te su provedena prate a ispitivanja. Uzorci od sve tri vrste drva pažljivo su izra ene u stolarskoj radionici, a prilikom izrade vodilo se ra una o smjeru vlakanaca (godovima) kako bi se ispitivanja mogla to no usporediti s navedenima u literaturi. U Laboratoriju za tribologiju napravljena su dva ispitivanja. Uzorci su ispitani na eroziju i abraziju, gdje se mjerila razlika u masi prije i nakon trošenja uzoraka, te se uspore ivalo koje se drvo brže, odnosno sporije troši. Za ispitivanje na abraziju korišten je ure aj "suhi pijesak/gumeni kota ". U Laboratoriju za mehani ka svojstva materijala, za ispitivanje tvrdo e korištena je Brinell-ova metoda. Bitno je naglasiti da su svi uzorci ispitani u radijalnom presjeku. Prije samog ispitivanja uzoraka, opisane su pobljže ispitne metode koje su korištene.

### 5.1. Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje je svojstvo drva da se ono opire postupnom narušavanju (mehani kom trošenju) svoje površine uslijed djelovanja vanjskih mehani kih sila. Ne postoji univerzalna metoda odre ivanja otpornosti trošenja drva.

Jedna od raspoloživih metoda koja se danas koristi je "suhi pijesak/gumeni kota " (slika 21). Ova metoda za ispitivanje koristi eli ni disk sa slojem prirodne gume po radijusu tvrdo e 64 Shore-a. Promjer diska je 228,6 mm, a pogonjen je elektromotorom s reduktorom snage 0,7 kW. Prilikom ispitivanja broj okretaja je konstantan i iznosi  $100 \text{ min}^{-1}$ , a sila pritiska je 45 N. Kao abraziv koristi se isti kvarcni pijesak (99,99%  $\text{SiO}_2$ ), a promjeri zrnaca su u

granicama od 212 do 300  $\mu\text{m}$ . Dotok pijeska regulira se sapnicom koja svojim oblikom i otvorom osigurava protok od 250 do 350 g/min pijeska.



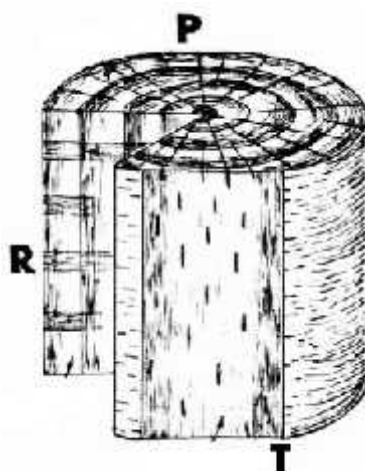
Slika 21. Uređaj za ispitivanje trošenja na abraziju [42].

Abraziv se dovodi izmeću ispitnog uzorka i rotirajućeg kota. Kota se na mjestu kontakta giba u smjeru istjecanja pijeska. Oslonac poluge leži u ravnini koja je tangencijalna na obod kota, a okomita na horizontalni promjer u smjeru djelovanja sile. Prije samog početka ispitivanja, uzorke je potrebno izvagati na analitičkoj vagi Mettlers s točnošću od 0,0001 g [42].

Otpornost protiv trošenja površine drva moguće je izraziti:

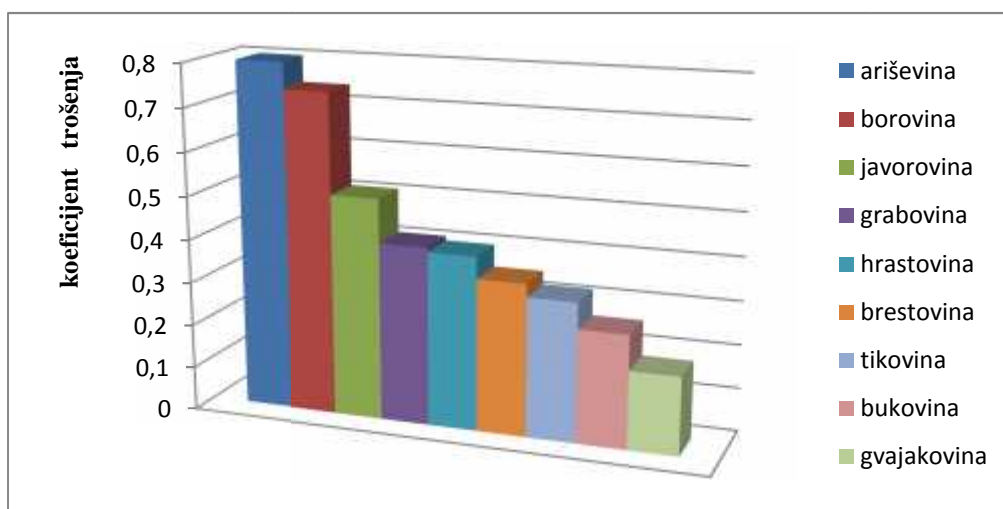
- smanjenjem volumena,
- smanjenjem mase,
- recipročnom vrijednosti smanjenja debljine uzorka uslijed trošenja.

U radijalnom smjeru otpornost na trošenje je dvostruko veća od trošenja drva u tangencijalnom smjeru, a u poprečnom je najveća otpornost na trošenje (slika 22).



Slika 22. Prikaz raspored trošenja po presjecima:  
P-popre ni, R-radijalni, T-tangencijalni [43].

Otpornost na trošenje znatno utječe u anatomski, fizički i mehanički svojstva drva. Na slici 23. je prikazan koeficijent trošenja  $k_h$  po Kollmannu u odnosu na smrekovinu, gdje je  $k_h=1,0$  [4].

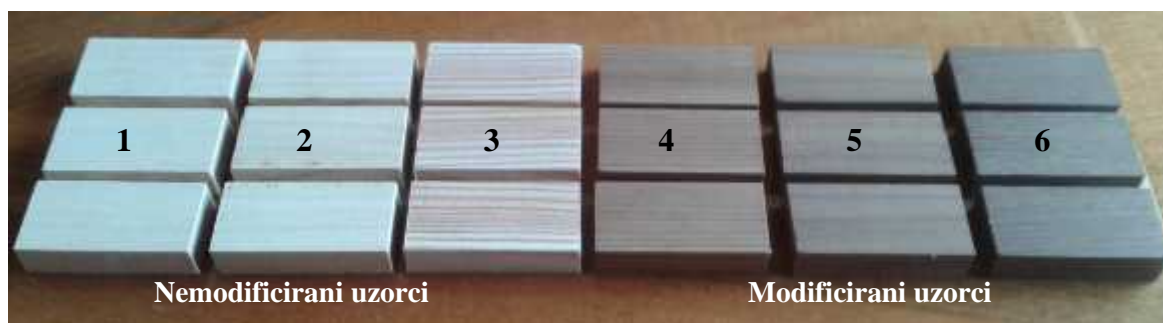


Slika 23. Prikaz vrijednosti trošenja za neke vrste drva u odnosu na smrekovinu [4].

