

# Utjecaj sadržaja vode na ogrjevnu vrijednost drvene sirovine

---

Rustan, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*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:108:825179>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-13**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ**

**DRVNA TEHNOLOGIJA**

**FILIP RUSTAN**

**UTJECAJ SADRŽAJA VODE NA OGRJEVNU**  
**VRIJEDNOST DRVNE SIROVINE**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, 2022.**



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

**UTJECAJ SADRŽAJA VODE NA OGRJEVNU**  
**VRIJEDNOST DRVNE SIROVINE**

**ZAVRŠNI RAD**

Prediplomski studij:	Drvena tehnologija
Predmet:	Drvnoindustrijsko strojarstvo
Mentor:	doc. dr. sc. Branimir Šafran
Student:	Filip Rustan
JMBAG:	0036517283
Datum odobrenja teme:	30.03.2022.
Datum predaje rada:	14.09.2022.
Datum obrane rada:	23.09.2022.


**Zagreb, kolovoz, 2022.**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Utjecaj sadržaja vode na ogrjevnu vrijednost drvene sirovine
Autor:	Filip Rustan
Adresa autora:	Čučerska cesta 329, Zagreb
Mjesto izradbe:	Fakultet šumarstva i drvene tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Završni rad
Mentor:	doc. dr. sc. Branimir Šafran
Komentor:	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Izradu rada pomogao:	M. Sc. Marin Dujmović
Godina objave:	2022.
Opseg:	33 str., 34 slike, 25 tablica i 14 navoda literature
Ključne riječi:	Ogrjevna vrijednost, sadržaj vode, sadržaj pepela, energija
Sažetak:	<p>Zbog štetnog utjecaja fosilnih goriva teži se njihovoj zamjeni i primjeni prihvatljivih izvora energije. Drvena sirovina jedan je od obnovljivih i ekološki prihvatljivih izvora energije. No količina energije dobivena izgaranjem drva ovisi o njegovom sadržaju vode. Stoga su ciljevi ovog rada ispitati sadržaj vode hrasta, bukve, bagrema i jele nakon određenog vremena kondicioniranja, odrediti sadržaj pepela tim vrstama drva i ispitati ogrjevne vrijednosti pri različitim sadržajima vode. Za ispitivanja su korišteni usitnjeni uzorci koji su navlaživani određenim brojem sati u klimatskoj komori na 30 °C i relativnoj vlažnosti zraka 80 % od početnog apsolutno suhog stanja. Sadržaj vode određivan je gravimetrijskom metodom. Sadržaj pepela određivan je pomoću mufolne peći spaljivanjem uzoraka. Ogrjevna vrijednost određivana je pomoću kalorimetra. Za obradu podataka korišten je Microsoft Excel. Sadržaj vode svim vrstama drva intenzivno se povećava od apsolutno suhog stanja tijekom prvih 15 sati provedenih na zadanim uvjetima. Nakon 15 sati provedenih na zadanim uvjetima sadržaj vode blago raste ili varira kod svih vrsta. Stoga se može reći da su uzorci postigli vlagu ravnoteže. Postignuta vlaga ravnoteže odstupa od vlage ravnoteže određene putem dijagrama vlage ravnoteže za otprilike 3-4 % zbog higroskopske histereze. Bukva ima najveći udio pepela (0,55 %), zatim bagrem (0,42 %), jela (0,28 %), a hrast najmanje (0,25 %). Ogrjevna vrijednost je najveća za uzorke s najmanjim sadržajem vode, a povećanjem sadržaja vode ogrjevna vrijednost drva linearno se smanjuje za svaku vrstu drva. Vremenski gledano, ogrjevna vrijednost svih vrsta drva početnog apsolutno suhog stanja naglo pada u prvih 15 sati provedenih na 30 °C i 80 % relativne vlage zraka. Nakon 15 sati ogrjevna vrijednost varira oko jedne vrijednosti. Primijetna je veća ogrjevna vrijednost jele po jedinici mase što je razumljivo zbog većeg sadržaja lignina koji ima veću ogrjevnu vrijednost po jedinici mase.</p>

## BASIC DOCUMENTATION CARD

Title:	Influence of moisture content on the calorific value of wood raw material
Author:	Filip Rustan
Adress of Author:	Čučerska cesta 329, Zagreb
Thesis performed at:	Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb
Publication Type:	Undergraduate thesis
Supervisor:	doc. dr. sc. Branimir Šafran
Co-supervisor	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Preparation Assistant:	M. Sc. Marin Dujmović
Publication year:	2022.
Volume:	33 pages, 34 tables, 25 figures and 14 references
Key words:	Calorific value, moisture content, ash content, energy
Abstract:	<p>Due to the harmful impact of fossil fuels, efforts are being made to replace them and to use acceptable energy sources. Wood raw material is one of the renewable and environmentally friendly energy sources. However, the amount of energy obtained by burning wood depends on its moisture content. Therefore, the goals of this work are to examine the water content of oak, beech, acacia and fir after a certain time of wetting, to determine the ash content of these types of wood and to examine the calorific value at different moisture contents. Crushed samples were used for the tests, which were moistened for a certain number of hours in a climate chamber at 30 °C and relative humidity of 80 % from the initial absolutely dry state. The moisture content was determined by the gravimetric method. The ash content was determined using a muffle furnace by burning the samples. The calorific value was determined using a calorimeter. Microsoft Excel is used for data processing. The moisture content in all types of wood increases intensively from an absolutely dry state during the first 15 hours spent at the given conditions. After 15 hours spent in the given conditions, the moisture content increases slightly or varies, in all types of wood. Therefore, it can be said that the samples have reached equilibrium moisture. The achieved equilibrium moisture deviates from the equilibrium moisture determined via the moisture balance diagram by approximately 3-4 % due to hygroscopic hysteresis. Beech has the largest share of ash (0.55 %), followed by acacia (0.42 %), fir (0.28 %), and oak the least (0.25 %). The calorific value is the highest for samples with the lowest water content, and as the moisture content increases, the calorific value of wood decreases linearly for each type of wood. In terms of time, the calorific value of all types of wood with the initial absolutely dry state drops in the first 15 hours spent at 30 °C and 80 % relative humidity. After 15 hours, the calorific value varies around one value. The higher calorific value of fir per unit of mass is noticeable, which is understandable due to the higher content of lignin, which has a higher calorific value per unit of mass.</p>

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

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

Zagreb, 5.8.2022. godine

  
\_\_\_\_\_

*vlastoručni potpis*

Filip Rustan

**SADRŽAJ**

<b>TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA .....</b>	<b>I</b>
<b>BASIC DOCUMENTATION CARD .....</b>	<b>II</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>V</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>VI</b>
<b>PREDGOVOR.....</b>	<b>VII</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. CILJ ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>2</b>
<b>3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>3</b>
3.1 Sadržaj vode u drvu.....	3
3.2 Sadržaj pepela.....	4
3.3 Ogrjevna vrijednost.....	5
<b>4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>6</b>
4.1 Vrste drva korištene za istraživanje .....	6
4.1.1 Obična jela ( <i>Abies alba Mill.</i> ).....	6
4.1.2 Hrast lužnjak ( <i>Quercus robur L.</i> ).....	7
4.1.3 Obična bukva ( <i>Fagus sylvatica L.</i> ).....	8
4.1.4 Obični bagrem ( <i>Robinia pseudoacacia L.</i> ).....	9
4.2 Priprema uzoraka .....	10
4.3 Navlaživanje uzoraka u klima komori i uzorkovanje .....	11
4.4 Određivanje sadržaja vode .....	12
4.5 Određivanje sadržaja pepela .....	14
4.6 Određivanje gornje ogrjevne vrijednosti .....	16
4.7 Obrada podataka .....	18
<b>5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM .....</b>	<b>19</b>
5.1 Analiza sadržaja vode.....	19
5.2 Analiza sadržaja pepela.....	25
5.3 Analiza gornje ogrjevne vrijednosti .....	26
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>32</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>33</b>



## POPIS SLIKA

**Slika 1.** Dijagram vlage ravnoteže (Sinković, 2019., prema Keylwerth i Loughborough, 1931)

**Slika 2.** Sadržaj suhe drvne tvari (Horvat i Krpan, 1985., prema König i Becker)

**Slika 3.** Ogrjevne vrijednosti različitih vrsta drva (Horvat i Krpan, 1985)

**Slika 4.** Obična jela ([https://www.stolarija-grga.com/gradjevinska-stolarija/balkonska-vrata#prettyphoto\[d\]/4/](https://www.stolarija-grga.com/gradjevinska-stolarija/balkonska-vrata#prettyphoto[d]/4/), 12.8.2022.)

**Slika 5.** Hrast lužnjak

([https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrast\\_lu%C5%BEnjak#/media/Datoteka:Quercus\\_robur\\_MHNT.BOT.2010.6.75.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrast_lu%C5%BEnjak#/media/Datoteka:Quercus_robur_MHNT.BOT.2010.6.75.jpg), 13.8.2022.)

**Slika 6.** Obična bukva (<https://www.mmm-vukelic.hr/drvo/bukva/>, 13.8.2022.)

**Slika 7.** Obični bagrem

([https://hr.wikipedia.org/wiki/Obi%C4%8Dni\\_bagrem#/media/Datoteka:Black\\_Locust\\_Endgrain.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Obi%C4%8Dni_bagrem#/media/Datoteka:Black_Locust_Endgrain.jpg), 13.8.2022.)

**Slika 8.** Sječkalica RETSCH SM 400

**Slika 9.** Sušionik Sutjeska

**Slika 10.** Usitnjeni uzorci u plastičnim posudama s oznakama vrste drva

**Slika 11.** Premještanje usitnjenih uzoraka određenog sadržaja vode u bočice

**Slika 12.** Klima komora

**Slika 13.** Raspored uzorkovanja

**Slika 14.** Analitička vaga Sartorius Talent TE214S-OCE

**Slika 15.** Staklene posudice s uzorcima koji su spremi za sušenje

**Slika 16.** Sušionik Sutjeska s uzorcima u staklenim posudicama

**Slika 17.** Mufolna peć (Nabertherm L9/13/B180)

**Slika 18.** Stavljanje keramičkih posudica s uzorcima u mufolnu peć

**Slika 19.** Uzorci prije (lijevo) i nakon (desno) spaljivanja

**Slika 20.** Hidraulična preša s kalupom za izradu tableta (Augustinović, 2015)

**Slika 21.** Kalorimetar IKA C200

**Slika 22.** Kalorimetarska bomba (Šafran i dr., 2018)

**Slika 23.** Punilica

**Slika 24.** Rezultat mjerenja ogrjevne vrijednosti kalorimetrom

**Slika 25.** Sadržaj vode hrasta nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %

**Slika 26.** Sadržaj vode bukve nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %

**Slika 27.** Sadržaj vode bagrema nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %

**Slika 28.** Sadržaj vode jele nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %

**Slika 29.** Sadržaj pepela po vrsti drva

**Slika 30.** Gornja ogrjevna vrijednost hrasta pri određenom sadržaju vode

**Slika 31.** Gornja ogrjevna vrijednost bukve pri određenom sadržaju vode

**Slika 32.** Gornja ogrjevna vrijednost bagrema pri određenom sadržaju vode

**Slika 33.** Gornja ogrjevna vrijednost jele pri određenom sadržaju vode

**Slika 34.** Gornja ogrjevna vrijednost pri određenom sadržaju vode za 4 vrste drva

## POPIS TABLICA

**Tablica 1.** Fizička i mehanička svojstva obične jele (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

**Tablica 2.** Fizička i mehanička svojstva hrasta lužnjaka (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

**Tablica 3.** Fizička i mehanička svojstva obične bukve (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

**Tablica 4.** Fizička i mehanička svojstva običnog bagrema (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

**Tablica 5.** Sadržaj vode uzoraka koji su uzorkovani nakon sušenja do apsolutno suhog stanja

**Tablica 6.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80% bili **1 sat**

**Tablica 7.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **3 sata**

**Tablica 8.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **7 sati**

**Tablica 9.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **15 sati**

**Tablica 10.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **31 sat**

**Tablica 11.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **47 sati**

**Tablica 12.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **63 sata**

**Tablica 13.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **87 sati**

**Tablica 14.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili **111 sati**

**Tablica 15.** Sadržaj pepela u uzorcima svih vrsta drva

**Tablica 16.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji su uzorkovani nakon sušenja do apsolutno suhog stanja, sa sadržajem vode približno 0 % (prikazan u tablici)

**Tablica 17.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **1 sat**

**Tablica 18.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **3 sata**

**Tablica 19.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **7 sati**

**Tablica 20.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **15 sati**

**Tablica 21.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80% u vremenu od **31 sata**

**Tablica 22.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **47 sati**

**Tablica 23.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **63 sata**

**Tablica 24.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **87 sati**

**Tablica 25.** Ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **111 sati**

## **PREDGOVOR**

Zahvaljujem se mentoru doc. Branimiru Šafranu koji mi je omogućio provedbu ovog završnog rada, a posebno asistentu na projektu Marinu Dujmoviću koji mi je pomagao i vodio me kroz sav posao koji je trebalo napraviti za istraživanja.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i sestri, Branku, Božici i Mariji, na potpori i razumijevanju.

