

# Usporedba teorijskih i empirijskih ogrjevnih vrijednosti miskantusa

---

**Jakšić, Katarina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:378499>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



# **USPOREDBA TEORIJSKIH I EMPIRIJSKIH OGRJEVNIH VRIJEDNOSTI MISKANTUSA**

DIPLOMSKI RAD

Katarina Jakšić

Zagreb, rujan, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



Diplomski studij:

Mikrobna biotehnologija u poljoprivredi

# **USPOREDBA TEORIJSKIH I EMPIRIJSKIH OGRJEVNIH VRIJEDNOSTI MISKANTUSA**

DIPLOMSKI RAD

Katarina Jakšić

Mentor:

Doc. dr. sc. Vanja Jurišić

Zagreb, rujan, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## **IZJAVA STUDENTA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Katarina Jakšić**, JMBAG 01781020999, rođena 24.04.1995. u Čakovcu, izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

### **USPOREDBA TEORIJSKIH I EMPIRIJSKIH OGRJEVNIH VRIJEDNOSTI MISKANTUSA**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica/jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata/upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studenta / studentice*



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZVJEŠĆE

### O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studentice **Katarine Jakšić**, JMBAG 01781020999, naslova

#### USPOREDBA TEORIJSKIH I EMPIRIJSKIH OGRJEVNIH VRIJEDNOSTI MISKANTUSA

obranjen je i ocijenjen ocjenom \_\_\_\_\_, dana \_\_\_\_\_.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. Doc. dr. sc. Vanja Jurišić mentor

\_\_\_\_\_

2. Doc. dr. sc. Nikola Bilandžija član

\_\_\_\_\_

3. Prof. dr. sc. Neven Voća član

\_\_\_\_\_

## Zahvala

Ovime se zahvaljujem Zavodu za poljoprivrednu tehnologiju, skladištenje i transport Agronomskog fakulteta koji je omogućio provođenje svih potrebnih analiza za ovo istraživanje.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Vanji Jurišić, mag. ing. agr. Mislavu Konteku i mag. ing. agr. Anamariji Peter na pomoći pri izvođenju analiza i izradi rada. Također se zahvaljujem povjerenstvu doc. dr. sc. Nikoli Bilandžiji i prof. dr. sc. Nevenu Voći.

Najveće zahvale idu mojoj obitelji koja mi je bila velika podrška i potpora tokom studiranja.

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
Cilj istraživanja .....	2
2. Pregled literature .....	3
2.1. Obnovljivi izvori energije .....	3
2.2. Biomasa .....	5
2.3. Miskantus.....	9
2.3.1. Taksonomija miskantusa .....	10
2.3.2. Genetski resursi.....	10
2.3.3. Ciljevi uzgoja .....	10
2.3.4. Energetska svojstva miskantusa .....	11
2.3.5. Energetsko iskorištavanje.....	12
2.3.6. Produktivnost miskantusa diljem Europe .....	14
2.3.7. Ekološka učinkovitost .....	14
2.3.8. Obnova zemljišta (fitoremedijacija).....	15
2.3.9. Tolerancija na abiotški stres .....	15
2.4. <i>Miscanthus x giganteus</i> .....	16
2.5. Ogrjevna vrijednost .....	17
2.5.1. Kalorimetar s bombom .....	17
2.5.2. Izračunavanje gornje ogrjevne vrijednosti .....	18
2.5.2.1. Izračun gornje ogrjevne vrijednosti na temelju podataka o strukturalnim svojstvima.....	18
2.5.2.2. izračun gornje ogrjevne vrijednosti na temelju podataka o elementarnim svojstvima.....	19
3. Materijali i metode.....	21

3.1. Materijali.....	21
3. 2. Metode .....	21
3.2.1. Sadržaj vode.....	22
3.2.2. Sadržaj pepela.....	22
3.2.3. Sadržaj koksa .....	23
3.2.4. Ukupni ugljik, vodik, dušik i sumpor.....	24
3.2.5. Fiksirani ugljik .....	24
3.2.6. Hlapive tvari.....	25
3.2.7. Utvrđivanje lignoceluloznog sastava.....	25
3.2.8. Ogrjevna vrijednost.....	25
3.3. Statistička analiza .....	26
4. Rezultati i rasprava .....	27
4.1. Rezultati analiza sastava miskantusa .....	27
4.2. Teorijski izračun gornje ogrjevne vrijednosti biomase .....	37
5. Zaključak .....	41
6. Popis literature.....	42



# Sažetak

Diplomskog rada studentice **Katarine Jakšić**, naslova

## USPOREDBA TEORIJSKIH I EMPIRIJSKIH OGRJEVNIH VRIJEDNOSTI MISKANTUSA

Sve veća potreba za energijom postaje izazov za ljudski razvoj. Glavni izvori energije su neobnovljivi koji imaju štetan utjecaj na okoliš stoga je ključno pronaći alternativne izvore.

Biomasa je jedna od visoko potencijalnih energenata, a definira se kao biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog porijekla, uključujući frakciju industrijskog i komunalnog otpada. Sve se više istražuju trajni energetske usjevi zbog njihovih niskih zahtjeva kada se uzgajaju za proizvodnju biomase i zbog značajnog prinosa. Jedna takva kultura je višegodišnja rizomska trava miskantus. Najpoznatiji hibrid ove vrste je *Miscanthus x giganteus*.

Cilj ovog istraživanja bio je analizirati 5 hibrida križanaca *M. sacchariflorus* x *M. sinensis* te usporediti teorijske i empirijske ogrjevne vrijednosti. Gornja ogrjevna vrijednost je jedno od najvažnijih svojstava koja opisuje energetske potencijal i koja određuje učinkovitost uporabe biomase. Eksperimentalne metode za procjenu ogrjevne vrijednosti su skupe i dugotrajne, stoga se u literaturi predlažu brojni izračuni s ciljem teorijskog utvrđivanja ogrjevne vrijednosti.

**Ključne riječi:** energija, miskantus, ogrjevna vrijednost

## Summary

Of the master's thesis - student **Katarina Jakšić**, entitled

### COMPARISON OF THEORETICAL AND EMPIRICAL HEATING VALUES OF MISCANTHUS

The growing need for energy is becoming a challenge for human development. The main sources of energy are non-renewable, which have a detrimental effect on the environment and have crucially found alternative sources.

Biomass is the same as high-potential energy, defined as the biodegradable fraction of products, waste and residues of biological origin, including the fraction of industrial and municipal waste. Increasingly, exploratory energy plants are durable due to low requirements when used for biomass production and because of significant yield. One such crop is the perennial rhizome herb *Miscanthus*. The most famous hybrid of its kind is *Miscanthus x giganteus*.

The aim of this study was to analyze 5 hybrids of crossbreeds of *M. sacchariflorus* x *M. sinensis* and to compare theoretical and empirical heating values. The upper heating value is one of the most important properties that describes the energy potential and allows the use of biomass. Experimental methods for predicting heating values are expensive and time-consuming; therefore, numerous calculations are proposed in the literature with theoretical determination of heating value.

**Keywords:** energy, *Miscanthus*, heating value

## 1. Uvod

Sve više postaje očito da je današnji globalni pristup energiji neodrživ. Glavni izvori energije su neobnovljivi izvori energije, a njih ima u ograničenim količinama i sve je naglašeniji njihov štetan utjecaj na okoliš. U takvom scenariju korištenje obnovljivih izvora energije (energija voda, sunčeva energija, energija vjetra, geotermalna energija, biomasa, tekuća biogoriva i bioplin) dolazi u središte energetske politike razvijenih zemalja (Sušnik i Benković, 2007). Obnovljivi izvori energije su oni izvori čiji se prosječni dotok svake godine ponavlja, bez smanjenja – barem za ljudsko poimanje vremena (Šljivac i Šimić, 2009).

Brzo rastuća potražnja za energijom postaje izazov za ljudski razvoj zbog brzog trošenja izvora energije, utjecaja na okoliš i nacionalnu energetske sigurnost (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012). Iako je industrijska revolucija promijenila svijet svojim otkrićima, moderno čovječanstvo danas prekomjerno ovisi o fosilnim gorivima kao glavnom izvoru energije. Međutim, osim ekonomskog aspekta, intenzivno korištenje neobnovljivih fosilnih goriva ima i štetan utjecaj na okoliš. Dolazi do porasta emisija stakleničkih plinova i toksičnih tvari u atmosferi. Značajno povećanje sadržaja CO<sub>2</sub> u atmosferi, uslijed izgaranja fosilnih goriva, u značajnoj mjeri doprinosi i samom efektu globalnog zagrijavanja. Stoga je neophodno istražiti moguće alternativne izvore energije koji bi znatno smanjili emisiju CO<sub>2</sub> kao i drugih stakleničkih plinova (Bilandžija i sur., 2013). Svjetska energetska emisija ugljičnog dioksida će porasti s 29,7 na 42,4 milijardi tona u razdoblju od 2007. do 2035. godine, dok će globalna potražnja za energijom porasti za 49 % u istom razdoblju, po prosječnoj stopi od 1,4 % godišnje. Rastuća potražnja za fosilnim gorivima i trend iscrpljivanja zaliha goriva su glavne prijetnje energetske sigurnosti i ekonomskom rastu. Zbog toga raste potražnja za pronalaskom alternativnih, obnovljivih izvora energije u cijelom svijetu (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012).

Kao jedno od mogućih rješenja za ublažavanje efekta staklenika, uz korištenje energije Sunca, vjetra i vode, nameću se i kruta biogoriva kroz izravno sagorijevanje biomase (Bilandžija i sur., 2013). Biomasa je jedna od visoko potencijalnih energenata u nastajanju, koja ima neto uravnoteženu emisiju CO<sub>2</sub>. Za korištenje biomase i drugih organskih otpadnih materijala potrebno je opsežno proučavanje njegovih fizikalnih, kemijskih i termodinamičkih svojstava (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012). Biomasa i njezini produkti uz to što su obnovljivi oni su i dovoljno slični fosilnim gorivima tako da je moguća njihova neposredna zamjena u postojećoj infrastrukturi. Potencijali biomase koja nastaje u poljoprivredi i šumarstvu su značajni. Njihovim iskorištenjem u energetske svrhe može se pridonijeti zaštiti okoliša, i ukupnom gospodarskom razvoju zemlje. Čine ju brojni proizvodi biljnog i životinjskog svijeta, a može se podijeliti na drvnu, nedrvnu te biomasu životinjskog podrijetla (Sušnik i Benković, 2007). Uz korištenje poljoprivredne lignocelulozne biomase, sve se više istražuju energetske usjevi zbog niskih zahtjeva i visokih prinosa.

Jedna od takvih kultura je višegodišnja trava miskantus. Danas je miskantus vodeća trajna poljoprivredna energetska kultura u Europi zbog svog visokog potencijala za prinos

suhe tvari i sposobnosti da raste na širokoj površini klimatskih uvjeta. Miskantus je produktivan na poljoprivrednim zemljištima nižeg stupnja, uključujući i slano tlo i zemljišta onečišćenim teškim metalima. Međutim, standardni genotip *M. giganteus* pokazuje ograničenja s obzirom na abiotičke stresove, osobito sušu, stoga su identificirani novi genotipovi među *M. sacchariflorus* kao i *M. sinensis* vrsta i hibrida koji su u sušnim uvjetima nadmašili *M. giganteus*. Biomasa trave miskantusa najčešće se koristi kao sirovina pri izravnom izgaranju za proizvodnju toplinske i električne energije putem kogeneracijskih sustava ili u pećima na kruta goriva za proizvodnju toplinske energije (Lewandowski i sur., 2018).

Jedno od najvažnijih svojstava goriva je ogrjevna vrijednost o kojoj ovisi energetski sadržaj i koja određuje učinkovitost upotrebe biomase (Acar i Ayanoglu, 2012). Ogrjevna vrijednost biomase neophodna je za provedbu energetske analize i projektiranje bilo kojeg bioenergetskog sustava. Eksperimentalne metode za procjenu ogrjevne vrijednosti su dugotrajne, skupe i imaju veću mogućnost pojave eksperimentalnih pogrešaka (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012). U literaturi se predlažu brojne jednadžbe za izračun ogrjevne vrijednosti goriva iz podataka dobivenih analizom biomase (Acar i Ayanoglu, 2012).

## **Cilj istraživanja**

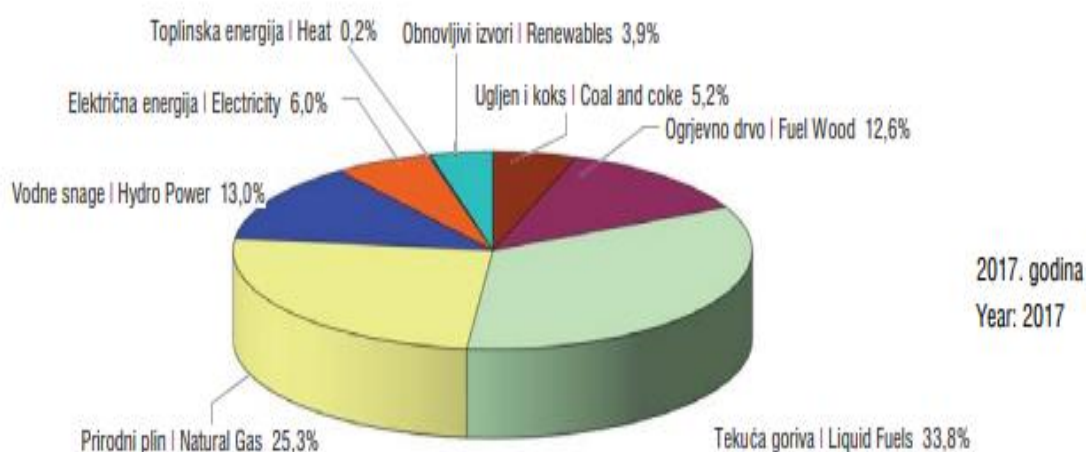
Cilj ovog rada je usporediti teorijske i empirijske ogrjevne vrijednosti novih genotipova hibrida miskantusa, kao i usporedba ostalih rezultata analiza.

## 2. Pregled literature

### 2.1. Obnovljivi izvori energije

U posljednjih nekoliko godina kombiniranje više čimbenika (smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, programi energetske učinkovitosti ili racionalnog korištenja energije, deregulacija i natjecanje, diversifikacija energetske izvora, zahtjevi za samoodrživosti nacionalnih energetske sustava...), dovelo do povećanog zanimanja za distribuiranu proizvodnju iz obnovljivih izvora energije. Utjecaj na okoliš jedan je od značajnih faktora u razmatranju priključenja novih proizvodnih objekata na mrežu (Šljivac i Šimić, 2009).

Rezerve nafte, plina i ugljena mogu i dalje postojati sljedećih nekoliko desetljeća, a energetske prijelaz na nižu razinu ispuštanja ugljika nužan je zbog suočavanja s neobuzdanim klimatskim promjenama. Obnovljivi i alternativni izvori energije drže ključ za rješavanje dvostrukog problema, energije i klimatskih promjena, s visokim početnim ulaganjima. Prijelaz s fosilnih goriva na obnovljive izvore energije zahtijeva velika ulaganja i inovativne tehnologije. Ekolozi savjetuju da se korištenje fosilnih goriva svede na najmanju moguću mjeru zbog njihovih štetnih učinaka na okoliš bez obzira na njihovu rezervu ili nestanak. Također, povezuju vrhunac proizvodnje nafte i plina s vrhuncem emisije CO<sub>2</sub>, koja stalno raste (402 ppm u 2014.). Ne postoji kemijski proces koji može očistiti volumen CO<sub>2</sub> iz atmosfere. Energetski stručnjaci počeli su razmišljati o održivim ugljikovodičnim gorivima recikliranjem H<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub> kao obnovljivi izvori energije. Postupak korištenja i sekvenciranja CO<sub>2</sub> (engl. *carbon capture and storage*, CCS) može pomoći pretvoriti CO<sub>2</sub> natrag u ugljikovodična goriva u prisutnosti H<sub>2</sub>O kao što se u prošlosti vegetacija i mrtve životinje pretvarala u fosilna goriva nekoliko desetaka milijuna godina (Abas i sur., 2015). Na slici 2.1.1. prikazan je udio potrošnje primarne energije u Republici Hrvatskoj 2007. godine.



Slika 2.1.1: Udjeli u potrošnji primarne energije u RH 2017. godine

Izvor: [http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2019/03/Energija2017\\_final.pdf](http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2019/03/Energija2017_final.pdf)

Obnovljivi izvori energije se u hrvatskom Zakonu o energiji definiraju kao: „Izvori energije koji su sačuvani u prirodi i obnavljaju se u cijelosti ili djelomično, posebno energija vodotoka, vjetra, neakumulirana sunčeva energija, biodizel, biomasa, bioplin, geotermalna energija itd.“ (NN68/2001).