### 5.1.2. Rezultati ispitivanja

Za ispitivanje na abraziju izrađena su tri uzorka od termo tretiranih i netretiranih uzoraka. Dimenzije ispitnih uzoraka su  $50 \times 25 \times 12,5$  mm. Prije samog trošenja uzoraka (slika 24.) na uređaju „suhi pijesak/gumena kota“ izmjerena je masa uzoraka na analitičkoj vagi.





Slika 24. Izgled uzoraka prije ispitivanja na abraziju:

a) jasenovina (1 i 6); b) abachi (2 i 5); c) borovina (3 i 4).

Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3 i 4. Razlika u masi ra una se prema jednadžbi (1),:

$$m = m_1 - m_2, \text{ [g]} \quad (1)$$

a srednja vrijednost mase prema jednadžbi (2):

$$m_{SR} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{3}, \text{ [g]} \quad (2)$$

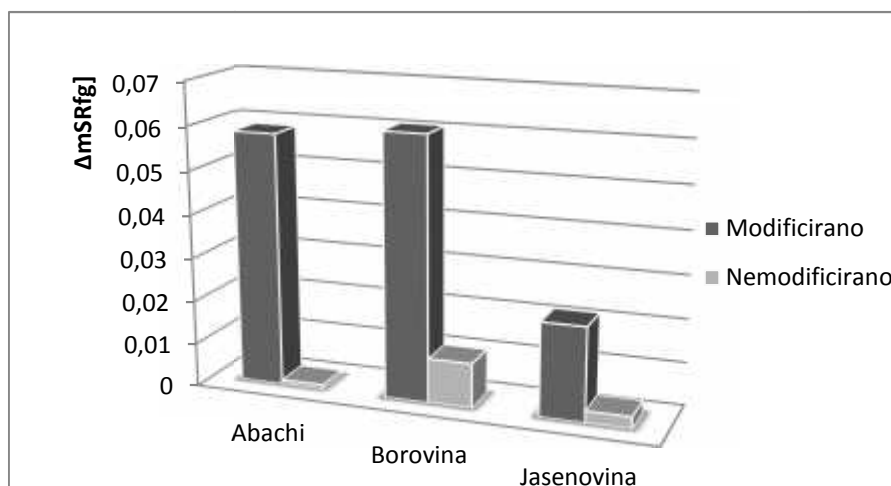
Tablica 3. Vrijednost mase modificiranih uzoraka nakon trošenja materijala

Modificirani uzorci	Abachi m [g]	Borovina m [g]	Jasenovina m [g]
Uzorak 1	0,0649	0,0703	0,0140
Uzorak 2	0,0674	0,0592	0,0228
Uzorak 3	0,0429	0,0524	0,0281
$m_{SR}$ [g]	0,0584	0,0606	0,0216

Tablica 4. Vrijednost mase nemodificiranih uzoraka nakon trošenja materijala

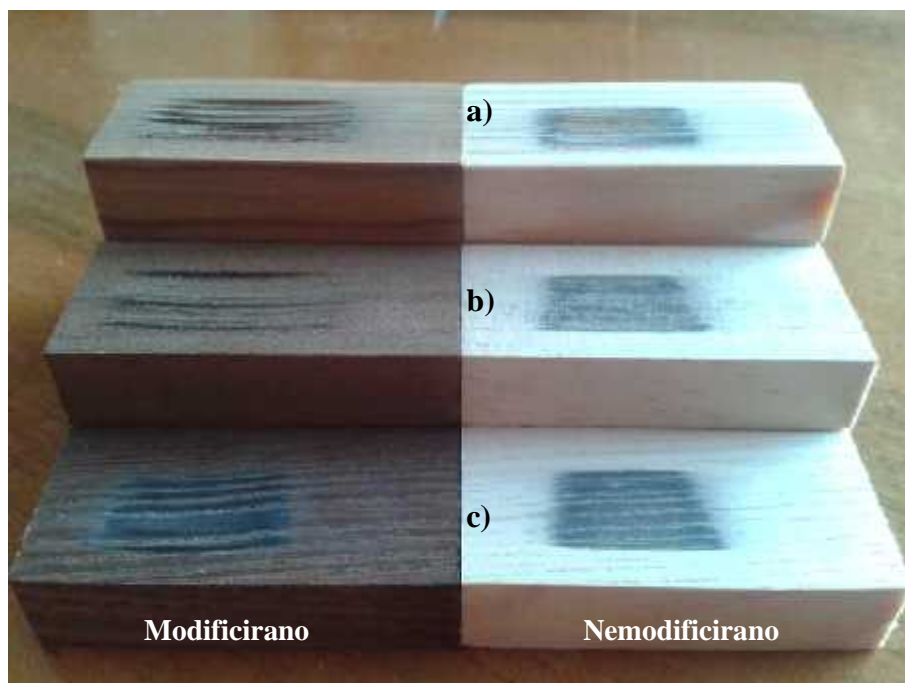
Nemodificirani uzorci	Abachi m [g]	Borovina m [g]	Jasenovina m [g]
Uzorak 1	0,0011	0,0047	0,0023
Uzorak 2	0,0014	0,0115	0,0030
Uzorak 3	0,0005	0,0149	0,0029
$m_{SR}$ [g]	0,0010	0,0103	0,0027

Modificirani uzorci su pokazali znatno ve e trošenje materijala u odnosu na nemodificirane uzorke (slika 25).



**Slika 25. Raspored trošenja modificiranih i nemodificiranih uzoraka.**

Uzorci od termotretirane jasenovine u prosjeku su se znatno manje trošili u odnosu na uzorke od termotretirane borovine i drva abachi (slika 26). Isto tako, nemodificirani uzorci od jasenovine i abachi pokazali su veliku otpornost na abrazijsko trošenje, na što je svakako utjecala i širina te broj godina na ispitnim uzorcima.