## 1. UVOD

Jedan od glavnih svjetskih problema je korištenje fosilnih goriva. Ta goriva neobnovljiv su izvor energije, imaju štetan utjecaj na okoliš i jedan su od najvećih uzročnika klimatskih promjena. Stoga već duže vrijeme postoji težnja za što većom primjenom obnovljivih i ekološki prihvatljivih izvora energije. U obnovljive izvore energije spadaju Sunce, voda, vjetar i biomasa. U biomasu spadaju razne sirovine biljnog i životinjskog porijekla, a jedna od najznačajnijih je drvena sirovina. Potrošnja energije dobivene iz biomase u Hrvatskoj je oko 14 % ukupne potrošnje energije, a proizvodnja energije iz biomase čini oko 30 % ukupne proizvodnje (Energija u Hrvatskoj 2020, Energetski institut Hrvoje Požar). S obzirom da je Hrvatska bogata šumama koje prekrivaju 49,3 % teritorija, vidi se potencijal za povećanje potrošnje i proizvodnje energije dobivene iz biomase (Šume u Hrvatskoj, Hrvatske Šume). Energija, tj. količina topline dobivena izgaranjem određene mase ili volumena drva određuje se kao ogrjevna, tj. kalorijska vrijednost drva. Pri gorenju drva određenog sadržaja vode dio energije dobiven izgaranjem troši se na zagrijavanje i isparavanje vode iz drva. Takav utrošak energije drva nije poželjan. Stoga nam je bitan sadržaj vode drva kojeg koristimo za ogrjev jer o tome ovisi iskorištenje toplinske energije.

U ovom završnom radu određivat će se sadržaj vode 4 vrste drva nakon navlaživanja od početnog apsolutno suhog stanja, pratit će se dinamika navlaživanja i analizirat će se utjecaj postignutih sadržaja vode na ogrjevnu vrijednost drva. Osim toga, analizirat će se i udjeli pepela za sve 4 vrste drva.

## 2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog rada je odrediti dinamiku vodoupojnosti, sadržaj pepela te ovisnost ogrjevne vrijednosti o sadržaju vode za 4 vrste drva. Prvo, odredit će se sadržaji vode hrasta, bukve, bagrema i jele nakon 1, 3, 7, 15, 31, 47, 63, 87 i 111 sati provedenih u klima komori na 30 °C i 80 % relativne vlage zraka. Uzorci će biti početnog apsolutno suhog stanja. Pomoću toga utvrdit će se dinamika promjene sadržaja vode, tj. vodoupojnost tijekom vremena provedenog na zadanim uvjetima. Druga stvar koja će se utvrditi je sadržaj pepela sve 4 vrste drva. Treća stvar koja će se odrediti je ogrjevna vrijednost uzoraka čiji će se sadržaji vode prethodno odrediti. Pomoću toga utvrdit će se kako se mijenja ogrjevna vrijednost hrasta, bukve, bagrema i jele s promjenom sadržaja vode.

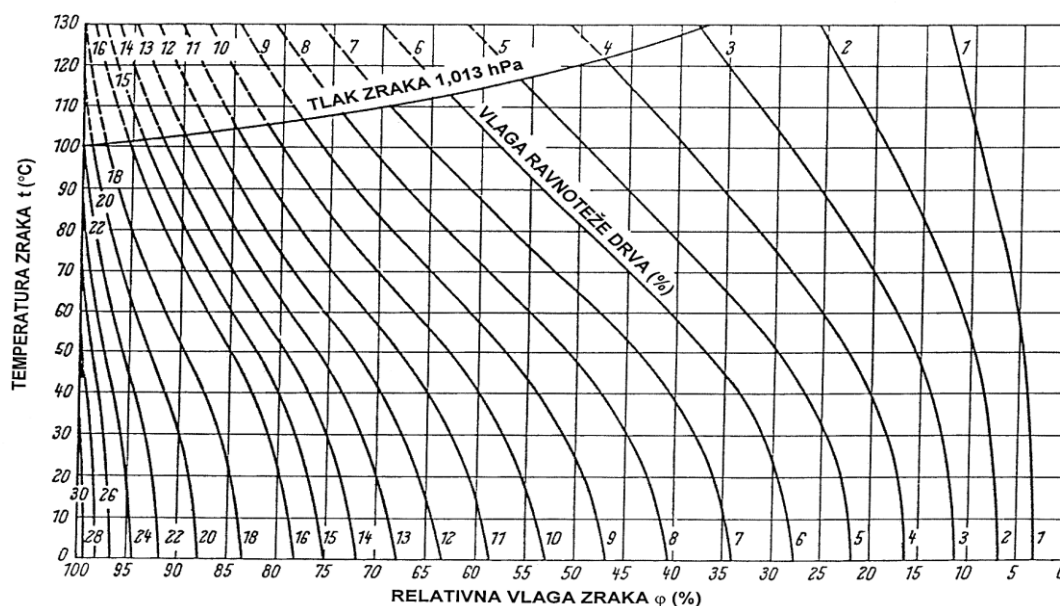
### 3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

#### 3.1 Sadržaj vode u drvu

„Sadržaj vode u drvu je količina vode koja se nalazi u drvu“ (Struna, Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje). Voda u drvu može biti slobodna ili vezana. Slobodna voda nalazi se u porama stanica i nije vezana uz staničnu stijenkku. Vezana voda je voda koja se nalazi u staničnoj stijenci. Kada stanične stijenske sadržavaju najveću količinu vezane vode i kada nema slobodne vode u drvu tada je postignuta točka zasićenja vlakanca. S promjenom sadržaja vode drva ispod točke zasićenja vlakanca mijenjaju se dimenzije i masa drva, a iznad točke zasićenja vlakanca mijenja se samo masa drva.

Drvo ima svojstvo higroskopnosti. „Higroskopnost drva je svojstvo drva da na sebe prima i od sebe otpušta vlagu iz okoline u skladu s mikroklimatskim uvjetima“ (Struna, Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje). Kada drvo upija vodu govori se o adsorpciji, a kada otpušta vodu govori se o desorpciji. Kada se drvo jednom posuši do apsolutno suhog stanja i zatim krene upijati vodu, pri istoj relativnoj vlazi zraka imat će 1-4 % niži sadržaj vode pri adsorpciji nego pri desorpciji. Ta pojava naziva se higroskopna histereza.

Pri konstantnim mikroklimatskim uvjetima drvo nastoji postići vlagu ravnoteže. Vлага ravnoteže je sadržaj vode pri kojem drvo ne prima niti otpušta vodu iz okolnog zraka. Ako znamo kolika je temperatura i relativna vlaga zraka nekog prostora tada se pomoću dijagrama vlage ravnoteže (Slika 1.) može odrediti kolika je vлага ravnoteže u tim uvjetima. Vлага ravnoteže varira u Hrvatskoj od otprilike 9 % sadržaja vode drva do točke zasićenosti vlakancaca 24-32 % (Krpan, 1953).



Slika 1. Dijagram vlage ravnoteže (Sinković, 2019., prema Keylwerth i Loughborough, 1931)

### 3.2 Sadržaj pepela

„Sadržaj pepela je maseni udio anorganskoga ostatka koji ostaje nakon izgaranja čvrstog biogoriva u kontroliranim uvjetima“ (Struna, Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje). Sadržaj pepela komercijalnih vrsta listača i četinjača ima prosječne vrijednosti općenito u granicama između 0,3 i 1,5 % suhe tvari drva. Pepeo sadrži najviše kalcija kojeg ima 50-70 % u ukupnoj masi pepela u obliku CaO, zatim kalija kojeg ima 10-30 % u obliku K<sub>2</sub>O, magnezija ima 5-10 % i aluminijska, željeza i natrija ima 1-2 %. (Antonović, 2019., prema Sertić, 2000). Pepeo zbog svog sastava ima mogućnost za primjenom u poljoprivredi kao poboljšivač tla i u građevinskoj industriji kao dodatak u proizvodnji cementa ili betona ili kao alternativna sirovina za proizvodnju klinkera (Carević, 2018). Sadržaj pepela različitih vrsta drva prikazan je u tablici (Slika 2.) zajedno sa sadržajem suhe tvari ostalih sastavnih grupa drva.

Vrsta drveta	Sadržaj suhe drvene tvari u %						Celuloza (iz razlike)
	Proteini (N × 6,25)	Smole (alkohol + benzol ekstrakt)	Pepeo	Hemiceluloze		Lignin	
				pentozani	heksozani		
jelovina	1,21	1,71	0,42	11,63	13,00	27,98	44,06
borovina	1,27	3,17	0,53	10,80	12,78	29,52	41,93
brezovina	1,29	2,47	0,68	25,86	4,61	28,27	41,85
topolovina	1,39	2,66	0,84	22,71	2,60	22,45	47,33
bukovina	1,58	0,70	0,96	24,30	4,36	22,69	45,41
jasenovina	1,30	2,24	0,83	23,68	5,70	26,01	40,24
vrbovina	1,17	2,04	0,83	23,31	5,05	24,70	42,91
johovina	1,89	2,83	0,49	22,94	3,65	24,57	43,64

Slika 2. Sadržaj suhe drvene tvari (Horvat i Krpan, 1985., prema Konig i Becker)

### 3.3 Ogrjevna vrijednost

Ogrjevna, tj. kalorijska vrijednost drva je količina topline koja se dobije izgaranjem neke jedinice mase ili volumena neke vrste drva. Postoje gornja i donja ogrjevna vrijednost. Donja ogrjevna vrijednost dobije se kada se od gornje ogrjevne vrijednosti oduzme toplina potrošena za isparavanje vode iz drva (Horvat i Krpan, 1985). Energija koja se troši za isparavanje vode je otprilike 0,68 kWh/kg vode (Energetska vrijednost drveta, Piljak pelet). Ogrjevna vrijednost ovisi o sadržaju vode, masi, zdravosti i kemizmu drva. Ogrjevna vrijednost je veća za drvo veće gustoće, kada se izražava po jedinici volumena za isti sadržaj vode. Lignin ima veću ogrjevnu vrijednost od celuloze. Lignin daje 25,12 MJ/kg, a celuloza 17,38 MJ/kg. Ogrjevna vrijednost je veća ako je prisutna smola u drvu. Drvo četinjača ima veći udio lignina nego listače i sadrže smole pa imaju veću ogrjevnu vrijednost po jedinici mase. No listače su cijenjenije za ogrjev zbog toga što se drvo prodaje po prostornom metru, a ne po masi. Stoga listače zbog značajno veće mase pri istom volumenu, tj. zbog veće gustoće imaju veću ogrjevnu vrijednost po jedinici volumena. Sa većim sadržajem vode manja je ogrjevna vrijednost, a za svakih 10 % sadržaja vode smanjuje se ogrjevna vrijednost za 12 % (Horvat i Krpan, 1985). Ogrjevne vrijednosti različitih vrsta drva prikazane su u tablici (Slika 3.) po jedinici mase (kg) za apsolutno suho drvo ( $H_{0\%}$ ) i prosušeno drvo ( $H_{15\%}$ ), a po metru kubnom ( $m^3$ ) i prostornom metru (pm) za prosušeno drvo ( $H_{15\%}$ ).