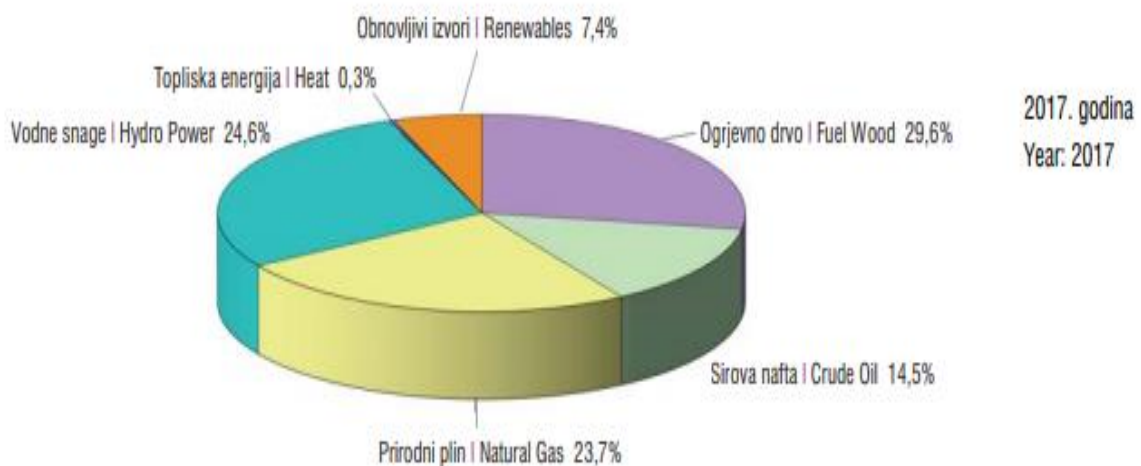
Obnovljivost pojedinog izvora energije najlakše se objasni ako se kaže da je obnovljiv izvor onaj čiji se prosječni dotok svake godine ponavlja, bez smanjenja – barem za ljudsko poimanje vremena. Za razliku od neobnovljivih izvora, obnovljivi oblici energije ne mogu se iscrpiti, ali je moguće u potpunosti iscrpiti njihove potencijale. Dio obnovljivih izvora energije nije moguće uskladištiti i transportirati u prirodnom obliku (vjetar, zračenje sunca), a dio jest (voda u vodotocima i akumulacijama, biomasa i bioplin). Izvore energije koje nije moguće uskladištiti treba iskoristiti u trenutku kad se pojave ili ih pretvoriti u neki drugi oblik energije (Šljivac i Šimić, 2009).

Općenito, nekonvencionalni izvori imaju ogroman potencijal za proizvodnju energije – poželjno svojstvo. Sa Sunca na tlo Hrvatske dostruji približno 500 puta više energije nego što je godišnja hrvatska potrošnja svih oblika energije. Male hidroelektrane predstavljaju ograničeni potencijal, kojega naprosto nema na znatnom dijelu ogromnih prostranstava globusa. Biomasa predstavlja velik, ali ipak znatno manji potencijal od energije Sunčeva zračenja. Geotermalna energija ima pri današnjem načinu korištenja ograničeni potencijal, ali prikriveni potencijal je ogroman ako dođe do prihvatljivog korištenja topline Zemljine unutrašnjosti s velikih dubina (Šljivac i Šimić, 2009).

Kod većine nekonvencionalnih izvora nema utroška energije prilikom pridobivanja izvornog oblika (kao što postoji značajan utrošak energije pri eksploataciji ugljenokopa), niti utroška energije za transport izvornog oblika, jer je transport u pravilu nemoguć. Zbog toga treba postrojenja za pretvorbu nekonvencionalnog izvora u povoljniji oblik izložiti djelovanju tog obnovljivog izvora. Jedino se kod ogrjevnog drveta, biomase i otpada javljaju ti utrošci energije. Primjerice, za sječu drvene mase, za pošumljavanje i uzgoj šume, za transport od mjesta sječe do mjesta korištenja te za pripremu drveta za korištenje, dolazi do utroška energije, koji mogu biti u tolikoj mjeri da cijela stvar postane neracionalna. Slično je s biomasom i otpadom, jedino tu može izostati utrošak pri uzgoju jer se uzgoj odvija neovisno od eventualnog energetskog korištenja (slama kao rezultat poljoprivredne proizvodnje pšenice, ili će istrnuti ili se energetski iskoristiti). Pod kumulativnom CO<sub>2</sub>-neutralnosti nekonvencionalnih izvora energije, smatra se neutralnost promatrana u ukupnom lancu – od pridobivanja energije, izrade i montaže pogonskih uređaja, do korištenja i zbrinjavanja nakon korištenja. Iako se često govori o CO<sub>2</sub>-neutralnosti apsolutno svih nekonvencionalnih izvora, najčešće se misli na neutralnost prilikom pretvorbe nekonvencionalnog oblika u iskoristiv oblik i tada je takvo gledanje točno. Za biomasu, to je dakako ispunjeno samo ukoliko je godišnje iskorištavanje mase jednako ili manje od godišnjeg prirasta nove mase. Tada će emisija CO<sub>2</sub> pri korištenju te biomase biti jednaka emisiji CO<sub>2</sub> prilikom fotosinteze te biomase. Sagorijevanje biomase izaziva emisiju plinova manje štetnih od konvencionalnih goriva jer praktički nema sumpora (kao u ugljenu ili nafti). Ipak je emisija iz tih postrojenja

nešto veća nego li iz konvencionalnih postrojenja, jer radi se o manjim jedinicama i manjem stupnju djelovanja pri pretvorbi energije (Šljivac i Šimić, 2009).

Od svih obnovljivih izvora energije, izuzevši velike hidroelektrane, najveći se doprinos u prevladavanju nastale situacije očekuje od biomase. Biomasa i njezini produkti uz to što su obnovljivi oni su i dovoljno slični fosilnim gorivima, što omogućuje njihovu direktnu zamjenu u postojećoj infrastrukturi. Značajan je izvor biomase koja nastaje u poljoprivredi i šumarstvu. Iskorištavanjem biomase u energetske svrhe može se pridonijeti zaštiti okoliša, otvaranju novih radnih mjesta, razvoju ruralne zajednice, a samim time i razvojem ukupnog gospodarstva zemlje. Unatoč značajnom potencijalu za proizvodnju energije, Republika Hrvatska biomasom pokriva samo mali dio potreba za energijom, a time znatan dio prirodnog bogatstva ostaje neiskorišten (Sušnik i Benković, 2007). Na slici 2.1.2. prikazani su udjeli u ukupnoj proizvodnji energije u Republici Hrvatskoj 2007. godine.



Slika 2.1.2: Udjeli u ukupnoj proizvodnji energije u RH, 2017. godine  
Izvor: [http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2019/03/Energija2017\\_final.pdf](http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2019/03/Energija2017_final.pdf).

## 2.2. Biomasa

Biomasa je prvi i najstariji izvor energije koji su ljudi koristili, a danas se smatra obnovljivim izvorom energije koji ima velik potencijal za iskorištenje i koji može pridonijeti zaštiti okoliša, otvaranju novih radnih mjesta i ukupnom gospodarskom razvoju cijele zemlje. Čine ju brojni proizvodi biljnog i životinjskog svijeta, a može se podijeliti na drvnu (ostaci iz šumarstva i drvne industrije, brzorastuće drveće, otpadno drvo iz drugih djelatnosti te drvo koje nastaje kao sporedni proizvod u poljoprivredi), nedrvnu (ostaci, sporedni proizvodi i

otpad iz bilinogojstva te biomasa dobivena uzgojem uljarica, algi i trava) te biomasu životinjskog podrijetla (otpad i ostaci iz stočarstva) (Sušnik i Benković, 2007).

Prema Direktivi 2009/28/EK, biomasa je biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog porijekla, dobivenih iz poljoprivrede (uključujući biljne i životinjske tvari), šumarstva i srodnih industrija, uključujući biorazgradivu frakciju industrijskog i komunalnog otpada. Proizvodnja biomase izravno je povezana sa uporabom tla, koja mora biti održiva. Održivost se postiže kada je proizvodnja biomase negativna ili neutralna tijekom životnog ciklusa. Kako bi se spriječilo natjecanje između proizvodnje hrane u odnosu na energiju u proizvodnji biomase, Direktiva RED (2009/28/EC) uvela je pojam "održive biomase". Taj je pojam dobio dodatnu moć i značaj nakon odluke Vijeća EU (2016/590) o potpisivanju Pariškog sporazuma o klimi (Krička i sur., 2017). Zbog vrlo širokog značenja samog pojma, proučavanje biomase vrlo je složeno. Biomasa je dugo vremena bila najupotrebljavaniji obnovljivi izvor, posebice za proizvodnju topline. U posljednje vrijeme biomasa se sve više počinje koristiti i za proizvodnju električne energije, kao i u obliku kogeneracije – kombinirane proizvodnje električne energije i topline (Ognjan i sur., 2007).

Pri definiranju poljoprivredne biomase često se koristi izraz „biogorivo“. Biogoriva proizvedena od same biomase mogu se podijeliti u nekoliko vrsta, u smislu oblika njihove krajnje uporabe i vrste sirovine iz koje se proizvode. Što se tiče njihove krajnje uporabe, biogoriva su klasificirana kao čvrsta, tekuća i plinovita (Krička i sur., 2017).

Biomasa je složena heterogena smjesa strukturnih organskih komponenti, kao što su celuloza, hemiceluloza i lignin. Karakterizacija tih komponenti (s obzirom na kvalitetu i količinu) u danoj biomasi je ključna za određivanje pristupa obradi biomase i za razumijevanje mehanizma reakcije biogoriva u njegovoj proizvodnji. Kvaliteta biomase je presudna za upotrebljivost, a često je povezana sa sadržajem različitih mikro i makroelemenata. Na takav elementarni sastav biomase obično utječu genetski određena svojstva, kao i okolišni uvjeti, kao što su karakteristike tla (plodnost, pH), vremenske značajke (oborine) i mjere za uzgoj biljaka - gnojidba. Znanje o sadržaju različitih elemenata u biomasi može biti korisno u odabiru metode pretvaranja biomase u energiju (Krička i sur., 2017).

Budućnost dobivanja energije iz biomase ovisi o složenom međudjelovanju četiri grupe čimbenika:

- 1) tehnologija pretvorbe te izgledi mogućnosti korištenja novih biljnih sorti i mikroorganizama uz nove metode pretvorbe koje povećavaju prinos iskoristive energije - realni kapacitet kopnenih i vodenih ekosustava na kojima je moguća proizvodnja biomase za energiju;
- 2) alternativni načini upotrebe energetske potencijalnih kopnenih i vodenih ekosustav;
- 3) implikacije tehnologija energije iz biomase na okolišne zagađivače te invazivne vrste (Field i sur., 2008).

Glavna prednost biomase kao energenta u odnosu na fosilna goriva je njena obnovljivosti, trajnost te manja emisija štetnih plinova i otpadnih voda. Računa se da je opterećenje atmosfere s CO<sub>2</sub> pri korištenju biomase kao goriva gotovo zanemarivo jer ako se



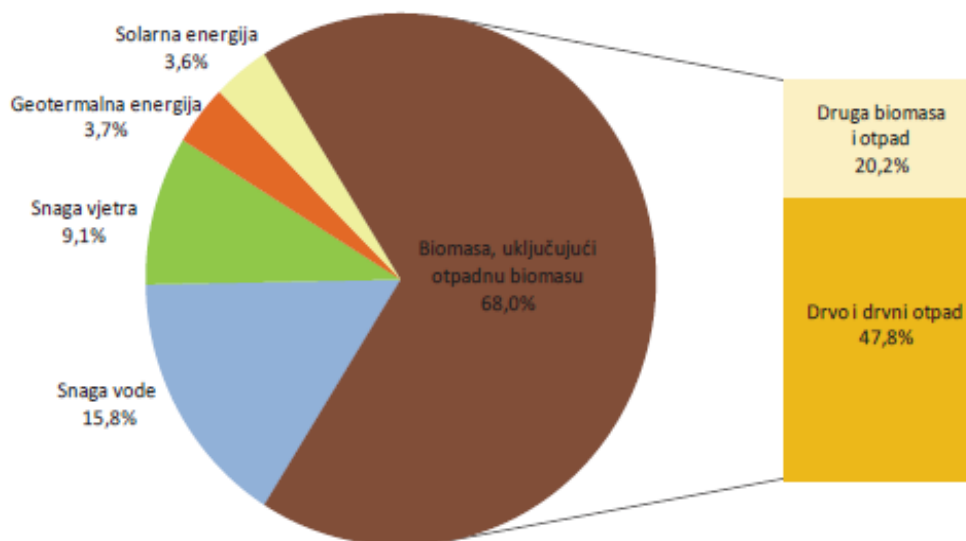
biomasa proizvodi održivo, rast drveća u šumi i druge biljne zajednice vezat će CO<sub>2</sub> iz atmosfere i pohranjivati ga u biljnu strukturu. Spaljivanjem biomase ugljik će se oslobađati u atmosferu da bi se opet asimilirao s novom generacijom biljaka. Tako korištenjem biomase umjesto fosilnih goriva, ugljik pohranjen u fosilnim gorivima ostaje u tlu, a ne oslobađa se u atmosferu kao CO<sub>2</sub> pa je ukupna bilanca jednaka nuli, odnosno biomasa se može smatrati CO<sub>2</sub>-neutralnim gorivima (Sušnik i Benković, 2007). Plinovi SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> koji nastaju izgaranjem fosilnih goriva, osim što imaju štetno djelovanje na zdravlje, poznati su i kao "kiseli" plinovi. Njihovom transformacijom prilikom izgaranja nastaju kiseli sastojci koji se talože iz atmosfere u obliku mokrog taloženja (kisele kiše) koje uništavaju biljnu zajednicu, i suhog taloženja. Plin NO<sub>x</sub> uzrokuje u najvećoj mjeri nastajanje fotooksidativnog plina ozona (O<sub>3</sub>), koji ima štetno djelovanje na zdravlje ljudi i vegetaciju. Najveće emisije plina ozona nastaju pri izgaranju ugljena dok su pri izgaranju biomase minimalne i uglavnom zanemarive. Izrazito značajan doprinos u smanjenju emisije ima korištenje biodizela u gradovima. Njegovo korištenje u vozilima - javnom gradskom prijevozu i osobnim automobilima prosječno smanjuje emisiju ugljikovodika za 50 %, emisiju ugljičnog monoksida za 60 % te emisiju čestica za čak 80 % (Sušnik i Benković, 2007).

Dodatne su prednosti zbrinjavanje i iskorištavanje otpada i ostataka iz poljoprivrede, šumarstva i drvne industrije, smanjenje uvoza energenta, ulaganje u poljoprivredu i nerazvijena područja i povećanje sigurnosti opskrbe energijom. Sigurnost opskrbe energijom jedan je od najznačajnijih strateških problema svake zemlje. Sadašnjom energetsom strategijom predviđa se da će tijekom narednih desetljeća znatnije porasti ovisnost RH o uvozu energije. Takva energetska budućnost vrlo je nepovoljna i gospodarski i politički zbog sve veće ovisnosti o uvozu energije i energenata, što je posebno vidljivo u vremenu sve izraženijih klimatskih promjena. Opstanak pojedinih ruralnih područja u RH ugrožen je visokom razinom iseljavanja koja danas raste do zabrinjavajućih brojki. Stoga, uzimajući u obzir značenje biomase za ruralna područja, podizanje energana na biomasu može imati pozitivne posljedice na ruralno tržište rada i to kroz izravno zapošljavanje, ali i kroz podršku pripadajućim djelatnostima i pratećoj industriji (Sušnik i Benković, 2007).

Iskorištenje biomase u Hrvatskoj ima dugu tradiciju, no zbog nedostatka svijesti o njenim prednostima i donedavno nedostatka poticaja, biomasa se u Hrvatskoj još uvijek uglavnom koristi u obliku ogrjevnog drva. Prema podacima dobivenim istraživanjem, s obzirom na veliki potencijal biomase u Hrvatskoj, povećanje njenog iskorištavanja u Hrvatskoj moglo bi rezultirati izravnim otvaranjem 5000 novih radnih mjesta te ukupno 60.000 radnih mjesta (izravno, neizravno i inducirano zapošljavanje). Hrvatska ima velik broj poljoprivrednih površina (posebice istočna Hrvatska), a svake godine nakon žetve ostaje oko četiri milijuna tona ostataka, od čega bi se 30 % moglo proizvesti oko 18 PJ (5 TWh) energije, što je oko 4 % ukupne potrošnje energije u Hrvatskoj 2005. Time bi se postigle emisijske uštede oko 1,5 milijuna tona CO<sub>2</sub>. Slične analize provedene su i za ostale tipove biomase, a procjenjuje se da ukupni energetske potencijal biomase u Hrvatskoj iznosi oko 50 PJ, čime bi se teoretski moglo pokriti 10 % ukupne potrošnje energije u Hrvatskoj. Republika Hrvatska ima razmjerno velike mogućnosti iskorištavanja biomase, posebice iz drvne industrije i

poljoprivrede. Budući da se većina električne energije u Hrvatskoj proizvodi u primorskim županijama (hidroelektrane), upotrebom biomase kao goriva, koje je pretežno prisutno u kontinentalnim županijama, došlo bi do uravnoteženja proizvodnje, kao i smanjenja opterećenja kontinentalnih termoelektrana. Isto tako, elektrane na biomasu mogu pomoći pri razvoju ruralnih područja i pridonijeti zapošljavanju stanovništva blizu lokacije same elektrane (Ognjan i sur., 2007).