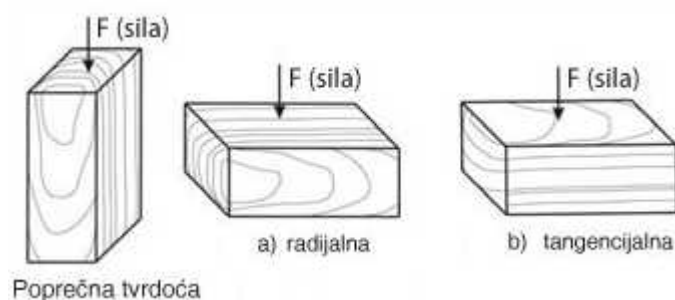
**Slika 26. Izgled uzoraka nakon ispitivanja na abraziju:**

**a) borovina, b) abachi, c) jasenovina.**

## 5.2. Ispitivanje tvrdo e drva

### 5.2.1. Tvrdo a drva

Tvrdo a drva je otpor kojeg drvo pruža težnji stranog tijela da prodire u njegovu strukturu (volumen). Na tvrdo u drva zna ajno utje u anatomska, fizikalna i mehani ka svojstva drva. Prema pravcu djelovanja sile, tvrdo a drva može biti odre ena na tri osnovna presjeka (slika 27).



Slika 27. Mjerenje tvrdo e drva u odnosu na presjek [44].

Tvrdo a drva najve a je na popre nom presjeku, odnosno kada sila djeluje u smjeru vlakana. Tvrdo a popre nog presjeka do 2,5 puta je ve a od tvrdo e radijalnog i tangencijalnog presjeka, odnosno kada sila djeluje okomito na vlakanca u tangencijalnom i radijalnom smjeru [44]. Tvrdo a radijalnog presjeka nešto je malo ve a od tvrdo e tangencijalnog presjeka. U tablici 5. su prikazane tvrdo e po Janka skali za popre nu tvrdo u pri 12% vlažnosti drva.

Tablica 5. Vrijednosti najviše tvrdo e za neke doma e i egzotične vrste drva [44].

Opis	Popre na tvrdo a (MPa)	Vrste drva
vrlo meko drvo	< 35	jelovina, smrekovina, topolovina, lipovina
meko drvo	od 35,1 do 50	johovina, brezovina, ariševina, borovina
srednje tvrdo drvo	od 50,1 do 65	orahovina, brestovina, kestenovina, dudovina
tvrdo drvo	od 65,1 do 100	hrastovina, jasenovina, tikovina, grabovina
vrlo tvrdo drvo	od 100 do 150	svibovina, crnikovina, žutikovina, šimširevina
najtvr e drvo	>150	gvajakovina

Za ispitivanje tvrdoće drva, danas se uglavnom koriste dvije metode:

- metoda po Brinell-u,
- metoda po Janki.

### 5.2.2. Postupak ispitivanja tvrdoće po Brinell-u

Postupak ispitivanja tvrdoće po Brinell-u prema (HRN EN 1534) prikazan na slici 28. temelji se na mjerenju otiska čelične kuglice promjera 10 mm na površini drva pod djelovanjem sile od 1000 N za tvrde vrste drva i 500 N za meke vrste drva. Vrijeme konstantnog opterećenja je 30 sekundi i mjere se dva unakrsna promjera [44].

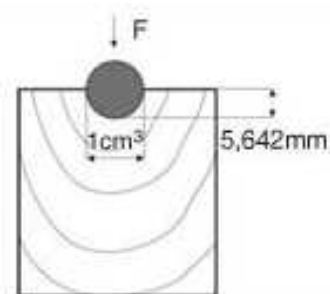


Slika 28. Postupak ispitivanja tvrdoće metodom po Brinell-u [37].

Nedostatak Brinell-ove metode je, što kod vrlo tvrdih vrsta drva veličina otiska kuglice na njegovoj površini je relativno mala, pa postoji realna mogućnost da se otisak nađe pretežno u zoni ranog ili kasnog drva unutar jednog prstena prirasta, a time i do velike varijacije dobivenih rezultata zbog vrlo velike razlike u tvrdoćama ovih dviju zona. Smatra se da je Brinell-ova metoda pogodnija za određivanje tvrdoće kod nižih vrijednosti gustoće drva [44].

### 5.2.3. Postupak ispitivanja tvrdo e po Janki

Postupak ispitivanja po Janki (ASTM D 1037-7) sastoji se u utvr ivanju sile koja je potrebna da se eli na kuglica promjera 11,284 mm utisne u drvo do polovine svog promjera (5,642 mm) (slika 29).



Slika 29. Postupak ispitivanja tvrdo e metodom janka [44]

Na taj se na in ostvaruje otisak na površini drva od 100 mm<sup>2</sup>. Konstantna brzina utiskivanja kuglice kre e se u granicama od 3 do 6 mm/min. Vrijednosti za tvrdo e po Janki dobiju se iz jednadžbe (10):

$$H_{wc} = K \cdot P, \text{ [N]} \quad (10)$$

gdje je:

K - koeficijent koji ovisi o dubini prodora kuglice

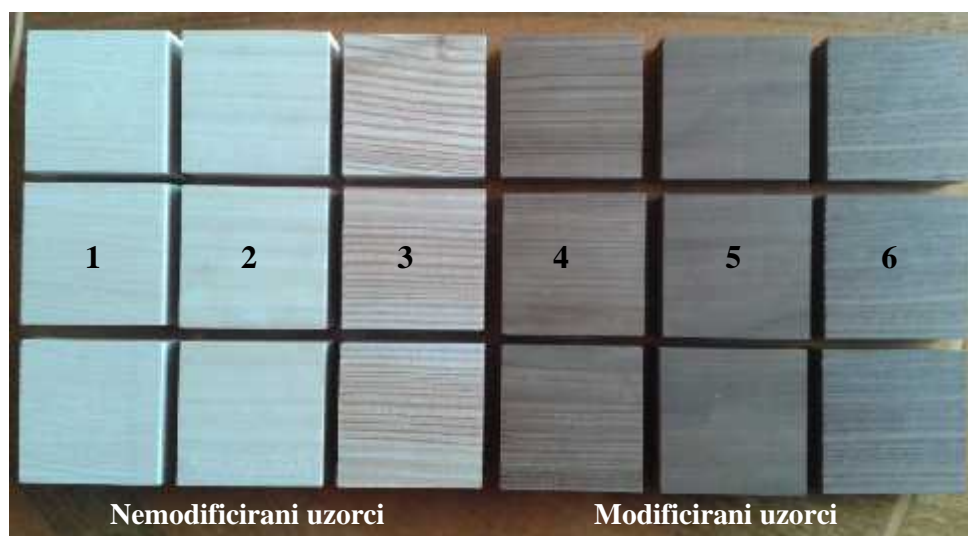
P - sila utiskivanja na propisanu dubinu