Vrsta drveta	Ogrjevna snaga drva		Volumna masa pros. drva ( $H_{15}$ ) kg $m^3$	Ogrjevna snaga							
	stand. suhog prosušenog			po $m^3$		po pm					
	$H_0$ , MJ kg	$H_{15}$ , MJ kg		GJ $m^3$		GJ pm					
Grab	17,01	13,31	540	830	860	7,187	11,047	11,447	5,031	7,733	8,013
Bukva	18,82	14,84	540	720	910	8,014	10,685	13,504	5,610	7,479	9,453
Hrast	18,38	14,44	430	690	960	6,209	9,964	13,862	4,346	6,975	9,507
Jasen	17,81	13,98	450	690	860	6,291	9,646	12,023	4,404	6,752	8,416
Brijest	—	14,70	480	680	860	7,056	9,996	12,642	4,939	6,997	8,849
Javor	17,51	13,73	530	630	790	7,277	8,650	10,847	5,094	6,055	7,593
Bagrem	18,95	14,97	580	770	900	8,683	11,527	13,473	6,078	8,069	9,431
Breza	19,49	15,43	510	650	830	7,869	10,029	12,807	5,508	7,020	8,965
Kesten, pitomi	—	13,29	—	570	—	—	7,575	—	—	5,302	—
Vrba, bijela	17,85	13,65	360	560	630	4,914	7,644	8,599	3,440	5,351	6,019
Vrba, siva	17,54	13,73	360	560	630	4,943	7,689	8,650	3,460	5,382	6,055
Joha, crna	18,07	14,21	490	550	640	6,963	7,815	9,094	4,874	5,470	6,366
Joha, bijela	17,26	13,52	490	550	640	6,625	7,436	8,653	4,637	5,205	6,057
Topola, crna	17,26	13,52	410	450	560	5,543	6,084	7,571	3,880	4,259	5,300
Drvo listača (prosjeck)	17,99	14,10	—	—	—	4,914	8,985	13,852	3,440	6,289	9,507
Smreka	19,66	15,60	330	470	680	5,148	7,332	10,608	3,604	5,132	7,426
Jela	19,49	15,45	350	450	750	5,407	6,952	11,587	3,784	4,866	8,111
Bor obični	21,21	16,96	330	520	890	5,597	8,819	15,094	3,918	6,173	10,566
Ariš	16,98	14,86	440	590	850	6,538	8,767	12,631	4,577	6,137	8,842
Duglazija	19,18	15,20	—	530	—	—	8,056	—	—	5,639	—
Borovac	20,41	16,24	340	400	510	5,522	6,496	8,282	3,865	4,547	5,792
Drvo četinjača (prosjeck)	19,49	15,70	—	—	—	5,148	7,737	15,094	3,604	5,416	10,566

Slika 3. Ogrjevne vrijednosti različitih vrsta drva (Horvat i Krpan, 1985)



## 4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

### 4.1 Vrste drva korištene za istraživanje

Za istraživanje smo koristili četiri vrste drva od kojih su tri listače i jedna četinjača. Korišteni uzorci su:

- Četinjače: - obična jela (*Abies alba Mill.*)
- Listače: - hrast lužnjak (*Quercus robur L.*)
  - obična bukva (*Fagus sylvatica L.*)
  - obični bagrem (*Robinia pseudoacacia L.*)

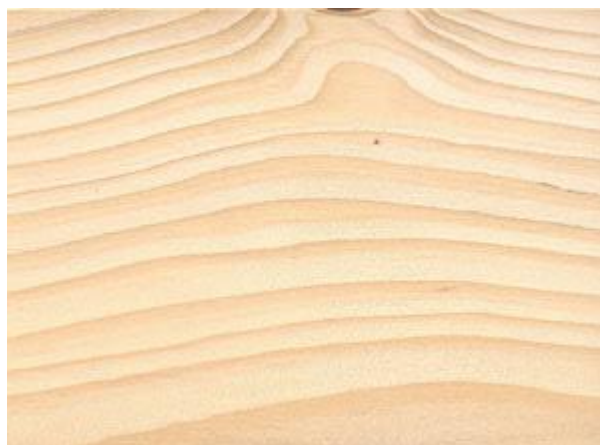
#### 4.1.1 Obična jela (*Abies alba Mill.*)

Stablo obične jele dolazi iz porodice Pinaceae. Trgovački naziv drva obične jele (Slika 4. i Tablica 1.) je obična jelovina, a također se može naći pod nazivima: Edeltanne, Silbertanne, Weistanne (Njemačka), silver fir, european silver fir, common silver fir (Velika Britanija, SAD), sapin pectiné, sapin des Vosges (Francuska), avellino, abete bianco, avezzo (Italija) (Jirouš-Rajković i Šefc 2019).

Rasprostire se u zapadnoj, srednjoj i južnoj Europi. Planinsko je drvo i najbolje se razvija na nadmorskim visinama od 1000 do 1600 metara (Jirouš-Rajković i Šefc 2019). Stablo je visoko do 40 metara. Krošnja je u mladosti čunjasta, a kasnije valjkasta. Grane su horizontalno otklonjene, a grančice ne vise (Horvat i Krpan, 1967). Autohtona je vrsta u Hrvatskoj. Peta je najzastupljenija vrsta u Hrvatskoj i čini 7,9 % drvnih zaliha u Republici Hrvatskoj (Šume u Hrvatskoj, Hrvatske Šume).

**Tablica 1.** Fizička i mehanička svojstva drva obične jele (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

Gustoća apsolutno suhog drva, $\rho_0$	320...410...710 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća prosušenog drva, $\rho_{12-15}$	350...450...750 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća sirovog drva, $\rho_s$	800...900...1000 kg/m <sup>3</sup>
Poroznost	oko 73 %
Radijalno utezanje, $\beta_r$	oko 3,8 %
Tangentno utezanje, $\beta_t$	oko 7,6 %
Volumno utezanje, $\beta_v$	11,5 %
Čvrstoća na tlak	31...47...59 MPa
Čvrstoća na vlak, paralelno s vlakancima	48...84...120 MPa
Čvrstoća na savijanje	47...73...118 MPa
Čvrstoća na smik	3,7...5,0...6,3 MPa
Tvrdoća po Brinellu, paralelno s vlakancima	18...30...57 MPa
Tvrdoća po Brinellu, okomito na vlakanca	13... 16 MPa
Modul elastičnosti	6,6...11,0...17,2 GPa



**Slika 4.** Drvo obične jele ([https://www.stolarija-grga.com/gradjevinska-stolarija/balkonska-vrata#prettyphoto\[d\]/4/](https://www.stolarija-grga.com/gradjevinska-stolarija/balkonska-vrata#prettyphoto[d]/4/), 12.8.2022.)

### 4.1.2 Hrast lužnjak (*Quercus robur* L.)

Stablo hrasta lužnjaka pripada porodici *Fagaceae*. Trgovački naziv drva hrasta lužnjaka (Slika 5. i Tablica 2.) je hrastovina lužnjaka, a ostali nazivi su: Früheiche, Stieleiche, Sommereiche (Njemačka), pedunculate oak, European oak (Velika Britanija, SAD), quercia gentile, Farnia (Italija), Chêne pédonculé (Francuska) (Jirouš-Rajković i Šefc 2019).

Rasprostire se po nizinskim šumama gotovo cijele Europe, sjeverne Afrike i zapadne Azije. Listopadno je drvo, visoko i preko 40 metara sa srednjim promjerom debla do 1 metar (Jirouš-Rajković i Šefc 2019). Druga je najzastupljenija vrsta drva u Hrvatskoj sa 11,6 % drvnih zaliha u šumama Republike Hrvatske (Šume u Hrvatskoj, Hrvatske Šume).



**Slika 5.** Drvo hrasta lužnjaka  
([https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrast\\_lu%C5%BEnjak#/media/Datoteka:Quercus\\_robur\\_MHNT.BOT.2010.6.75.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrast_lu%C5%BEnjak#/media/Datoteka:Quercus_robur_MHNT.BOT.2010.6.75.jpg), 13.8.2022.)

**Tablica 2.** Fizička i mehanička svojstva drva hrasta lužnjaka (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

Gustoća apsolutno suhog drva ( $\rho_o$ )	390...650...930 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća prosušenog drva ( $\rho_{12-15}$ )	430...690...960 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća sirovog drva ( $\rho_s$ )	650...1000...1160 kg/m <sup>3</sup>
Udio pora	oko 57 %
Longitudinalno utezanje ( $\beta_l$ )	oko 0,4 %
radijalno ( $\beta_r$ )	4 do 4,6 %
tangentno ( $\beta_t$ )	7,8 do 10 %
volumno ( $\beta_v$ )	12,5 do 15 %
Čvrstoća na tlak	54...61...67 MPa
Čvrstoća na vlak, paralelno s vlakancima	50...90...180 MPa
Čvrstoća na vlak, okomito na vlakanca	2,6...4...9,6 MPa
Čvrstoća na savijanje	74...88...105 MPa
Dinamička čvrstoća savijanja	0,01...0,06...0,16 J/mm <sup>2</sup>
Čvrstoća na smik	6...11...13 MPa
Tvrdoća po Janki, paralelno s vlakancima	66 MPa
Tvrdoća po Janki, okomito na vlakanca	56 MPa
Modul elastičnosti	10...11,7...13,2 GPa

### 4.1.3 Obična bukva (*Fagus sylvatica* L.)

Stablo obične bukve pripada porodici *Fagaceae*. Trgovački naziv drva obične bukve (Slika 6. i Tablica 3.) je obična bukovina, a ostali nazivi su: Gemeine Buche, Buche (Njemačka), beech (Velika Britanija, SAD), hêtre (Francuska), faggio (Italija) (Jirouš-Rajković i Šefc 2019).

Rasprostranjena je po Europi na nadmorskim visinama od razine mora do 2250 metara nadmorske visine. Listopadno je drvo visoko do 40 metara (Horvat i Krpan, 1967). Autohtona je vrsta u Hrvatskoj. Najzastupljenija je vrsta drva u šumama Hrvatske sa 37,2 % drvnih zaliha (Šume u Hrvatskoj, Hrvatske Šume).



**Slika 6.** Drvo obične bukve (<https://www.mmm-vukelic.hr/drvo/bukva/>, 13.8.2022.)

**Tablica 3.** Fizička i mehanička svojstva drva obične bukve (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

Gustoća apsolutno suhog drva ( $\rho_o$ )	490...680...880 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća prosušenog drva ( $\rho_{12-15}$ )	540...720...910 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća sirovog drva ( $\rho_s$ )	820...1070...1270 kg/m <sup>3</sup>
Udio pora	oko 55 %
radijalno ( $\beta_r$ )	oko 5,8 %
tangentno ( $\beta_t$ )	oko 11,8 %
volumno ( $\beta_v$ )	14,0...17,9...21,0 %
Čvrstoća na tlak	41...62...99 MPa
Čvrstoća na vlak, paralelno s vlakancima	57...135...180 MPa
Čvrstoća na savijanje	74...123...21 MPa
Čvrstoća na smik	8...9,5 MPa
Tvrdoća po Janki, paralelno s vlakancima	oko 83 MPa
Tvrdoća po Janki, okomito na vlakanca	oko 65MPa
Modul elastičnosti	100..160...180 GPa

### 4.1.4 Obični bagrem (*Robinia pseudoacacia* L.)

Stablo običnog bagrema pripada porodici *Leguminosae*. Trgovački naziv drva običnog bagrema (Slika 7. i Tablica 4.) je obična bagremovina, a često se kolokvijalno naziva akacija ili agacija. Također se nalazi pod nazivima: falsche Akazie, gemeine Robinie (Njemačka), false acacia, robinia (Velika Britanija), common robinia, black locust, yellow locust (SAD), falsa acacia, robinia (Italija), faux-acacia, robinier (Francuska) (Jirouš-Rajković i Šefc 2019).