Unatoč slaboj zastupljenosti biomase u ukupnom energetske sastavu Republike Hrvatske, zahvaljujući promjenama u energetske sektoru očekuje se da će se stanje promijeniti. Mogućnosti primjene biomase su velike - od proizvodnje toplinske i električne energije, zamjene fosilnih goriva bioplinom i biodizelom do mogućnosti suspaljivanja (*cofiring*, zamjena dijela fosilnih goriva u termoelektranama biomasom). Osim poticajnih mjera na razini države, ratifikacijom Kyotskog protokola Hrvatskoj se otvaraju nove mogućnosti za financijski povoljnije povećanje udjela biomase. Kyotski protokol naime zemljama potpisnicama omogućuje zadovoljenje emisijske kvote na više načina. To su vlastite mjere smanjenja emisija (u koje spada i primjerice povećanje udjela obnovljivih izvora energije, pa tako i biomase, u vlastitoj proizvodnji energije), a potom i mogućnost sudjelovanja na nekoj od shema trgovanja emisijama te sudjelovanje u projektnim mehanizmima (Pašičko i sur., 2007). Na slici 2.2.1. prikazana je potrošnja obnovljivih izvora energije u Europskoj uniji 2011. godine.



Slika 2.2.1: Potrošnja OIE u Europskoj uniji 2011. godine

Izvor: Bilandžija, 2014.

Poljoprivredna lignocelulozna biomasa posjeduje veliki energetske potencijal jer se dobiva iz ostataka primarnih poljoprivrednih i prehrambenih proizvoda. Međutim, sve se više istražuju trajni energetske usjevi zbog niskih zahtjeva kada se uzgajaju za proizvodnju biomase, kao i zbog značajnog prinosa biomase po hektaru. Ovi usjevi su dobro prilagođeni

za uzgoj na tlima lošije kvalitete gdje se ne natječu s proizvodnjom hrane. Uspostava takvih nasada u ruralnim područjima pruža mogućnost razvoja neovisnog obnovljivog izvora energije i ima pozitivan utjecaj na poljoprivrednu proizvodnju (Krička i sur., 2017). Kulture za proizvodnju energije (energetske kulture) su one koje su uzgojene isključivo za svrhu proizvodnje biomase. Cilj uzgoja energetske kulture je proizvodnja što veće količine biomase po jedinici površine s ciljem njezine pretvorbe u energiju. Energetske kulture mogu biti jednogodišnje ili višegodišnje. Višegodišnje biljke nemaju veće zahtjeve tijekom uzgoja. Mogućnost uzgoja na marginalnim tlima je veoma bitno kako bi se izbjegao sukob u proizvodnji hrane i energije. Jedna od takvih višegodišnjih kultura je i rizomska trava *Miscanthus x giganteus* (Bilandžija, 2014).

### 2.3. Miskantus

Miskantus je višegodišnja rizomska trava koja potječe iz istočne Azije. Pokusi u polju potvrdili su izvanrednu niskotemperaturnu C4 fotosintezu koja rezultira visokopotencijalnim prinosom biomase s malim zahtjevima. Prvi put je u Europu uvedena iz Japana u '30-ima od strane danskog biljnog kolekcionara Axel Olsena. Danas je miskantus vodeća trajna energetska trava u Europi zbog svog visokog potencijala za prinos suhe tvari i sposobnosti da raste na širokoj površini klimatskih uvjeta od južne do sjeverne Europe. Visok udio holoceluloze (celuloze + hemiceluloze) u staničnim stjenkama ga čine višenamjenskom sirovinom za pretvaranje u širok raspon materijala i koristi se u brojnim sustavima za proizvodnju energije. Trenutno, raznoliki i obećavajući hibridi se procjenjuju u različitim klimatskim uvjetima i na različitim tlima, uključujući i marginalna zemljišta manje pogodna za proizvodnju hrane, s ciljem opskrbe kvalitetne biomase za razne uporabe. Zemljopisna rasprostranjenost genotipova miskantusa u području porijekla, istočna Azija, pokazuje da *Miscanthus sinensis* i *Miscanthus sacchariflorus* imaju potencijal za rast u različitim klimatskim uvjetima, dok je *Miscanthus floridulus* ograničen na geografske širine ispod 30 °N. Prirodni hibrid *Miscanthus x giganteus* smatra se da se razvio iz *M. sinensis* i *M. sacchariflorus* (Lewandowski i sur., 2018). *Miscanthus x giganteus* je ujedno i najpoznatiji i najistraživaniji hibrid miskantusa. Na slici 2.3.1. prikazan je trogodišnji nasad *Miscanthus x giganteus*.



Slika 2.3.1: Trogodišnji nasad *Miscanthus x giganteus*  
Izvor: Bilandžija, 2014.

### 2.3.1. Taksonomija miskantusa

Miskantus pripada istoj porodici kao što su kukuruz, sirak i šećerna trska: *Andropogoneae*. Njegova morfološka i molekularna karakterizacija ukazuje na to da je usko povezana sa šećernom trskom i sirkom. Istraživanja ukazuju na različit broj vrsta za rod miskantus, u rasponu od 14 do 23 (Lewandowski i sur., 2018).

### 2.3.2. Genetski resursi

Široka geografska rasprostranjenost miskantusa u istočnoj Aziji dovela je do ogromne genetske raznolikosti i posljedično fenotipske varijacije. Ovaj raznolik genetski resurs se iskorištava u uzgojnim programima u Europi i Sjedinjenim Državama. Dok su cvjetovi *M. sinensis* i *M. sacchariflorus* imaju i antere i stigmum (dvodomni), većina genotipova miskantusa je jednodomna. Time se osigurava da sva sjemena proizvode rezultate i stoga je pogodan za "hibridni" uzgoj (Lewandowski i sur., 2018).

### 2.3.3. Ciljevi uzgoja

Za sve uzgojne programe miskantusa glavni je cilj povećati prinos biomase uz minimalne unose u različitim klimatskim uvjetima. U nedavnom projektu OPTIMISC,

identificirani su novi hibridi koji mogu nadmašiti *M. giganteus*, osobito u neoptimalnim uvjetima uzgoja kao što su suša, hladnoća ili salinitet. Prinos suhe tvari usjeva i energetski prinos po hektaru, koja ovisi o pretvorbi energije, glavni su kriteriji za procjenu učinkovitosti usjeva za proizvodnju bioenergije. Uzgoj nastoji maksimizirati prinos neto energije, poboljšanjem učinkovitosti korištenja resursa usjeva i biomase uz zadržavanje kvalitete za različite mogućnosti korištenja i održavanje visokog prinosa biomase. Karakteristike kakvoće biomase relevantne su pri odabiru genotipova za specifičnu upotrebu. Međutim, kompromisi između kvalitete i prinosa su česti. Rani sezonski genotipovi s niskim sadržajem vode, pepela, kalija (K) i klorida (Cl) su poželjni za potrebe izgaranja. Međutim, rano sezonski genotipovi *M. sinensis* koji pokazuju nizak sadržaj pepela, K i Cl imaju najniži prinos. Za izgaranje su poželjni visoki sadržaji lignina biomase miskantusa. Međutim, genotipovi s nižim sadržajem lignina su više pogodni za fermentaciju, kao što je anaerobna digestija i proizvodnja etanola (Lewandowski i sur., 2018).

#### 2.3.4. Energetska svojstva miskantusa

Istraživanja u Njemačkoj pokazuju da prinos energije vrste *M. giganteus* požnjevenog u prosincu varira između 187 i 528 GJ ha<sup>-1</sup>. Odgađanjem žetve prinos energije pada za 12-15 % između prosinca i veljače te za naknadnih 13 % između veljače i ožujka. To je povezano sa značajnim padom sadržaja vlage, pepela, dušika, klora i sumpora u biomasi uslijed gubitaka lisne mase, cvatova kao i translokacije elemenata u rizome. Odgađanjem žetve od jeseni do početka proljeća (ožujak, travanj), u narednoj godini se snižava prinos biomase, ali povećava kvaliteta sagorijevanja uslijed snižavanja vlage, pepela, klora i dušika. Nadalje, i iz ekonomskih razloga preporuča se kasna žetva kod sadržaja vlage u biomasi ispod 30 %, zbog nižih troškova sušenja. Gubici tijekom zime mogu dovesti do smanjenja prinosa biomase za 15-35 %, ali sušenjem na polju smanjuje se sadržaj vlage u samoj kulturi, što pozitivno utječe na kvalitetu sirovinu za sagorijevanje (Bilandžija i sur., 2013).

CEN/TS 14961 (2005.) norma za krutu biomasu, među ostalim sirovinama, propisuje i granične vrijednosti određenih parametara za travu *M. giganteus*. Obzirom da sadržaji vlage, hlapive tvari te fiksirani ugljik nisu definirani CEN/TS normom, navedeni parametri uspoređeni su s relevantnim literaturnim podacima. Dakle, navedena norma za *M. giganteus* propisuje donju ogrjevnu vrijednost 17,00-20,00 MJ kg<sup>-1</sup> i vrijednost pepela 1,00-6,00 %. Uspoređujući propisane i analizirane vrijednosti, može se uočiti da su istraživani uzorci u potpunosti sukladni propisanoj normi. Količina hlapivih tvari u krutim gorivima iz biomase je visoka te obično varira između 76,0 i 86,0 % u drvnoj biomasi, kao i fiksirani ugljik 15,0 i 25,0 %. Postotni udjeli sumpora i dušika (na svim lokacijama) ukazuju na ekološku vrijednost trave *M. giganteus* u neposrednoj proizvodnji električne i toplinske energije. Dobiveni podaci potvrdili su potencijal trave *M. giganteus* uzgojene u Republici Hrvatskoj u smislu visokokvalitetne i ekološki prihvatljive sirovine, kao CO<sub>2</sub>-neutralnog goriva, s ciljem održivog gospodarenja u sustavu zaštite okoliša (Bilandžija i sur., 2013).

### 2.3.5. Energetsko iskorištavanje

McKendry (2002.) navodi tri osnovna načina pretvorbe biomase: termokemijska, biokemijska te mehanička ekstrakcija s esterifikacijom. Biokemijske pretvorbe uključuju anaerobnu digestiju i alkoholnu fermentaciju, dok termokemijske uključuju izgaranje, pirolizu, uplinjavanje te likvefakciju. U biokemijskim biomasa se prethodno obrađuje i celuloza i hemiceluloza se hidroliziraju enzimatski na C6 i C5 šećere. Posljednjih godina razvijeni su sojevi kvasca koji mogu pretvoriti ne samo C6 već također C5 šećere u etanol, čime se omogućuje iskorištenje većeg dijela holoceluloze za proizvodnju biogoriva. Dok se u biokemijskoj konverziji može koristiti samo holoceluloza, u termokemijskoj pretvorbi se lignin može pretvoriti u biogorivo. Iz tog razloga, termokemijski način pretvorbe se obično primjenjuje za prerada drva ili drvnih sirovina, dok se biokemijske pretvorbe više koriste za poljoprivredne ostatke, kao što su pšenica i kukuruzna slama, koji imaju niži sadržaj lignina. Miskantus je prikladan dodatak takvim ostacima zato što se žanje u proljeće u vrijeme kada nema drugih ostataka (npr. pšenična slama ljeti, kukuruzna slama na jesen) (Lewandowski i sur., 2018). Najčešće se koristi za suspaljivanje s ugljenom i/ili samostalnim izravnim spaljivanjem za proizvodnju toplinske i/ili električne energije. Zbijanjem se mogu proizvoditi pelete/briketi za učinkovitije korištenje ili se može koristiti u „rinfuznom“ stanju (bale). Može se koristiti i u neenergetске svrhe (proizvodnja papira, građevinskog materijala, malča, plastike, prostirka za domaće životinje), kao i za poboljšanja strukture tla, smanjenje erozije, fitoakumulacije (Bilandžija, 2014).

#### 2.3.5.1. Izgaranje

Biomasa trave miskantusa najčešće se koristi kao sirovina pri izravnom sagorijevanju za proizvodnju toplinske i električne energije putem kogeneracijskih sustava ili u pećima na kruta goriva za proizvodnju toplinske energije, što u konačnici minimizira negativan utjecaj na okoliš prilikom procesa dobivanja energije. Za potrebe grijanja koristi se za izravno loženje termoelektrana i plamenika za biomasu manjeg obujma. Proizvodnja električne energije i kombinacija toplinske i električne energije (kogeneracija, CHP) uglavnom zahtijeva velike primjene (Lewandowski, I. i sur. 2018). Kogeneracijske sheme koriste otpadnu toplinu termalnih proizvodnih objekata bilo za industrijske procese ili grijanje te su vrlo dobar način povećanja ukupne energetske učinkovitosti. Obnovljivi izvori imaju znatno manju energetska vrijednost u usporedbi s fosilnim gorivima zbog čega su njihove elektrane manje veličine te geografski široko raspodijeljene i priključuju se uglavnom na distribucijsku mrežu (Šljivac i Šimić, 2009).

Pogodnost biomase za izgaranje ovisi o sadržaju pepela, kalija i klorida i ponašanju otopljenog pepela. Biomasa miskantusa ima ograničenja kvalitete za izgaranje uglavnom zbog visokog sadržaja kalija i klorida u usporedbi s drvnom biomasom. Za sadržaj K je navedeno da varira od 0,11 % do 1,2 % i Cl od 0,03 % do 0,16 %, ovisno o genotipu i vremenu

berbe. Visok sadržaj kalija dovodi do nižih temperatura topljenja pepela miskantusa, a kloridi mogu tvoriti korozivne spojeve koji potencijalno mogu oštetiti kotlove. Visoka točka taljenja pepela važna je za većinu tehnologija izgaranja biomase, koje su razvijene za drvenu biomasu i zahtijevaju minimalnu temperaturu taljenja pepela od 1200 °C za siguran rad. Međutim, dostupna je i tehnologija izgaranja koja može podnijeti nižu temperaturu taljenja ili koje zapravo zahtijevaju niske temperature topljenja pepela. Za *M. giganteus*, pepeo se topi na 900 °C. Postoje različite opcije za optimizaciju kvalitete biomase duž proizvodnog lanca, posebno na terenu. Vrijeme žetve ima snažan utjecaj na anorganske sastojke biomase, koji kasnije utječu ponašanje taljenja pepela. Za potrebe izgaranja, ožujak se smatra optimalnim mjesecom za žetvu u umjerenim područjima za uzgoj biomase s niskim udjelom kalija, klorida, pepela i vlage (Lewandowski i sur., 2018). Ukoliko sušenje nije moguće, žetva se ne smije provesti ako je sadržaj vlage iznad 15 do 17 %, kako bi materijal bio adekvatno skladišten. Budući da sušenje opterećuje ukupnu ekonomsku bilancu proizvodnje krutog goriva, može se utvrditi da je postignuta zadovoljavajuća vlaga požete sirovine (Bilandžija i sur., 2013).

#### 2.3.5.2. Bioplin

Primjena biomase miskantusa za proizvodnju bioplina trenutno se istražuje i još uvijek nije najpogodnija za praktična bioplinska postrojenja. Ima nekoliko izazova koji se moraju prevladati prije nego što se miskantus može smatrati glavnim usjevom za proizvodnju bioplina. Potrebno je pronaći optimalno vrijeme žetve, koje bi osiguralo visok prinos po površini i dobivanje odgovarajuće kvalitete biomase, uz održavanje dugoročne produktivnosti usjeva. Posebno je izazovno zbog žetve u proljeće koja je nepovoljna za anaerobnu digestiju biomase miskantusa. Gubici biomase tijekom zime smanjuju prinos bioplina. Osim toga, sadržaj lignina se povećava u odnosu na jesen i zimu i dovodi do niže kvalitete biomase za anaerobnu digestiju, jer lignin negativno korelira sa specifičnim prinosom bioplina. Zbog tog razloga, miskantus bi trebao biti ubran još kad je zelen prije zime. To bi dovelo do većeg prinosa i kvalitete biomase, ali u sljedećim godinama ugrožava prinos. Kvaliteta biomase za proizvodnju bioplina se smanjuje kako vegetacijski period napreduje, zbog procesa lignifikacije. Ranija žetva bi zahtijevala genotipove koji su tolerantni za zeleni rez, ali takvi još nisu identificirani. Tolerancija na zeleni rez uglavnom je povezana s preseljenjem ugljikohidrata u rizome koji su potrebni za nicanje i ponovni rast sljedećeg proljeća. To znači da je potrebno početi i dovršiti genotipove s poboljšanom tolerancijom na zeleni rez, ranijim premještanjem ugljikohidrata. Mogući čimbenici koji utječu na ovaj proces su cvjetanje i aktivno starenje. Novi genotipovi također nude potencijal za stvaranje manje lignificirane biomase. Međutim, takvi bi genotipovi također zahtijevali vrlo visok prinos biomase, jer je to i dalje najvažniji čimbenik koji utječe na prinos neto energije. U Europi, *M. giganteus* spada među genotipove s najviše prinosa i još uvijek je jedina komercijalno dostupna sorta. Zbog toga se preporuča da se za iskorištavanje bioplina bere u listopadu. Za održavanje dugoročne produktivnosti usjeva, hranjive tvari iskorištene dobivenom

biomasom treba zamijeniti primjenom digestata ili gnojiva. Zbog svoje višegodišnje prirode, visokog prinosa i poboljšanih metoda poslovanja, miskantus je obećavajući usjev za dobivanje velikih količina biomase, niske cijene, za anaerobnu digestiju (Lewandowski i sur., 2018).