Nedostatak ove metode je u prevelikoj dubini utiskivanja kuglice, tako da su prednosti dobivene tvrdo e bliske vrijednostima vrsto e na tlak za istu vrstu drva, anatomski pravac i vlažnost. U Europi se najviše primjenjuje Brinell-ova metoda, a u Americi metoda po Janki. Prisutnost ova dva na ina ispitivanja i uo ene njihove slabosti nam govore da niti jedna metoda nije idealna.

Smatra se da je metoda po Janki pogodnija za odre ivanje tvrdo e viših vrijednosti gusto e drva [44].

### 5.2.4. Rezultati ispitivanja

Za ispitivanje na tvrdo u metodom po Brinell-u, izra eno je tri uzorka od svake vrste drva. Dimenzije ispitnih uzoraka su 50×50×25 mm (slika 30). Sila pri kojoj su uzorci bili optere eni je konstantna i iznosila je 1000 N u vremenu od 15±3 sekunde.



**Slika 30. Izgled uzoraka prije ispitivanja na tvrdo u po Brinell-u:  
a) jasnovina (1 i 6); b) abachi (2 i 5); c) borovina (3 i 4).**

Nakon ispitivanja kroz  $25 \pm 5$  sekundi, mjerena su dva unakrsna promjera digitalnim pomi nim mjerilom i uzima se njihova srednja vrijednost (slika 31).



**Slika 31. Mjerenje otiska kuglice digitalnim pomi nim mjerilom.**

Vrijednosti dobivene mjerenjem uzoraka (paralelno i okomito na smjer godova) prikazane su u tablicama 6., i 7. Iz jednadžbe (13) izra unata je tvrdo a po Brinell-u:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ [MPa]} \quad (3)$$

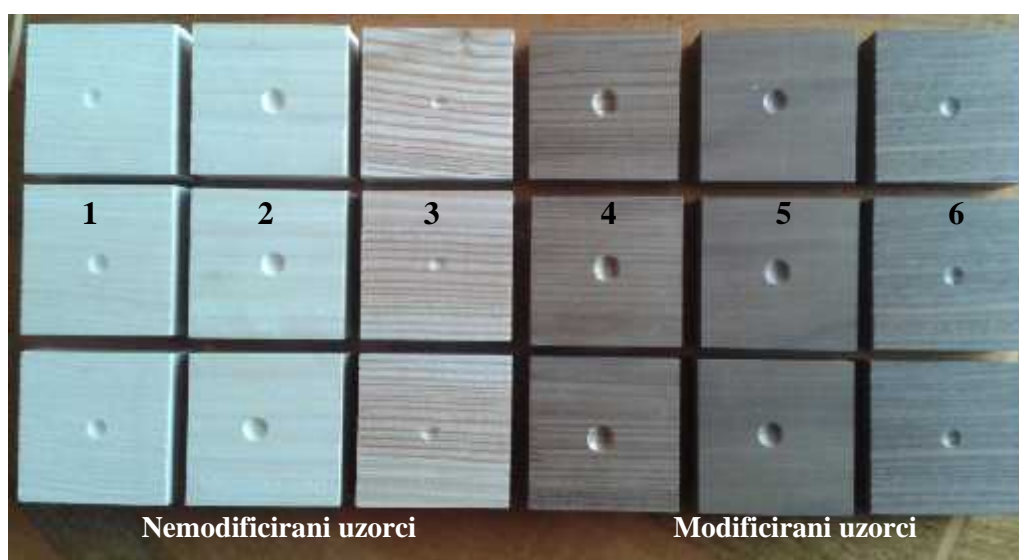
**Tablica 6. Vrijednosti modificiranih uzoraka dobivenih nakon ispitivanja na tvrdo u**

<b>Modificirani uzorci</b>	<b>Abachi</b> paralelno / okomito d [mm]	<b>Borovina</b> paralelno / okomito d [mm]	<b>Jasenovina</b> paralelno / okomito d [mm]
Uzorak 1	8;8,1 / 8,1;8,1	8,8;9,3 / 8,9;9,4	6,3;6,3 / 6,2;6,6
Uzorak 2	8,1;8,2 / 8,1;8,1	9;8,9 / 9,1;9,	6,4;6,3 / 6,3;6,4
Uzorak 3	8,3;8,4 / 8,3;8,3	9,1;9,1 / 9,2;9,1	6,1;6,5 / 6,5;6,4
HB	15,01 [MPa]	10,97 [MPa]	27,98[MPa]

**Tablica 7. Vrijednosti nemodificiranih uzoraka dobivenih nakon ispitivanja na tvrdo u**

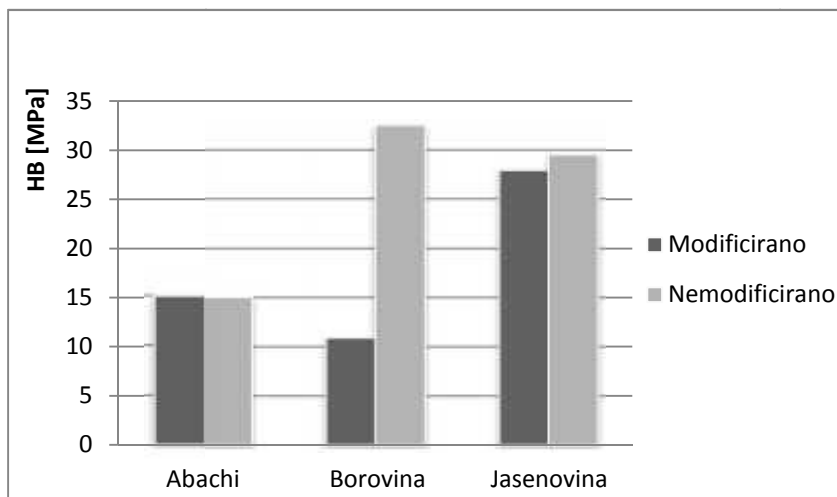
<b>Nemodificirani uzorci</b>	<b>Abachi</b> paralelno / okomito d [mm]	<b>Borovina</b> paralelno / okomito d [mm]	<b>Jasenovina</b> paralelno / okomito d [mm]
Uzorak 1	7,8;7,9 / 8,1;7,7	6,1;6,2 / 6,5;6,2	6,2;6,2 / 6;6,1
Uzorak 2	8;8,4 / 8,3;8,4	5,6;5,3 / 5,8;5,4	6,2;6,3 / 5,9;6,2
Uzorak 3	8,4;8,2 / 8,7;8,1	6,1;6,1 / 5,9;6,1	6,4;6,5 / 6,3;6,1
HB	15,06 [MPa]	32,53 [MPa]	29,55 [MPa]