Bagrem je porijeklom iz Sjeverne Amerike, no rasprostranjen je po cijelom svijetu. U Europu je stigao u 17. stoljeću. Listopadno je drvo koje može narasti do 30 metara visine (Jirouš-Rajković i Šefc 2019).



**Slika 7.** Drvo običnog bagrema

([https://hr.wikipedia.org/wiki/Obi%C4%8Dni\\_bagrem#/media/Datoteka:Black\\_Locust\\_Endgrain.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Obi%C4%8Dni_bagrem#/media/Datoteka:Black_Locust_Endgrain.jpg), 13.8.2022.)

**Tablica 4.** Fizička i mehanička svojstva drva običnog bagrema (Jirouš-Rajković i Šefc 2019)

Gustoća apsolutno suhog drva, $\rho_0$	540...740...870 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća prosušenog drva, $\rho_{12-15}$	580...770...900 kg/m <sup>3</sup>
Gustoća sirovog drva, $\rho_s$	800...900...950 kg/m <sup>3</sup>
Poroznost	oko 52 %
Radijalno utezanje, $\beta_r$	oko 4,4 %
Tangentno utezanje, $\beta_t$	oko 6,9 %
Volumno utezanje, $\beta_v$	oko 11,4 %
Čvrstoća na tlak	62...72...81 MPa
Čvrstoća na vlak, paralelno s vlakancima	88...136...184 MPa
Čvrstoća na savijanje	103...136...169 MPa
Čvrstoća na smik	11...12,8...14,6 MPa
paralelno s vlakancima	67...78...88 MPa
Tvrdoća po Brinellu, okomito na vlakanca	28...34...47 MPa
Modul elastičnosti	9...11,3...13,5 GPa

### 4.2 Priprema uzoraka

Osnovna sirovina je drvena građa (hrast, bukva, bagrem i jela) koja je dlijetom i čekićem usitnjena na kockice približnih dimenzija 2x2x2 cm. Kockice su zatim usitnjene na sječkalici RETSCH SM 400 (Slika 8.) u dva prolaza. Prvi prolaz kroz sito otvora 8 mm i drugi prolaz kroz sito otvora 2 mm. Usitnjeni uzorci stavljeni su u sušionik (Slika 9.) na  $103 \pm 2$  °C i posušeni do apsolutno suhog stanja.



**Slika 8.** Sječkalica RETSCH SM 400



**Slika 9.** Sušionik Sutjeska



### 4.3 Navlaživanje uzoraka u klima komori i uzorkovanje

Dio usitnjenih uzoraka svake vrste drva (Slika 10.) koji su posušeni do apsolutno suhog stanja prebačen je u bočice (Slika 11.). Uzorci su prebačeni tako da je za svaku vrstu drva napunjena jedna bočica s 10 grama uzorka. Tim uzorcima određivat će se sadržaj vode, ogrjevna vrijednost i udio pepela. Bočice se zatim stavljaju u hladnjak na stabilizaciju.



**Slika 10.** Usitnjeni uzorci u plastičnim posudama s oznakama vrste drva



**Slika 11.** Premještanje usitnjenih uzoraka određenog sadržaja vode u bočice

Ostatak usitnjenog i apsolutno suhog uzorka koji se nalazi u plastičnim posudama s oznakama (Slika 10.) stavlja se u klima komoru (Slika 12.). U svakoj plastičnoj posudi nalazi se 200 g uzorka. Uvjeti u klima komori postavljeni su na temperaturu od 30 °C i relativnu vlagu zraka od 80 %. Uzorci su vađeni iz klima komore nakon određenog vremena prema rasporedu (Slika 13.) i uzorkovani. Raspored vađenja uzoraka je takav da su uzorci vađeni i uzorkovani nakon 1, 3, 7, 15, 31, 47, 63, 87 i 111 sati provedenih u klima komori. Uzorkovanje je provedeno tako da je iz svake posude, tj. od svake vrste drva uzeto 10 grama i prebačeno u bočicu s oznakom (Slika 11.). Prije prebacivanja svaki uzorak se promiješao sa žlicom. Tako su prilikom svakog vađenja uzoraka iz klima komore napunjene 4 bočice. Bočice se zatim stavljaju u hladnjak radi stabilizacije, kako bi uzorci u bočicama zadržali trenutne parametre (u prvom redu sadržaj vode), a posude s uzorkom vraćaju se u klima komoru. Vađenjem uzoraka iz

## 4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

klima komore i uzorkovanjem dobiveno je 36 bočica sa uzorcima što s 4 bočice prethodno uzorkovanog apsolutno suhog uzorka čini ukupno 40 bočica s uzorcima spremnih za daljnje istraživanje.



**Slika 12.** Klima komora

	vrijeme	$\Delta h$	kumulativno vrijeme
ponedjeljak (9.5.)	start: 08.00	0	0
	9,00	1	1
	11,00	2	3
	15,00	4	7
	23,00	8	15
utorak (10.5.)			
	15,00	16	31
srijeda (11.5.)	7,00	16	47
	23,00	16	63
četvrtak (12.5.)			
	23,00	24	87
petak (13.5.)			
	23,00	24	111

**Slika 13.** Raspored uzorkovanja

### 4.4 Određivanje sadržaja vode

Sadržaj vode uzorka određivan je gravimetrijski prema normi HRN EN ISO 18134-1:2015. Za svaku bočicu s uzorkom pripremljene su 3 staklene posudice (vagalice). Svaka staklena posudica izvagana je na analitičkoj vagi (Sartorius Talent TE214S-OCE) (Slika 14.) s točnošću od 0,1 mg i dobivena masa predstavlja masu prazne posudice ( $m_1$ ). U svaku od tri staklene posudice koje su prethodno tarirane na vagi stavljeno je po otprilike 1 g uzorka iz iste bočice s točnošću od 0,1 g. Izvagana

#### 4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

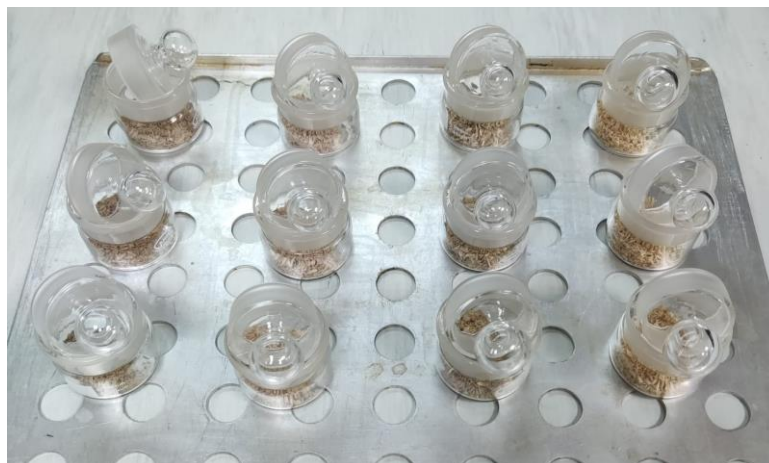
---

masa zapisana je s točnosti od 0,1 mg i predstavlja masu uzorka ( $m_u$ ). Zbrajanjem mase prazne posudice ( $m_1$ ) i mase uzorka ( $m_u$ ) dobije se masa posudice i uzorka prije sušenja ( $m_2$ ).



**Slika 14.** Analitička vaga Sartorius Talent TE214S-OCE

Posudice (Slika 15.) su zatim stavljene u sušionik Sutjeska (Slika 16.) na temperaturu od  $103 \pm 2$  °C. Postupak sušenja traje minimalno 3 sata kako bi sva voda mogla ispariti iz uzorka, no nikada više od 24 sata radi sprečavanja gubitka hlapljivih tvari drva. Tijekom sušenja u sušioniku staklene posudice imaju otklopljen poklopac kako bi voda mogla slobodno ispariti izvan posudice.



**Slika 15.** Staklene posudice s uzorcima koji su spremi za sušenje





**Slika 16.** Sušionik Sutjeska s uzorcima u staklenim posudicama

Nakon sušenja staklene posudice su poklopljene poklopcem radi sprečavanja navlaživanja uzorka i stavljene u eksikator da se ohlade na sobnu temperaturu. Nakon hlađenja posudice s uzorkom su izvagane na analitičkoj vagi i dobivena masa predstavlja masu posudice s uzorkom nakon sušenja ( $m_3$ ). Sadržaj vode uzorka računa se prema formuli (1):

$$W(\%) = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (1)$$

W – sadržaj vode uzorka (%)

$m_1$  – masa prazne posudice (g)

$m_2$  – masa posudice i uzorka prije sušenja (g)

$m_3$  – masa posudice i uzorka nakon sušenja (g)

S obzirom da su za svaku bočicu ispitivana po tri uzorka, konačni sadržaj vode uzorka iz bočice dobiven je računanjem srednje vrijednosti.

#### 4.5 Određivanje sadržaja pepela

Sadržaj pepela određivan je prema normi HRN EN ISO 18122-2015 pomoću mufolne peći (Nabertherm L9/13/B180) (Slika 17.). Za ispitivanje su izabrani uzorci iz bočica uzorkovanih odmah nakon sušenja do apsolutno suhog stanja. S obzirom da se udio pepela ne mijenja s promjenom sadržaja vode drva moguće je bilo uzeti uzorke s bilo kojim sadržajem vode, no bitno je znati točan sadržaj vode ispitanih uzoraka. Za svaku vrstu drva pripremljene su po 3 keramičke posudice. Posudice su izvagane na analitičkoj vagi s točnošću 0,1 mg, a zatim je svaka napunjena s 1 g uzorka (Slika 19. lijevo) i stavljena u peć (Slika 18.). Peć je kroz 30 minuta jednoliko povećavala temperaturu do 250 °C. Ta temperatura je zadržana sljedećih 60 minuta kako bi hlapive

#### 4. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

komponente mogle izaći iz uzorka prije zapaljenja. Zatim je u sljedećih 30 minuta temperatura jednoliko povećavana do  $550 \pm 10$  °C i ta temperatura je zadržana sljedećih 120 minuta.



**Slika 17.** Mufolna peć (Nabertherm L9/13/B180)



**Slika 18.** Stavljanje keramičkih posudica s uzorcima u mufolnu peć



**Slika 19.** Uzorci prije (lijevo) i nakon (desno) spaljivanja

Nakon toga uzorci su izvađeni iz peći (Slika 19. desno) i ostavljeni na otvorenom 5 minuta da se ohlade, a zatim su stavljeni u eksikator za daljnje hlađenje do sobne temperature. Ohlađeni uzorci važu se na analitičkoj vagi s točnošću od 0,1 mg. Sadržaja pepela određuje se pomoću formule (2):

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (2)$$

$A_d$  – sadržaj pepela (%)

$m_1$  – masa prazne posude (g)

$m_2$  – masa posude i uzorka (g)

$m_3$  – masa posude i pepela (g)

$M_{ad}$  – postotni sadržaj vode uzorka za određivanje sadržaja pepela

Konačni sadržaj pepela određene vrste drva dobiven je kao srednja vrijednost sadržaja pepela od sva tri ispitana uzorka uzeta od te vrste drva.

## 4.6 Određivanje gornje ogrjevne vrijednosti

Prvi korak je izrada tableta od uzorka na hidrauličnoj preši (Slika 20.). Kalup za izradu tableta ima 4 provrta promjera 13 mm. U svaki provrt stavi se po  $1 \pm 0,1$  g uzorka i zatim se u provrt stave metalni klinovi. Kalup s uzorcima i klinovima preša se oko pola minute na 40 kN, a dobivene "tablete" spremaju se u plastične bočice radi sprječavanja navlaživanja.