#### 2.3.5.3. Tekuća goriva i biokemikalije

Miskantus nije tipičan usjev za proizvodnju tekućih goriva (biogoriva prve generacije), budući da ne sadrži ulja koja se mogu ekstrahirati i sadrži vrlo malo šećera. Njegova se biomasa može okarakterizirati kao lignocelulozna, s visokim sadržajem celuloze i holoceluloze (celuloza + hemiceluloza). Na sadržaj celuloze, hemiceluloze i lignina može utjecati izbor genotipa i vrijeme berbe biomase. Zbog sve većeg broja rafinerija biogoriva druge generacije širom svijeta, miskantus ima potencijal postati veliki usjev za biogoriva.

Osim proizvodnje biogoriva, pretvorba biomase u kemikalije za upotrebu u različitim primjenama, uključujući bioplastiku, trenutno je obećavajuće područje za istraživanje i razvoj s ciljem uspostavljanja biogospodarstva u kemijskoj industriji. Obje pretvorbe su prikladne za biokemijsku proizvodnju: npr. termokemijske za proizvodnju 5-hidroksimetilfurfurala i biokemijske za proizvodnju etanola. To omogućuje visokovrijednu primjenu biomase miskantusa, koja u isto vrijeme može pridonijeti osiguravanju potražnje biomase u rastućoj bioekonomiji (Lewandowski i sur., 2018).

#### 2.3.6. Produktivnost miskantusa diljem Europe

Prinosi zabilježeni u poljskim pokusima diljem Europe sa standardnim genotipom *M. giganteus* razlikuju se prema mjestu i datumu berbe. Općenito, prinosi su niži na mjestima s manje vode ili drugim abiotičkim stresovima. Oni se također smanjuju kada je žetva odgođena nakon najvećeg prinosa. Međutim, za postizanje najbolje kvalitete biomase za izgaranje žetva miskantusa se obično provodi u proljeće nakon potpunog starenja i preseljenja hranjivih tvari u rizome i nakon što se osuši u polju do < 14 % vlage (Lewandowski i sur., 2018).

#### 2.3.7. Ekološka učinkovitost

Budući da miskantus nije porijeklom iz Europe ili SAD-a, postoji zabrinutost oko nekontroliranog širenja ovog usjeva. Postoje dva potencijalno relevantna načina za takvo rasprostiranje: (1) preko puzavih rizoma i (2) preko sjemena. U više genotipova *M. sacchariflorus* uočeni su puzavi rizomi, stoga bi ih trebalo isključiti iz komercijalizacije. Genotipovi testirani u terenskim pokusima EU OPTIMISC-a koji su proizveli održivo sjeme pripadaju ili vrstama *M. sinensis* ili *M. sinensis* × *M. sacchariflorus*. Širenje putem sjemena je



pažljivo praćeno u istraŹivanjima. Širenje preko sjemena miskantusa relevantno za *M. sinensis* i *M. sinensis* × *M. sacchariflorus* hibrida - mogu se spriječiti pažljivim izborom genotipa. Zbog toga je potrebno izabrati genotipove koji ne stvaraju plodna sjemena ili se ne mogu širiti preko sjemena zbog klimatskih uvjeta odrećenog područja (Lewandowski i sur., 2018). Miskantus ima visok stupanj otpornosti na bolesti i štetoćine (ne koriste se pesticidi) i mogućnost racionalnog korištenja hranjivih tvari (dušika). *M. giganteus* je sterilna vrsta, ne postoji mogućnost nekontroliranog širenja (BilandŹija, 2014).

#### 2.3.8. Obnova zemljišta (fitoremedijacija)

Zbog svog učinkovitog recikliranja hranjivih tvari i malih zahtjeva za unosom, miskantus ima potencijal da raste na granićnim zemljištima. Zbog toga je i od interesa za uzgoj na kontaminiranom zemljištu u svrhu sanacije tla. Jedna studija koja je istraŹivala uzgoj miskantusa na tlima onećišćenim policikličkim aromatskim ugljikovodicima (PAH) dokazala je da uzgoj miskantusa ima pozitivan utjecaj na razgradnja PAH-a. Druga studija koja je testirala uporabu miskantusa u puferskim ispitivanjima za kontrolu ispiranja nitrata i izbjegavanje onećišćenja podzemnih voda pokazali su pozitivne rezultate, sa 60-70 % smanjenim ispiranjem nitrata. Također se može uzgajati u svrhu fitoekstrakcije ili fitostabilizacije kontaminanata tla. Na primjer, ima potencijala za sanaciju tla zagaćenim od cinka (Zn) fitoekstrakcijom, s tim da je *M. sinensis* najviše odgovarajući genotip jer ne pokazuje znaćajno smanjenje akumulacije biomase na tlima zagaćenim cinkom. Ostali zagaćivaći, kao kao barij (Ba) i nikal (Ni), također se mogu sanirati iz tla. Ispitivanje miskantusa na tlima zagaćenima teškim metalima pokazalo je da može pomoći u spriječavanju onećišćenja podzemnih voda putem fitostabilizacije teških metala. Budući da je miskantus višegodišnja energetska trava, ona može pridonijeti kolićini humusa u tlu tijekom godina (Lewandowski i sur., 2018).

#### 2.3.9. Tolerancija na abiotiski stres

Pokazalo se da je miskantus produktivan na poljoprivrednim zemljištima nićeg stupnja, ukljućujući i slano tlo i zemljišta onećišćenim teškim metalima. Mećutim, standardni genotip *M. giganteus* pokazuje ogranićenja s obzirom na abiotićeke stresove, osobito sušu. Stoga je cilj projekta OPTIMISC bio identificirati relevantne osobine i mehanizme otpornosti na abiotićeke stresove suše, slanih tala, hladnoću i mraz, koji su relevantni za proizvodnju miskantusa. Identificirani su genotipovi meću *M. sacchariflorus* kao i *M. sinensis* vrsta i hibrida koji su u sušnim uvjetima nadmašili *M. giganteus*. Tolerancija na sušu je osigurana kombinacijom osobina. Genotipovi tolerantni na salinitet identificirani su meću *M. sacchariflorus* i *M. sinensis* vrsta. *M. giganteus* nije dokazao toleranciju na salinitet. Najbolji genotipovi su oni koji koriste mehanizam koji aktivno sprječava nakupljanje iona u listovima i

tako minimiziraju oštećenje bitnih fizioloških procesa kao što je fotosinteza. Općenito, biljke s većim rizomima su tolerantnije na sol od biljaka s manjim rizomima. Procjena tolerancije na mraz otkrila je da postoje tolerantniji genotipovi od *M. giganteus* dostupni među *M. sinensis* i hibridnim tipovima. Tolerancija na hladnoću i mraz glavni su mehanizmi koji dopuštaju da se raspon europske proizvodnje miskantusa proširila dalje prema sjeveru i istoku (Lewandowski i sur., 2018).

## 2.4. *Miscanthus x giganteus*

Jedna od sirovina za proizvodnju CO<sub>2</sub>-neutralnih goriva je i višegodišnja energetska kultura *Miscanthus x giganteus*, koja tijekom energetskog iskorištenja emitira 0,131 kg CO<sub>2</sub> ekvivalenta kW h<sup>-1</sup> proizvedene struje, što je značajno manje u usporedbi s ugljenom koji emitira 0,990 kg CO<sub>2</sub> istog ekvivalenta. Glavne karakteristike kulture *M. giganteus* su visoki prinosi suhe tvari po jedinici površine (prosjeak 15-20 t ha<sup>-1</sup>), eksploatacija usjeva preko 15 godina te visoka energetska vrijednost (17,05 do 19,21 MJ kg<sup>-1</sup>). Obzirom da se žetva može obavljati od studenog (poslije pojave prvih jačih mrazeva) pa sve do početka novog ciklusa vegetacije (ožujak, travanj), u svakom se podneblju utvrđuje optimalni rok žetve s obzirom na trenutni sadržaj vlage i energetska svojstva. Rana žetva maksimizira prinos energije po ha, a kasna žetva ga smanjuje (Bilandžija i sur., 2013).

Energetska kultura *Miscanthus x giganteus* trenutno je jedna od kultura u EU čiji je uzgoj namijenjen proizvodnji biogoriva i bioproizvoda, no kao takva ima određenih nedostataka s aspekta otpornosti i produktivnosti uzgoja na tako širokom geografskom području. Razvoj novih genotipova ključan je za prevladavanje tih nedostataka (Kontek i sur., 2019).

*Miscanthus x giganteus* može doseći visinu od 4 metra, a prinosi (uz navodnjavanje) mogu doseći i do 40 t ha<sup>-1</sup>. Usjev zahtijeva ograničenu primjenu gnojiva i vrlo malo drugih unosa, a tlu dodaje značajne količine organske tvari (Krička, T. i sur. 2017). Biljka je kratkog dana te joj je rast i razvoj osjetljiv na odnos dana i noći. Tolerantan je na niske temperature te može razviti listove na temperaturama nižim od 10 °C, a korijenje može prezimiti na temperaturama nižim od -20 °C. Sterilni je hibrid, ne razvija sjeme nego se razmnožava vegetacijski. Razmnožava se obično pomoću rizoma, dok se u zadnje vrijeme ispituje mogućnost razmnožavanja kulturom meristema. Kao tehnologija za sadnju mogu poslužiti strojevi za sadnju krumpira i slično. Rizomi se sade na 100x100 cm razmaka, na dubinu od 5 do 10 centimetara (Erickson i sur., 2008).

*Miscanthus x giganteus* se dokazala kao zanimljiva energetska kultura za ublažavanje efekta staklenika, poglavito radi činjenice što tijekom izravnog sagorijevanja predstavlja CO<sub>2</sub>-neutralno gorivo. Provedene analize su potvrdile potencijal trave *M. giganteus*, u smislu energetski visokokvalitetne i ekološki prihvatljive sirovine za proizvodnju krutih biogoriva, s ciljem održivog gospodarenja u sustavu zaštite okoliša (Bilandžija i sur., 2013).

## 2.5. Ogrjevna vrijednost

Gornja ogrjevna vrijednost (engl. *higher heating value* - HHV) je jedno od najvažnijih svojstava goriva koja definira energetska sadržaj i koja određuje učinkovitost upotrebe biomase i fosilnih goriva (Acar i Ayanoglu, 2012). Ogrjevna vrijednost biomase neophodna je za provedbu energetske analize i projektiranje bilo kojeg bioenergetskog sustava (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012).

Da bi se biomasa koristila kao gorivo u proizvodnji toplinske i električne energije, potrebno je poznavati njezine ogrjevne vrijednosti, jer one predstavljaju pouzdanu mjeru za određivanje energetske sadržaja goriva. To se često izražava ili gornjom ili donjom ogrjevnom vrijednošću (Krička i sur., 2017).

Gornja ogrjevna vrijednost (HHV) odnosi se na toplinu koja je uklonjena izgaranjem goriva s izvornom i nastalom vodom u kondenziranom stanju, dok je niža ogrjevna vrijednost bazirana na plinovitoj vodi kao proizvodu. Viša ogrjevna vrijednost (HHV) sadrži latentnu toplinu produkata izgaranja vodene pare jer se vodena para može kondenzirati u tekućoj vodi. Odnos između više i niže toplinske vrijednosti: niža toplinska vrijednost (LHV) je korekcija HHV zbog vlage u gorivu (biomasi) ili vodene pare nastale tijekom izgaranja vodika u gorivu. Ogrjevna vrijednost goriva može se odrediti eksperimentalno korištenjem adijabatskog kalorimetra s bombom, koji mjeri promjenu entalpije između reaktanata i produkata (Acar i Ayanoglu, 2012). Osim toga, ogrjevna vrijednost se može odrediti izračunom s podacima dobivenim analizom sastava biomase.

### 2.5.1. Kalorimetar s bombom

Kalorimetar s bombom koristi se za određivanje gornje ogrjevne vrijednosti krutih i tekućih goriva, ali ova metoda je sofisticirana, dugotrajna i skupa. Viša ogrjevna vrijednost goriva (HHV), određena je kalorimetrijski standardnom metodom EN 14918:2010 metode (ispitivanje krutih i tekućih goriva, određivanje bruto kalorične vrijednosti kalorimetra s bombom i izračun neto kalorijske vrijednosti; metoda s adijabatskim plaštom). U bombu je umetnuta posuda s peletom koja je sadržavala oko 1.000 g biomase. Nakon zatvaranja bombe je napunjena kisikom (čistoća 99,99 %) pod tlakom od 30 bara. Bomba je postavljena u adijabatsku kalorimetrijsku opremu napunjenu vodom, a uzorak je zapaljen električno. Rezultirajuće povećanje temperature vode omogućuje izračun HHV uzorka. Toplinski kapacitet kalorimetra određen je korištenjem benzojeve kiseline kao referentne tvari. Tipične analize pogrešaka za uzorke biomase su u rasponu od  $\pm 60 \text{ kJ kg}^{-1}$ . Međutim, mjerenje je složen i dugotrajan proces koji zahtijeva postavljanje, mjerenje i proračun (Acar i Ayanoglu, 2012).

## 2.5.2. Izračunavanje gornje ogrjevne vrijednosti

Eksperimentalne metode za procjenu ogrjevne vrijednosti su dugotrajne, skupe i imaju veću mogućnost pojave eksperimentalnih pogrešaka (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012). HHV se određuje projektiranjem proračuna ili numeričkih simulacija sustava toplinske pretvorbe za goriva. U literaturi se predlažu brojne jednadžbe za izračun HHV goriva iz osnovnih podataka analize. Ogrjevna vrijednost biomase može se odrediti eksperimentalno ili se može izračunati iz elementarnih i/ili strukturalnih analiza. Eksperimentalno određivanje ogrjevne vrijednosti i strukturalne analize zahtijevaju posebne instrumente, dok se podaci iz elementarne analize mogu relativno jednostavno dobiti pomoću uobičajene laboratorijske opreme (Acar i Ayanoglu, 2012).

Elementarna analiza, tj. konačna analiza goriva nužna je za njihovu učinkovitu i čistu uporabu, dok HHV goriva određuje kvantitativni energetska sadržaj goriva. Postoji niz korelacija za predviđanje HHV-a iz elementarne analize goriva. Elementarnom analizom određuje se postotak ugljika (C), vodika (H), kisika (O), sumpora (S) i dušika (N) u gorivu. Vrijednosti ovih elemenata mogu se razlikovati ovisno o vrstama goriva. Konačna analiza može odrediti toplinsku vrijednost goriva. Količina S i N u gorivu pomaže u određivanju parametara projektiranja i rada sustava za proizvodnju bioenergije različitim termokemijskim procesima. Konačna analiza zahtijeva najskuplju opremu i visoko obučene analitičare (Acar i Ayanoglu, 2012).

Suprotno tome, strukturalna analiza je osnovna karakterizacija goriva i može se provesti na lakši, brži i jeftiniji način korištenjem standardne laboratorijske opreme i može je voditi bilo koji kompetentni znanstvenik ili inženjer (Acar i Ayanoglu, 2012). Strukturalna analiza daje podatke o vlazi, pepelu i hlapivim tvarima na osnovi postotka mase (Patel i Gami, 2012). Također određuje fiksirani ugljik, koji se izračunava oduzimanjem vlage, pepela i hlapljivih tvari iz ukupne biomase. Određuje i građu stanične stjenke, odnosno lignocelulozni sastav (lignin, celuloza i hemiceluloza) (Bilandžija, 2014). Strukturalna analiza dobra je kao početni pokazatelj kvalitete goriva (Acar i Ayanoglu, 2012).

### 2.5.2.1. Izračun gornje ogrjevne vrijednosti na temelju podataka o strukturalnim svojstvima

Na temelju strukturalne analize, u literaturi su predložene sljedeće formule. Između HHV i holoceluloze iz lignoceluloznih goriva nema izravne veze, ali postoje dobri odnosi između sadržaja lignina i utvrđenih HHV lignoceluloznih uzoraka biomase. Tako se ogrjevne vrijednosti biomase mogu izračunati korištenjem sadržaja lignina (L %) dobivenog jednostavnom kemijskom analizom. Gornja ogrjevna vrijednost ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) uzorka biomase kao funkcija L korelirana je korištenjem sljedeće jednadžbe:

$$1) \text{ HHV} = 0,0979L + 16,292,$$

za koje je kvadrat koeficijenta korelacije ( $R^2$ ) bio 0,9321. Postotak prosječne pogreške izračunat pomoću ove jednadžbe bio je jednak 3,3 (Acar i Ayanoglu, 2012.)

Razvijene su formule za izračunavanje gornje ogrjevne vrijednosti (HHV) goriva iz biomase iz podataka strukturalne analize. HHV ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) uzoraka biomase kao funkciju fiksiranog ugljika (FC, wt %) izračunat je iz jednadžbe:

$$2) \text{ HHV} = 0,196 \text{ FC} + 14,119,$$

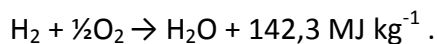
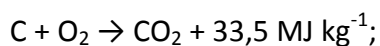
za koje je koeficijent korelacije 0,9997 (Acar i Ayanoglu, 2012).