Na slici 32. prikazani su uzorci ispitani na tvrdo u, gdje se jasno može vidjeti razlika u otisku kuglice na pojedinim uzorcima.



**Slika 32. Izgled uzoraka nakon ispitivanja na tvrdo u:**  
**a) jasnovina (1 i 6); b) abachi (2 i 5); c) borovina (3 i 4).**

Uzorak od nemodificirane borovine (3), pokazuje znatno veći otpor otiska kuglice u osnovni materijal za razliku od modificirane borovine (4). Uzorci od termotretiranog drva abachi (5) i termotretirane jasenovine (6), u oba slučaja pokazali su se poprilično jednako tvrdim, što u konačnici pokazuje i tvrdoća (slika 33).

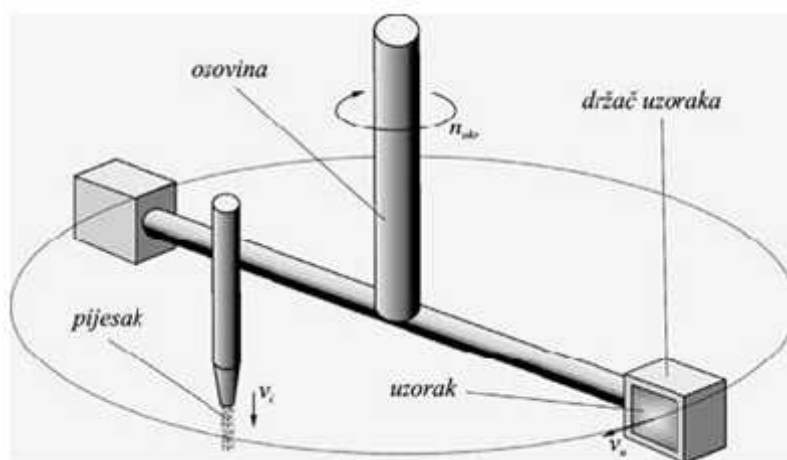


Slika 33. Raspored tvrdoća po presjeku za ispitane uzorke

### 5.3. Ispitivanje na eroziju

#### 5.3.1. Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje

Otpornost na erozijsko trošenje modificiranih i nemodificiranih uzoraka određena je pomoću uređaja prikazanog na slici 35. Za ispitivanje erozijske otpornosti nekog materijala ne postoji standardna metoda već svaki Laboratorij za tribološka ispitivanja koristi svoju metodu i opremu.



Slika 34. Shematski prikaz uređaja na erozijsko trošenje [45].



U postupku ispitivanja uzorak se podvrgava eroziji krutim esticama pod različitim kutovima. U uređaju za erozijsko trošenje korištenom u ovom radu, rotacijom pri vršenju uzoraka osigurava se dovoljna brzina udara estica o površinu, a da se ne koristi neki prijenosni medij pod tlakom (slika 34.)[45].



**Slika 35. Uređaj za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje [45].**

Prije i nakon trošenja izmjerena je masa svih uzoraka na analitičkoj vagi Mettlers (slika 36.) s točnošću od 0,0001 g.



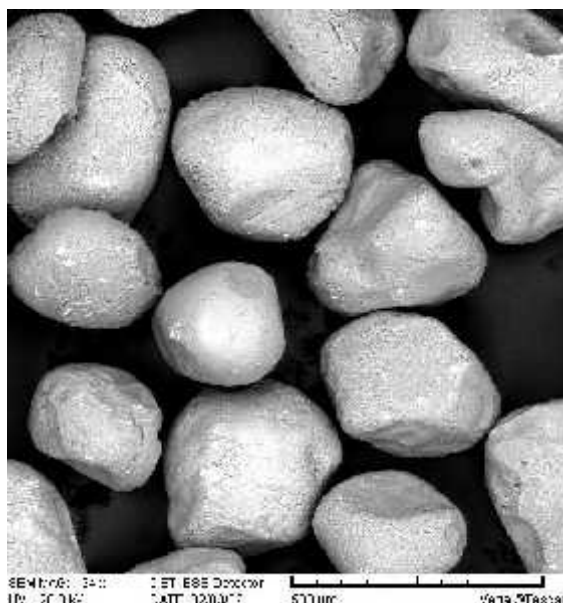
**Slika 36. Mjerenje uzoraka na analitičkoj vagi Mettlers [37].**

Ure aj ima mogućnost istovremenog ispitivanja dva uzorka pri jednakim ili različitim uvjetima to jest kutovima trošenja 30°, 60° i 90°. Zbog usporedivosti rezultata protok pijeska kroz mlaznicu mora biti konstantan za cjelokupno vrijeme trajanja pokusa. Slika 37. pokazuje uzorak u držaču ure aja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje.



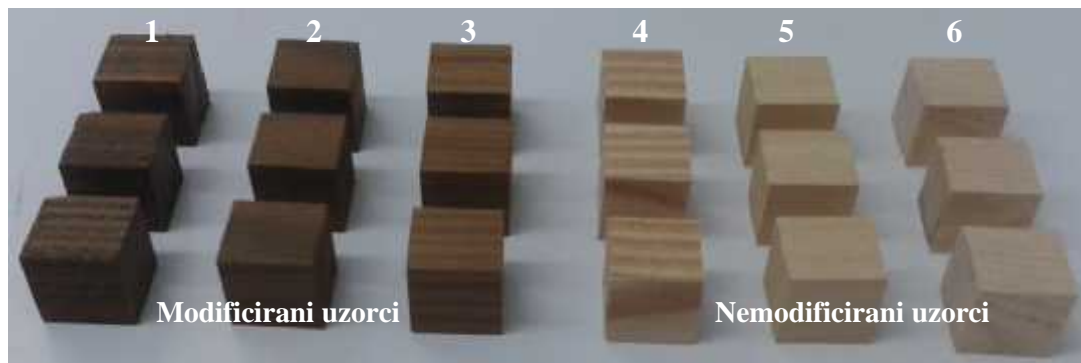
**Slika 37. Uzorak na držaču ure aja za ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje [45].**

Uključivanjem ure aja pijesak počinje ići kroz mlaznicu, te rotacijom uzorka dolazi do interakcije uzorak – erodent. Na slici 38. prikazane su čestice erodenta snimljene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM).