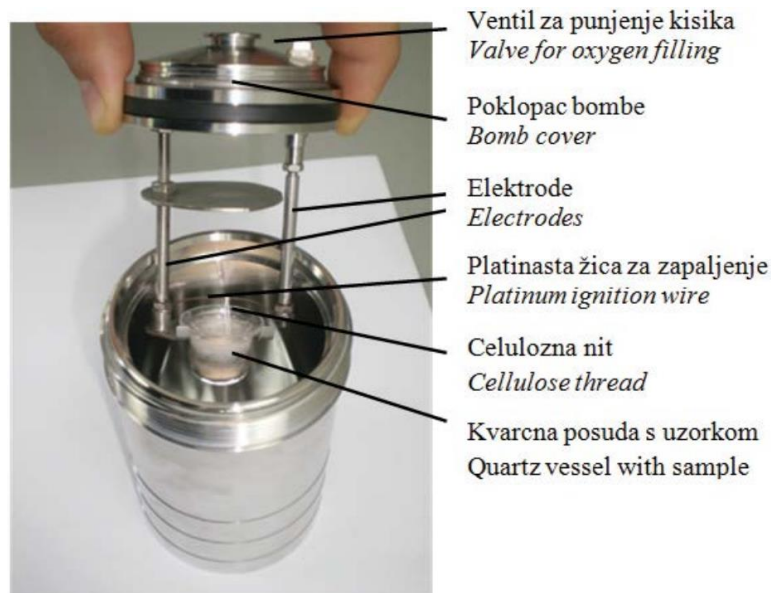


**Slika 20.** Hidraulična preša sa kalupom za izradu tableta (Augustinović, 2015)

Gornja ogrjevna vrijednost pri sadržaju vode određivana je kalorimetrom IKA C200 (Slika 21.). Glavni dijelovi kalorimetra su: kalorimetarska bomba (Slika 22.), mješalica, posuda kalorimetra i temperaturni osjetnik (Šafran i dr., 2015).



**Slika 21.** Kalorimetar IKA C200



**Slika 22.** Kalorimetarska bomba (Šafran i dr., 2018)

Prethodno isprešana tableta izvagana je na analitičkoj vagi i ta masa je unesena u kalorimetar. Tableta se zatim stavlja u kvarcnu posudicu preko celulozne niti. Bitno je da su tableta i celulozna nit u kontaktu kako bi došlo do zapaljenja. Kvarcna posudica stoji na nosaču. Celulozna nit je prethodno zavezana za žicu za zapaljenje. Kalorimetarska bomba se zatim zatvara poklopcem i puni kisikom čistoće 99,5 % s punilicom (Slika 23.). Nakon punjenja na poklopac se stavlja kontaktni spoj. Kalorimetarska bomba se zatim stavlja u kalorimetar. Spremnik kalorimetra puni se s 3 litre vode čija početna temperatura mora biti u rasponu od 18 do 25 °C. Spuštanjem poklopca kalorimetra pokreće se postupak ispitivanja. Mjerenje traje oko 16 minuta. Na kraju mjerenja na ekranu kalorimetra ispiše se ogrjevna vrijednost uzorka izražena u J/g (Slika 24.). Za svaku bočicu provedena su dva mjerenja s kalorimetrom, a kao konačan rezultat uzima se srednja vrijednost ta dva mjerenja. Za ukupnih 40 bočica provedeno je 80 mjerenja.



**Slika 23.** Punilica



**Slika 24.** Rezultat mjerenja gornje ogrjevne vrijednosti kalorimetrom

### 4.7 Obrada podataka

Podaci su zapisivani i obrađivani u programu Microsoft Excel. Uneseni su podaci potrebni za izračun sadržaja vode, sadržaja pepela i podaci o ogrjevnoj vrijednosti uzoraka. S dobivenim rezultatima izračunate su srednje vrijednosti sadržaja vode, sadržaja pepela i ogrjevnosti za svaki uzorak iz pojedine bočice. Napravljeni su grafovi za lakšu vizualizaciju podataka.

## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

Rezultati su zapisani u tablicama u kojima svaki uzorak ima svoju oznaku. Uzorci su označeni na način da slova označuju vrstu drva (H – hrast, Bu – bukva, Ba – bagrem i J/S – jela/smreka). Prvi broj u oznaci označuje redoslijed vađenja uzoraka iz klima komore i uzorkovanja s iznimkom nule koja označava uzorak koji nije bio u klima komori nego je uzorkovan nakon sušenja do apsolutno suhog stanja. Drugi broj označava pojedini uzorak iz iste bočice. Svaka bočica ima svoju oznaku (npr. H 0. ili Bu 1.). Iz svake bočice ispitana su tri uzorka (npr. uzorci iz bočice Bu 1. imaju oznake Bu 1.1., Bu 1.2. i Bu 1.3.).

### 5.1 Analiza sadržaja vode

Rezultati određivanja sadržaja vode uzoraka prikazani su u tablicama ispod. Sadržaj vode svakog pojedinog uzorka prikazan je u stupcu pod nazivom „Sadržaj vode (%)“. U sljedećem stupcu pod nazivom „Prosjek“ prikazana je srednja vrijednost sadržaja vode od tri uzorka uzeta iz iste bočice.

**Tablica 5.** Sadržaj vode uzoraka koji su uzorkovani nakon sušenja do apsolutno suhog stanja

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 0.1.	30,1680	1,0754	31,2434	31,2383	0,47	0,49
H 0.2.	28,3803	1,0743	29,4546	29,4497	0,46	
H 0.3.	33,1259	1,0579	34,1838	34,1780	0,55	
Bu 0.1.	29,3869	1,0755	30,4624	30,4575	0,46	0,44
Bu 0.2.	31,6527	1,0430	32,6957	32,6912	0,43	
Bu 0.3.	30,0394	1,0645	31,1039	31,0992	0,44	
Ba 0.1.	31,1061	1,0212	32,1273	32,1226	0,46	0,43
Ba 0.2.	29,3327	1,0205	30,3532	30,3492	0,39	
Ba 0.3.	36,7284	1,0866	37,8150	37,8104	0,42	
J/S 0.1.	30,2327	1,0376	31,2703	31,2652	0,49	0,48
J/S 0.2.	29,5995	1,0460	30,6455	30,6409	0,44	
J/S 0.3.	32,8998	1,0148	33,9146	33,9094	0,51	

Uzorci iz tablice 5. posušeni su u sušioniku do apsolutno suhog stanja, no rezultat određivanja sadržaja vode nije točno 0 %. Uzrok tome može biti upijanje vlage iz prostorije tijekom vaganja 10 grama uzorka koji se spremio u bočicu i tijekom vaganja uzorka za postupak gravimetrije.



## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

**Tablica 6.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 1 sat

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 1.1.	28,3804	1,0457	29,4261	29,3739	4,99	4,98
H 1.2.	36,7280	1,0340	37,7620	37,7103	5,00	
H 1.3.	30,2323	1,0146	31,2469	31,1967	4,95	
Bu 1.1.	30,0393	1,0388	31,0781	31,0271	4,91	4,88
Bu 1.2.	29,5989	1,0191	30,6180	30,5684	4,87	
Bu 1.3.	33,1257	1,0811	34,2068	34,1543	4,86	
Ba 1.1.	31,6527	1,0341	32,6868	32,6377	4,75	4,75
Ba 1.2.	31,1058	1,0069	32,1127	32,0646	4,78	
Ba 1.3.	32,8995	1,0181	33,9176	33,8694	4,73	
J/S 1.1.	31,8410	1,0129	32,8539	32,8180	3,54	3,55
J/S 1.2.	29,8132	1,0787	30,8919	30,8537	3,54	
J/S 1.3.	31,8246	1,0127	32,8373	32,8012	3,56	

**Tablica 7.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 3 sata

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 2.1.	32,2008	1,0362	33,2370	33,1533	8,08	8,05
H 2.2.	30,4819	1,0126	31,4945	31,4130	8,05	
H 2.3.	29,3863	1,0084	30,3947	30,3138	8,02	
Bu 2.1.	30,1682	1,0337	31,2019	31,1216	7,77	7,77
Bu 2.2.	29,5020	1,0154	30,5174	30,4384	7,78	
Bu 2.3.	31,5885	1,0553	32,6438	32,5618	7,77	
Ba 2.1.	30,8799	1,0342	31,9141	31,8397	7,19	7,13
Ba 2.2.	29,0222	1,0237	30,0459	29,9725	7,17	
Ba 2.3.	28,9124	1,0084	29,9208	29,8498	7,04	
J/S 2.1.	34,1357	1,0458	35,1815	35,1009	7,71	7,69
J/S 2.2.	29,3332	1,0385	30,3717	30,2918	7,70	
J/S 2.3.	30,4378	1,0059	31,4437	31,3667	7,65	

**Tablica 8.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 7 sati

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 3.1.	32,8997	1,0248	33,9245	33,8137	10,81	10,76
H 3.2.	30,2323	1,0079	31,2402	31,1318	10,76	
H 3.3.	30,4372	1,0146	31,4518	31,3430	10,72	
Bu 3.1.	29,5990	1,0621	30,6611	30,5509	10,38	10,33
Bu 3.2.	30,0391	1,0061	31,0452	30,9414	10,32	
Bu 3.3.	36,7282	1,0162	37,7444	37,6399	10,28	
Ba 3.1.	31,6522	1,0191	32,6713	32,5731	9,64	9,77
Ba 3.2.	31,1057	1,0171	32,1228	32,0229	9,82	
Ba 3.3.	33,1258	1,0086	34,1344	34,0351	9,85	
J/S 3.1.	31,8409	1,0207	32,8616	32,7545	10,49	10,47
J/S 3.2.	29,8133	1,0294	30,8427	30,7347	10,49	
J/S 3.3.	31,8243	1,0143	32,8386	32,7330	10,41	

## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

**Tablica 9.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 15 sati

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 4.1.	32,2012	1,0233	33,2245	33,1059	11,59	11,57
H 4.2.	30,4813	1,0262	31,5075	31,3888	11,57	
H 4.3.	29,3869	1,0535	30,4404	30,3187	11,55	
Bu 4.1.	30,1680	1,0059	31,1739	31,0555	11,77	11,79
Bu 4.2.	29,5019	1,0431	30,5450	30,4220	11,79	
Bu 4.3.	31,5886	1,0103	32,5989	32,4797	11,80	
Ba 4.1.	30,8796	1,0794	31,9590	31,8404	10,99	10,96
Ba 4.2.	29,3321	1,0205	30,3526	30,2407	10,97	
Ba 4.3.	29,0217	1,0222	30,0439	29,9323	10,92	
J/S 4.1.	34,1351	1,0010	35,1361	35,0169	11,91	11,86
J/S 4.2.	28,9124	1,0242	29,9366	29,8152	11,85	
J/S 4.3.	28,3805	1,0192	29,3997	29,2792	11,82	

**Tablica 10.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 31 sat

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 5.1.	30,4375	1,0489	31,4864	31,3578	12,26	12,23
H 5.2.	30,2322	1,0210	31,2532	31,1286	12,20	
H 5.3.	32,8997	1,0366	33,9363	33,8096	12,22	
Bu 5.1.	29,5992	1,0404	30,6396	30,5130	12,17	12,11
Bu 5.2.	30,0391	1,0010	31,0401	30,9191	12,09	
Bu 5.3.	36,7283	1,0011	37,7294	37,6085	12,08	
Ba 5.1.	31,6526	1,0441	32,6967	32,5783	11,34	11,28
Ba 5.2.	31,1055	1,0357	32,1412	32,0245	11,27	
Ba 5.3.	33,1259	1,0027	34,1286	34,0159	11,24	
J/S 5.1.	31,8408	1,0579	32,8987	32,7693	12,23	12,20
J/S 5.2.	31,8246	1,0635	32,8881	32,7582	12,21	
J/S 5.3.	29,8130	1,0053	30,8183	30,6962	12,15	