Za izračunavanje HHV ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) iz rezultata o sadržaju FC i hlapivih tvari (VM %) predložena je sljedeća formula:

$$3) \text{ HHV} = 0,312\text{FC} + 0,1708\text{VM} \text{ (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012).}$$

2.5.2.2. Izračun gornje ogrjevne vrijednosti na temelju podataka o elementarnim svojstvima

Na temelju rezultata elementarne analize, predložene su sljedeće formule za izračun ogrjevne vrijednosti. Istražen je odnos između opaženih sadržaja HHV i C, H, O i N (tež. % daf) uzorka. Oksidacijska toplina C i H:



Tako se HHV ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) može izračunati iz:

$$1) \text{ HHV} = 0,335\text{C} + 1,423\text{H} - 0,154\text{O} - 0,145\text{N}.$$

Ova jednadžba dobivena korištenjem oksidacijskih toplina C i H i redukcije topline O, uz pretpostavku da je utjecaj sadržaja N biomase na HHV negativan (Acar i Ayanoglu, 2012).

$$2) \text{ HHV} = 0,4373\text{C} - 1,6701 \text{ (Acar i Ayanoglu);}$$

$$3) \text{ HHV} = 0,3516\text{C} + 1,16225\text{H} - 0,1109\text{O} + 0,0628\text{N} + 0,10465\text{S} \text{ (Saidur i sur., 2011).}$$

Nhuchen i Abdul Salamu (2012.) predlažu sljedeće linearne i nelinearne korelacije za procjenu HHV biomase:

a. Linearna korelacija je:  $\text{HHV} = 19.2880 - 0.2135 \times \text{VM/FC} + 0.0234 \times \text{FC/ASH} - 1.9584 \times \text{ASH/VM};$

b. Nelinearna korelacija je:  $HHV = 20.7999 - 0.3214 \times VM/FC + 0.0051 \times (VM/FC)^2 - 11.2277 \times ASH/VM + 4.4953 \times (ASH/VM)^2 - 0.7223 \times (ASH/VM)^3 + 0.0383 \times (ASH/VM)^4 + 0.0076 \times FC/ASH$  (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012).

Najbolja prednost jednadžbe za izračun HHV bilo kojeg goriva jednostavno iz njegove neposredne analize što time pruža koristan alat za modeliranje procesa izgaranja, gasifikacije i pirolize te se može koristiti za ispitivanje svih podataka (starih ili novih) za moguće pogreške u rezultatima koji su mnogo izvan predviđenih rezultata (Acar i Ayanoglu, 2012).

Ekperimentalni postupak određivanja gornje ogrjevne vrijednosti bilo kojeg goriva u laboratoriju je dugotrajan i skup pa izvođenje različitih korelacija olakšava i pojeftinjuje taj proces. Dakle, novi pristup za razvijanje korelacija je koristeći omjere nehlapivih, hlapivih i neorganskih sastojaka dobivenih neposrednom analizom biomase (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012).

## 3. Materijali i metode

### 3.1. Materijali

U istraživanju će se koristiti biomasa energetske kulture miskantus i to 5 hibrida križanaca *Miscanthus sacchariflorus* x *Miscanthus sinensis* (tzv. sac x sin hibrida), uzgojenih na pokušalištu Šašinovečki lug. Nasad je uspostavljen u 2018. godini, a žetva je bila u zimskom periodu. Uzorci će biti uzorkovani s 5 pozicija unutar pojedine uzgojne parcele, a analize će se provesti u 3 ponavljanja. Potom će se uzorci osušiti prirodnim putem sa zrakom okoline te usitniti u laboratorijskom mlinu (Slika 3.1.1) (IKA Analysetechnik GmbH, Njemačka) i na posljetku homogenizirati.



Slika 3.1.1: Laboratorijski mlin

### 3.2. Metode

Istraživanje je provedeno u svibnju 2019. godine. Sve su analize provedene u Laboratoriju za istraživanje biomase i energetske iskoristivost u poljoprivredi, Zavodu za poljoprivrednu tehnologiju, skladištenje i transport, Sveučilišta u Zagrebu, Agronomskog fakulteta.

### 3.2.1. Sadržaj vode

Analiza je za sve uzorke provedena u tri ponavljanja, vaganjem oko 2 grama uzorka. Određivanje sadržaja vode provodilo se tako da su svi uzorci osušeni u sušnici (Slika 3.2.1.1) na temperaturi od 105 °C tijekom 4 sata, odnosno dok nisu osušeni do konstantne mase. Sadržaj vode određen je utvrđivanjem razlike između mase uzorka prije i poslije sušenja sukladno standardnoj metodi HRN EN 18134-2:2015.



Slika 3.2.1.1: Laboratorijska sušnica

### 3.2.2. Sadržaj pepela

Pepeo je anorganski dio goriva koji ostaje nakon potpunog izgaranja. Analiza je provedena u tri ponavljanja za svaki uzorak, vaganjem oko 1 grama uzorka u porculanski lončić koji se nakon toga stavi u mufolnu peć. Sadržaj pepela u uzorcima određen je utvrđivanjem razlike između mase uzorka prije i poslije izgaranja u mufolnoj peći (Slika 3.2.2.1) (Nabertherm Controller B170, Njemačka) na temperaturi od  $550 \pm 10$  °C tijekom 4 sata, odnosno do konstantne mase, sukladno standardnoj metodi HRN EN ISO 18122:2015.





Slika 3.2.2.1: Mufolna peć

### 3.2.3. Sadržaj koksa

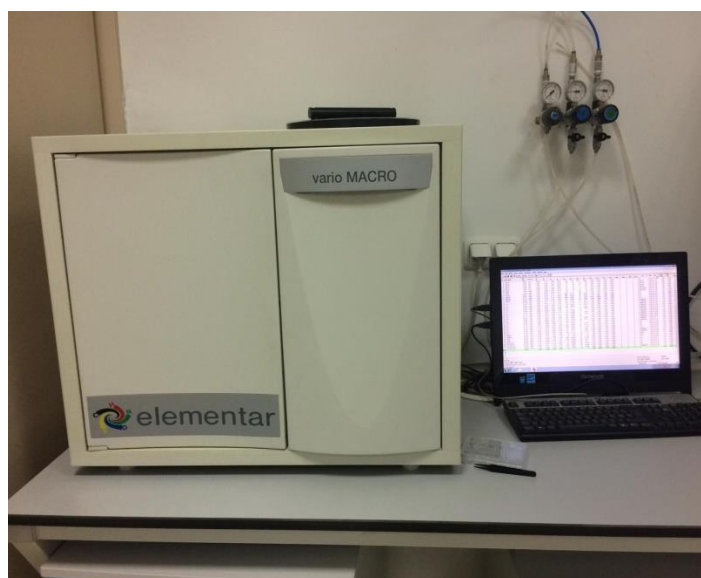
Analiza koksa predstavlja proces u kojem na vrlo visokoj temperaturi dolazi do izgaranja hlapivih tvari te zaostaje koks. Pri temperaturi od oko 450 °C dolazi do nestanka plamena nakon čega se zaostali koks zagrijava sve do 900 °C. Sadržaj koksa određuje se izgaranjem uzorka u mufolnoj peći (Slika 3.2.3.1), pri temperaturi od 900 °C u trajanju od 5 minuta, sukladno metodi za određivanje koksa CEN/TS 15148:2009. Utvrđivanjem razlike u masi uzorka prije i nakon izgaranja dobiven je udio koksa u uzorcima.



Slika 3.2.3.1: Određivanje sadržaja koksa u mufolnoj peći

### 3.2.4. Ukupni ugljik, vodik, dušik i sumpor

Analiza je provedena u tri ponavljanja za svaki uzorak. Određivanje ukupnog ugljika, vodika, dušika i sumpora (CHNS), provedeno je metodom suhog spaljivanja na Vario, Macro CHNS analizatoru (Slika 3.2.4.1.) (Elementar Analysensysteme GmbH, Njemačka) prema protokolima za ugljik, vodik i dušik (HRN EN 16948:2015) te sumpor (HRN EN 15289:2011). Postupak se bazira na spaljivanju uzorka u struji kisika na 1150 °C uz prisutnost volfram (VI) oksida u ulozi katalizatora. Prilikom spaljivanja oslobađaju se plinovi NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O. U redukcijskoj koloni, koja je zagrijana na 850 °C, uz djelovanje bakra kao redukcijskog sredstva, NO<sub>x</sub> plinovi se reduciraju do N<sub>2</sub>, a SO<sub>3</sub> plinovi do SO<sub>2</sub>. Nastale N<sub>2</sub> plinove, helij (plin nosilac) nosi direktno na detektor TCD (termo-vodljivi detektor). Dok ostali plinovi, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> prije dolaska na detektor prolaze kroz adsorpcijske kolone za CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i SO<sub>2</sub>.



Slika 3.2.4.1: CHNS analizator

Sadržaj kisika izračunava se računski:

$$\text{Kisik (\%)} = 100 - \text{C (\%)} - \text{H (\%)} - \text{N (\%)} - \text{S (\%)}$$

### 3.2.5. Fiksirani ugljik

Pojam fiksirani ugljik (FC) se odnosi na krutu frakciju koja ostaje nakon isparavanja hlapivih komponenti. Uglavnom se sastoji od ugljika, ali i određene količine vodika, kisika, sumpora i dušika. Može se odrediti računski sukladno EN 15148:2009:

$$\text{Fiksirani ugljik (\%)} = \text{koks (\%)} - \text{pepeo (\%)}$$

### 3.2.6. Hlapive tvari

Pojam hlapivih tvari odnosi se na komponente goriva koje se oslobađaju kada se gorivo zagrijava pri visokim temperaturama, ne isključujući vodenu paru. Hlapiva tvar sadrži zapaljive (CxHy plinovi, CO i H<sub>2</sub>) i nezapaljive plinove (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>). Biomasa općenito ima vrlo visoki sadržaj hlapivih tvari, s vrijednostima oko 75%, ali one mogu narasti do 90%, ovisno o uzorku (Khan i sur., 2009). Zbog visokog sadržaja hlapivih tvari, biogoriva su lako zapaljiva čak i pri relativno niskim temperaturama, u usporedbi s nekim drugim fosilnim gorivima poput ugljena. Sadržaj hlapivih tvari izračunava se računski sukladno CEN/TS 15148:2009:

Sagorive tvari (%) = 100 - Sadržaj pepela (%) - Sadržaj vode (%);

Hlapive tvari (%) = Sagorive tvari (%) - Fiksirani ugljik (%).

### 3.2.7. Utvrđivanje lignoceluloznog sastava

Određivanje udjela celuloze, hemiceluloze i lignina provedeno je modificiranom standardnom metodom ISO 5351-1:2002.

### 3.2.8. Ogrjevna vrijednost

Kalorimetrija je eksperimentalni postupak za određivanje gornje ogrjevne vrijednosti (eng. higher heating value, HHV). Gornja je ogrjevna vrijednost (H<sub>g</sub>) utvrđena korištenjem standardne ISO metode (HRN EN 14918:2010) u adijabatskom kalorimetru IKA C200 Analysentechnik GmbH, Njemačka (Slika 3.2.8.1). U kvarcnu posudicu odvagano je oko 0,5 grama uzorka koji je potom u kontroliranim uvjetima spaljen u kalorimetru. Gornja ogrjevna vrijednost svih uzoraka dobivena je korištenjem IKA C200 programskog paketa kalorimetra. Analize su provedene u tri ponavljanja za svaki uzorak.

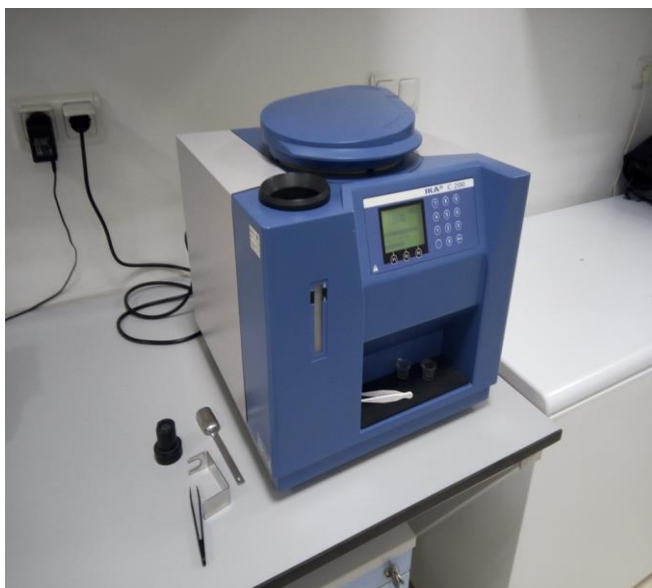
Donja je ogrjevna vrijednost (H<sub>d</sub>) utvrđena računski pomoću formule:

$$H_d \text{ (J kg}^{-1}\text{)} = H_g \text{ (J kg}^{-1}\text{)} - \{2441.80 * \text{ (J kg}^{-1}\text{)} [8.936^{**} \times H \text{ (}\%\text{)}]\} / 100.$$

Pri čemu je:

\* Energija potrebna za isparavanje vode

\*\* Odnos molekularne mase između H<sub>2</sub>O i H<sub>2</sub>.



Slika 3.2.8.1: Adijabatski kalorimetar



Slika 3.2.8.2: uzorak za kalorimetriju

### 3.3. Statistička analiza

Usporedba teorijskih i empirijskih ogrjevnih vrijednosti hibrida miskantusa testiran je analizom varijance (ANOVA).

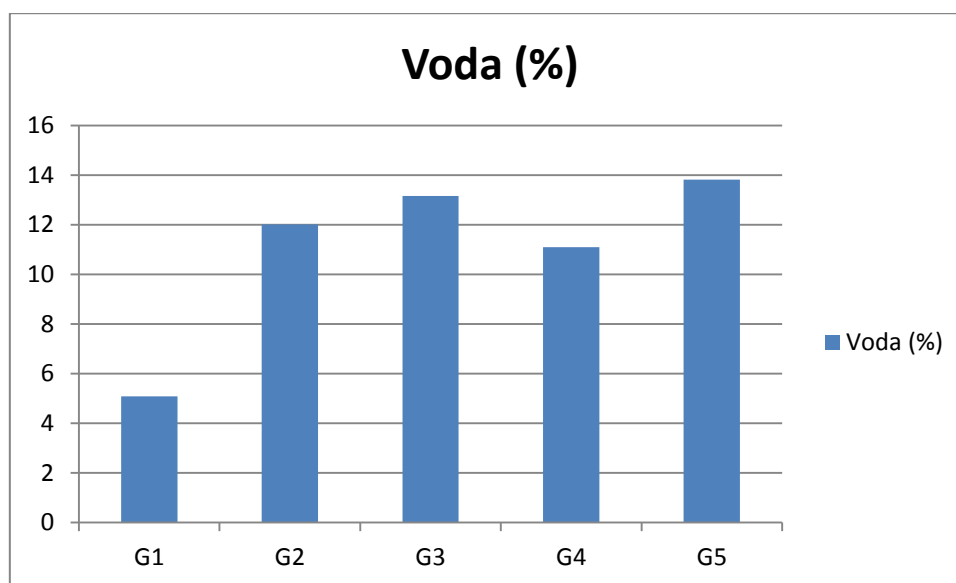
Razlike između aritmetičkih sredina pojedinih formula, za svojstva za koja se njihov utjecaj pokazao signifikantnim, testirane su t-testom uz Bonferronijevu korekciju. Početni prag signifikantnosti bio je 5 % (0,05).

## 4. Rezultati i rasprava

Za usporedbu energetske vrijednosti ispitivane biomase križanaca *Miscanthus sacchariflorus* x *Miscanthus sinensis*, potrebno je bilo istražiti gorive i negorive tvari sadržane u njoj. U biomasi su gorive tvari ugljik, vodik i klor, dok su kisik, dušik, vlaga i pepeo negorivi (Krička i sur., 2012).

### 4.1. Rezultati analiza sastava miskantusa

Na slici (4.1.1) prikazane su srednje vrijednosti sadržaja vode u istraživanim genotipovima miskantusa. Vlaga u gorivima ima sljedeće učinke: apsorbira dio topline oslobođene u procesu izgaranja. Kao rezultat, smanjuje se neto korisna toplina iz goriva i temperatura peći, a dolazi i do gubitka topline iz snopa. Vlaga također smanjuje brzinu izgaranja, posebno u slučaju velikih veličina komada goriva. Gorivo iz biomase može se podijeliti u dvije kategorije: s visokim postotkom (> 40 %) i niskim postotkom vlage (6-16 %). Veći sadržaj vode smanjuje ogrjevnu vrijednost, što rezultira slabijim iskorištenjem goriva (Patel i Gami, 2012).

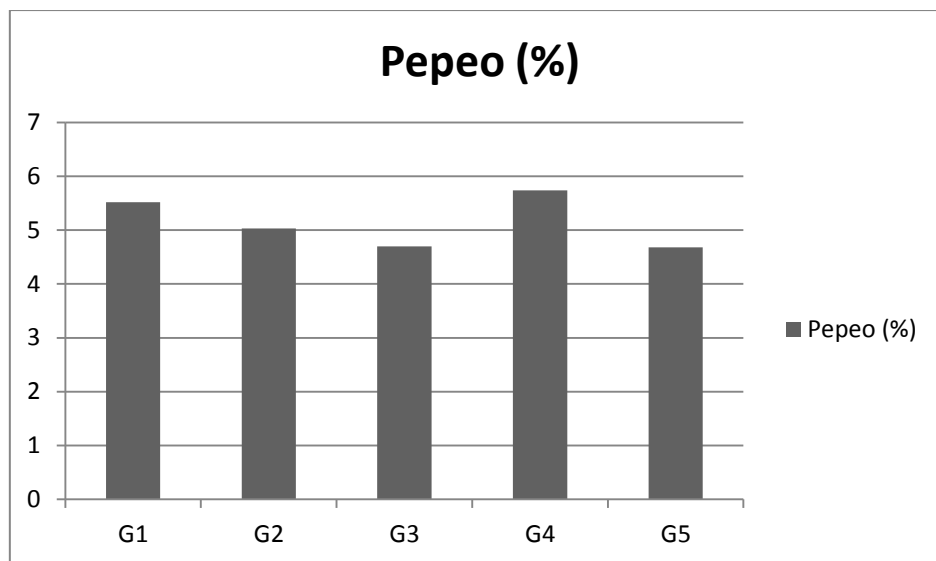


Slika 4.1.1: Sadržaj vode (%) u istraživanim sac x sin hibridima

Bilandžija i sur. (2016.) u svom istraživanju navode rezultate za sadržaj vode u vrijednosti od 24,45 % za *Miscanthus x giganteus*. Sadržaj vode u 5 analiziranih sac x sin hibrida miskantusa u ovom istraživanju kretao se u prosjeku od 11,03 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja vode od 7,22 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek sadržaja vode kretao se u vrijednosti od 4,64 %. Dobivene vrijednosti sadržaja vode za istraživane hibride miskantusa su manje od vrijednosti dobivene za *Miscanthus x giganteus*, ali više u usporedbi s drugim

kulturama. Na razlike utječu razlike u sorti i kulturama, vrijeme sušenja, klimatske prilike i veličina korištene biomase.

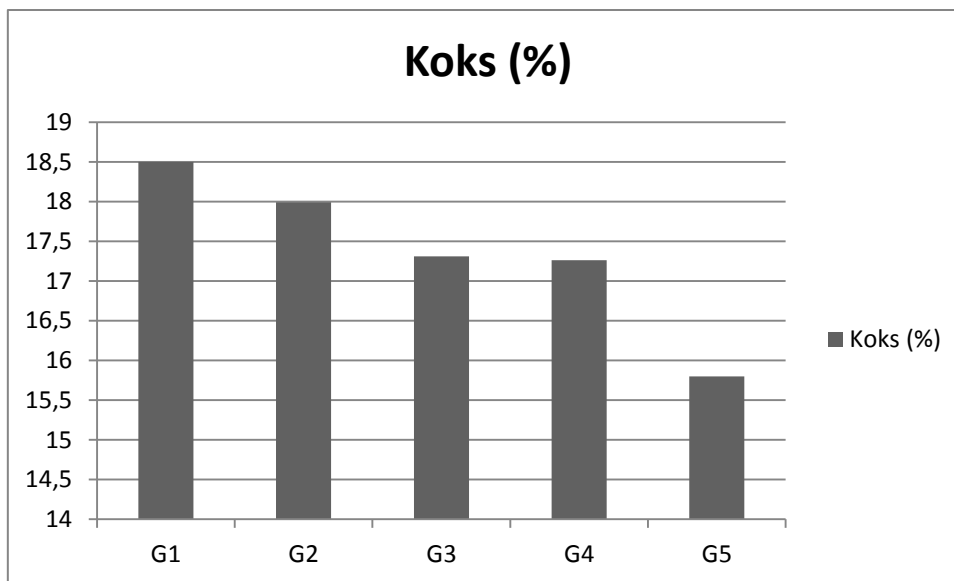
Na slici (4.1.2) prikazane su srednje vrijednosti sadržaja pepela u istraživanim genotipovima miskantusa. Pepeo je jedno od istraživanih svojstava biomase. Štoviše, nepoželjan je sastojak u biomasi zbog katalitičkog utjecaja na toplinsku razgradnju. Također, veća koncentracija pepela rezultira višom količinom ugljika i koncentracije plina (Bilandžija i sur., 2016.) Pepeo se sastoji od negorivih mineralnih čestica, a gorivo s većim sadržajem pepela ima lošiju kvalitetu (Krička i sur. 2012) jer sprječava pravilnu distribuciju zraka (Patel i Gami, 2012).



Slika 4.1.2: Sadržaj pepela (%) u istraživanim sac x sin hibridima

Bilandžija i sur. (2017.) u svom istraživanju navode rezultate za sadržaja pepela u vrijednosti od 1,49 % za *Miscanthus x giganteus*. Sadržaj pepela u 5 analiziranih sac x sin hibrida miskantusa u ovom istraživanju kretao se u prosjeku od 5,13 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja pepela od 2,84 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek sadržaja pepela kretao se u vrijednosti od 5,85 %. Vrijednosti sadržaja pepela dobivenih u ovom istraživanju su više u usporedbi s drugim energetsom kulturama.

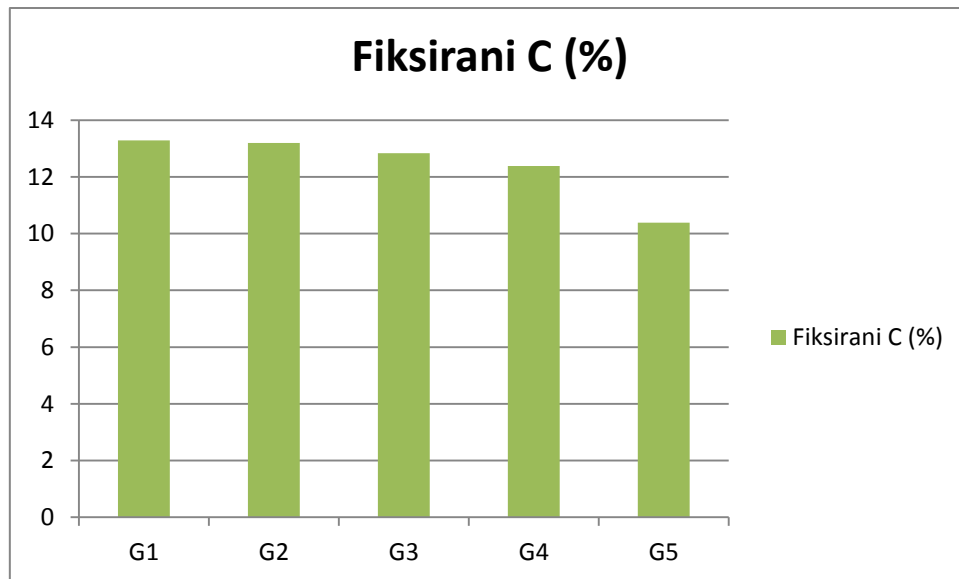
Na slici (4.1.3) prikazane su srednje vrijednosti sadržaja koksa u istraživanim genotipovima miskantusa. Koks je poželjna komponenta u gorivu. Nastaje pri visokim temperaturama, oko 450 °C, kada prestaje izgaranje hlapivih tvari, dolazi do nestanka plamena, te počinje izgaranje koksa, koji povećava temperaturu sve do 900 °C (Boboulos, 2010.).



Slika 4.1.3: Sadržaj koka (%) u istraživanim sac x sin hibridima

Sadržaj koka je poželjno svojstvo sirovine (Boboulos, 2010). Sadržaj koka u 5 istraživanih sac x sin hibrida miskantusa u ovom istraživanju kretao se u prosjeku od 17,37 %. U usporedbi s drugom energetskom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja koka od 7,85 %. Vrijednosti sadržaja koka dobivene u ovom istraživanju su znatno više u usporedbi sa istraživanjem provedenim na *Sida hermaphrodita* pa je prema tome povoljniji za energetska iskorištavanje.

Na slici (4.1.4) su prikazane srednje vrijednosti udjela fiksiranog ugljika (FC) u istraživanim genotipovima miskantusa. Fiksirani ugljik jedan je od najvažnijih sastavnica goriva i predstavlja čvrsto vezani ugljik u biomasi (Krička i sur. 2012). Uz pepeo, predstavlja kruti ostatak nakon gorenja, odnosno ispuštanja hlapivih tvari. Fiksirani ugljik predstavlja količinu ugljika vezanog u biomasi fotosintezom: što je veći udio fiksiranog ugljika, to je veća kvaliteta biomase za gorivo zbog povećane količine vrijednost grijanja (Bilandžija i sur., 2016). Sadržaj fiksiranog ugljika, odnosno njegova vrijednost dobivena je računski iz prethodno provedenih analiza.



Slika 4.1.4: Udio fiksiranog ugljika % u istraživanim san x sin hibridima

U svom istraživanju Nhuchhen i Abdul Salam (2012.) navode rezultate za udio fiksiranog ugljika u vrijednosti od 12,4 % za miskantus. Udio fiksiranog ugljika u 5 analiziranih sac x sin hibrida miskantusa u ovom istraživanju kretao se u prosjeku od 12,41 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost udjela fiksiranog ugljika od 5,09 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek udjela FC kretao se u vrijednosti od 17,81 %. Rezultati ovog istraživanja za sadržaj fiksiranog ugljika se poklapaju sa istraživanjem provedenim na *Miscanthus x giganteus*, dok *Sida hermaphrodita* ima niži sadržaj. Pošto je veći sadržaj fiksiranog ugljika poželjan za korištenje biomase kao goriva, miskantus je povoljnija kultura.

U tablici (4.1.1) su prikazane srednje vrijednosti sadržaja ugljika, vodika, dušika, sumpora i kisika u istraživanim genotipovima miskantusa. Ugljik je najvažnija goriva komponenta, a vrijednost zagrijavanja biomase povećava se sa sadržajem CO<sub>2</sub>. Vodik je drugi najvažniji element i dio vodika koji je vezan na ugljik, tzv. slobodni vodik, aktivan je u stvaranju biomase, stvarajući vodu i oslobađajući toplinu te na taj način povećava toplinsku vrijednost goriva. Sumpor i klor su nepoželjni elementi, a u biomasi se nalaze u tragovima. Sumpor je vrlo štetan za okoliš ako se veže na organsku tvar. Dušik ne razvija toplinu niti sudjeluje u procesu izgaranja i smanjuje vrijednost grijanja goriva (Krička i sur., 2012). Koncentracije dušika i sumpora bi trebale biti što niže jer utječu na emisije štetnih plinova (NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub>) (Bilandžija i sur., 2016). Kisik je također nepoželjan element u biomasi jer veže ugljik (element za izgaranje) i, poput dušika, smanjuje toplinsku vrijednost goriva (Krička i sur., 2012).



Tablica 4.1.1: Sadržaj CHNSO (%) u istraživanim sac x sin hibridima

METODA	G1	G2	G3	G4	G5
C (%)	49,59	48,86	49,74	49,37	49,7
H (%)	3,9	3,91	3,91	3,93	3,91
N (%)	1,54	1,3	1,03	1,4	0,74
S (%)	0,13	0,12	0,12	0,12	0,1

Bilandžija i sur. (2017.) u svom istraživanju navode rezultate za sadržaj ugljika u vrijednosti od 48,75 % za *Miscanthus x giganteus*. Prosjek sadržaja ugljika u ovom istraživanju iznosi 49,45 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja ugljika od 50,08 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek sadržaja ugljika kretao se u vrijednosti od 46,04 %. Dobivene vrijednosti svih navedenih istraživanja su slične.

Bilandžija i sur. (2016.) u svom istraživanju navode rezultate za sadržaj vodika u vrijednosti od 3,57 % za *Miscanthus x giganteus*. Prosjek udjela vodika u ovom istraživanju iznosi 3,19 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja vodika od 6,10 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek sadržaja vodika kretao se u vrijednosti od 6,19 %. Dobivene vrijednosti za istraživanje na miskantusu za sadržaj vodika su niže u usporedbi s navedenim istraživanjima, što je neželjena komponenta s obzirom da vodik povećava ogrjevnu vrijednost.

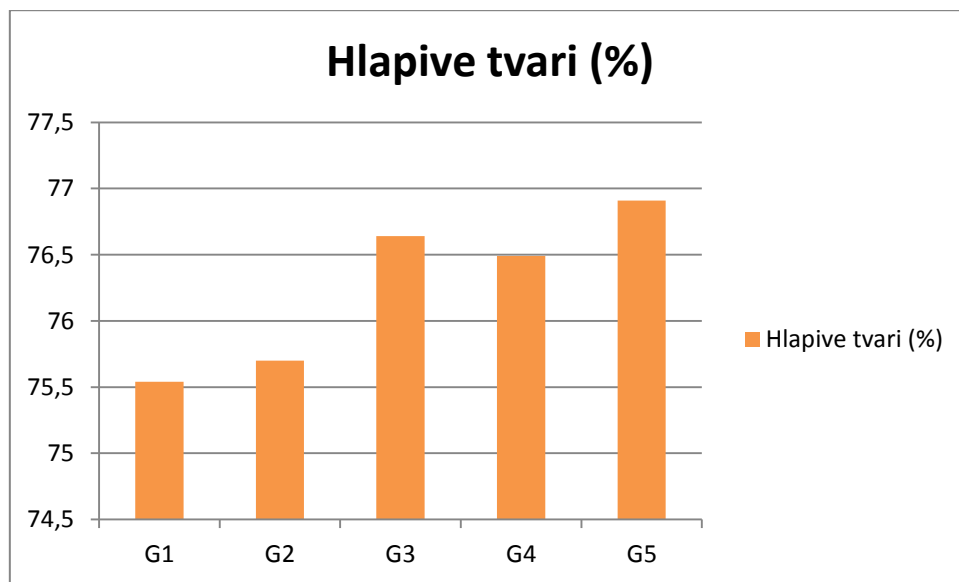
Bilandžija i sur. (2017.) u svom istraživanju navode rezultate za sadržaj dušika u vrijednosti od 0,47 % za *Miscanthus x giganteus*. Prosjek udjela dušika u ovom istraživanju iznosi 1,2 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja dušika od 0,65 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek sadržaja dušika kretao se u vrijednosti od 0,51 %. U usporedbi s navedenim istraživanjima, prosječna vrijednost 5 analiziranih hibrida miskantusa za sadržaj dušika je viša od ostalih, što je nepovoljno jer dolazi do emisije štetnih plinova.

Bilandžija i sur. (2017.) u svom istraživanju navode rezultate za sadržaj sumpora u vrijednostima od 0,07 % za *Miscanthus x giganteus*. Prosjek udjela sumpora u ovom istraživanju iznosi 0,11 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja sumpora od 0,23 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek sadržaja sumpora kretao se u vrijednosti od 0,23 %. Prosječne vrijednosti za sadržaj sumpora u svim navedenim istraživanjima su niske što je poželjna komponenta jer je smanjena emisija plinova sa sumporom koji su štetni za okoliš.

Bilandžija i sur. (2016.) u svom istraživanju navode rezultate za sadržaj kisika u vrijednosti od 49,31 % za *Miscanthus x giganteus*. Prosjek udjela kisika u ovom istraživanju iznosi 45,31 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i

sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja kisika od 42,95 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek sadržaja kisika kretao se u vrijednosti od 46,04 %. Vrijednosti dobivene u ovom istraživanju za sadržaj kisika su nešto više u usporedbi sa *Sida hermaphrodita* što je nepovoljno jer kisik smanjuje ogrjevnu vrijednost.

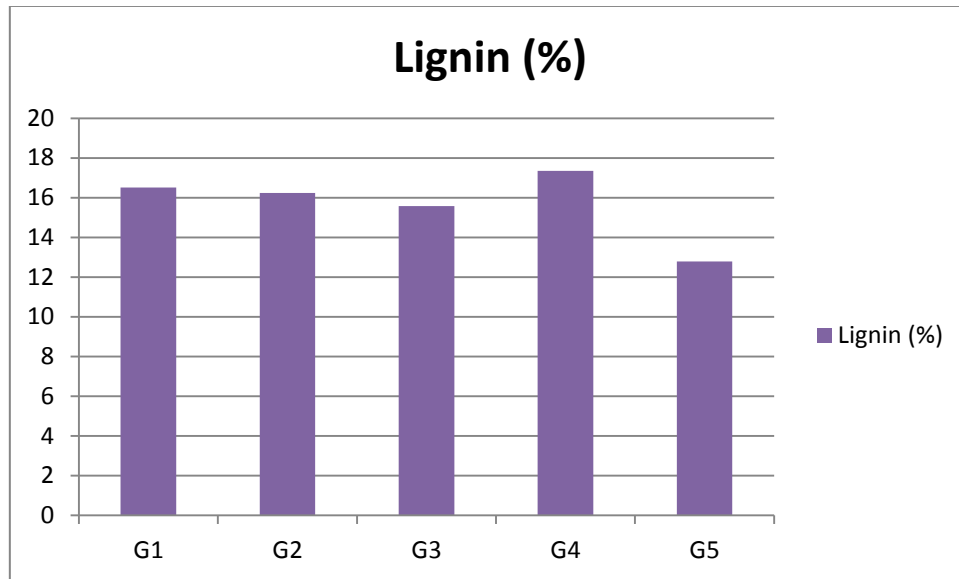
Na slici (4.1.5) prikazane su srednje vrijednosti sadržaja hlapivih tvari u istraživanim genotipovima miskantusa. Zagrijavanjem goriva iz biomase oslobađaju se hlapive tvari (zapaljivi plin i dim). Ako je sadržaj hlapivih tvari u gorivu visok, potpuno sagorijevanje dovodi do tamnog dima, gubitka topline, opasnosti od onečišćenja i taloženja čađe na površinama kotla (Patel i Gami, 2012). Goriva s većim udjelom hlapivih tvari imaju nižu energetska vrijednost, tj. trebaju veću energiju aktivacije od goriva koja sadrže manje hlapljive tvari pa je poželjno da imaju što manji sadržaj u biomasi (Krička i sur. 2012).



Slika 4.1.5: Sadržaj hlapivih tvari (%) u istraživanim sac x sin hibridima

U svom istraživanju (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012.) navode rezultate za sadržaj hlapivih tvari u vrijednosti od 87,20 % za miskantus. Prosječna vrijednost sadržaja hlapivih tvari 5 analiziranih sac x sin hibrida miskantusa u ovom istraživanju je 76,25 %. U usporedbi s drugom energetska kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost sadržaja hlapivih tvari od 84,90 %. U istraživanju na pšenici (Krička i sur. 2012.) prosjek sadržaja hlapivih tvari kretao se u vrijednosti od 75,44 %. Usporedbom dobivenih vrijednosti sadržaja hlapivih tvari s navedenim istraživanjima, može se utvrditi da je vrijednost hibrida miskantusa niža od ostalih, što je povoljna karakteristika.

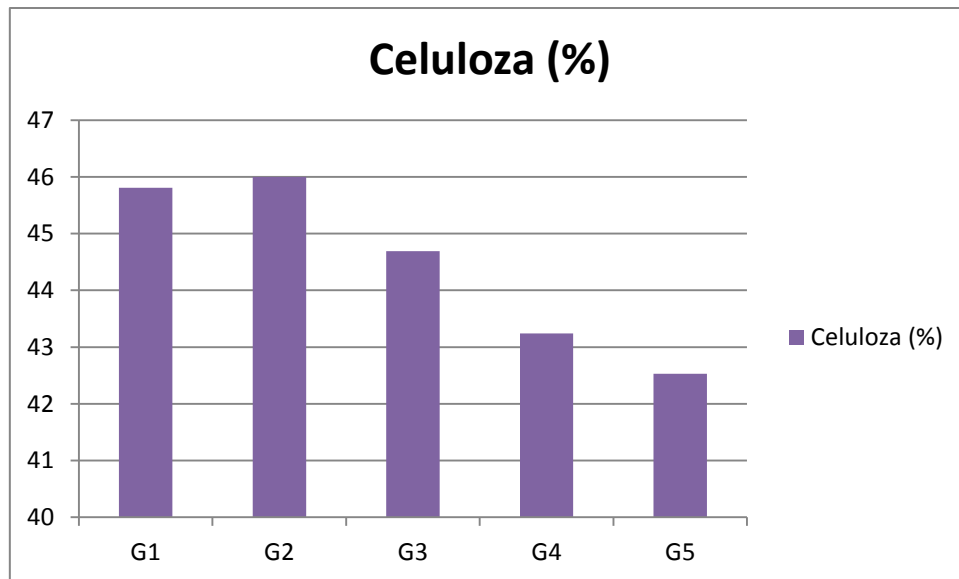
Na slici (4.1.6) prikazane su srednje vrijednosti udjela lignina u istraživanim genotipovima miskantusa. Biomasa s višim udjelom lignina pogodnija je za proizvodnju energije procesom izravnog sagorijevanja, dok je tijekom proizvodnje biogoriva druge generacije poželjan njegov što niži udio. Prosječan udio lignina u biomasi trave *Miscanthus x giganteus* u razmjeru od 18,8% do 29,2% (Antonović i sur., 2016).



Slika 4.1.6: Udio lignina (%) u istraživanim sac x sin hibridima

Bilandžija i sur. (2017.) u svom istraživanju navode rezultate za udio lignina u vrijednosti od 29,25 % za *Miscanthus x giganteus*. U ovom istraživanju prosječna vrijednost udjela lignina je 15,69 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost udjela lignina od 26,38 %. Uspoređujući analizirani miskantus u ovom istraživanju i vrijednosti dobivene u ostalim istraživanjima može se utvrditi da je udio lignina dosta niži, a također je i niži od prosjeka navedenog u literaturi.

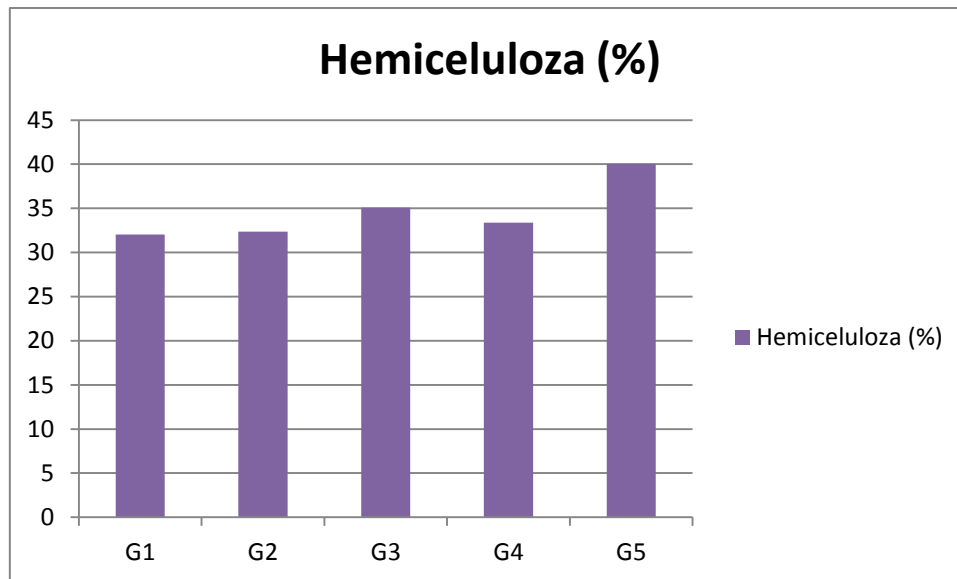
Na slici (4.1.7) prikazane su srednje vrijednosti udjela celuloze u istraživanim genotipovima miskantusa. Celuloza ima višu koncentraciju kisika u odnosu na lignin, pa je ogrjevna vrijednost celuloze manja od lignina. Uslijed navedenog, poželjan je niži udio celuloze za proces izravnog sagorijevanja, a što viši u proizvodnji lignoceluloznog bioetanola. Udio celuloze u biomasi kulture *Miscanthus x giganteus* kreće se od 45 % do 49,1 % (Antonović i sur., 2016).



Slika 4.1.7: Udio celuloze (%) u istraživanim sac x sin hibridima

Bilandžija i sur. (2017.) u svom istraživanju navode rezultate za udio celuloze u vrijednosti od 49,22 % za *Miscanthus x giganteus*. U ovom istraživanju prosječna vrijednost udjela celuloze analiziranih hibrida je 44,45 %. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. 2017. navode srednju vrijednost udjela celuloze od 40,12 %. Vrijednosti udjela celuloze u ovom istraživanju su između vrijednosti istraživanja na *Miscanthus x giganteus* i *Sida hermaphrodita*, i na minimalnom postotku uspoređujući ga s rasponom u literaturi.

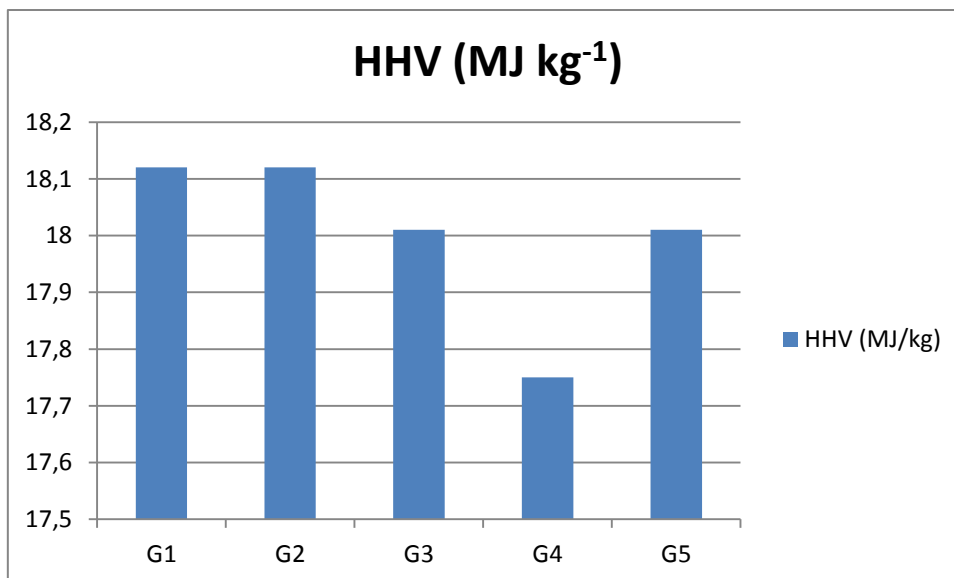
Na slici (4.1.8) prikazane su srednje vrijednosti udjela hemiceluloze u istraživanim genotipovima miskantusa. Kao i celuloza, hemiceluloza ima višu koncentraciju kisika u odnosu na lignin pa je ogrjevna vrijednost hemiceluloze manja od lignina stoga je poželjan je niži udio hemiceluloze u biomasi trave *Miscanthus x giganteus* za proces sagorijevanja. Pregledom literature utvrđeno je da se hemiceluloza unutar stanične stijenke trave *Miscanthus x giganteus* nalazi u rasponu od 19,9% do 30,0% (Antonović i sur., 2016).



Slika 4.1.8: Udio hemiceluloze (%) u istraživanim sac x sin hibridima

Antonović i sur. (2016.) u svom istraživanju navode rezultat za udio hemiceluloze u vrijednosti od 19,27 % za *Miscanthus x giganteus*. U ovom istraživanju za 5 sac x sin hibrida miskantusa prosječna vrijednost udjela hemiceluloze je 34,58 %. U usporedbi s drugom energetskom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost udjela hemiceluloze od 27,21 %.

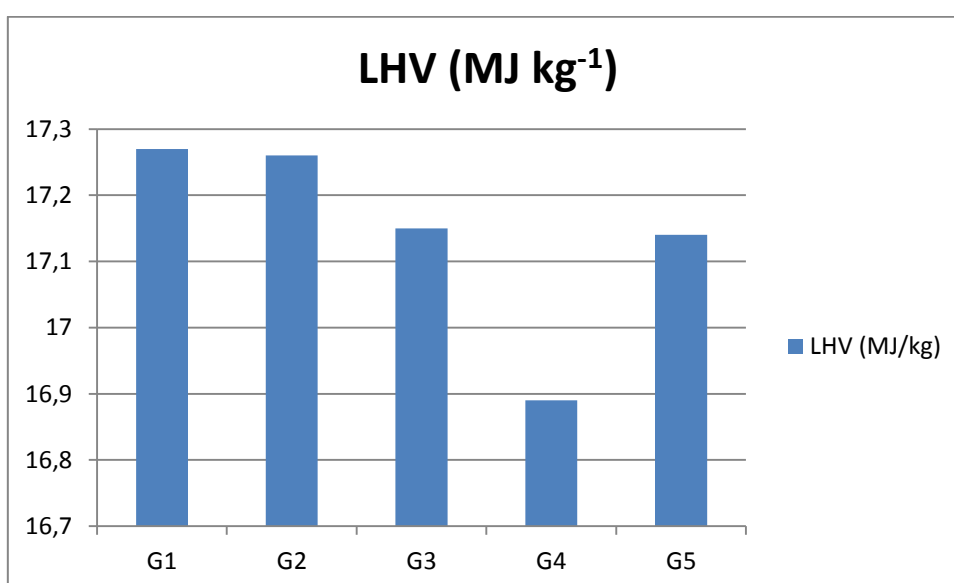
Na slici (4.1.9) prikazane su srednje vrijednosti gornje ogrjevne vrijednosti za istraživane genotipove miskantusa. Korištenje biomase kao goriva u termičkim i električnim primjenama zahtijeva poznavanje njezine ogrjevne vrijednosti. Ogrjevna vrijednost odražava sadržaj energije u gorivu na standardizirani način. Često se izražava kao viša ili niža ogrjevna vrijednost. Viša ogrjevna vrijednost se odnosi toplinu koja se oslobađa potpunim izgaranjem jedinice, što dovodi do proizvodnje vodene pare i njezine eventualne kondenzacija. U ovom trenutku mjeri se ukupna oslobođena energija (Bilandžija i sur., 2016). Udio hemiceluloze je u ovom istraživanju najviši, uspoređujući ga s navedenim istraživanjima. Također je iznad prosjeka navedenog u literaturi.



Slika 4.1.9: Više ogrjevne vrijednosti (MJ kg<sup>-1</sup>) za istraživane sac x sin hibride

U svom istraživanju (Nhuchhen i Abdul Salam, 2012.) navode rezultate za višu ogrjevnju vrijednost u vrijednosti od 19,3 MJ kg<sup>-1</sup> za *Miscanthus*. Prosječna vrijednost 5 analiziranih sac x sin hibrida miskantusa u ovom istraživanju za više ogrjevne vrijednosti je 18 MJ kg<sup>-1</sup>. U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost više ogrjevne vrijednosti od 18,13 MJ kg<sup>-1</sup>. Uspoređujući rezultate za višu ogrjevnju vrijednost analiziranog miskantusa i navedenih istraživanja, može se utvrditi da postoje manja odstupanja.

Na slici (4.1.10) prikazane su niže ogrjevne vrijednosti za istraživane genotipove miskantusa. Niža ogrjevna vrijednost ne razmatra latentnu toplinu vode koju sadrže goriva (Bilandžija i sur., 2016).



Slika 4.1.10: Niže ogrjevne vrijednosti (MJ kg<sup>-1</sup>) za istraživane sac x sin hibride

Bilandžija i sur. (2017.) u svom istraživanju navode rezultate za nižu ogrjevnu vrijednost u vrijednosti od  $17,25 \text{ MJ kg}^{-1}$  za *Miscanthus x giganteus*. Prosječna vrijednost analiziranih sac x sin hibrida miskantusa u ovom istraživanju za niže ogrjevne vrijednosti je  $17,14 \text{ MJ kg}^{-1}$ . U usporedbi s drugom energetsom kulturom *Sida hermaphrodita*, Krička i sur. (2017.) navode srednju vrijednost niže ogrjevne vrijednosti od  $16,8 \text{ MJ kg}^{-1}$ . U istraživanju na pšenici (Krička i sur., 2012.) prosjek niže ogrjevne vrijednosti kretao se u vrijednosti od  $16,44 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Dobivene niže ogrjevne vrijednosti slične su vrijednostima u navedenim istraživanjima.

## 4.2. Teorijski izračun gornje ogrjevne vrijednosti biomase

U podnaslovu 2.5.2. (Izračunavanje gornje ogrjevne vrijednosti) navedene su formule za izračunavanje HHV-a koje su sažete u tablici 4.2.1. i 4.2.2. kao i prosječna vrijednost dobivenih rezultata za sve istraživane hibride. Dobiveni rezultati testirani su analizom varijance (ANOVA) i uspoređeni s rezultatima gornjim ogrjevnim vrijednostima dobivenim eksperimentalnom analizom sastava biomase miskantusa.

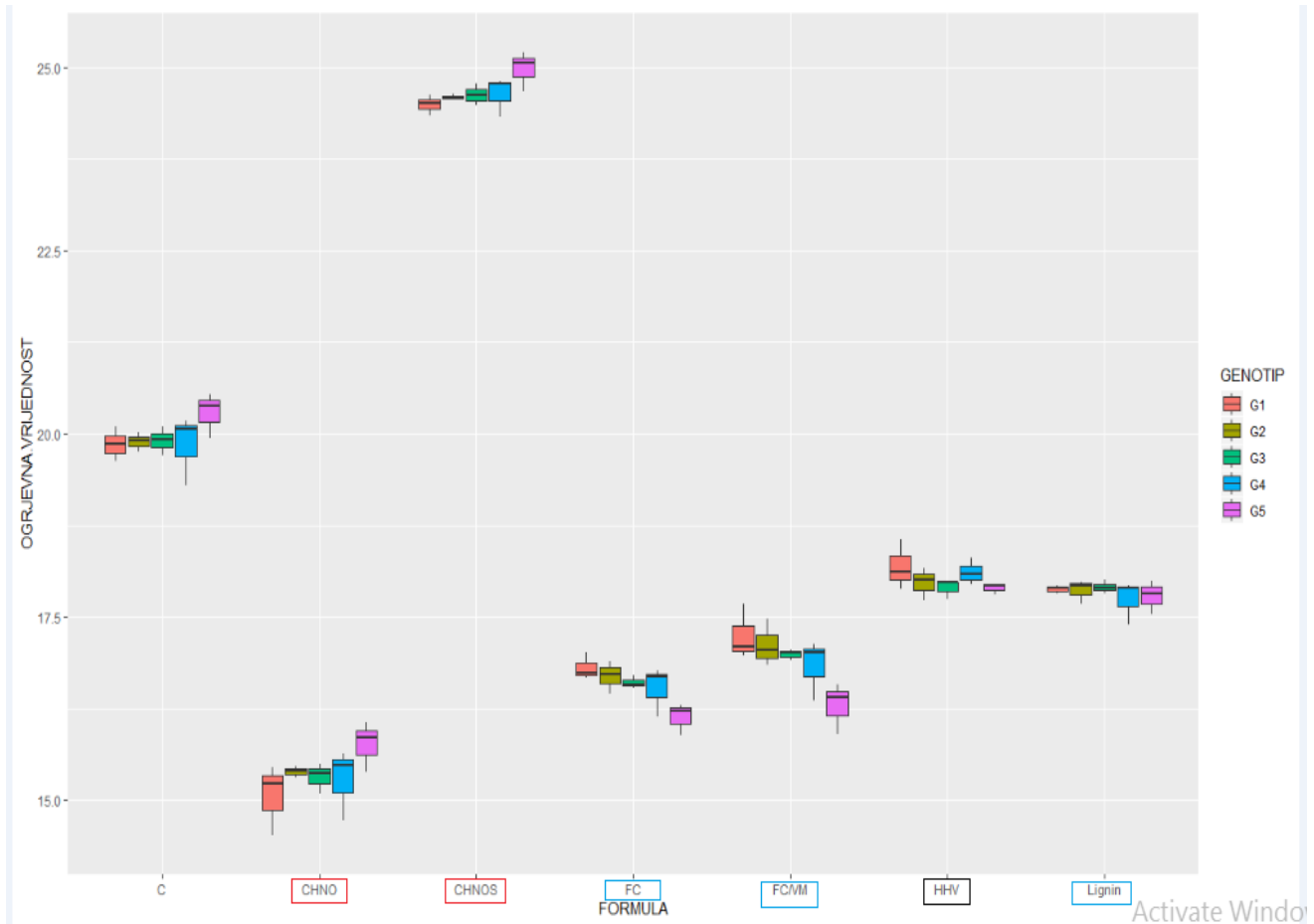
Tablica 4.2.1: Formule za izračunavanje HHV-a iz elementarne analize i prosječna vrijednost dobivenih rezultata

Formula	Elementarna analiza	Prosječna vrijednost rezultata (HHV $\text{MJ kg}^{-1}$ )
CHNO (%)	$0,335C + 1,423H - 0,164O - 0,145N$	15,36
C (%)	$0,4373C - 1,6701$	19,96
CHONS (%)	$0,3516C + 1,16225H - 0,1109O + 0,0628N + 0,10465S$	24,66

Tablica 4.2.2: Formule za izračunavanje HHV-a iz strukturalne analize i prosječna vrijednost dobivenih rezultata

HHV ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )	Strukturalna analiza	Prosječna vrijednost rezultata (HHV $\text{MJ kg}^{-1}$ )
Lignin (%)	$0,0979L + 16,292$	17,83
Fiksirani ugljik (%)	$0,196FC + 14,119$	16,55
Fiksirani ugljik, hlapive tvari (%)	$0,312FC + 0,1708VM$	16,89

Na slici 4.2.1. grafički su prikazane prosječne vrijednosti izračunate prema navedenim formulama i izmjerenih eksperimentalnom metodom za svaki genotip (G1 – G5).



Slika 4.2.1: Distribucija izračunatih vrijednosti i izmjerenih vrijednosti HHV-a

Na slici 4.2.1. je vidljivo da se formule koje u izračunu obuhvaćaju CHNO i CHNOS (zaokružene crvenom) najmanje podudaraju s eksperimentalno utvrđenom vrijednošću HHV-a (zaokruženo crnom). Formula za izračunavanje prema sadržaju ugljika (C) nije precizna, ali usporedbi s formulama CHNOS i CHNO je bliža izmjerenoj vrijednosti. Najpouzdanije su formule (zaokružene plavom) za izračunavanje prema sadržaju lignina, prema sadržaju fiksiranog ugljika (FC) i prema sadržaju fiksiranog ugljika i hlapivih tvari (FC/VM). Te formule su proizišle iz strukturalnih analiza koje su jeftine i brže, mogu se provesti na standardnoj laboratorijskoj opremi i može ih voditi bilo koji kompetentni znanstvenik ili inženjer.

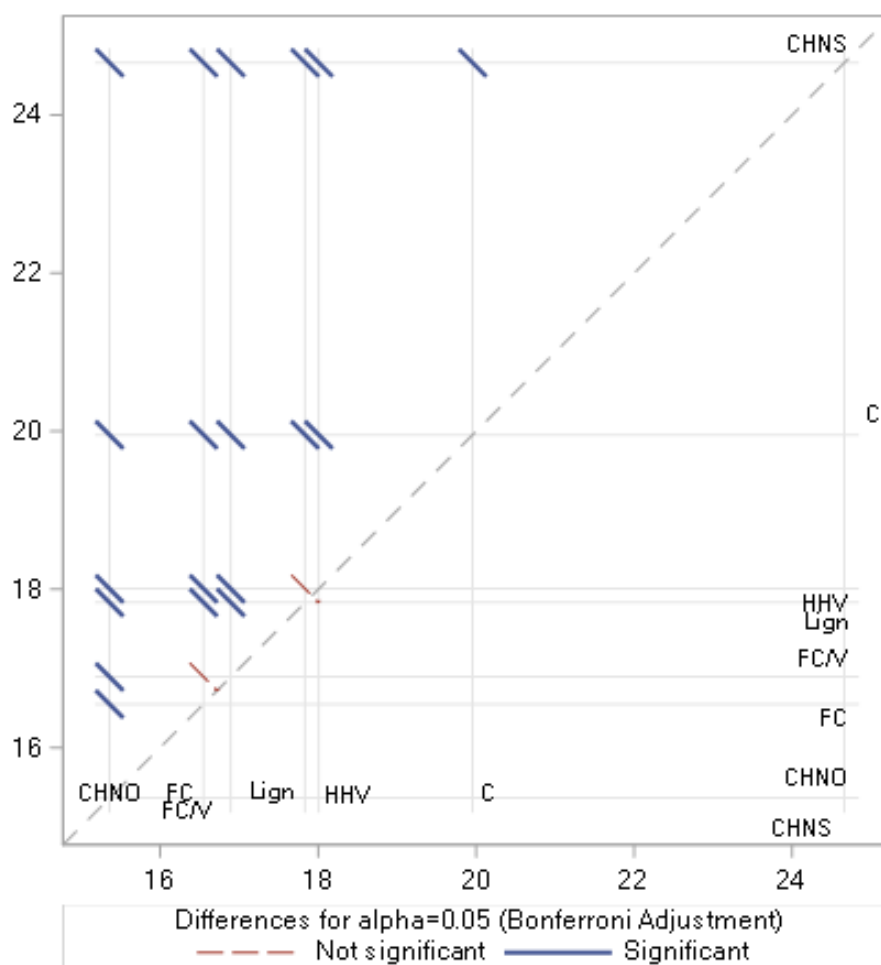
U tablici 4.2.3. prikazana je srednja vrijednost svih genotipova za pojedinu formulu, odnosno za izmjerenu HHV i njihova standardna devijacija. Istraživanje smo provodili na pet genotipova po tri ponavljanja pa iz toga proizlazi N = 15.



Tablica 4.2.3: Prosječna vrijednost i standardna devijacija

Level of FORMULA	N	OGRJEVNA_VRIJEDNOST	
		Mean	Std Dev
C	15	19,955	0,301
CHNO	15	15,361	0,384
CHNOS	15	24,659	0,237
FC	15	16,551	0,303
FC/VM	15	16,895	0,443
HHV	15	18,009	0,217
Lignin	15	17,835	0,171

Na slici 4.2.2. grafički su prikazane razlike između rezultata pojedinih formula i izmjerene ogrjevne vrijednosti. Plave crte prikazuju vrijednosti koje se značajno razlikuju, a crvene prikazuju vrijednosti koje nisu značajno različite.



Slika 4.2.2: Razlika između rezultata formula i izmjerene HHV

Iz grafa (4.2.2.) je vidljivo da se formule CHNOS i CHNO signifikantno razlikuju od HHV-a. CHNOS ima najveće odstupanje od prosjeka i zbog toga je najmanje mjerodavna za izračunavanje više ogrjevne vrijednosti. Formule za izračunavanje prema sadržaju lignina i prema sadržaju fiksiranog ugljika i hlapivih tvari (FC, FC/VM) nisu signifikantno različite od HHV-a te se smatraju najpouzdanijima u svrhu teorijskog računanja gornje ogrjevne vrijednosti biomase.

## 5. Zaključak

U ovom istraživanju provedene su analize na 5 križanaca *Miscanthus sacchariflorus* x *Miscanthus sinensis* (tzv. sac x sin hibrida).

Za analizirane sac x sin hibride dobivene su:

- Prosječne vrijednosti za sadržaj vode od 11,03 %, pepela od 5,13 %, koka od 17,37 %, fiksiranog ugljika 5,09 % i hlapivih tvari od 76,25 %.
- Prosječne vrijednosti za sadržaj ukupnog ugljika od 48,75 %, vodika 3,19 %, dušika 1,2 %, sumpora 0,11 % i kisika 45,31 %.
- Prosječne vrijednosti za udio lignina od 15,69 %, celuloze 44,45 % i hemiceluloze 34,58 %.
- Prosječne vrijednosti za višu ogrjevnu vrijednost od 18 MJ kg<sup>-1</sup>, a za nižu 17,14 MJ kg<sup>-1</sup>.
- Analizirana energetska kultura miskantus predstavlja energetski visokovrijednu i ekološki prihvatljivu sirovinu za proizvodnju energije, kao sirovina za izravno izgaranje.

Gornja ogrjevna vrijednost je jedno od najvažnijih svojstava goriva kojim se definira energetski sadržaj i koja određuje učinkovitost upotrebe biomase. Može se utvrditi eksperimentalno ili se može izračunati iz podataka dobivenih elementarnim ili strukturalnim analizama.

Cilj ovog rada bio je usporediti teorijske i empirijske ogrjevne vrijednosti miskantusa, pri čemu je dobiveno:

- Formule izvedene iz podataka dobivenih elementarnom analizom (C, CHNO, CHNOS) biomase pokazale su se manje točnima za izračun gornje ogrjevne vrijednosti, dok se formule CHNOS i CHNO signifikantno razlikuju od izmjerene ogrjevne vrijednosti.
- Formule izvedene iz podataka dobivenih strukturalnom analizom (lignin, FC, FC/VM) biomase pokazale su se preciznijima za teorijski izračun gornje ogrjevne vrijednosti, odnosno nisu signifikantno različite od izmjerene ogrjevne vrijednosti.

## 6. Popis literature

1. Abas, N., Kalair, A., Khan, N. (2015). Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures* 69: 31-49.
2. Acar, S., Ayanoglu, A. (2012). Determination of higher heating values (HHVs) of biomass fuels. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 28(2): 749-758.
3. Antonović, A., Bilandžija, N., Jurišić, V., Voća, N., Leto, J., Matin, A., Krička, T. (2016). Lignocelulozni sastav trave *Miscanthus x giganteus* u odnosu na različite tehnološke i agroekološke uvjete. 51. hrvatski i 11. međunarodni simpozij agronoma, Zbornik radova: 450-454.
4. Bilandžija, N. (2014). Perspektiva i potencijal korištenja kulture *Miscanthus x giganteus* u Republici Hrvatskoj. *Inženjerstvo okoliša*. 2: 81-87.
5. Bilandžija, N., Jurisic, V., Voca, N., Leto, J., Matin, A., Sito, S., Kricka, T. (2016.) Combustion properties of *Miscanthus x giganteus* biomass – optimization of harvest time, *Journal of the Energy Institute*, doi: 10.1016/j.joei.2016.05.009
6. Bilandžija, N., Jurišić, V., Leto, J., Matin, A., Voća, N. (2013). Energetske karakteristike trave *Miscanthus x giganteus* kao CO<sub>2</sub>-neutralnog goriva. Zbornik radova 48. hrvatskog i 8. međunarodnog simpozija agronoma: 55-59.
7. Bilandžija, N., Jurišić, V., Voća, N., Leto, J., Matin, A., Grubor, M., Krička, T. (2017). Energetska valorizacija biomase trave *Miscanthus x giganteus* – studija slučaja u Hrvatskoj. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 1: 32-36.
8. Boboulos M. (2010). *Biomass Properties and Fire Prediction Tools*. Book Boon.
9. Erickson, J., Rainbolt, C., Newman, Y., Sollenberger, L., Hessel, Z. (2008). Production of *Miscanthus x giganteus* for Biofuel. *Production of Biofuel Crops in Florida*. Agronomy Department, IFAS, University of Florida.
10. Field, C. B., Campbell, J. E., Lobell, D. B. (2008). Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in ecology & evolution*, 23(2): 65-72.
11. Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P.J., Spliethoff, H. (2009). Biomass Combustion in Fluidized Bed Boilers: Potential Problems and Remedies. *Fuel Process. Technol.* 90: 21-50.
12. Kontek, M., Krička, T., Matin, M., Bilandžija, N., Jurišić, V. (2019). Novi genotipovi roda *Miscanthus* – tehnologija podizanja nasada za potrebe prerade do bioproizvoda. *Proceedings*

54th Croatian & 14th International Symposium on Agriculture. 284-284. (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni).

13. Krička, T., Bilandžija, N., Jurišić, V., Voća, N., Matin, A. (2012.) Energy analysis of main residual biomass in Croatia. *African Journal of Agricultural Research*. 7(48): 6383-6388.
14. Krička, T., Matin, A., Bilandžija, N., Jurišić, V., Antonović, A., Voća, N., Grubor, M. (2017.) Biomass valorisation of *Arundo donax* L., *Miscanthus × giganteus* and *Sida hermaphrodita* for biofuel production. *International Agrophysics*. Doi: 10.1515/intag-2016-0085.
15. Krička, T., Matin, A., Bilandžija, N., Jurišić, V., Antonović, A., Voća, N., Grubor, M. (2017.) Biomass valorisation of *Arundo donax* L., *Miscanthus × giganteus* and *Sida hermaphrodita* for biofuel production. *International Agrophysics*. 31, 575-581 DOI: 10.1515/intag-2016-0085.
16. Lewandowski, I., Clifton-Brown, J., Kiesel, A., Hastings, A., Iqbal, Y. (2018). *Miscanthus*. Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts, pp.35-59 DOI: [10.1016/B978-0-12-812900-5.00002-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812900-5.00002-3): 35-59.
17. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource technology*, 83(1), 47-54.
18. Nhuchhen, D.R., Abdul Salam, P. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*. 99: 55-63.
19. Ognjan, D., Stanić, Z., Tomšić, Ž. (2007). Analiza poticajnih mjera za gradnju i korištenje obnovljivih izvora električne energije s naglaskom na biomasi. 2. stručni skup s međunarodnim sudjelovanjem – Obnovljivi izvori energije u Republici Hrvatskoj. Zbornik radova, Osijek.
20. Pašičko, R., Robić, S., Tuerk, A. (2007). Utjecaj trgovanja emisijama CO<sub>2</sub> na konkurentnost energije iz biomase. 2. stručni skup s međunarodnim sudjelovanjem – Obnovljivi izvori energije u Republici Hrvatskoj. Zbornik radova, Osijek.
21. Patel, B., Gami, B. (2012). Biomass Characterization and its Use as Solid Fuel for Combustion. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 3(2): 123-128.
22. Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S., Mekhilfer, S. (2011.) A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15: 2262-2289.
23. Sušnik, H., Benković Z. (2007). Energetska strategija Republike Hrvatske u kontekstu održivog razvitka šumarstva i poljoprivrede. 2. stručni skup s međunarodnim sudjelovanjem – Obnovljivi izvori energije u Republici Hrvatskoj. Zbornik radova, Osijek.
24. Šljivac, D., Šimić, Z. (2009). Obnovljivi izvori energije – najvažnije vrste, potencijal i tehnologija.

## Životopis

Katarina Jakšić je rođena 24.04.1995. u Čakovcu. Živi u Goričanu, Međimurska županija. Pohađala je od 2010. do 2014. godine Gimnaziju Josipa Slavenskog u Čakovcu. 2014. godine upisuje se na Agronomski fakultet u Zagrebu, na kojem je redovni student i završila je preddiplomski studij: Agroekologija. 2017. upisuje i završava petu godinu diplomskog studija: Agroekologija, usmjerenje Mikrobna biotehnologija u poljoprivredi. Tečno govori i razumije engleski jezik koji je za vrijeme svog školovanja savladala do C1 razine. Njemački jezik joj je bio prvi strani jezik u osnovnoj i srednjoj školi te ga je savladala do A2 razine. Informatički je pismena te upoznata s radom u programima MS Word, MS PowerPoint i MS Excel. Posjeduje vozačku dozvolu B kategorije. Od svoje 5. godine je aktivna članica kluba „Mažoretkinje i twirling klub Goričan“, a od 2015. je članica Savjeta mladih u Goričanu.