**Slika 38. čestice erodenta SiO<sub>2</sub> snimljene pretražnim elektronskim mikroskopom [45].**

Za svaki novi ispitivani kut mlazu se izlaže neerodirana površina uzorka. Kako se erozijska otpornost određuje preko gubitka mase, potrebno je prije i poslije svakog ispitivanja izmjeriti točnu masu uzoraka. Izgled uzoraka prije ispitivanja na eroziju prikazan je na slici 39.



**Slika 39. Izgled uzoraka prije ispitivanja na eroziju:**  
**a) jasenovina (1 i 6); b) abachi (2 i 5); c) borovina (3 i 4).**

### 5.3.2. Rezultati ispitivanja

Prilikom ispitivanja erodent koji se koristio prilikom ispitivanja je silicij oksidni ( $\text{SiO}_2$ ) pijesak, a uzorci su bili ispitivani pod kutem od  $90^\circ$ . Erozijskom trošenju uzorci su podvrgnuti na način da je uzorak u vršenju pripadaju i drža koji je povezan s osovinom koja se rotirala brzinom 1440 okretaja/minuti, pri čemu je dolazilo do udara uzoraka u mlaz abraziva ~ 20 000, koji je uslijed gravitacije padao kroz sapnicu promjera 5 mm, dok je sapnica udaljena 3 mm od uzorka. Vrijeme ispitivanja jedne površine trajalo je 13 minuta i 53 sekunde, a brzina ispitnog uzorka iznosila je 24,3 m/s. Nakon završetka pojedinog ispitivanja određene površine, uzorci su očišćeni te vagani na analitičkoj vagi Mettlers. Stupanj erozije određeno je pomoću gubitka mase očitanim prilikom vaganja. Vrijednosti dobivene nakon ispitivanja prikazane su u tablici 8. i 9.

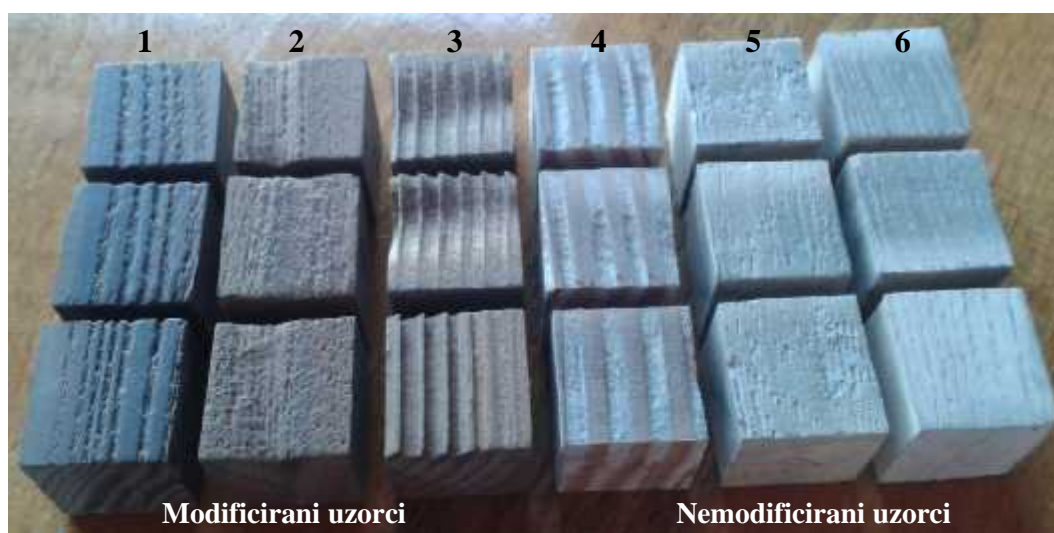
**Tablica 8. Vrijednosti mase modificiranih uzoraka nakon trošenja na eroziju**

<b>Modificirani uzorci</b>	<b>Abachi</b> m [g]	<b>Borovina</b> m [g]	<b>Jasenovina</b> m [g]
Uzorak 1	0,0657	0,0431	0,0204
Uzorak 2	0,0482	0,0696	0,0277
Uzorak 3	0,0545	0,0748	0,0250
$m_{SR}$ [g]	0,0561	0,0625	0,0243

**Tablica 9. Vrijednosti mase nemodificiranih uzoraka nakon trošenja na eroziju**

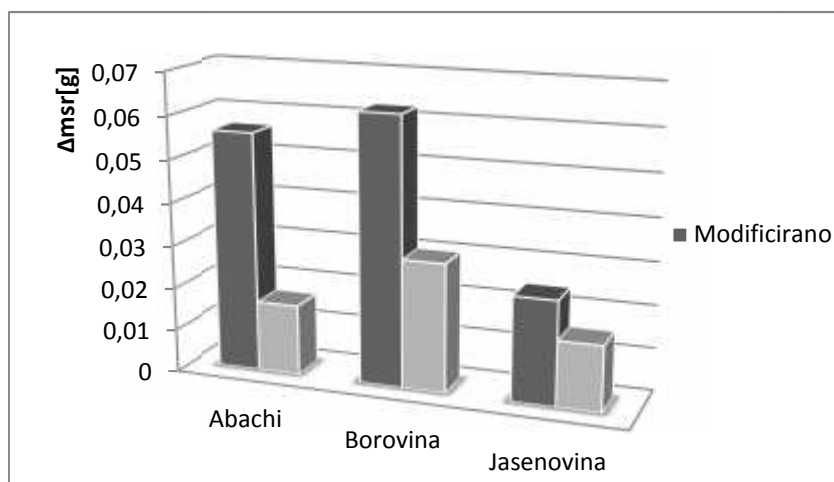
Nemodificirani uzorci	Abachi m [g]	Borovina m [g]	Jasenovina m [g]
Uzorak 1	0,0173	0,0307	0,0144
Uzorak 2	0,0148	0,0330	0,0174
Uzorak 3	0,0176	0,0263	0,0141
$m_{SR}$ [g]	0,0165	0,03	0,0153