**Tablica 11.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 47 sati

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 6.1.	32,2007	1,0624	33,2631	33,1313	12,41	12,33
H 6.2.	30,4817	1,0001	31,4818	31,3588	12,30	
H 6.3.	29,3870	1,0694	30,4564	30,3250	12,29	
Bu 6.1.	30,1683	1,0180	31,1863	31,0605	12,36	12,26
Bu 6.2.	29,5014	1,0167	30,5181	30,3938	12,23	
Bu 6.3.	31,5884	1,0061	32,5945	32,4718	12,20	
Ba 6.1.	30,8795	1,0176	31,8971	31,7788	11,63	11,54
Ba 6.2.	29,3321	1,0080	30,3401	30,2241	11,51	
Ba 6.3.	29,0221	1,0334	30,0555	29,9368	11,49	
J/S 6.1.	34,1354	1,0476	35,1830	35,0545	12,27	12,17
J/S 6.2.	28,9123	1,0363	29,9486	29,8225	12,17	
J/S 6.3.	28,3801	1,0205	29,4006	29,2773	12,08	



## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

**Tablica 12.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 63 sata

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 7.1.	32,2006	1,0062	33,2068	33,0816	12,44	12,39
H 7.2.	30,4817	1,0033	31,4850	31,3606	12,40	
H 7.3.	29,3863	1,0072	30,3935	30,2694	12,32	
Bu 7.1.	30,1682	1,0109	31,1791	31,0549	12,29	12,30
Bu 7.2.	29,5014	1,0357	30,5371	30,4101	12,26	
Bu 7.3.	31,5883	1,0195	32,6078	32,4819	12,35	
Ba 7.1.	30,8795	1,0109	31,8904	31,7733	11,58	11,45
Ba 7.2.	29,3321	1,0231	30,3552	30,2390	11,36	
Ba 7.3.	29,0218	1,0257	30,0475	29,9305	11,41	
J/S 7.1.	34,1352	1,0074	35,1426	35,0199	12,18	12,18
J/S 7.2.	28,9117	1,0198	29,9315	29,8076	12,15	
J/S 7.3.	28,3800	1,0196	29,3996	29,2752	12,20	

**Tablica 13.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 87 sati

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 8.1.	31,6524	1,0060	32,6584	32,5304	12,72	12,79
H 8.2.	33,1265	1,0217	34,1482	34,0170	12,84	
H 8.3.	29,3362	1,0032	30,3394	30,2110	12,80	
Bu 8.1.	27,5083	1,0449	28,5532	28,4259	12,18	12,29
Bu 8.2.	31,1056	1,0197	32,1253	32,0002	12,27	
Bu 8.3.	30,4821	1,0302	31,5123	31,3843	12,42	
Ba 8.1.	32,2009	1,0778	33,2787	33,1536	11,61	11,55
Ba 8.2.	30,1684	1,0486	31,2170	31,0962	11,52	
Ba 8.3.	29,5017	1,0321	30,5338	30,4148	11,53	
J/S 8.1.	29,3862	1,0051	30,3913	30,2664	12,43	12,51
J/S 8.2.	31,5886	1,0277	32,6163	32,4872	12,56	
J/S 8.3.	30,8792	1,0325	31,9117	31,7821	12,55	

**Tablica 14.** Sadržaj vode uzoraka koji su na temperaturi 30 °C i relativnoj vlazi zraka 80 % bili 111 sati

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	Sadržaj vode (%)	Prosjek (%)
H 9.1.	29,3322	1,0104	30,3426	30,2153	12,60	12,56
H 9.2.	29,0220	1,0496	30,0716	29,9397	12,57	
H 9.3.	28,9120	1,0119	29,9239	29,7973	12,51	
Bu 9.1.	28,3803	1,0743	29,4546	29,3209	12,45	12,46
Bu 9.2.	34,1355	1,0831	35,2186	35,0836	12,46	
Bu 9.3.	31,8405	1,0651	32,9056	32,7727	12,48	
Ba 9.1.	29,8127	1,0302	30,8429	30,7215	11,78	11,82
Ba 9.2.	29,5989	1,0307	30,6296	30,5084	11,76	
Ba 9.3.	30,0395	1,0335	31,0730	30,9498	11,92	
J/S 9.1.	31,8243	1,0118	32,8361	32,7101	12,45	12,43
J/S 9.2.	36,7281	1,0265	37,7546	37,6269	12,44	
J/S 9.3.	30,4373	1,0603	31,4976	31,3663	12,38	

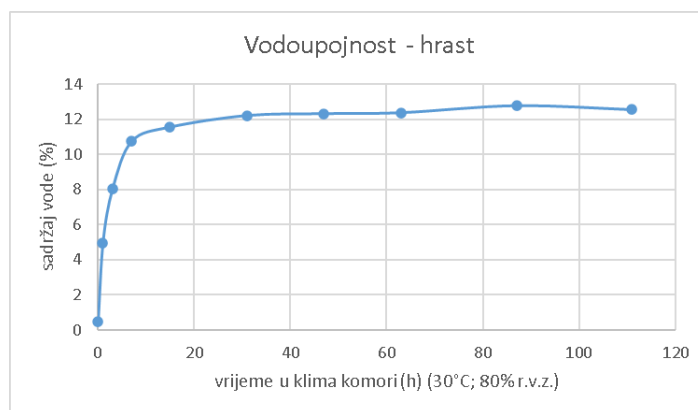
## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

Porastom broja sati provedenih u klima komori na zadanim uvjetima uočava se povećanje sadržaja vode uzoraka. Povećanje sadržaja vode uzoraka intenzivno je do četvrtog vađenja uzoraka iz klima komore, tj. do 15. sata provedenog na zadanim uvjetima i do tada je vodoupojnost najveća. Do četvrtog vađenja uzoraka, tj. nakon 15 sati uzorci hrasta, bukve, bagrema i jele postigli su sadržaj vode 11,57 %, 11,79 %, 10,96 % i 11,86 %, tim redom za svaku vrstu drva. Uzorci koji su vađeni nakon 15. sata iz klima komore imaju približno isti sadržaj vode koji blago raste ili varira, posebno za svaku vrstu drva. Maksimalni postignuti sadržaji vode su 12,79 %, 12,46 %, 11,82 % i 12,51 %, tim redom za hrast, bukvu, bagrem i jelu.

S obzirom da se sadržaji vode zadnjih 5 mjerenja vrlo malo razlikuju, može se reći da su uzorci u zadanim uvjetima (temperatura 30 °C i relativna vlaga zraka 80 %) postigli vlagu ravnoteže. Za hrast, bukvu i jelu postignuta vlaga ravnoteže približno je 12,5 %, a za bagrem približno 11,8 %. Vlaga ravnoteže drva određena pomoću dijagrama vlage ravnoteže sa slike 1. za zadane uvjete (temperatura 30 °C i relativna vlaga zraka 80%) iznosi približno 15,5 % što je za 3 %, odnosno 3,7 % više nego što je dobiveno ovim istraživanjem. Razlog niže vlage ravnoteže dobivene ovim istraživanjem nego određivanjem sa slike 1. je higroskopna histereza. Tj. zbog prvotnog sušenja uzoraka do apsolutno suhog stanja narednim upijanjem vlage iz zraka (adsorpcijom) postiže se manji sadržaj vode drva pri istoj relativnoj vlazi zraka nego tijekom otpušanja vode iz drva (desorpcije) pri sušenju.

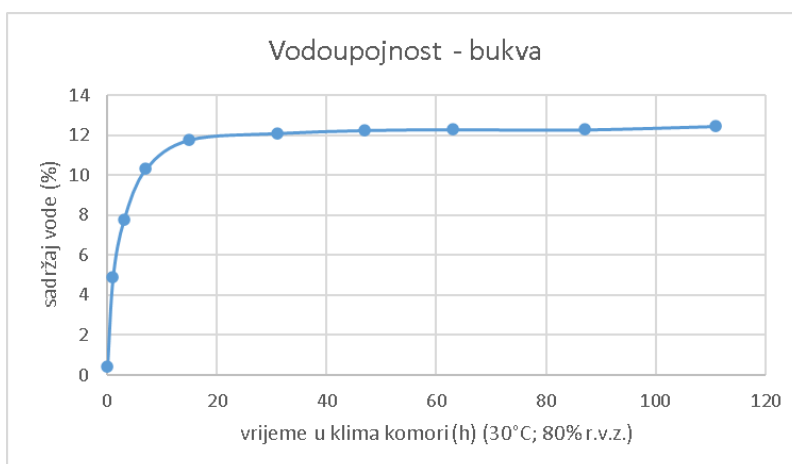
Vlaga drva mijenja se brže kada je zrak bliže potpunom zasićenju vlagom (Krpan, 1953) stoga se može reći da je izabrana relativna vlaga zraka od 80 % imala utjecaj na brzinu navlaživanja uzoraka. Velik utjecaj na brzinu kojom sadržaj vode drva dolazi u ravnotežu s vlagom zraka ima izmjena zraka tj. cirkulacija (Krpan, 1953) koje u ovom istraživanju nije bilo.

Za lakšu vizualizaciju i praćenje dinamike povećanja sadržaja vode napravljeni su grafovi (Slika 25., 26., 27. i 28.) pomoću podataka iz tablica. Grafovi pokazuju koliki je sadržaj vode uzoraka nakon određenog broja sati provedenog na zadanim uvjetima za svaku vrstu drva posebno.

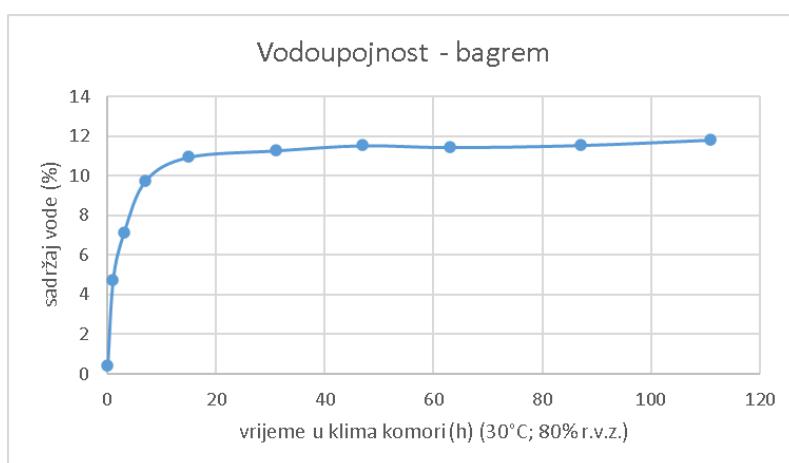


**Slika 25.** Sadržaj vode hrasta nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %

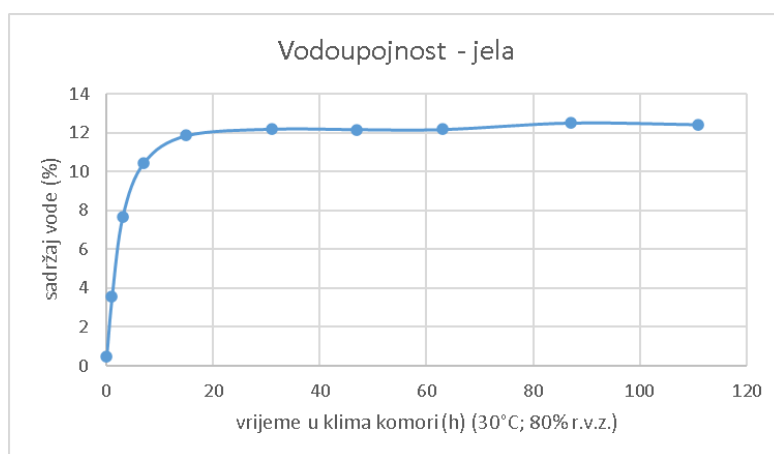
## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



**Slika 26.** Sadržaj vode bukve nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %



**Slika 27.** Sadržaj vode bagrema nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %



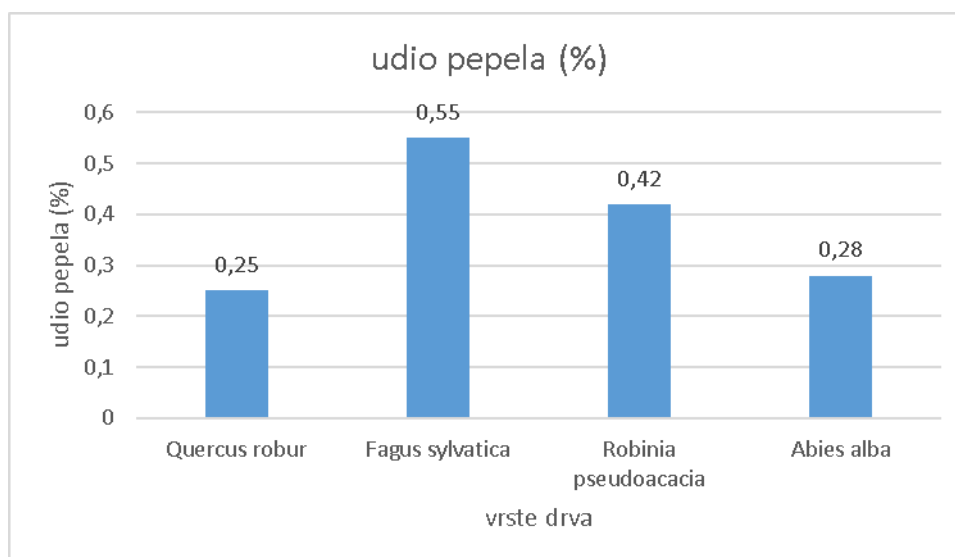
**Slika 28.** Sadržaj vode jele nakon određenog vremena provedenog na 30 °C i r.v.z 80 %

## 5.2 Analiza sadržaja pepela

Rezultati sadržaja pepela ispitanih uzoraka prikazani su u tablici (Tablica 15.) i grafu (Slika 29.).