Nakon vaganja uzorci od modificiranog drva (1,2 i 3) su se znatno više trošili. Uzorci od modificirane borovine (3) pokazali su najmanju otpornost na erozijsko trošenje (slika 40),



**Slika 40. Izgled uzoraka nakon ispitivanja na eroziju:**  
**a) jasenovina (1 i 6); b) abachi (2 i 5); c) borovina (3 i 4).**

dok su se uzorci od nemodificiranog drva abachi (5) i jasenovine (6) pokazali najveću otpornost na erozijsko trošenje. Zanimljivo je kako su se uzorci od modificirane jasenovine (1) u prosjeku znatno manje trošili. Na slici 41. može se vidjeti koju ulogu imaju godovi (tvr i dio drva) na utjecaj erozijskog trošenja. Što su godovi širi i veći i to se drvo manje troši. To je svakako rezultiralo i manji gubitak mase kod uzoraka od jasenovine u oba slučaja, što u konačnici pokazuje i vrijednosti trošenja uzoraka prikazane na slici 41.



**Slika 41. Raspored trošenja uzoraka na eroziju**

Uzmemo li u obzir da su se u sva tri ispitivanja (abrazija, erozija i tvrdoća) uzorci od modificirane borovine pokazali kao najmanje tvrdima i otpornima na trošenje (slika 42.), to svakako govori da se toplinskom obradom ovih uzoraka mehanička svojstva kod nekih vrsta materijala znatno smanjuju, kako je opisano i navedeno u literaturi.



**Slika 42. Izgled uzorka od modificirane borovine nakon erozijskog trošenja.**

## 6. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja, rezultati se značajno razlikuju u pojedinim segmentima. Najotporniji materijali u pogledu trošenja na abraziju pokazali su se uzorci od modificirane i nemodificirane jasenovine, dok su se uzorci od termotretirane borovine i drva abachi u prosjeku poprilično više trošili. Uzorci od borovine pokazali su najmanju otpornost trošenja na abraziju na što je svakako utjecala širina i broj godina (kasnog i ranog drva). Obzirom da su ispitivanja provedena bez zaštitnih premaza, rezultati su pokazali manju otpornost na abrazijsko trošenje od onih koji bi se dobili zaštitnim premazima, a koji se koriste u većini slučajeva.

Po pitanju tvrdoće kod nemodificiranih uzoraka, kao najtvrdiji uzorci pokazali su se uzorci od borovine i jasenovine, a najmanje tvrdima uzorci od drva abachi, kako se i očekivalo iz literature. Zanimljiv je podatak da su se modificirani uzorci od jasenovine i drva abachi pokazali poprilično jednako tvrdima u odnosu na nemodificirane uzorke od borovine. Međutim, uzorci od termotretirane borovine pokazali su se najmanje tvrdima. U konačnici rezultat jest da neke vrste termotretiranjem gube svoja mehanička svojstva, dok kod nekih vrsta termotretiranog drva, kao na primjeru jasenovine i drva abachi, tvrdoća ostaje ista ili se čak može i povećati.

Ispitivanjem uzoraka na eroziju kao i kod ispitivanja na abraziju modificirani uzorci pokazali su se znatno manje otpornima na trošenje u odnosu na nemodificirane uzorke. Međutim, na slici 40. vidljivo je da su se ispitivanjem na eroziju uzorci od nemodificirane borovine, jasenovine i abachi nešto više trošili u odnosu na prije provedena ispitivanja na abraziju (vidi sliku 25). Na to je vjerojatno utjecalo i vrijeme trajanja ispitivanja, što je rezultat i većeg broja rasipanja u vrijednostima.

Bitno je naglasiti da su svi ispitni uzorci ispitani u radijalnom presjeku kako bi se vrijednosti mogle točno usporediti. Prilikom ispitivanja uzoraka na tvrdoću, zbog ograničene debljine termotretiranih uzoraka, nije bilo moguće ispitati tvrdoću na preostala dva presjeka (poprečni i radijalni). Stoga su dobivene vrijednosti tvrdoće dane u tablicama 5. i 6. znatno manje, što je pokazatelj i slabijih mehaničkih svojstava u radijalnom presjeku u odnosu na vrijednosti opisane u literaturi.

Iako su dobivene vrijednosti nakon ispitivanja modificiranih uzoraka nešto slabija ili su kod nekih vrsta ostala čak i ista, postupci toplinske i kemijske modifikacije ipak služe prvenstveno

za produljenje vijeka trajanja drva izloženog atmosferskim uvjetima. Cilj modificiranja je da se skupe i rijetke egzotične vrste drva zamijene manje skupim vrstama, čime se smanjuje šteta u šumi i sva njihova dobra. Iako i ovi postupci modificiranja imaju neke nedostatke, cilj je svakako ublažiti ili u konačnici smanjiti propadanje drva. Kemijska i toplinska modifikacija već se komercijalno primjenjuju, dok su ostali postupci modifikacije drva još u fazi istraživanja. S obzirom da je nanotehnologija prevlada tek na početku razvoja, takvi primjeri pokazuju da su nanolakovi naša budućnost, te da će nanotehnologija imati važnu ulogu u povećanju trajnosti drvnih i ostalih proizvoda.