**Tablica 15.** Sadržaj (udio) pepela u uzorcima svih vrsta drva

Uzorak	m1 (g)	mu (g)	m2 (g)	m3 (g)	prosjeak sadržaja vode	udio pepela (%)	prosječni udio pepela (%)
H 0.1.	18,0785	1,0295	19,1080	18,0810	0,4929	0,24	0,25
H 0.2.	13,6945	1,0332	14,7277	13,6969		0,23	
H 0.3.	19,0225	1,0354	20,0579	19,0252		0,26	
Bu 0.1.	18,6633	1,0355	19,6988	18,6690	0,4429	0,55	0,55
Bu 0.2.	19,4983	1,0070	20,5053	19,5038		0,55	
Bu 0.3.	13,5324	1,0197	14,5521	13,5379		0,54	
Ba 0.1.	17,5738	1,0329	18,6067	17,5779	0,4252	0,40	0,42
Ba 0.2.	13,9245	1,0055	14,9300	13,9285		0,40	
Ba 0.3.	16,7712	1,0157	17,7869	16,7758		0,45	
J/S 0.1.	18,7152	1,0379	19,7531	18,7184	0,4812	0,31	0,28
J/S 0.2.	17,1356	1,0194	18,1550	17,1383		0,27	
J/S 0.3.	18,4297	1,0001	19,4298	18,4324		0,27	



**Slika 29.** Sadržaj (udio) pepela po vrsti drva

Prema dobivenim rezultatima najveći prosječni sadržaj pepela u uzorcima sadrži bukva (0,55 %). Sljedeći je bagrem (0,42 %) pa jela (0,28 %). Najmanji prosječni sadržaj pepela u uzorcima sadrži hrast (0,25 %).

Prema prijašnjim istraživanjima sadržaja pepela (Slika 2.) u bukvi isnosio je 0,96 % što je za 0,41 % više nego što je dobiveno ovim istraživanjem (0,55 %). Za jelu prema prijašnjim istraživanjima udio pepela iznosi 0,42 % što je za 0,14 % više nego u ovome istraživanju (0,28 %).

### 5.3 Analiza gornje ogrjevne vrijednosti

Rezultati gornje ogrjevne vrijednosti (bruto kalorijske vrijednosti) ispitanih uzoraka prikazani su u tablicama ispod.

**Tablica 16.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji su uzorkovani nakon sušenja do apsolutno suhog stanja, sa sadržajem vode približno 0 %(prikazan u tablici)

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 0.1.	0,49	19628	19590
H 0.2.		19551	
Bu 0.1.	0,44	19602	19573
Bu 0.2.		19543	
Ba 0.1.	0,43	19473	19449
Ba 0.2.		19424	
J/S 0.1.	0,48	20049	20030
J/S 0.2.		20011	

**Tablica 17.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od 1 sat

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 1.1.	4,98	18591	18631
H 1.2.		18670	
Bu 1.1.	4,88	18778	18737
Bu 1.2.		18696	
Ba 1.1.	4,75	18537	18558
Ba 1.2.		18578	
J/S 1.1.	3,55	19410	19400
J/S 1.2.		19390	

**Tablica 18.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od 3 sata

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 2.1.	8,05	18026	18039
H 2.2.		18052	
Bu 2.1.	7,77	18255	18260
Bu 2.2.		18265	
Ba 2.1.	7,13	18181	18149
Ba 2.2.		18116	
J/S 2.1.	7,69	18609	18563
J/S 2.2.		18517	

## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

**Tablica 19.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od 7 sati

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 3.1.	10,76	17543	17560
H 3.2.		17576	
Bu 3.1.	10,33	17712	17682
Bu 3.2.		17652	
Ba 3.1.	9,77	17648	17668
Ba 3.2.		17688	
J/S 3.1.	10,47	18047	18048
J/S 3.2.		18048	

**Tablica 20.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od 15 sati

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 4.1.	11,57	17382	17368
H 4.2.		17353	
Bu 4.1.	11,79	17508	17500
Bu 4.2.		17491	
Ba 4.1.	10,96	17484	17476
Ba 4.2.		17468	
J/S 4.1.	11,86	17767	17817
J/S 4.2.		17867	

**Tablica 21.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od 31 sata

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 5.1.	12,23	17339	17303
H 5.2.		17266	
Bu 5.1.	12,11	17460	17466
Bu 5.2.		17472	
Ba 5.1.	11,28	17437	17414
Ba 5.2.		17391	
J/S 5.1.	12,20	17758	17726
J/S 5.2.		17693	

## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

**Tablica 22.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **47 sati**

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 6.1.	12,33	17198	17213
H 6.2.		17228	
Bu 6.1.	12,26	17431	17413
Bu 6.2.		17394	
Ba 6.1.	11,54	17379	17368
Ba 6.2.		17357	
J/S 6.1.	12,17	17810	17821
J/S 6.2.		17832	

**Tablica 23.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **63 sata**

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 7.1.	12,39	17212	17205
H 7.2.		17197	
Bu 7.1.	12,30	17314	17322
Bu 7.2.		17330	
Ba 7.1.	11,45	17305	17319
Ba 7.2.		17333	
J/S 7.1.	12,18	17705	17706
J/S 7.2.		17707	

**Tablica 24.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od **87 sati**

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 8.1.	12,79	17196	17230
H 8.2.		17264	
Bu 8.1.	12,29	17424	17410
Bu 8.2.		17396	
Ba 8.1.	11,55	17415	17402
Ba 8.2.		17389	
J/S 8.1.	12,51	17764	17750
J/S 8.2.		17736	

## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

**Tablica 25.** Gornja ogrjevna vrijednost uzoraka koji imaju određeni prosječni sadržaj vode postignut na temperaturi od 30 °C i relativnoj vlazi zraka od 80 % u vremenu od 111 sati

Uzorak	Prosjeak sadržaja vode (%)	Bruto kalorijska vrijednost (J/g)	Prosjeak (J/g)
H 9.1.	12,56	17238	17225
H 9.2.		17211	
Bu 9.1.	12,46	17364	17379
Bu 9.2.		17394	
Ba 9.1.	11,82	17329	17358
Ba 9.2.		17387	
J/S 9.1.	12,43	17749	17746
J/S 9.2.		17743	

Najveću gornju ogrjevnju vrijednost pri sadržaju vode imaju uzorci s najmanjim sadržajem vode. Najveća prosječna gornja ogrjevna vrijednost pri sadržaju vode za hrast je 19589,5 J/g pri 0,49% sadržaja vode, za bukvu 19572,5 J/g pri 0,44 % sadržaja vode, za bagrem 19448,5 J/g pri 0,43 % sadržaja vode i za jelu 20030 J/g pri 0,48 % sadržaja vode.

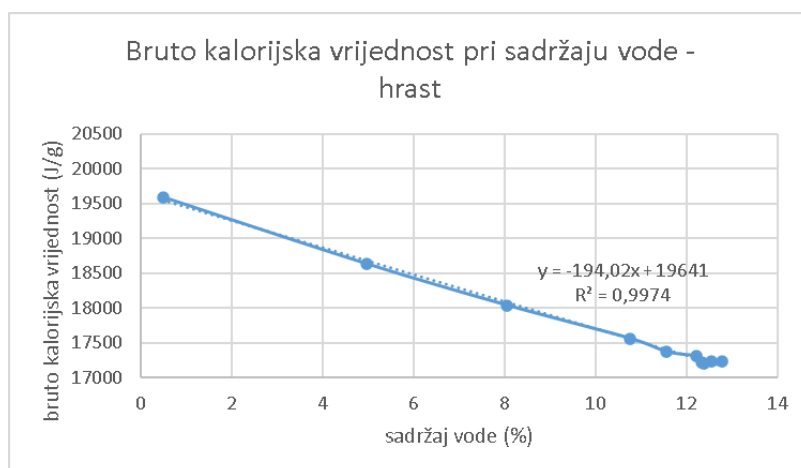
Povećanjem sadržaja vode u uzorcima linearno se smanjuje gornja ogrjevna vrijednost. Najmanja prosječna gornja ogrjevna vrijednost za hrast je 17204,5 J/g pri 12,39 % sadržaja vode, za bukvu 17322 J/g pri 12,30 % sadržaja vode, za bagrem 17319 J/g pri 11,45 % sadržaja vode i za jelu 17706 J/g pri 12,18 % sadržaja vode.

Vremenski gledano, ogrjevna vrijednost svih vrsta drva početnog apsolutno suhog stanja naglo pada u prvih 15 sati provedenih na 30 °C i 80 % relativne vlage zraka zbog naglog rasta sadržaja vode. U ostatku vremena provedenog na zadanim uvjetima ogrjevna vrijednost blago pada ili varira oko jedne vrijednosti zbog blagog rasta i variranja sadržaja vode.

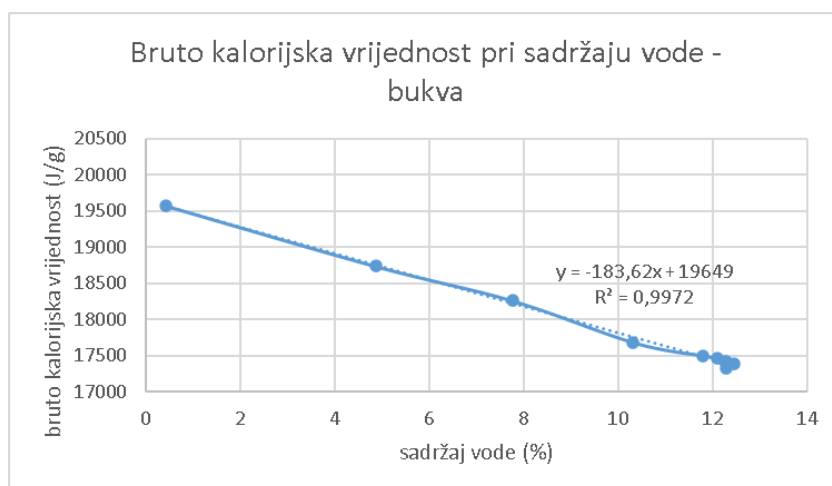
Trend linearnog pada gornje ogrjevnje vrijednosti sa povećanjem sadržaja vode prikazan je u grafovima ispod (Slika 30., 31., 32. i 33.).



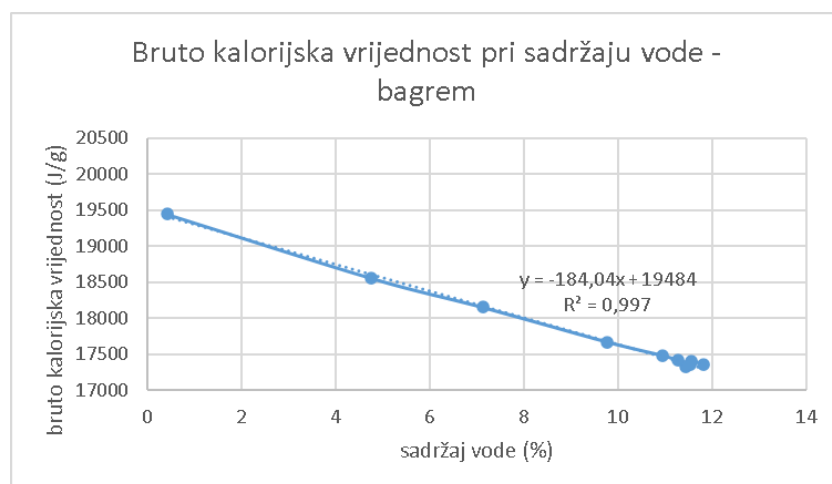
## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



**Slika 30.** Gornja ogrjevna vrijednost hrasta pri određenom sadržaju vode

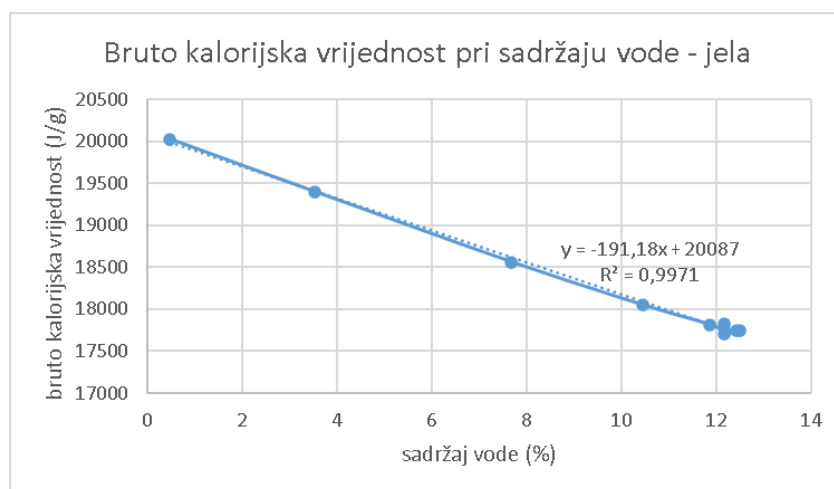


**Slika 31.** Gornja ogrjevna vrijednost bukve pri određenom sadržaju vode



**Slika 32.** Gornja ogrjevna vrijednost bagrema pri određenom sadržaju vode

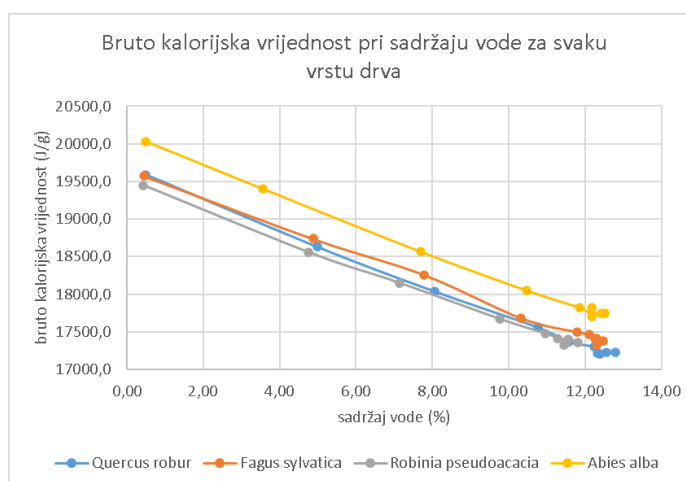
## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



**Slika 33.** Gornja ogrjevna vrijednost jelovine pri određenom sadržaju vode

S obzirom da rezultati iz tablice 16. prikazuju ogrjevne vrijednosti pri sadržaju vode koji su približno 0 %, ti rezultati mogu se usporediti s rezultatima prijašnjih ispitivanja ogrjevnih vrijednosti sa slike 3. Rezultati dobiveni ovim ispitivanjem daju veće ogrjevne vrijednosti drva za sadržaj vode približno 0 %, nego rezultati sa Slike 3. za apsolutno suho drvo. Rezultati iz ovog ispitivanja imaju 1210 J/g veću ogrjevnju vrijednost za hrast nego sa slike 3., za bukву 776 J/g, za bagrem 499 J/g i za jelu 540 J/g veću vrijednost nego rezultati sa slike 3.

Iako je svaka ogrjevna vrijednost dobivena za različiti sadržaj vode može se primjetiti da jela ima veće ogrjevne vrijednosti po jedinici mase nego ostale vrste drva što je vidljivo i na grafu (Slika 34.). To je očekivano jer jela kao i ostale četinjače sadrži veći udio lignina koji ima veću ogrjevnju vrijednost po jedinici mase.



**Slika 34.** Gornja ogrjevna vrijednost pri određenom sadržaju vode za 4 vrste drva

### 6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu ispitani su sadržaji vode drva hrasta, bukve, bagrema i jele nakon određenog vremena navlaživanja. Određeni su sadržaji pepela sve 4 vrste drva i ispitane su ogrjevne vrijednosti tih vrsta drva pri različitim sadržajima vode.

Uzorci početnog apsolutno suhog stanja svake vrste drva proveli su ukupno 111 sati u klima komori na 30 °C i 80 % relativnoj vlazi zraka. Maksimalni postignuti sadržaj vode u tom vremenu za hrast je 12,79 %, za bukvu 12,46 %, za bagrem 11,82 % i za jelu 12,51 %. Sadržaj vode svim vrstama drva intenzivno se povećava od apsolutno suhog stanja tijekom prvih 15 sati provedenih na zadanim uvjetima. Nakon 15 sati provedenih na zadanim uvjetima sadržaj vode blago raste ili varira kod svih vrsta. Stoga može se reći da su uzorci postigli vlagu ravnoteže. Postignuta vlaga ravnoteže odstupa od vlage ravnoteže određene putem dijagrama vlage ravnoteže za otprilike 3-4 %, a razlog je higroskopna histereza.

Vrsta drva s najvećim sadržajem pepela je bukva (0,55 %). Sljedeći najveći sadržaj pepela ima bagrem (0,42 %), pa jela (0,28 %). Hrast ima najmanji sadržaj pepela (0,25 %). Prema prijašnjim istraživanjima sadržaj pepela u bukvi je za 0,41 %, a za jelu za 0,14 % veći nego u ovom istraživanju. Za hrast i bagrem nema rezultata prijašnjih istraživanja. Sadržaj pepela u drvu ovisi o mnogim faktorima od staništa i tla, načina manipulacije sirovine, čistoće stovarišta stoga odstupanja od prijašnjih istraživanja možemo pripisati navedenim razlozima.

Ogrjevna vrijednost je najveća za uzorke s najmanjim sadržajem vode, a povećanjem sadržaja vode ogrjevna vrijednost drva linearno se smanjuje za svaku vrstu drva. Vremenski gledano, ogrjevna vrijednost svih vrsta drva početnog apsolutno suhog stanja naglo pada u prvih 15 sati provedenih na 30 °C i 80 % relativne vlage zraka. Nakon 15 sati ogrjevna vrijednost još blago pada ili varira oko jedne vrijednosti. Vidljivo je da ogrjevna vrijednost naglo pada u vremenu kada sadržaj vode naglo raste, a kada sadržaj vode blago raste ili varira ogrjevna vrijednost blago pada ili varira. Stoga, zaključuje se da sadržaj vode ima direktan utjecaj na ogrjevnu vrijednost drva. Najveća prosječna gornja ogrjevna vrijednost za hrast je 19589,5 J/g pri 0,49 % sadržaja vode, za bukvu 19572,5 J/g pri 0,44 % sadržaja vode, za bagrem 19448,5 J/g pri 0,43 % sadržaja vode i za jelu 20030 J/g pri 0,48 % sadržaja vode. Najmanja prosječna gornja ogrjevna vrijednost za hrast je 17204,5 J/g pri 12,39 % sadržaja vode, za bukvu 17322 J/g pri 12,30 % sadržaja vode, za bagrem 17319 J/g pri 11,45 % sadržaja vode i za jelu 17706 J/g pri 12,18 % sadržaja vode. Za jelu su dobivene veće ogrjevne vrijednosti po jedinici mase što je razumljivo zbog većeg udjela lignina koji ima veću ogrjevnu vrijednost po jedinici mase.

Niži sadržaj vode ogrjevnog drva bitan nam je jer drvo s nižim sadržajem vode ima veću ogrjevnu vrijednost, a time i veću korisnost, tj. toplinu koju drvo oslobađa izgaranjem. Niži sadržaj vode ogrjevnog drva može se postići pravilnim skladištenjem drva na zraku sa što nižom relativnom vlagom, sprečavanjem direktnog navlaživanja drva, osiguravanjem provjetravanja drva i sl.

## LITERATURA

1. Antonović, A., 2019: Skripta iz predmeta Kemija drva, prvi dio, Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, 70 str.
2. Carević, I., 2018: Što raditi s pepelom iz energana na drvenu biomasu? [https://eko.zagreb.hr/UserDocsImages/zg\\_energetski\\_tjedan/2018/dokumenti/3.pdf](https://eko.zagreb.hr/UserDocsImages/zg_energetski_tjedan/2018/dokumenti/3.pdf) (Pristupljeno 26.8.2022.)
3. Horvat, I. i Krpan, J., 1967, Drvno industrijski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 512-527 str.
4. Horvat I. i Krpan J., 1985: Osnove nauke o drvu, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb, 26, 57-58 str.
5. Jirouš-Rajković V. i Šefc B., 2019: Vrste drva s naslovnica časopisa Drvna industrija, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb, 3, 17, 25, 41 str.
6. Krpan, J., 1953: Istraživanja higroskopske ravnoteže vlage uzduha i drveta, Glasnik za šumske pokuse: Annales pro experimentis foresticis, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:980376> (pristupljeno 19.8.2022.)
7. Sinković T., Tehnička svojstva drva 1, Tablice\_pismeni\_ispit, Merlin, 2019.
8. Šafran, B., Jug, M., Radmanović, K., Hasan, M., Augustinović, K., Vučković, K., Risović, S., 2018: Doprinos istraživanju peleta od drva turopoljskog kraja, Šumarski list, 142 (3-4):149-159.
9. Energetska vrijednost drveta, Piljak pelet <https://www.piljak.hr/drvo-je-prvo-2/> (Pristupljeno 26.8.2022.)
10. Energija u Hrvatskoj 2020, Godišnji energetski pregled [https://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2022/01/Velika\\_EIHP\\_Energija\\_2020.pdf](https://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2022/01/Velika_EIHP_Energija_2020.pdf) (pristupljeno 25.8.2022.)
11. Struna, Definicije – higroskopsnost drva <http://struna.ihji.hr/search-do/?q=higroskopsnost+drva&naziv=1&polje=0#container> (pristupljeno 25.8.2022.)
12. Struna, Definicije – Sadržaj pepela <http://struna.ihji.hr/search-do/?q=sadr%C5%BEaj+pepela#container> (pristupljeno 25.8.2022.)
13. Struna, Definicije – sadržaj vode u drvu <http://struna.ihji.hr/naziv/sadrzaj-vode-u-drvu/36421/> (pristupljeno 25.8.2022.)
14. Šume u Hrvatskoj, Općenito o šumama <https://www.hrsume.hr/index.php/hr/ume/opcenito/sumeuhry> (pristupljeno 25.8.2022.)