## 7. LITERATURA

- [1] [http://www.mf.unze.ba/materijali/GPM/Seminarski\\_Lucic.pdf](http://www.mf.unze.ba/materijali/GPM/Seminarski_Lucic.pdf) , 27.03.2015.
- [2] Richter, K., 2005: Neue Materialien und Beschichtungen für den Oberflächenschutz. Schweizer Holzbau, str:12-17. 29.03.2015.
- [3] <http://www.gradimo.hr/clanak/drvo-i-njegova-primjena/348>, 29.03.2015.
- [4] Osnove nauke o drvu, Šumarski fakultet sveu ilišta u Zagrebu, Katedra za tehnologiju drva, Zagreb 1985.
- [5] <http://www.ffri.uniri.hr/markodundjer/Materijali/09%20Prirodni%20i%20konstrukcijski%20materijali.pdf>, 05.04.2015.
- [6] <http://www.teknogi.it/Joomla/index.php/6-il-legno-agenti-di-degrado-e-cure>, 05.04.2015.
- [7] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>, 08.04.2015.
- [8] <http://www.ss-obrtnicka-pozega.skole.hr/documents/05%20-%20Tesarski%20radovi.pdf>, 12.04.2015.
- [9] [http://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1370701270-0-drvo\\_13.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1370701270-0-drvo_13.pdf), 17.04.2015.
- [10] Turkulin, H.; V.; Grbac, I., 1997: Površinska postojanost drvnih građevnih konstrukcija. Šumarski list 11-12; str: 617-629
- [11] Hasan, M.; Despot, R., 2003: Termini koji modificirano drvo – materijal današnjice. Les 55(10); str: 342-345.
- [12] <http://www.ekapija.com/website/sr/page/236449/Da-li-znate-%C5%A1ta-sve-mo%C5%BEe-da-trpi-termi%C4%8Dki-obra%C4%91eno-drvo->, 17.04.2015.
- [13] Rep, G.; Pohleven, F. 2001: Wood modification- a promising method for wood preservation. International Conference: Wood in construction industry:Tradition and future. Zagreb, Croatia, 25 April 2001: str: 27-38.
- [14] <http://www.woodworking2b.com/Product/20259.htm>, 23.04.2015.
- [15] <http://www.heatwood.se/en/thermowood/>, 23.04.2015.
- [16] <http://arborwoodco.com/#home>, 24.04.2015.
- [17] [http://www.evolen.hr/cro\\_thermal\\_wt.htm](http://www.evolen.hr/cro_thermal_wt.htm), 24.04.2015.
- [18] Patzelt, M.; Stingl, R.; Teischinger, A., 2002: Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluß auf ausgewählte Holzeigenschaften. In: Modified Wood. IHF & VHÖ. BOKU Wien



- [19] <http://www.popularwoodworking.com/projects/thermally-modified-wood>, 25.04.2015.
- [20] Sundquist, B., 2004: Colour changes and acid formation in wood during heating. Doctoral thesis. Divisions of Wood Material Science. Lulea University of technology, Skelleftea, Sweden.
- [21] [http://preradardrveta.sfb.bg.ac.rs/arhiva/2007/br%2020/pd20\\_04\\_gubitak\\_mase.pdf](http://preradardrveta.sfb.bg.ac.rs/arhiva/2007/br%2020/pd20_04_gubitak_mase.pdf)
- [22] Ayadi, N.; Lejeune, F.; Charrier, B.; Merlin, A., 2003: Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61; str: 221-226.
- [23] Jämsä, S., 2006: Influence of wood material and surface treatment on water absorption and cracking. In: Proceedings, Fifth international woodcoatings congress "Enhancing service life" Prague, October 17-18 2006. Paint Research Ass. Teddington, UK. Paper 3: str: 1-7.
- [24] Militz, H.; Tjeerdsma, B. 2001: Heat treatment of wood by the PLATO-process. Cost E22 – Environmental optimization of wood protection. Meeting proceedings: Review of heat treatments of wood. Antibes, France.
- [25] Sailer, M.; Rapp, A.O., 2000: Upgrading of wood by application of an oil-heat treatment. *Holz als Roh-und Werkstoff* 58 (1-2); str: 15-22
- [26] Homan, W.J.; Jorissen, A.J.M., 2004: Wood modification developments. *HERON* 49(4); str: 361-386.
- [27] <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/docs/tc-sessions/tc-65/md/presentations/17Militz.pdf>
- [28] Larsson Brellid, P.; Simonson, R.; Risman, P.O., 1999: Acetylation of solid wood using microwave heating. Part 1: *Holz als Roh-und Werkstoff* 57; str: 259-263.
- [29] Evans, P.D.; Wallis, A.F.A.; Owen, N.L., 2000: Weathering of chemically modified wood surfaces. Natural weathering of Scots pine acetylated to different weight gains. *Wood Sci Tech.* 34; str 151-165.
- [30] [https://www.youtube.com/watch?v=4pD\\_\\_UfuIDc](https://www.youtube.com/watch?v=4pD__UfuIDc), 15.05.2015.
- [31] <http://wall.hr/travel/morate-posjetiti-mojsijev-most-u-nizozemskoj/>, 28.05.2015.
- [32] Filetin, T., 2005: Primjena nanomaterijala u tehnici. *Suvremeni materijali i postupci*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2005, str. 226.
- [33] Rössler, A., 2005: Nanotechnologische Applicationen in der Farben-und Lackindustrie. Bachofner Consulting/SVC, CH-5502 Hunzenschwil
- [34] DRVNA INDUSTRIJA br:64 (3); str: 261-262, (2013)

- [35] <http://spa-studio.hr/saune-prodaja/cijene/nase-osnovno-nacelo-je-kvaliteta-bez-kompromisa>, 30.05.2015.
- [36] [http://fi107076470.fm.alibaba.com/product/127699775-103482845/Thermo\\_Abachi\\_Exterior\\_Claddings.html](http://fi107076470.fm.alibaba.com/product/127699775-103482845/Thermo_Abachi_Exterior_Claddings.html), 30.05.2015.
- [37] Osobni izvori i slike
- [38] <http://www.kolibica.com/svojstva-drvene-gradje/tehnice-osobine-belog-bora.html>, 26.06.2015.
- [39] <http://www.jaf-drveneterase.ba/masivno-drvo/termo-bor.html>, 26.06.2015.
- [40] <http://www.decking.hr/parket-od-jasena-karakteristike-savjeti/>, 27.06.2015.
- [41] <http://www.drvene-terase.hr/clanci-detalji/termo-jasen/8>, 29.06.2015.
- [42] [http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=38852](http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=38852), 03.01.2014.
- [43] Konstrukcije proizvoda od drva, Šumarski fakultet sveu ilišta u Zagrebu, Stjepan Tkalec-Silvana Prekrat, Zagreb 2000.
- [44] <http://www.gradjevinarstvo.rs/TekstDetaljiURL/Ispitivanje-tvrdo%C4%87e-drвета.aspx?ban=820&tekstid=1012>, 03.12.2013.
- [45] K. Šimunovi , K. Grilec, V. Ivuši , *Istraživanje otpornosti plinski naštrcanih NiCrBSi slojeva na erozijsko trošenje*, Technical Gazette, 14 (2007); str: 59-64.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc