Energetske karakteristike biomase divljeg prosa (Panicum virgatum L.) u odnosu na različite rokove žetve

Matin, Božidar

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:204:302247

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet
University of Zagreb
Faculty of Agriculture

ENERGETSKE KARAKTERISTIKE BIOMASE DIVLJEG PROSA (*Panicum virgatum* L.) U ODNOSU NA RAZLIČITE ROKOVE ŽETVE

DIPLOMSKI RAD

Božidar Matin

Zagreb, rujan, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet
University of Zagreb
Faculty of Agriculture

Diplomski studij:

Poljoprivredna tehnika – Mehanizacija

ENERGETSKE KARAKTERISTIKE BIOMASE DIVLJEG PROSA (*Panicum virgatum* L.) U ODNOSU NA RAZLIČITE ROKOVE ŽETVE

DIPLOMSKI RAD

Božidar Matin

Mentor:

doc.dr.sc. Nikola Bilandžija

Zagreb, rujan, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture

IZJAVA STUDENTA

O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Božidar Matin**, JMBAG 0012040913, rođen 25.12.1976. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

ENERGETSKE KARAKTERISTIKE BIOMASE DIVLJEG PROSA (*Panicum virgatum* L.) U ODNOSU NA RAZLIČITE ROKOVE ŽETVE

Svojim potpisom jamčim:

- da sam 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 upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____ _____

Potpis studenta

Sveučilište u Zagrebu
Agronomski fakultet

University of Zagreb
Faculty of Agriculture

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta Božidar Matin, JMBAG 0012040913, naslova:

ENERGETSKE KARAKTERISTIKE BIOMASE DIVLJEG PROSA (*Panicum virgatum* L.) U ODNOSU NA RAZLIČITE ROKOVE ŽETVE

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____ , dana _____ .

Povjerenstvo: potpisi:

1. doc. dr. sc. Nikola Bilandžija mentor _____
2. doc. dr. sc. Vanja Jurišić član _____
3. prof. dr. sc. Josip Leto član _____

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Nikoli Bilandžiji koji je svojim znanstvenim i stručnim savjetima oblikovao ideju i pomogao mi u izradi ovoga diplomskog rada. Veliko mu hvala na razumijevanju i strpljenju.

Također zahvalu upućujem i članovima povjerenstva, doc. dr. sc. Vanji Jurišić, koja mi je svojom nesebičnom pomoći pomogla u izradi rada te prof. dr. sc. Josipu Leti na pomoći i savjetima kod žetve te na izdvojenom vremenu i trudu.

Također se želim zahvaliti asistentima Mateji Grubor, mag. ing. agr., Anamariji Peter, mag. ing. agr. i Mislavu Konteku, mag. ing. agr. na velikoj pomoći pri provedbi laboratorijskih istraživanja. Zahvaljujem se i prof. dr. sc. Tajani Krička na susretljivosti i savjetima.

Veliko hvala mojim roditeljima koji su uvijek vjerovali u mene i moj uspjeh te podržavali moju težnju k ostvarivanju viših ciljeva.

I na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj supruzi i našoj djeci koji su mi znatno olakšali ove dvije godine studija svojom podrškom i motivacijom, a bez kojih ovaj uspjeh ne bi bio moguć niti potpun.

Hvala svima!

Sadržaj

1. Uvod 1
1.1. Cilj rada 2
2. Pregled literature 3
2.1. Općenito o obnovljivim izvorima energije 3
2.2. Biomasa kao obnovljivi izvor energije 4
2.3. Poljoprivredna biomasa 5
2.3.1. Poljoprivredne energetske kulture 6
2.4. Općenito o energetskoj kulturi divlje proso (*Panicum virgatum* L.) 7
2.4.1. Podrijetlo i evolucija 7
2.4.2. Divlje proso kao energetska kultura u Sj. Americi 8
2.4.3. Divlje proso kao energetska kultura u Europi 8
2.5. Agroklimatski uvjeti uzgoja divljeg prosa 10
2.6. Agroekološki uvjeti uzgoja divljeg prosa 10
2.7. Mehanizacija i sistemi žetve 12
2.8. Vrijeme žetve i prinosi 14
2.9. Skladištenje 15
2.10. Mogućnosti korištenja biomase divljeg prosa u proizvodnji energije 15
3. Energetske karakteristike u procesu izgaranja 18
3.1. Gorive tvari biomase 18
3.2. Negorive tvari biomase 19
3.3. Ogrjevna vrijednost biomase 20
3.4. Mikro i makro elementi 20
4. Materijali i metode 22
4.1. Materijali 22
4.1.1. Pokusno polje Šašinovec 22
4.1.2. Plan pokusnog polja 22
4.2. Metode 24

4.2.1. Negorive tvari 24

4.2.1.1. Udio vode 24
4.2.1.2. Udio pepela 24
4.2.1.3. Udio dušika 25
4.2.1.4. Udio koksa 25
4.2.1.5. Udio fiksiranog ugljika 25

4.2.2. Gorive tvari 25

4.2.2.1. Udio ugljika, vodika i sumpora 25
4.2.2.2. Udio kisika 26
4.2.2.3. Udio hlapivih tvari 26

4.2.3. Ogrjevna vrijednost 26

4.2.3.1. Gornja ogrjevna vrijednost 26
4.2.3.2. Donja ogrjevna vrijednost 27

4.2.4. Mikro i makro elementi 27

4.3. Statistička obrada podataka 28

5. Rezultati i rasprava 29

5.1. Negorive tvari 29

5.1.1. Udio vode 29

5.1.2. Udio pepela 30

5.1.3. Udio dušika 30

5.1.4. Udio koksa 31

5.1.5. Udio fiksiranog ugljika 32

5.2. Gorive tvari 33

5.2.1. Udio ugljika 33

5.2.2. Udio vodika 33

5.2.3. Udio sumpora 34

5.2.4. Udio kisika 35

5.2.5. Udio hlapivih tvari 36

5.3. Ogrjevna vrijednost 37
5.3.1. Gornja ogrjevna vrijednost 37
5.3.2. Donja ogrjevna vrijednost 37
5.4. Mikro i makro elementi 38
5.4.1. Makro elementi 38
5.4.1.1. Udio kalija 38
5.4.1.2. Udio natrija 39
5.4.1.3. Udio kalcija 40
5.4.1.4. Udio magnezija 41
5.4.2. Mikro elementi 42
5.4.2.1. Udio mangana 42
5.4.2.2. Udio cinka 42
5.4.2.3. Udio željeza 43
5.4.2.4. Udio kadmija 44
5.4.2.5. Udio nikla 44
5.4.2.6. Udio kroma 45
5.4.2.7. Udio kobalta i olova 46
6. Zaključak 47
7. Popis literature 48
Životopis

Sažetak

Diplomskog rada studenta Božidar Matin, naslova

ENERGETSKE KARAKTERISTIKE BIOMASE DIVLJEG PROSA (*Panicum virgatum* L.) U ODNOSU NA RAZLIČITE ROKOVE ŽETVE

Fosilna goriva trenutačno zadovoljavaju glavninu energetskih potreba u svijetu. Međutim, sukladno ciljevima modernog društva da postane nisko-ugljično i ekološki prihvatljivo „zeleno gospodarstvo“ definira obnovljive izvore energije kao važan segment za ostvarivanje navedenih ciljeva. Pod klasifikacijom obnovljivih izvora energije, ubraja se i poljoprivredna biomasa, a samim time i biomasa dobivena uzgojem višegodišnjih energetskih kultura poljoprivrednog podrijetla. Divlje proso (*Panicum virgatum* L.), kao energetsku kulturu, definiraju niska ulaganja u agrotehniku, visoka otpornost na bolesti i štetočine, kao i potencijalno visoki prinosi. Biomasa divljeg prosa može se konvertirati u različite oblike energije, odnosno biogoriva, a jedan od načina pretvorbe je i proizvodnja energije putem termokemijskih procesa pretvorbe. Cilj ovog rada bio je utvrditi energetske karakteristike (gorive i negorive tvari, ogrjevne vrijednosti, mikro i makro elemente) biomase trave divljeg prosa s obzirom na različite rokove žetve (jesenski i proljetni). U odnosu na istraživane rokove žetve utvrđena je signifikantna razlika u udjelima vode, pepela, dušika, ugljika, sumpora i kisika. Nasuprot, signifikantne razlike nisu utvrđena u udjelima vodika, koksa, fiksiranog ugljika i hlapivih tvari kao ni kod ogrjevnih vrijednosti. Rokovi žetve najviše su imali utjecaja na istraživane udjele mikro i makro elemenata jer su kod svih utvrđene signifikantne razlike. Prosječne vrijednosti udjela vode, pepela i donje ogrjevne vrijednosti, kao jednih od važnijih istraživanih parametara, u prvom i drugom roku bile su 33,88% i 10,95% za vodu, 4,59% i 3,71% za pepeo te 17,29 MJ kg^{-1} i 17,42 MJ kg^{-1} za donju ogrjevnu vrijednost. Podatci dobiveni ovim istraživanjem definiraju biomasu divljeg prosa, uzgojenu u istraživanim agroekološkim uvjetima Hrvatske, sirovinom zadovoljavajućih energetskih karakteristika. Odgađanje roka žetve od jeseni do proljeća rezultiralo je postizanjem kvalitetnije biomase, kao ulazne sirovine u procesu neposrednog izgaranja.

Ključne riječi: Divlje proso, biomasa, energetska kultura, žetva, energetske karakteristike.

Summary

Of the master's thesis - student Božidar Matin**,** entitled

ENERGY PROPERTIES OF SWITCHGRASS (*Panicum virgatum* L.) DEPENDING ON DIFFERENT HARVEST PERIODS

Fossil fuels currently meet most of the energy needs in the world. However, according to the goals of modern society to become low-carbon and environmentally-friendly "green economy" defines renewable energy sources as an important segment for achieving the stated goals. Under the classification of renewable energy sources, agricultural biomass is also included, and thus the biomass obtained from the cultivation of perennial energy crops of agricultural origin. Switchgrass (*Panicum virgatum L),* as an energy crop, is defined by low investment in agricultural technology, high resistance to disease and pests, as well as potentially high yields. Switchgrass biomass can be converted into different forms of energy or biofuels, and one of the ways of conversion is energy production through thermochemical conversion processes. The aim of this study was to determine the energetic characteristics of switchgrass biomass in relation to two different harvesting periods (autumn and spring). Significant differences in the proportions of water, ash, nitrogen, carbon, sulfur and oxygen were found in relation to the research periods of harvest. In contrast, no significant differences were found in the proportions of hydrogen, coke, fixed carbon, and volatile matter as well as in the heating values. Harvest periods had the greatest impact on the research of micro and macro elements, since significant differences were found in all of them. The average values of water, ash and lower heating values as one of the most important researched parameters in autumn and spring harvest were 33,88% and 10,95% for water, 4,59% and 3,71% for ash and 17,29 mg kg^{-1} and 17,42 mg kg^{-1} for the lower heating value. The data obtained from this research define the biomass of switchgrass, grown in the investigated agro-ecological conditions of Croatia, as the raw material of satisfactory energy characteristics. Delaying the harvest period from autumn to spring has resulted in the achievement of higher quality biomass as input material in the direct combustion process.

Keywords: switchgrass, biomass, energy crop, harvest, energy properties.

1. Uvod

Potreba za energijom svakim danom sve više raste, a većinom se namiruje korištenjem fosilnih goriva. Obnovljivi izvori energije nameću se kao logični izvori energije u zamjeni dijela fosilnih goriva. Korištenje i razvoj obnovljivih izvora energije dugoročno doprinosi diversifikaciji proizvodnje energije i sigurnosti opskrbe, smanjenju ovisnosti o uvozu energenata, smanjenju utjecaj uporabe fosilnih goriva na okoliš, otvaranju novih radnih mjesta i razvitku poduzetništva, potiču razvoj novih tehnologija i domaćeg gospodarstva te ulaganju u ruralna područja. Obnovljivi izvori energije značajno smanjuju emisiju ugljičnog dioksida (CO_2) i predstavljaju značajan aspekt klimatske i energetske politike (Čakija, 2007.; www.mzoip.hr, 2019.). Kao jedan od izvora dobivanja energije iz obnovljivih resursa je i poljoprivredna biomasa, odnosno biomasa dobivena uzgojem energetskih kultura.

Pretvorba biomase u pojedine oblike energije stara je ideja ali joj se sve više pozornosti pridaje radi problema s okolišem, opskrbe energijom i poljoprivrednim tržištem (McCarl i Schneider, 2001.). Naime, napredno korištenje goriva, energije i proizvoda na bazi biomase može značajno pridonijeti energetskoj sigurnosti države, dobrobiti poljoprivrede i kvaliteti okoliša. Međutim, koncept je zahtjevan te se mora temeljiti na holističkom razmatranju brojnih poljoprivrednih, ekonomskih, tehnoloških, energetskih i ekoloških elemenata. Napredno korištenje uključuje odluke o odgovarajućim istraživačkim strategijama za proizvodnju i preradu biomase, kao i politike za promicanje ekološki prihvatljivih praksi. Takve odluke uključuju identifikaciju strategija biomase kako bi se naglasio razvoj i oblikovanje politika i pravila koja olakšavaju primjerenu proizvodnju i uporabu biomase. Važno je naglasiti da, iako se razmatra već više od 30 godina, biomasa još uvijek nije postigla veliku tržišnu penetraciju u industriji sirovina za proizvodnju električne energije zbog jeftino dostupnih fosilnih goriva i relativno visokih troškova (El-Halwagi, 2003.).

Biomasa se pretvara u energiju korištenjem različitih procesa, a ovisi o vrsti i kvaliteti sirovine, željenom obliku proizvedene energije, načinu upotrebe, okolišnim normama te ekonomskim mogućnostima. Tri su osnovna načina pretvorbe biomase: termokemijska, biokemijska i mehanička ekstrakcija s esterifikacijom. Tako je moguće proizvesti vodenu paru za zagrijavanje, dobivanje električne energije u kogeneracijskim postrojenjima ili dobivanje biogoriva koja se mogu koristiti u transportu (Šimić, 2010.).

Raspoloživa količina poljoprivredne biomase, koja se može koristiti za proizvodnju energije prvenstveno je određena raspoloživom površinom zemljišta i prinosom energetskih kultura koje se uzgajaju na toj zemlji. Međutim, takav poljoprivredni uzgoj može imati i negativan i pozitivan utjecaj na okoliš. Iz tog razloga važno je da svaki korak prema većoj proizvodnji biogoriva ima za cilj podržati pozitivan razvoj, dok u isto vrijeme ne povećava postojeće pritiske na bioraznolikost poljoprivrednih površina, te resurse vode i tla (www.eea.europa.eu, 2006.). Navedeno potvrđuje tezu o potrebi za holocikličkim pristupom kod uvođenja energetskih kultura na poljoprivredne površine.

U posljednje vrijeme značajna pozornost posvećena je uzgoju višegodišnjih trava za proizvodnju energije i to kako bi se pristupilo revitalizaciji marginalnih površina kroz proizvodnju dodatnih količina biomase. U jednu od višegodišnjih trava ubraja se i divlje proso (*Panicum vigratum* L.) (www.farm-energy.extension.org, 2019.). U Sjedinjenim Američkim Državama, od kuda i potječe, divlje proso se smatra najvrjednijom prirodnom travom za proizvodnju biomase na širokom rasponu lokacija. Divlje proso je kultura koja uspijeva na različitim tipovima tla, otporan je na niske temperature, štetnike i bolesti te nema prevelikih zahtjeva za vodom i gnojivima. Poznat je po snažnom rastu u kasno proljeće i rano ljeto. Vrijedan je i za stabilizaciju tla, kontrolu erozije i za zaštitu od vjetra. Kada se jednom uspostavi nasad, iz istog korijena može rasti od 10 do 20 godina, pa i duže. Ima visok potencijal prinosa suhe tvari i dobre ogrjevne vrijednosti, jednostavno ga je inkorporirati u sustav uzgoja gdje se može koristiti konvencionalna oprema, povećava razinu ugljika, aktivnost mikroorganizama u tlu te služi kao stanište divljih životinja (www.ieabioenergy. com, 2011.).

Divlje proso trenutno se koristi kao:
- sirovina koja se može pretvoriti u korisnu energiju,
- krmno bilje za ispašu, sijeno ili sijenažu,
- kontrola erozije u vodotocima, nasipima, rubovima potoka,
- vegetativne filter trake (za smanjenje otjecanja tla i hranjivih tvari),
- melioracija/stabilizacija pješčanih dina i poremećenih područja i
- staništa divljih životinja (Parrish i Fike, 2005.; Monti, 2012.).

Divlje proso pokazuje značajan potencijal kao energetska kultura te je jedno od kandidata za proizvodnju velikih količina biomase koja bi se potom pretvarala u određene tipove energije ili biogorivo. Na energetska svojstva biomase veliki utjecaj imaju agroklimatski i agroekološki uvjeti tijekom uzgoja, posebice vrijeme žetve. Žetve kasnog ljeta i rane jeseni imaju veći udio vode, jer biljke nisu potpuno osušene, a postoji i veća mogućnost da suha tvar sadrži višu razinu elemenata kao što su kalij, dušik, fosfor i silicij (Davis i Ragauskas, 2010.). Ti elementi mogu uzrokovati veće količine pepela i čestice koje zagađuju zrak tijekom izgaranja smanjujući učinkovitost i povećavajući troškove održavanja (Sami i sur., 2001.). Poznato je da proljetne i zimske berbe smanjuju sadržaj pepela, ali i povećavaju količinu suhe tvari (Samson i Mehdi, 1998.; Adler i sur., 2006.).

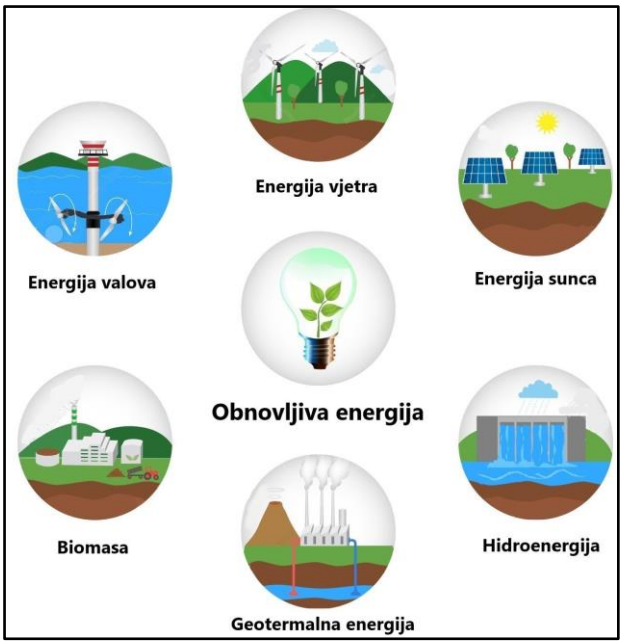
1.1. Cilj rada

Cilj ovog rada je utvrditi energetska svojstva (negorive i gorive tvari, ogrjevnu vrijednost, mikro i makro elemente) biomase trave divljeg prosa (*Panicum virgatum* L.) u odnosu na različite rokove žetve (jesenska i proljetna žetva).

2. Pregled literature

2.1. Općenito o obnovljivim izvorima energije

Pojam „Obnovljivi izvori energije“ Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, definira kao obnovljive nefosilne izvore energije (Slika 1.), a u njih ubraja: aerotermalnu energiju, energiju iz biomase, energiju iz biotekućina, energiju mora, hidroenergiju, energiju vjetra, geotermalnu i hidrotermalnu energiju, energiju plina iz deponija otpada, plin iz postrojenja za obradu otpadnih voda i bioplina, sunčevu energiju i biorazgradivi dio certificiranog otpada za proizvodnju energije na gospodarski primjeren način sukladno propisima iz upravnog područja zaštite okoliša (NN 100/2015.).



Slika 1. Obnovljivi izvori energije
(Izvor: www.123RF.com)

Od otkrića vatre pa sve do otkrića fosilnih goriva, obnovljivi izvori energije bili su jedini izvori energije koji su bili na raspolaganju čovječanstvu. Uz korištenja drveta, naši preci su uočili prednosti koje nude prirodni izvori energija koje danas poznajemo: sunca, vode, energije vjetra i geotermalne energije. Energija Sunca koristila se kod svjetlarnika na kupolama građevina (Panteon), a od davnine su poznati i sustavi koji su služili za potpaljivanje vatre (www.kmbdg.com, 2019.).

Međutim, korištenje fosilnih goriva dovelo je do globalnih klimatskih promjena koje su postale sve ozbiljnije u nekoliko zadnjih desetljeća i koje su osvijestile ljude širom svijeta, da ozbiljno uzmu u razmatranje zamjenu fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije.

2.2. Biomasa kao obnovljivi izvor energije

Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, biomasu definira kao biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede (uključujući tvari biljnoga i životinjskoga podrijetla), šumarstva i srodnih proizvodnih djelatnosti, uključujući ribarstvo i akvakulturu, kao i biorazgradivi dio industrijskoga i komunalnoga otpada (NN 100/2015.).

Biomasa obuhvaća različite proizvode biljnog i životinjskog podrijetla. Uporabom biomase ublažava se proces klimatskih promjena jer biljke koriste CO_2 tijekom rasta i pohranjuju ga u svoje dijelove, a kod spaljivanja pohranjena količina CO_2 ispušta se u atmosferu te ga druge biljke koriste za rast. Na taj način zatvara se krug očuvanja CO_2 i temeljem toga biomasa se može definirati kao „CO_2 neutralno gorivo“ (www.eia.gov, 2018.; Matin i sur., 2019.)

Biomasa se dijeli na životinjski, drvni i nedrvni otpad te razlikujemo:

- drvna biomasa (ostaci iz šumarstva, otpadno drvo),
- drvna uzgojena biomasa (brzorastuće drveće),
- nedrvna uzgojena biomasa (brzorastuće alge i trave),
- ostatci i otpadci iz poljoprivrede i
- životinjski otpad i ostatci (Labudović, 2002.).

Biomasa predstavlja pohranjenu energiju koja se može crpiti po potrebi. Takve sirovine imaju tri glavne primjene: stvaranje topline i/ili električne energije, gorivo za transport i za kemijsku industriju (McKendry, 2002., Bilandžija, 2015.; Krička i sur., 2017.). Biomasa je obnovljivi izvor energije koji se može neposredno pretvarati u energiju izgaranjem. Kod toga se pomoću topline, može proizvesti vodena para za korištenje u industriji i domaćinstvima, kao i električna energija u termoelektranama (Dunović, 2011.; Matin i sur., 2019.). Biomasa i njezini produkti, ne samo da su obnovljivi, nego su i dovoljni tekućim fosilnim gorivima, te ih je moguće izravno zamijeniti. S obzirom na to da Republika Hrvatska ima veliki potencijal biomase za proizvodnju energije (oko 4 milijuna tona godišnje) ona bi mogla zamijeniti i do 25% ukupno utrošene energije (Krička i sur., 2007.). Biomasa, kao i svaka druga sirovina iz koje se dobiva energije, ima svoje prednosti i nedostatke (Krička i sur., 2017.).

Prednosti biomase su:

- mogućnost iskorištenja u raznim oblicima, ovisno o vrsti same biomase i načinu prikupljanja i/ili dorade,
- velike raspoložive količine na godišnjoj razini,
- smatra se neutralnom u smislu emisije stakleničkih plinova u atmosferu, posebno ugljikovog dioksida (CO_2) koji sudjeluje u procesu fotosinteze,
- sadrži niske razine sumpora i dušika u svome sastavu (uslijed fotosinteze) te se na taj način smanjuje emisija štetnih sumporovih i dušičnih oksida,
- najčešće se nalazi na mjestu potrošnje ili u njegovoj blizini te time pozitivno utječe na lokalnu energetsku neovisnost i samodostatnost i

- proizvodnja biomase potiče zapošljavanje i izvor dodatne zarade u šumarstvu, poljoprivredi i drvnoj industriji te tako bitno utječe na socijalno-gospodarsku sliku područja u kojem se proizvodi (Krička i sur., 2017.).

Nedostaci biomase su:

- periodičnost nastajanja, koja kod određenih tipova biomase (komina grožđa ili masline) zahtijeva trenutno zbrinjavanje iste,
- nepovoljni kemijski sastav može uzrokovati probleme tijekom energetskog iskorištenja (npr. povećani udio silicija utječe na stvaranje šljake u ložištima tijekom izgaranja) i
- velike količine nastale biomase često su povezane s problemima transporta, rukovanja i skladištenja proizvedenih količina (Krička i sur., 2017.).

2.3. Poljoprivredna biomasa

Kako je poljoprivreda jedna od najvažnijih gospodarskih grana u Europskoj uniji, od strateške je važnosti iznimno dobro njome gospodariti. U Hrvatskoj, poljoprivreda ima potencijal koji je znatno veći od iskorištenog s obzirom na to da postoji veliki postotak neobrađenih površina. U poljoprivrednoj proizvodnji troši se puno energije, ali korištenjem ostataka proizvodnje može biti i razmjerno značajan proizvođač s obzirom na to da svake godine ostanu velike količine neiskorištene biomase koja bi se mogla upotrijebiti u energetske svrhe (Jelčić, 2016.; Krička i sur., 2017.).

Poljoprivredna biomasa podrazumijeva biljne ostatke (Slika 2.) koji uključuju kukuruzovinu, oklasak, slamu, stabljike, ljuske, granje i energetske kulture (www.gospodarski.hr, 2014.).

Poljoprivrednu biomasu za proizvodnju biogoriva dijelimo na:

- biomasu ratarske proizvodnje (sijeno, slama, stabljike, kukuruzovina, oklasak, ljuske),
- biomasu voćarsko-vinogradarske proizvodnje (orezani ostatci trajnih nasada),
- biomasu iz dorade i prerade poljoprivrednih sirovina u prehrambenoj industriji (komina grožđa, komina masline, komina uljarica, koštice voća, ljuske jezgričavog voća),
- biomasu iz povrćarstva i ukrasne hortikulture (otpad iz vrtova i parkova),
- biomasu stočarske proizvodnje (gnoj, gnojnica, klaonički otpad, otpad u ribarstvu, mesno-koštano brašno) i
- biomasu energetskih kultura (Bilandžija, 2015.).

Za razliku od fosilnih goriva ovaj izvor energije je obnovljiv te sadrži vrlo malo ili čak uopće ne sadrži neke od štetnih tvari: sumpor, teške metale i sl., koje se nalaze u fosilnim gorivima, a koje se izgaranjem tih goriva otpuštaju u zrak te ugrožavaju zdravlje i okoliš. Proizvodnja i korištenje poljoprivredne biomase također doprinosi zaštiti tla i voda te povećanju bioraznolikosti. Poljoprivredna biomasa ima znatan energetski potencijal ne samo kroz ostatke primarne poljoprivredne proizvodnje, već i kroz nusproizvode nakon dorade i prerade poljoprivrednih sirovina u prehrambenoj industriji (Krička i sur., 2014.).



Slika 2. Izvori poljoprivredne biomase
(Izvor: www.nationalgeographic.com)

S obzirom na oblik krajnjeg korištenja i vrstu biomase od koje se proizvode, postoje dvije osnovne podjele biogoriva. Prema obliku krajnjeg korištenja biogoriva dijelimo na kruta, tekuća i plinovita. Najčešće korištena kruta goriva su peleti, briketi i sječka, od tekućih biodizel i bioetanol te bioplin kao plinovito. Biogoriva se ovisno o vrsti korištene sirovine u proizvodnji mogu podijeliti na: prvu, drugu i treću generaciju. U odnosu na prvu generaciju biogoriva (bioetanol, biodizel i bioplin) koja su se dobivala iz šećera, škroba, biljnih ulja ili životinjskih masti, tijekom proizvodnje druge generacije ne koriste se sirovine koje ujedno služe kao hrana za ljude i životinje, već se dobivaju isključivo iz ostataka poljoprivredne proizvodnje i šumskog otpada dok se za proizvodnju treće generacije biogoriva najčešće koriste alge (Vermerris, 2008.; Bilandžija i Voća, 2014.).

Iskustva iz država članica Europske unije pokazuju kako nikako ne bi trebalo zanemariti ovaj vrijedan izvor energije. Naravno, treba ju koristiti na način koji će biti energetski učinkovitiji nego što je to bilo do sada, kao što je to odavno postalo pravilo u zemljama Europske unije (Šljivac i Šimić, 2009.).

2.3.1. Poljoprivredne energetske kulture

Poljoprivredne energetske kulture uzgajaju se samo u svrhu dobivanja biomase. Cilj proizvodnje je dobiti što je moguće veće količine biomase po jedinici površine te njezina pretvorbu u energiju. Poljoprivredne energetske kulture mogu se podijeliti na jednogodišnje i višegodišnje. Višegodišnje energetske kulture, za razliku od jednogodišnjih energetskih kultura, nemaju prevelike zahtjeve za vrijeme uzgoja i to u smislu agrotehnike i kvalitete poljoprivrednog tla (Đonglić, 2005.; Bilandžija, 2014.; Bilandžija, 2015.).

Prednosti uzgoja višegodišnjih energetskih kultura:
- obrada tla samo u prvoj godini uzgoja, niski zahtjevi za gnojidbom,
- povećanje plodnosti tla,
- pozitivan utjecaj na biološku raznolikost,

- smanjenje erozije,
- izražena sekvestracija ugljika u biljku i tlo i
- mogućnost proizvodnje CO_2 neutralnog goriva (Krička i sur., 2017.).

Nedostatci uzgoja višegodišnjih energetskih kultura:
- konkurentnost u proizvodnji hrane,
- relativno visoka početna ulaganja i
- opasnost od požara u nasadu s niskim udjelom vlage (Krička i sur., 2017.).

Najzastupljenije višegodišnje poljoprivredne energetske kulture na području Europske unije su *Miscanthus x giganteus* (Slika 3.), divlje proso (Slika 4.) i blještac (Slika 5.), a uzgajaju se na približno 110 000 ha (AEBIOM, 2014.).



Slika 3. *Miscanthus x giganteus* (Izvor: www. bambooplants.ca)



Slika 4. Divlje proso (Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)



Slika 5. Blještac (Izvor: www. brightseeds.co.uk)

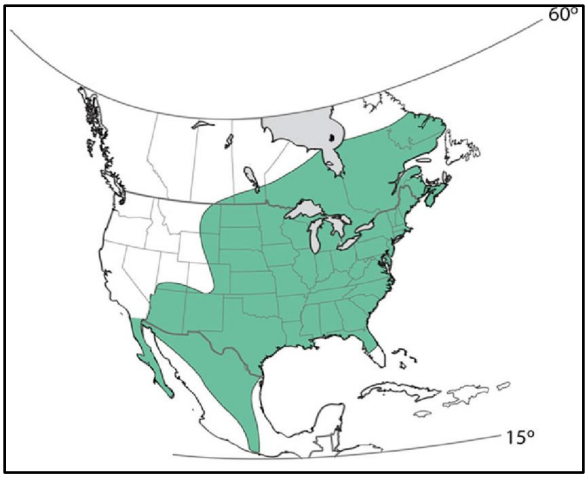
I ostale energetske kulture poput sudanske trave, konoplje, divovske trske i *Sida hermaphrodita* pokazuju značajan potencijal u proizvodnji lignocelulozne biomase (Krička i sur., 2017.).

2.4. Općenito o energetskoj kulturi divlje proso (*Panicum virgatum* L.)

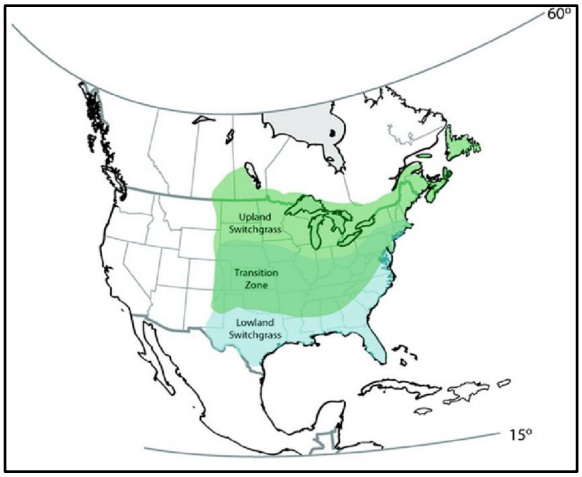
2.4.1. Podrijetlo i evolucija

Divlje proso (*Panicum virgatum* L.) je višegodišnja trava podrijetlom iz sjevernoameričkih prerija s visokom travom, gdje se prirodno pojavljuje istočno od Stjenjaka te od južne Kanade do Meksika i Srednje Amerike (Slika 6.). Kao trava, također se nalazi u Južnoj Americi i Africi gdje se koristi kao krmni usjev. Divlji proso ima C4 sustav fotosinteze, tipičan za tropske i toplosezonske trave, što ga čini vrlo učinkovitim u proizvodnji biomase u usporedbi s travama s C3 sustavom fotosinteze (Elbersen i sur., 2013.). Prirodno se javljaju dva glavna ekotipa (Slika 7.): nizinski ekotip koji ima deblje stabljike i prilagođen je toplim, vlažnim

mjestima na jugu te gorski ekotip koji ima tanje stabljike i tolerira suha tla i hladnije klimatske uvjete (www.ieabioenergy.com, 2011.).



Slika 6. Povijesni raspon divljeg prosa u Sj. Americi (Izvor: Monti, 2012.)



Slika 7. Raspon nizinskog i gorskog ekotipa u Sj. Americi (Izvor: Casler i sur., 2011.)

2.4.2. Divlje proso kao energetska kultura u Sj. Americi

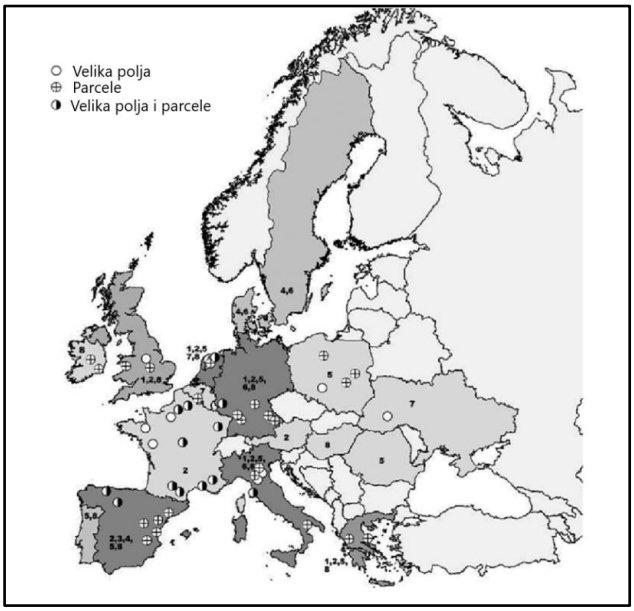
Sasvim je prirodno da su prve studije o uzgoju divljeg prosa kao energetske kulture provedene u Sjevernoj Americi, ali nije svaka kultura, kao kandidat za energetski usjev, prvi put proučavan u svojoj regiji ili zemlji podrijetla. Tako je *Miscanthus x giganteus* podrijetlom iz južne Azije, a kao mogući energetski usjev prvi put istraživan je u Engleskoj. U Kanadi, *Resource Efficient Agricultural Production* (REAP) je od 1991. godine radio na istraživanju divljeg prosa u svrhu toplinske pretvorbe (proizvodnju električne i toplinske energije) i proizvodnju etanola, te je uključen u projekte za korištenje divljeg prosa za proizvodnju papirnih vlakana. Ontario i Quebec su odabrana kao dva najpogodnija područja za istraživanje uzgoja divljeg prosa (Samson, 2007.).

2.4.3. Divlje proso kao energetska kultura u Europi

Značajno je da su prve europske studije o uzgoju divljeg prosa za energiju provedene u čuvenom Institutu za istraživanje usjeva (IACR), koji je ranije bio poznat kao eksperimentalna postaja Rothamsted, kada su znanstvenici 1993. godine zasadili prve parcele gorskog i nizinskog divljeg prosa (Christian i Riche, 2001; Christian i sur., 2002.). Godinu dana kasnije *Biotec*, talijanski privatni istraživački institut smješten u Cerviji (južna Italija), proveo je prve studije o divljem prosu u Mediteranskoj regiji. Navedene engleske i talijanske studije otkrile su adaptibilnost divljeg prosa u sjevernim i južnim europskim uvjetima. Međutim, zbog manje produktivnosti u odnosu na ostale usjeve biomase, divlje proso se u početku smatralo manje prikladnom kulturom za pretvorbu energije od nekih drugih vrsta.

U južnoj Europi, divlje proso je proizvelo znatno niže prinose biomase od gigantske trske (*Arundo donax* L.) i sirka (*Sorghum bicolor* L.), dok je u sjevernoj Europi bio manje produktivan od miskantusa i nekih kultura kratke ophodnje kao što su topola (*Populus spp.*) i vrba (*Salix spp*.) (Monti, 2012.).

Dobri rezultati iz Sj. Amerike otvorili su put europskim projektima koji su se provodili od 1998. do 2001., a posebno su se usredotočili na uzgoj divljeg prosa: „Divlje proso kao alternativni energetski usjev u Europi“ (Elbersen i sur., 2001.). Ovaj je projekt učinkovito koordinirao istraživačke aktivnosti na divljem prosu u Europi i proširio pokuse na širokom rasponu europskih geografskih širina, tla i klime (Slika 8.). Osim studija u Nizozemskoj i Velikoj Britaniji, studije su provedene i u južnoj Europi: Trisaia, Italija (40.09 'N, 16:38' E), Aliartos, Grčka (38.22 'N, 23.10' E) (Alexopoulou i sur., 2008.) i Bologna, Italija (44,43 'N, 11:47' E) (Monti i sur., 2004.).



Slika 8. Pokusna polja i parcele u Europi
(Izvor: Monti, 2012.)

Ti su projekti doveli do nekoliko zaključaka:

- divlje proso može se uzgajati u širokom rasponu europskih geografskih širina, iako razina proizvodnje biomase ne mora uvijek biti zadovoljavajuća,
- proizvodnja do 25 tST/ha je moguća, s većim prinosima koji se općenito vide pri sadnji nizinskih kultivara u južnijim širinama,
- uzgoj putem sjemena vrlo je značajan za poljoprivrednike, jer smanjuje njihova ulaganja u odnosu na razmnožavanja sadnicama,

- divlje proso je posebno ranjivo tijekom prve godine osnivanja usjeva, ali kada je nasad uspostavljen, zahtijeva relativno nisku uporabu zaštitnih sredstava i resursa poljoprivrednih gospodarstava (Parrish i sur., 2012., Monti. 2012.).

2.5. Agroklimatski uvjeti uzgoja divljeg prosa

Kod proizvodnje na otvorenom na prirodne uvjete čovjek najčešće ne može utjecati. Međutim, može prilagoditi i promijeniti procese proizvodnje, a i sortiment. Na to kakvu će kvalitetu i prinos biljke u usjevu dati, utječe niz čimbenika: količina oborina, postotak vode u tlu i zraku, broj sunčanih dana tj. toplina (Vukadinović i sur., 2014.).
Divlje proso ne smije se saditi sve dok **temperatura** tla ne bude stalno iznad 18 °C, a to je obično krajem travnja, a najčešće između 10. svibnja i 10. lipnja (Samson i sur., 2019.). S obzirom na **vodu,** divlje proso ima dobro razvijen duboki korijenov sustav koji mu omogućuje crpljenje vode iz dubljih profila tla (Slika 9.), a tijekom vegetacijske sezone crpi vodu iz gornjih slojeva tla (oko 0,5 m) (Eggemeyer i sur., 2008.).



Slika 9. Korijenov sustav divljeg prosa (Izvor: www.tallgrassprairiecenter.org)

2.6. Agroekološki uvjeti uzgoja divljeg prosa

Tla s višegodišnjim korovima, strme ili nepravilne terene te pretjerano vlažna područja potrebno je izbjegavati zbog negativnog utjecaja na operacije na terenu i žetvi. Produktivnost je najveća na tlima srednje i visoke plodnosti koja su umjereno fine teksture, dobro do umjereno dobro isušena i imaju pH od 5,5 do 6,5 (www.nrcs.usda.gov., 2009.).

Dobra priprema ključna je za uspostavljanje uspješnog nasada divljeg prosa. Priprema tla vrši se uglavnom **konvencionalnom obradom** tla za jare kulture koja uključuje duboku jesensko oranje na dubinu od oko 30 cm i dublje (Krička i sur., 2017.). U godini sjetve **gnojidba** dušikom u većini slučajeva nije potrebna jer je divlje proso izuzetno efikasno u uzimanju hranjivih tvari iz tla, a može se čak pokazati kontraproduktivnom i to poticanjem rasta korova. Kalijeva i fosforna gnojiva se ne primjenjuju tijekom osnivanja, osim ako su razine u tlu niske (Samson i sur., 2019.).

Divlje proso se **uzgaja iz sjemena**. Zbog toga je osnivanje nasada relativno jeftino, ali je ujedno i teško. Ipak, ako se primjenjuju ispravne mjere upravljanja, osnivanje nasada je općenito uspješno i s nižim troškovima u odnosu na trave koje se uzgajaju iz rizoma (*Miscanthus x giganteus*). Jedan od izazova u uzgoju divljeg prosa je mirovanje sjemena što

znači da u pravilu jedan dio sjemena u polju neće proklijati. Preporučljivo je napraviti test klijanja neposredno prije sijanja kako bi se utvrdio potencijal klijanja i prilagodilo količinu sjemena u skladu s tim (Elbersen i sur., 2013.).

Datumi sjetve mogu varirati od kraja travnja do sredine lipnja. Prerana sjetva će rezultirati gubitkom dijela sjemena zbog propadanja i životinja, te se povećava rizik od ranih klijavih korova. Sjetva nakon sredine svibnja povećava rizik od oštećenja zbog suše na novom nasadu (Hancock, 2017.).

Divlje proso može biti **zasijano** pomoću sijačice bez obrade tla (no-till drill) (Slika 10.) ili s konvencionalnom sijačicom (Slika 11.) koja ima dodatak za sjetvu sjemena trava u dobro pripremljeno tlo.



Slika 10. *No-till drill* sijačica
(Izvor: www.deere.com)



Slika 11. Konvencionalna sijačica
(Izvor: www.deere.com)

Općenito se preporučuje količina od 200 do 400 klijavih sjemenki/m². Trebalo bi biti dovoljno oko 100 do 200 biljčica koje se pojavljuju po m² (5-15 kg sjemena/ha). Sjeme se sadi na dubinu od 0,5 do 2 cm (Elbersen i sur., 2013.), dok drugi preporučaju sjetvu na dubinu od 0,6 do 1,3 cm za finija tla pa do 1,9 cm za grublja tla (Hancock, 2017.). Najčešći razmak između redova je od 15 do 80 cm. Divljem prosu potrebno je i nekoliko mjeseci da bi nasad postao dobro uspostavljen, a puna uspostava može potrajati i dvije, tri godine (Ocumpaugh i sur., 1997; Bransby i sur., 1997.).

Kontrola korova tijekom tog vremena je neophodna (Hancock, 2017.). Trave i širokolisne korove može se kontrolirati i košnjom iznad gornjeg dijela stabljike divljeg prosa kako bi se odstranili cvjetni dijelovi stabljika trava i korova prije nego što im sjeme dozrije (www.nrcs.usda.gov, 2009.).

2.7. Mehanizacija i sistemi žetve

Tehnika žetve može obuhvatiti više agrotehničkih zahvata kao što su košnja, formiranje zbojeva, usitnjavanje, sabijanje i manipulacija proizvedene biomase. Žetva se može provesti specijaliziranim uređajima za košnju određene energetske kulture ili se može koristiti konvencionalna mehanizacija koja se koristi u ratarskoj proizvodnji. Osnovna podjela žetve, s obzirom na broj prohoda, može se podijeliti na (Bilandžija i sur., 2017.):

1) Jednofaznu tehniku

Samo jedan prohod s jednim ili dva agregata mehanizacije u kojem se kombiniraju košnja i prešanje ili košnja i usitnjavanje biomase. Kod košnje samokretnim krmnim kombajnom (Slika 12.) biomasa se izravno upuhuje u prateće prikolice u obliku sječke. Prikolica može biti paralelno vučena traktorom uz kombajn ili mogu biti priključene na sam kombajn. Tijekom jednofazne žetve s jednim agregatom košnja se može provesti rotacijskim kosilicama s bubnjevima ili tanjurima, prednjim kosilicama s rotoudaračima, dok je na stražnjem priključnom vratilu priključena preša (Bilandžija i sur., 2017.) (Slika 13.).



Slika 12. Jednofazna žetva s dva agregata, samokretni krmni kombajn i kamion (Izvor: www.lter.kbs.msu.edu)



Slika 13. Jednofazna žetva s dva agregata, prednji priključni krmni kombajn i preša (Izvor: www.wnif.co.uk)

2) Višefaznu

Prva faza je košnja (Slika 14.) koja se može izvršiti kosilicom s rotoudaračima, rotacijskom kosilicom, oscilirajućom kosilicom ili windrowerom (Slika 15.), strojem koji se koristi u košnji trava i usjeva žitarica te oblikuje zbojeve, a može biti izveden kao samokretni ili vučeni stroj (Bilandžija i sur., 2017.). Zbog relativno visoke cijene zastupljeniji su u državama koje imaju razvijeniju poljoprivrednu proizvodnju – npr. John Deere W155 TD 167.486,00 USD (https://configure.deere.com/cbyo/#/en_us/configure/70241229 – cijena 04.09.2019.).

Ukoliko se tijekom košnje odmah ne formiraju zbojevi, iste je poželjno formirati tijekom druge faze, dok se treća faza odnosi na prešanje četvrtastih (Slika 16.) ili okruglih bala (Slika 17.). Najčešće su dvije veličine četvrtastih bala: 0.9 m x 0.9 m x 2.3 m i 0.9 m x 1.2 m x 2.4 m (Samson i sur., 2019.). Okrugle bale obično su promjera od 1,2m do 1,8 m i duljine od 1,2 do 1,8 m (Mitchell i Schmer, 2012.).



Slika 14. Košnja divljeg prosa
(Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)



Slika 15. Windrower John Deere
(Izvor: www.deere.com)



Slika 16. Prešanje četvrtastih bala
(Izvor: www.fginsight.com)



Slika 17. Prešanje okruglih bala
(Izvor: www.agriland.ie)

Bez obzira na sustav žetve, divlje proso treba kositi ne niže od 15 cm visine strništa kako bi se smanjila oštećenja guma na strojevima, zadržala vlaga od snijega, smanjila erozija tla i osiguralo skrovište za divlje životinje. Košnja divljeg prosa na manje od 15 cm rezultirati će krutim, tvrdim stabljikama koje mogu probušiti pneumatike na traktorima ili opremi za žetvu. Visina rezanja od 15 cm također će omogućiti divljem prosu da zadrži hranjive tvari i ugljikohidrate u bazi stabljike koje su potrebne za početak rasta u proljeće (Garland, 2008.).

2.8. Vrijeme žetve i prinosi

Žetva divljeg prosa jednom godišnje predstavlja najekonomičniji sustav žetve za proizvodnju biomase. Vrijeme žetve trebalo bi biti otprilike mjesec dana nakon prvog mraza (McLaughlin i Kszos, 2005.; Parrish i Fike, 2005.). Međutim, može biti potrebno i nekoliko mrazeva prije nego biljka bude potpuno dormantna. Osim toga, odgađanje žetve do nekoliko tjedana nakon mraza omogućuje translokaciju hranjivih tvari iz biomase natrag u bazu stabljike i korijenov sustav. Također poboljšava kvalitetu sirovine zbog niskog sadržaja vlage u nadzemnoj biomasi, kao i zbog smanjenja sadržaja dušika, drugih minerala (K, Ca) i koncentracije pepela koja može uzrokovati zatajenje izravnih sustava izgaranja (Miles i sur., 1996.; Lewandowski i Kicherer, 1997.). Ova strategija čuva hranjive tvari u tlu i istovremeno smanjuje količinu hranjivih tvari koje se gube iz biomase. Međutim, odgađanje žetve tijekom duljeg razdoblja nakon smrzavanja može rezultirati značajnim gubitkom biomase. Razlog tome su zimski vremenski uvjeti koji uzrokuju gubitak suhe tvari (uglavnom lisnato tkivo), degradaciju biomase, kompliciraju operacije žetve i na kraju učinkovitost same žetve (Adler i sur., 2006.).

Sustav dvije košnje godišnje može biti jedina pouzdana opcija za sakupljanje biomase divljeg prosa na nekim tlima u vlažnijim i hladnijim područjima. Općenito, u sustavu dvije žetve godišnje, divlje proso se žanje sredinom ili krajem ljeta, a druga žetva se vrši u jesen ako to vrijeme dopušta. Problem je u tome što je koncentracija dušika u biomasi relativno visoka u prvoj žetvi. Jedna od mogućnosti je biomasu iz ljetne žetve, pokošenu ostaviti na polju dok hranjive tvari i koncentracije pepela ne zadovolje željene razine za određeni proces konverzije (Cherney, 2005.). Troškovi druge žetve također se moraju uzeti u obzir prilikom donošenja ove odluke (Vogel i sur., 2002.). Kod sustava s dvije košnje u razmatranje također treba uzeti i kvalitetu same sirovine i gospodarenja gnojivom. Zbog potencijalno velikog gubitka dušika koji se iznosi putem biomase, možda će biti potrebno primijeniti dodatno dušično gnojivo nakon prve žetve u sustavu dvije košnje godišnje (www.nrcs.usda.gov, 2009.).

Udio vlage u usjevima u vlažnim područjima (SAD) varira od 75% početkom sezone rasta do oko 45% (na bazi vlažne mase) do kasne jeseni i do 20% ako je usjev ostao tijekom zime. U nešto sušim područjima zabilježeno je da se udio vlage kretao od 65% do 12,5% u kasnoj jeseni (Ogden i sur., 2010.). Za vrijeme žetve vlaga bi trebala biti ispod 15%, a poželjno je 10% kada se žanje zimi ili početkom proljeća. Ako je sadržaj vlage iznad 15%, potrebno je vršiti sušenje na polju. Divlje proso se zatim balira (vlaga mora biti < 20%) i skladišti prije nego što se dostavi na preradu ili za korištenje u neke druge svrhe (Elbersen i sur, 2013.).

Istraživanja koja su provedena na području cijelih Sjedinjenih Američkih Država, od strane US Department of Energy i Oak Ridge National Laboratory-a, od 1992. godine do 2001. godine na 42 pokusne lokacije pokazala su da je prinos suhe tvari bio između 9,47 i 23 t/ha (McLaughlin i Kszos, 2005.).

2.9. Skladištenje

Najjednostavniji način skladištenja je skladištenje bala (Slika 18.) ispod zaštitne tkanine, specifične za biomasu, koja je prozračna i omogućuje odbijanje vlažnog zraka tijekom faze samozagrijavanja mase. Također, postoji i način skladištenja bala na vodootpornoj površini zaštićenoj nadstrešnicom (Slika 19.) te smještenoj na sunčanom i prozračnom mjestu. Skladištenje u objektima (Slika 20.) pruža zaštitu od utjecaja vremenskih prilika uz istovremeno mali obujam posla kod skladištenja i izuzimanja iz skladišta. Najpovoljnije je korištenje već postojećih objekata zbog smanjenja troškova. Potrebno je osigurati što veću provjetrenost zbog spriječavanja formiranja kondenzata koji bi mogli oštetiti objekt.



Slika 18. Bale zaštićene tkaninom (Izvor: www.agriexpo.online)



Slika 19. Skladištenje bala pod nadstrešnicom (Izvor: www.nwdistrict.ifas.ufl.edu)



Slika 20. Skladištenje bala u skladištima (Izvor: www.iowaswitchgrass.com)

2.10. Mogućnosti korištenja biomase divljeg prosa u proizvodnji energije

S obzirom na mogućnosti korištenja u procesima proizvodnje energije, biomasa divljeg prosa pokazuje najviše potencijala u proizvodnji **(I) etanola**, **(II) bioplina** te **(III) električne i/ili toplinske energije procesom izgaranja**.

(I) Etanol je jedno od najpoznatijih biogoriva koje može biti zamjena za dizel ili benzin. Korištenje prve generacije etanola, podrazumijeva proizvodnju od zrna kukuruza, šećerne repe, šećerne trske. Međutim, proizvodnja biogoriva iz sirovina za hranu izaziva mnogo kontroverzi i stoga je došlo do razvoja biogoriva druge generacije, koja se proizvode od lignoceluloznog materijala, odnosno od sirovina koje se ne koriste u proizvodnji hrane (Sanderson i sur., 2006; Schmer i sur., 2014.). Za razliku od prve generacije, napredna biogoriva znatno bi mogla reducirati emisiju CO_2, a uz to ne koriste poljoprivredne površine namijenjene proizvodnji hrane kao temelj za njihovu proizvodnju (Gorlitsky, 2012.).

Dok etanol na bazi kukuruza sadrži jedva toliko energije koliko je potrebno za proizvodnju, gorivo proizvedeno od divljeg prosa sadrži više od 5 puta više energije nego što je potrebno za njegov uzgoj i preradu u etanol. Problem je u tome što tehnologija „celuloznog“ biogoriva, koja je potrebna za pretvaranje trava i drvenastih biljnih materijala u etanol, nije tržišno napredovala tako brzo kao tehnologija koja se koristi za pretvaranje žitarica u gorivo prve

generacije. Ona postoji, ali još nije u potpunosti isplativa. Ipak, milijuni litara celuloznog biogoriva sada se godišnje proizvodi u svijetu (www.smithsonianmag.com, 2017.).

Istraživanja su pokazala da se iz biomase divljeg prosa može očekivati količina od 262 kg/tST etanola. Praktična proizvodnja etanola iz divljeg prosa testirana je pomoću raznih metoda predtretmana jer kompleksnost strukture lignocelulozne biomase uvjetuje primjenu različitih tipova predtretmana, koji prethode procesu hidrolize celuloze i hemiceluloze na fermentabilne šećere. Prinos je bio između 0,14 g i 0,19 g etanola po gramu suhe tvari (kada su korišteni mikroorganizmi koji samo pretvaraju C6 šećere u etanol). To pokazuje da je u relativno niskim ulaznim uvjetima moguće postići proizvodnju od 2 t/ha etanola, uz pretpostavku umjerenog prinosa biomase od 10 tST/ha, dok bi teoretski prinos mogao biti i 2,6 tona etanola na 10 tona biomase (Elbersen i sur, 2013.)

Drugo istraživanje pokazalo je da bi prosječan prinos etanola iz biomase mogao biti i do 4200 l/ha ili 300 l/t biomase (www.ethanolproducer.com, 2007.).

(II) Bioplin se dobiva postupkom anaerobne fermentacije unutar koje bakterije razgrađuju biomasu. Anaerobne bakterije razgrađuju gotovo sav biološki materijal, a sam proces fermentacije događa se u nekoliko faza u kojima sudjeluju različite vrste bakterija. Proizvodnja energije zasnovana na bioplinu pouzdanija je od drugih obnovljivih izvora energije, npr. vjetra i sunca, a može se koristiti za pokrivanje velike potražnja za energijom ili promjena u proizvodnji nastalih zbog nepovoljnih vremenskih uvjeta. Bioplin se može izravno koristiti u kombiniranim toplinskim i energetskim jedinicama ili se može preraditi u biometan i transportirati do velikih plinskih elektrana preko plinske mreže (Kiesel i sur., 2016.).

Kukuruzna silaža trenutno je dominantna kultura za proizvodnju bioplina. Međutim, postoji težnja za micanjem kukuruzne silaže iz proizvodnje bioplina, kako bi se ona u potpunosti koristila u stočarskoj proizvodnji. Zamjenom s višegodišnjim C4 travama, koje imaju visoke prinose i hranjive tvari, utjecaj bioplina na okoliš mogao bi se značajno poboljšati te bi se izbjegla kolizija u proizvodnji hrane i energije. Istraživanja u proizvodnji bioplina pokazala su da se može dobiti i do 580 m^3/tST ili 3100 kWh/tST uz pretpostavku da je prinos biomase oko 12,4 tST/ha. Za primjer, potencijal kukuruza je oko 680 m^3/tST uz prinos biomase od oko 17,3 tST/ha, s time da su ulaganja za kukuruz puno veća te su potrebna kvalitetnija tla, za razliku od divljeg prosa koji zahtjeva manje impute i može se uzgajati na lošijim tlima (www.ontariobiomass.com, 2015.).

(III) Proizvodnja energije procesom izgaranja jedan je od temeljnih načina korištenja biomase kao krutog goriva. Prilikom izgaranja biomase procesi su složeni, brojni i događaju se istovremeno. Kod ulaska biomase u ložište, prvi proces je proces sušenja, gdje se oslobađa voda tj. vlaga vezana u biomasi. Drugi proces je proces oslobađanje plinova, koji se odvija gotovo istovremeno sa procesom sušenja. Kada završi sušenje dolazi do porasta temperature te do početka razgradnje čestica krutog goriva uz oslobođenje plinova dok sama brzina oslobađanja plinova ovisi o temperaturi i vrsti krutog goriva. Plinovi koji nastaju kao rezultat procesa, oksidiraju i formiraju plamen oko ovojnice čestice čvrstog goriva kako kisik dolazi

difuzijom u kontakt sa zapaljivim plinovima te ju on zagrijava što dodatno pogoduje oslobađanju plinova. Nakon procesa oslobađanja plinova, započinje zadnja faza, faza izgaranja krutog ostatka, tj. čađe. Kod procesa oslobađanja plinova na rešetci ostaju kruti ostatak i pepeo. Izgaranje krutog ostatka ovisi o brzini heterogene kemijske reakcije ugljika koja se odvija na površini čestice i brzini difuzije kisika u rubni sloj čestice gdje se ta reakcija i odvija. Sustavi izgaranja biomase pomoću raznih tehnika izgaranja i načina na koji se dovodi zrak razvijaju se prvenstveno s ciljem da se smanji emisija štetnih plinova (npr. No_x) ali i radi uštede goriva. Tri su osnovna načina izgaranja: postupno dovođenje zraka za izgaranje, postupno dovođenje goriva te recirkulacija dimnih plinova sa izlaza iz ložišta. Moderni sustavi baziraju se na jednom ili više sustava (Avgustinović, 2016.).

Divlje proso ima energetsku bilancu u približnom omjeru od 20:1 i prosječno može proizvesti 185 GJ energije od 10 tona proizvedene biomase (Samson i sur., 2000.). Relativno visok sadržaj pepela u divljem prosu uzrokovan je većim udjelom lišća koje u biomasi ove biljke može sadržavati i do 3 puta više pepela od stabljika. Visok sadržaj vlage u biomasi također rezultira smanjenom ogrjevnom vrijednošću, a taj sadržaj ne smije biti veći od 23% (Lewandowski i Kicherer, 1997.). U procesu sagorijevanja biomase važan je i sadržaj dušika jer utječe na emisije NOx (Elbersen, 2001.).

3. Energetske karakteristike u procesu izgaranja

Gorive tvari (suha tvar, ugljik, vodik, kisik, sumpor, hlapive tvari), negorive tvari (voda, pepeo, fiksirani ugljik, koks) te donja (LHV) i gornja (HHV) ogrjevna vrijednost definirani su kao primarne karakteristike biomase tijekom valorizacije biomase u procesu izgaranja. Također, na pogodnost korištenja utječu i prisutne količine mikro i makro elemenata u sastavu biomase (Bilandžija i sur., 2017.).

3.1. Gorive tvari biomase

Gorive tvari (Tablica 3.1.) su tvari koje dovedene na svoju temperaturu zapaljenja, uz prisutnost kisika iz zraka te uz stvaranje plamena ili žara, prelaze u plinovite spojeve i nesagorive ostatke. Gorive tvari biomase su: ugljik (C), vodik (H), kisik (O), sumpor (S) i hlapive tvari (HT) (Bilandžija, 2015.; Krička i sur., 2017.; Matin i sur., 2019.).

Tablica 3.1. Gorive tvari biomase

Gorive tvari			
Parametar	Utjecaj na proces izgaranja	Obrazloženje	Izvor
Ugljik	+	Veći udio ugljika dovodi do veće ogrjevne vrijednosti.	(Clarke i sur., 2011.).
Vodik	+	Veći udio vodika dovodi do veće ogrjevne vrijednosti.	(Clarke i sur., 2011.).
Sumpor	-	Formiranje sumpor oksida (SOx) i utjecaj na koroziju u pećima.	(Clarke i sur., 2011.).
Kisik	-	Smanjuje udio gorivih elemenata s kojima je u spoju što dovodi do smanjenja ogrjevne vrijednosti goriva.	(Bilandžija, 2015.)
Hlapive tvari	-	Spaljivanje hlapivih tvari općenito je prilično brzo što čini biomasu lako zapaljivom.	(Jenkins i sur., 1998; Caillat i Vakkilainen, 2013.

3.2. Negorive tvari biomase

Negorive tvari (Tablica 3.2.) su one tvari koje se u normalnim uvjetima neće zapaliti, čak ni onda kada su izložene djelovanju povišene temperature. Posebno su izražene kod krutih goriva, a u njih ubrajamo vodu, dušik (N), pepeo, fiksirani ugljik (Cfix) i koks (Bilandžija, 2015.; Krička i sur., 2017.).

Tablica 3.2. Negorive tvari biomase

Negorive tvari			
Parametar	Utjecaj na kvalitetu biomase	Obrazloženje	Izvor
Voda	-	Udio **vode** utječe na korisnu energiju svježe dobivene biomase, jer se toplina koja se oslobađa tijekom izgaranja gubi isparavanjem vode te izravno negativno utječe na ogrjevnu vrijednost.	(Bridgwater i sur., 2002.).
Pepeo	-	Visok udio **pepela** dovodi do problema taloženja. Goriva iz biomase, osobito poljoprivredne kulture/ostatci, imaju visok udio pepela s visokim udjelom kalija. Kao rezultat, pepeo se tali na nižim temperaturama, što rezultira taloženjem koja mogu zaglaviti elemente peći.	(Clarke i sur., 2011.).
Dušik	-	**Dušik** koji sadrži gorivo, odgovoran je za većinu emisija dušikovih oksida (NOx) koji nastaju izgaranjem biomase te predstavlja jedan od važnijih problema tijekom samog procesa izgaranja.	(Clarke i sur., 2011.; Elbersen i sur., 2001.).
Koks	+	**Koks** nastaje kao ostatak suhe destilacije i što ga je više to je gorivo kvalitetnije.	(Krička, 2010.).
Fiksirani ugljik	+	**Fiksirani ugljik** proizvodi čađu i gori kao kruti materijal u sustavu izgaranja. Veći udio fiksiranog ugljika dovodi do veće ogrjevne vrijednosti energenta.	(Khodier i sur., 2012.; Bilandžija, 2015.;).

3.3. Ogrjevna vrijednost biomase

Ogrjevna vrijednost (Tablica 3.3.), također poznata i kao kalorijska vrijednost, je energija raspoloživa u sirovini koja se procjenjuje iz topline oslobođene tijekom potpunog izgaranja u CO_2, H_2O (plinoviti H_2O za nižu toplinsku vrijednost - LHV ili tekući H_2O za višu toplinsku vrijednost - HHV) i druge manje proizvode (N_2, pepeo, itd.) (Bridgwater i sur., 2002.). Ogrjevna vrijednost najčešće je izražena u kJ ili MJ, a određuje se mjerenjem u kalorimetru i podijeljena je na gornju (HHV) i donju (LHV) ogrjevnu vrijednost (Pandžić i sur., 2016). Ogrjevna vrijednosti jedan je od osnovnih parametara u proračunu potencijala energije biomase (Bilandžija, 2015.).

Tablica 3.3. Ogrjevne vrijednosti biomase

Ogrjevna vrijednost			
Parametar	Utjecaj na proces izgaranja	Obrazloženje	Izvor
Gornja ogrjevna vrijednost (HHV)	+	**Gornja ogrjevna vrijednost (HHV)** definira udio energije goriva koji uključuje kondenzacijsku toplinu vodene pare sadržane u dimnim plinovima.	(Jenkins i sur., 1998.; Holtz, 2006.).
Donja ogrjevna vrijednost (LHV)	+	**Donja ogrjevna vrijednost (LHV)** označava udio energije goriva bez kondenzacijske topline vodene pare sadržane u ispušnim plinovima.	(Jenkins i sur., 1998.; Holtz, 2006.).

3.4. Mikro i makro elementi

Elementarni sastav ima značajan utjecaj na kvalitetu biomase i parametre procesa izgaranja (Stolarski i sur., 2017.) te može uzrokovati probleme u pećima, kroz pojavu šljake pepela, korozije i prljavštine (Cassida i sur., 2005.). Kemijski sastav korištene biomase usko je povezan s opsegom ovih problema (Reumerman i Van der Berg, 2002.). U sastavu biomase najčešće se nalaze slijedeći mikro i makro elementi: natrij (**Na**), kalcij (**Ca**), kalij (**K**), magnezij (**Mg**), krom (**Cr**), kobalt (**Co**), olovo (**Pb**), mangan (**Mn**), željezo (**Fe**), kadmij (**Cd**), nikal (**Ni**), cink (**Zn**), silicij (**Si**), klor (**Cl**), bakar (**Cu**) i titan (**Ti**) (Cuiping i sur., 2004.: Bilandžija, 2015.).

Proporcije pojedinih elemenata treba proučavati pojedinačno, ali i u njihovom međusobnom odnosu. Primjerice, zbog značajnog utjecaja na pojavu šljake pepela, u procjeni kvalitete biomase treba uzeti u obzir omjer **K**, **Ca** i **Si**. Biomasa koja ima visok omjer **Si** i **K** te **Ca** i **K** pridonosi smanjenju pojave šljake (Reumerman i Van der Berg, 2002.). **K** i **Na**, u kombinaciji sa **Cl** i **S** dovode do pojave korozije. Ovi elementi djelomično isparavaju tijekom izgaranja, formirajući alkalne kloride koji se kondenziraju na površini izmjenjivača topline i reagiraju s dimnim plinom, formirajući sulfate i otpuštajući **Cl** (Masia i sur., 2007.; Khan i sur., 2009.). **Ca i Mg** obično povećavaju temperaturu taljenja pepela, dok je **K** smanjuju (Obernberger, 1997.; Von Loo i Koppejan, 2002.). Stvaranje naslaga i onečišćenja javlja se zbog prisutnosti kalija **(K)**, kalcija **(Ca)**, magnezija **(Mg)**, klora **(Cl)** i silicija **(Si)** u biomasi u količinama većim nego kod ugljena (Qin i sur., 2006.).

Gorivo je samim time bolje ako je prisutan manji udio **K** i **Na** (Masia i sur., 2007.; Von Loo i Koppejan, 2008.). Tijekom izgaranja, hlapivi elementi kao što je **Cl** mogu formirati submikronske čestice koje se kondenziraju kao soli, koje uz prisustvo visokih temperatura, mogu uzrokovati da **K** i **Si** formiraju ljepljive naslage u komori za izgaranje (Bläsing i Müller, 2010.a.; Bläsing i Müller, 2010.b.). Zajedno s **Cl** i **S**, **K** i **Na** imaju glavnu ulogu u mehanizmima korozije. U slučaju visoke točke tališta, uz prisutnost **K** ili **Ca**, **Si** lako reagira formiranjem alkalnih silikata koji imaju značajno niže točke taljenja. **P** također može povećati potencijalno taloženje šljake (Bläsing i Müller, 2010.a).

Što je viši sadržaj kalija i natrija, niža je točka taljenja pepela biomase, a kao rezultat toga veća je pojava šljake i korozija kotla. Plinoviti klor i klorovodik glavni su faktori korozije kotlova, ali djelovanje HCl na metalu kotla manje je opasno od Cl_2 (elementarni klor). Kloridi, posebno kalijev i natrijev klorid, koji se oslobađaju tijekom izgaranja biomase kondenziraju se na površini kotlova. Zatim, u reakciji klorida s željeznim oksidima prisutnim u naslagama ili SO_2 koji se javlja u plinovima, nastaju klor i klorovodik. Čvrsti produkti tih reakcija pretvaraju se u staklasto viskozni sloj koji hvata nehlapljive elemente (**Ca, Si** i **Mg**) iz kojih nastaju silikati s nižim točkama taljenja nego u slučaju klorida, što povećava rizik od korozije (Brodowska i sur., 2018.).

Alkalni elementi kao što su **Na**, **Mg** ili soli (npr. klorid, sulfid) lako formiraju smjesu dviju ili više krutih faza, čime se smanjuje točka taljenja (Porbatzki i sur., 2011.). **Si** u kombinaciji s **Na** i **K** može dovesti do stvaranja silikata u česticama lebdećeg pepela (Khan i sur., 2009.). Ovi procesi potiču taljenje pepela na rešetci za sagorijevanje i pojavu šljake (Von Loo i Koppejan, 2008.). Tu činjenicu treba uzeti u obzir pri odabiru odgovarajuće tehnologije izgaranja i kontrole temperature (Von Loo i Koppejan, 2002.). **Cl** ima ulogu katalizatora, što dovodi do aktivne oksidacije materijala (cjevovodi), čak i kad je temperatura njihovih stijenki niska (100 – 150 °C) (Masia i sur., 2007.).

Kako sastav biomase utječe na sastav pepela, koji među ostalim čine i teški metali (**Cr**, **Co**, **Pb**, **Mn**, **Fe**, **Cd**, **Ni**, **Zn**, **Si**, **Cl**, **Cu i Ti**), poželjan je što niži udio istih kako bi se krajnje zbrinjavanje pepela nakon izgaranja moglo obaviti na ekološki prihvatljiv način (Bilandžija, 2015.).

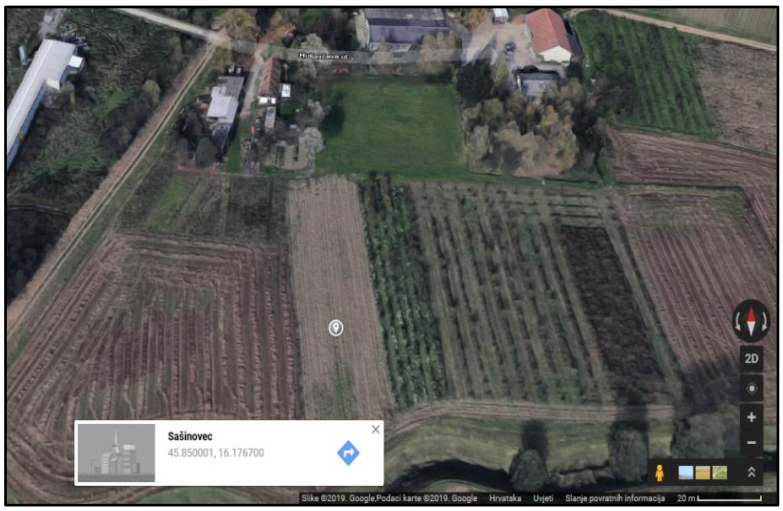
4. Materijali i metode

4.1. Materijali

Istraživanje je provedeno na biomasi trogodišnjeg nasada trave divlje proso (*Panicum virgatum* L.) (eng. *switchgrass*) koji je posijan 22. travnja 2016. godine. Pokusno polje nalazi se u gradu Zagrebu na lokaciji Šašinovec.

4.1.1. Pokusno polje Šašinovec

Pokusno polje smješteno je na površini Pokušališta Šašinovec Agronomskog fakulteta u istočnom dijelu grada Zagreba. Isječak topografske karte s položajem pokusnog polja prikazan je na slici 21. (N 45° 85' 00,01", E 16° 17' 67,00").



Slika 21. Isječak topografske karte s prikazom lokacije pokusnog polja Šašinovec (Izvor: www.google.com/maps)

4.1.2. Plan pokusnog polja

Osnovna parcela ima površinu od 19,2 m² (2,4 m x 8 m) dok je razmak između parcela i repeticija 1,3 m. Pokusno polje sastoji se od 16 parcela koje su postavljene po shemi Latinski kvadrat. Ukupna površina pokusnog polja iznosi 484,7 m² (35,9 m x 13,5 m). Pokusno polje divljeg prosa zasijano je 22.04.2016. godine samohodnom sijačicom na 12 cm razmaka između redova, s normom sjetve od 20 kg/ha.

Tijekom 2018. i 2019. godine provedena je žetva biomase divljeg prosa u dva roka (jesenski i proljetni):

- **jesenski rok** – 22.11.2018. godine
- **proljetni rok** – 08.03.2019. godine

Žetva (Slika 22.) je provedena na svakoj osnovnoj parceli u veličini od 2 m² (1 m x 2 m), odsijecanjem biljka na visini od 10 do 15 cm od tla motornom pilom.
Nakon žetve izvršeno je vaganje biomase na digitalnoj visećoj vagi (Slika 23.).

Dio požete biomase nakon vaganja je sasjeckan u manje dijelove, spremljen u vreće za uzorkovanje (Slika 24.) te poslan na 48-satno sušenje na 60 ˚C.



Slika 22. Žetva biomase na osnovnoj parcelici (Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)



Slika 23. Vaganje požete biomase (Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)



Slika 24. Uzorci biomase (Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)

Priprema uzoraka (Slika 25.) za analize kemijskih svojstava biomase provedena je na način da je biomasa nakon sušenja samljevena laboratorijskim mlinom Retsch GM 300 (Slika 26.).



Slika 25. Samljeveni uzorci (Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)



Slika 26. Laboratorijski mlin Retsch GM 300 (Izvor: Božidar Matin – vlastita arhiva)

4.2. Metode

Analize sastava biomase provedene su u Laboratoriju za istraživanje biomase i energetsku iskoristivost u poljoprivredi, Zavoda za poljoprivrednu tehnologiju, skladištenje i transport na Sveučilištu u Zagrebu, Agronomskom fakultetu. Nakon jesenskog i proljetnog uzorkovanja biomase divljeg prosa sa svake osnovne parcele u uzorcima su analizirane negorive tvari, gorive tvari, ogrjevne vrijednosti te mikro i makro elementi. Vrijednosti dobivenih udjela označene istim slovom statistički se značajno ne razlikuju uz $p < 0,05$.

4.2.1. Negorive tvari

Od negorivih tvari utvrđen je udio vode, pepela, dušika, koksa i fiksiranog ugljika.

4.2.1.1. Udio vode

Udio vode određuje se u laboratorijskoj sušnici (INKO, Hrvatska) (Slika 27.), prema HRN EN 18134-2:2015 metodi.



Slika 27. Laboratorijska sušnica
(Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)

4.2.1.2. Udio pepela

Određivanje udjela pepela provodi se u mufolnoj peći (Nabertherm, SAD) (Slika 28.) na temperaturi od 550 ± 10 °C tijekom 5 sati i 30 minuta, prema standardnoj metodi HRN EN ISO 18122:2015.



Slika 28. Mufolna peć (Izvor:
Božidar Matin – vlastita arhiva)

4.2.1.3. Udio dušika

Određivanje udjela dušika provodi se metodom suhog spaljivanja na Vario, Macro CHNS analizatoru (Elementar, Njemačka) prema standardnoj metodi HRN EN ISO 16948:2015.

4.2.1.4. Udio koksa

Udio koksa određuje se pri temperaturi od 900 ± 10 °C u mufolnoj peći (Nabertherm, SAD) (Slika 28.) u trajanju od 4 minute prema metodi za određivanje koksa CEN/TS 15148:2009.

4.2.1.5. Udio fiksiranog ugljika

Udio fiksiranog ugljika određuje se računski u skladu s EN 15148:2009.

Fiksirani ugljik (%) = koks (%) – pepeo (%)

4.2.2. Gorive tvari

Od gorivih tvari utvrđen je udio ugljika, vodika, sumpora, kisika i hlapivih tvari.

4.2.2.1. Udio ugljika, vodika i sumpora

Određivanje udjela ukupnog ugljika, vodika i sumpora, provodi se metodom suhog spaljivanja na Vario, Macro CHNS analizatoru (Elementar, Njemačka) (Slika 29.), prema protokolu HRN EN ISO 16948:2015 za ugljik i vodik te HRN EN ISO 16994:2015 za sumpor.



Slika 29. CHNS analizator (Izvor:
Božidar Matin - vlastita arhiva)

4.2.2.2. Udio kisika

Udio kisika izračunava se računski:

Kisik (%) = 100 - C (%) - H (%) - N (%) - S (%)

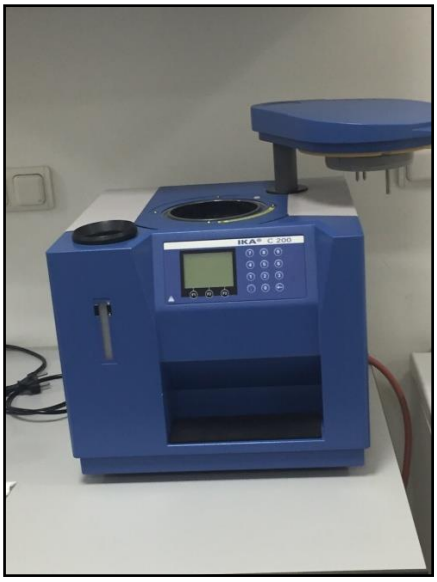
4.2.2.3. Udio hlapivih tvari

Udio hlapivih tvari određuje se računski u skladu s EN 15148:2009. Hlapiva tvar sadrži zapaljive (CxHy plinovi, CO i H_2) i nezapaljive plinove (CO_2, SO_2 i NOx).

4.2.3. Ogrjevna vrijednost

4.2.3.1. Gornja ogrjevna vrijednost

Gornja ogrjevna vrijednost ($H_{g)}$ određena je korištenjem standardne EN 14918:2010 metode u adijabatskom kalorimetru IKA C200 (Slika 30.).



Slika 30. Adijabatski kalorimetar (Izvor: Božidar Matin - vlastita arhiva)

4.2.3.2. Donja ogrjevna vrijednost

Donja ogrjevna vrijednost (H_d) dobiva se računski:

H_d (J kg^{-1}) = H_g (J kg^{-1}) - {2441.80* (J kg^{-1}) [8.936** x H (%)]} / 100

Pri čemu je: * Energija potrebna za isparavanje vode

** Odnos molekularne mase između H_2O i H_2

4.2.4. Mikro i makro elementi

Od mikro elemenata utvrđen je udio kadmija (Cd), željeza (Fe), mangana (Mn), nikla (Ni), cinka (Zn), kroma (Cr), kobalta (Co) i olova (Pb), a od makro elemenata udio kalija (K), natrija (Na), kalcija (Ca) i magnezija (Mg). Analiza mikro i makro elemenata provedena je na atomskom apsorpcijskom spektrometru (Perkin Elmer, AAnalyst 400) (Slika 31.), uz prethodnu pripremu uzoraka izgaranjem u mikrovalnoj peći (HRN EN ISO 16967:2015, HRN EN 16968:2015).



Slika 31. Atomski apsorpcijski spektrometar (Izvor:
Božidar Matin - vlastita arhiva)

4.3. Statistička obrada podataka

Korištena je PROC MIXED iz programskog paketa SAS (SAS Institute Inc., SAS 9.1.2 Help and Documentation, Cary, NC: SAS Institute Inc., 2002 - 2004.). Vrijednosti dobivenih udjela označene istim slovom statistički se značajno ne razlikuju uz $p < 0,05$.

5. Rezultati i rasprava

Provedenim analizama utvrđene su važnije energetske karakteristike biomase divljeg prosa (*Panicum Virgatum* L.) i to analizama **negorivih tvari** (voda, pepeo, dušik, koks i fiksirani ugljik), **gorivih tvari** (ugljik, vodik, sumpor, kisik i hlapive tvari), **ogrjevne vrijednosti** (gornja i donja) te **mikro** (kadmij, natrij, željezo, mangan, nikal, cink, krom, kobalt i olovo) **i makro elemenata** (kalij, natrij, kalcij, magnezij).

5.1. Negorive tvari

5.1.1. Udio vode

Udio vode jedan je od važnijih parametara koji utječe na goriva svojstva neke biomase. O udjelu vode ovisi kojom metodom će se sirovina prevesti do energije, odnosno goriva, te koliko će se potrošiti energije pri gorenju na isparavanje vode iz biomase. Udio vode uvelike utječe na razliku između ogrjevnih vrijednosti (Ross, 2008.).

U tablici 5.1. prikazan je udio vode u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.1. Udio vode (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	38,88a ± 0,287
Proljeće	10,95b ± 0,192

Prema vrijednostima iz tablice 5.1. udio vode u jesenskom roku žetve iznosio je 38,88%, a u proljetnom 10,95% te postoji statistička razlika između rokova žetve. Može se utvrditi da rokovi žetve značajno utječu na udio vode u istraživanoj biomasi. Odgađanje jesenskog roka žetve do proljeća dovodi do značajnog snižavanja udjela vode što je poželjno svojstvo tijekom procesa izgaranja.

U usporedbi s literaturnim podatcima Kemmerer i sur. (2014.) navode udio vode u biomasi trave divljeg prosa od 30% do 48% za jesenski rok žetve dok Ashwort i sur (2017.) navode udio od čak 80% početkom vegetacije, 53,4% za jesenski rok, od 12,5% do 17,9% za početak zime te od 12,6% do 19,6% za rok u veljači. Utvrđeni udio vode u ovom istraživanju je u granicama literaturnih podataka kod jesenskog roka, dok je kod proljetnog roka žetve manji.

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da divlje proso ima udio vode u granicama udjela vode kod drugih važnih sirovina korištenih za biomasu. Kumar i Ghosh (2018.) navode udio vode kod drvne biomase u vrijednosti od 20,1%, a kod slonove trave od 14,1%.

Tilvikiene (2014.) navodi udio vode za biomasu miskantusa između 30% i 70% ovisno o roku žetve, a Vassilev i sur. (2010.) navode udio vode kod pšenice od 10,1%.

5.1.2. Udio pepela

Udio pepela uvelike utječe na iskoristivost biomase. Jedna od ključnih komponenti kada se radi o udjelu pepela je skladištenje i rukovanje sirovinom. Kontaminacija tijekom skladištenja i transporta može uzrokovati da sirovina ima mnogo veći udio pepela nego što je prisutan u sirovini kod žetve (Gorlitsky, 2012.). Goriva s nižim udjelom pepela bolja su za termičko iskorištenje jer manje količine pepela olakšavaju njegovo uklanjanje, transport, skladištenje, iskorištenje i odlaganje (Krička, 2014.).

U tablici 5.2. prikazan je udio pepela u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.2. Udio pepela (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	4,59a ± 0,252
Proljeće	3,71b ± 0,066

Kako pokazuje tablica 5.2., udio pepela u jesenskom roku žetve iznosio je 4,59%, a u proljetnom 3,71% te postoji statistički razlika između rokova žetve. Dobivene vrijednosti biomase nalaze se unutar granica vrijednosti navedenih u literaturi. Kumar i Ghosh (2018.) navode udio pepela od 4,4% za jesenski rok, Clarke i sur. (2011.) od 5,7% za jesenski rok, a Sadaka i sur. (2014.) od 3,8% za jesenski rok.

Pilon i Lavoie (2011.) navode udio pepela od 3,7% za jesenski rok, Adler i sur. (2006.) od 3,41% do 3,46% za jesenski rok te od 2,26% do 2,47% za proljetni rok .

Pregledom literaturnih podataka Vassilev i sur. (2010.) utvrđuju udio pepela kod pšenice od 4% do 7,1% i ječma od 6%, Kumar i Ghosh (2018.) kod drvne biomase od 1,1%, a Brosse i sur. (2012.) kod miskantusa od 2,2% do 3,5%.

S obzirom na to da je povoljnija biomasa ona što ima niži udio pepela, odgoda žetve na proljetni rok poželjna je jer daje bolje rezultate.

5.1.3. Udio dušika

Kako dušik ne sudjeluje u procesu izgaranja, smanjuje ogrjevnu vrijednost biomase. Prilikom izgaranja biomase dio dušika se spaja s kisikom tvoreći dušične (NOx) spojeve koji imaju negativan utjecaj na okoliš (Garcia i sur., 2012.).

U tablici 5.3. prikazan je udio dušika u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.3. Udio dušika (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	0,14a ± 0,008
Proljeće	0,11b ± 0,013

Iz tablice 5.3. uočavaju se statističke razlike u udjelu dušika od 0,14% za jesenski rok te 0,11% za proljetni rok žetve. Dobivene vrijednosti su manje od vrijednosti koje navode Clarke i sur. (2011.) od 0,9% za jesenski rok. Pilon i Lavoie (2011.) utvrđuju udio dušika od 0,5% za jesenski rok, Adler i sur. (2006.) od 0,43% do 0,62% za jesenski rok te od 0,4% do 0,54% za proljetni rok. Elbersen i sur. (2013.) navode udio od 0,56% za proljetni rok, a David i Ragauskas (2010.) od 0,03% do 1,08% za jesenski rok. Uspoređujući dobivene rezultate može se uočiti da su dobivene vrijednosti za udio dušika kod divljeg prosa značajno manje od literaturnih vrijednosti iste kulture.

Clarke i sur. (2011.) navode da je udio dušika kod sirka 1,0%, miskantusa 0,5% i drvne biomase od 0,2% do 0,5%, a Tumuluru (2015.) navodi da je udio dušika kod kukuruza 0,42%. Vidljivo je da divlje proso ima nizak sadržaj dušika u odnosu na prikazane tipove biomase korištene za sagorijevanje.

5.1.4. Udio koksa

Udio koksa predstavlja ostatak suhe destilacije te što je njegov udio veći, biomasa je kvalitetnija (Krička, 2010.).

U tablici 5.4. prikazan je udio koksa u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.4. Udio koksa (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	15,61a ± 0,848
Proljeće	14,71a ± 0,644

Rezultati tablice 5.4. pokazuju statističke razlike u udjelima koksa te oni iznose 15,61% za jesenski rok te 14,71% za proljetni rok žetve.

Bilandžija i sur. (2014.) navode udio koksa kod miskantus između 15,74% i 17,21%, ovisno o vremenu žetve, odnosno prosječno 16,51%.

Kvalitetnija biomasa dobivena je jesenskom žetvom jer je vidljivo da se udio koksa smanjio s odgodom žetve do proljeća.

5.1.5. Udio fiksiranog ugljika

Povećanjem udjela fiksiranog ugljika (Cfix) u biomasi povećava se njena ogrjevna vrijednost, a samim time poboljšava se i sama kvaliteta biomase. Udio fiksiranog ugljika u biomasi predstavlja količinu vezanog ugljika putem fotosinteze u biomasi (McKendry, 2002.; Obenberger i Thek, 2004.).

U tablici 5.5. prikazan je udio fiksiranog ugljika u ovisnosti o rokovima žetve

Tablica 5.5. Udio fiksiranog ugljika (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	10,16a ± 0,789
Proljeće	10,23a ± 0,642

Udio fiksiranog ugljika bio je 10,16% kod jesenskog roka, a 10,23% kod proljetnog roka žetve te između tih rezultata nema statističke razlike (tablica 5.5.). Takvi rezultati manji su od literaturnih vrijednosti iste kulture od onih koje navode Kumar i Ghosh (2018.) od 12,3% za siječanjski rok, Sadaka i sur.(2014.) od 23,1% za jesenski rok, Pilon i Lavoie (2011.) od 15,3% za jesenski rok te Jackson i sur. (2016.) od 13,37% za kasno zimski rok.

McKendry (2002.) navodi udio fiksiranog ugljika kod drvne biomase od 17%, a Kumar i Ghosh (2018.) od 17,3%. Jackson i sur. (2016.) navode udio istraživanog parametra kod stabljike pšenice od 15,89% i miskantusa od 14,49%.

Iz ovih podataka vidljivo je da divlje proso ima manji udio fiksiranog ugljika u odnosu na neke od korištenih sirovina biomase za izgaranje. S obzirom na to da je biomasa s većim udjelom fiksiranog ugljika kvalitetnija, žetvom u proljeće dobiven je bolji udio istog.

5.2. Gorive tvari

5.2.1. Udio ugljika

Ugljik je osnovni i najvažniji element svih vrsta goriva, a njegov veći udio povećava energetsku kvalitetu biomase (Dimitrijević, 1984.; Obernberger i Thek, 2004.; Vassilev i sur., 2010.; Bilandžija, 2015.). Kako njegova vrijednost povećava energetsku kvalitetu biomase, veći udio ugljika apsolutno je poželjno svojstvo u biomasi.

U tablici 5.6. prikazan je udio ugljika u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.6. Udio ugljika (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	47,02b ± 0,227
Proljeće	47,49a ± 0,113

Sadržaj ugljika od 47,02% za jesenski rok te od 47,49% za proljetni rok žetve (tablica 5.6.) pokazuje da postoji statistička razlika između rokova žetve. Kada se usporede s literaturnim podatcima, dobivene vrijednosti udjela ugljika istraživane biomase su veće. Clarke i sur. (2011.) navode vrijednost od 45,5% za jesenski rok, Pilon i Lavoie (2011.) od 44,5% za jesenski rok, David i Ragauskas (2010.) od 42,33% do 47,53% za jesenski rok te Kumar i Ghosh (2018.) od 38% za siječanjski rok.

Clarke i sur. (2011.) navode da je udio ugljika kod drvne biomase od 47,8% do 50,1%, kod sirka 45,8% te kod miskantusa 47,9%. Qian i sur (2013.) utvrđuju udio ugljika kod sirka od 40,68% dok se kod stabljike pšenice vrijednost kreće od 46,2% do 49,4% (Vassilev i sur., 2010.; McKendry, 2002.).

Iz ovih podataka vidljivo je da divlje proso ima gotovo jednak udio ugljika u odnosu na neke od korištenih sirovina biomase za izgaranje. Biomasa je kvalitetnija što ima veći udio ugljika, a odgođenom žetvom do proljeća takva kvaliteta će se i postići.

5.2.2. Udio vodika

Vodik uz ugljik spada u osnovni sastav gorive tvari svakog goriva, a povećani udio vodika poboljšava kvalitetu samog energenta. Povećava ogrjevnu vrijednost goriva te stvara plamen i najzaslužniji je za razvijanje plinova (Dimitrijević, 1984.; Obernberger i Thek, 2004.; Voća, 2009.; Vassilev i sur., 2010.; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.7. prikazan je udio vodika u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.7. Udio vodika (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	5,99a ± 0,014
Proljeće	6,01a ± 0,040

Kao što je vidljivo iz tablice 5.7., statistička razlika između udjela vodika u istraživanoj biomasi divljeg prosa ne postoji. Udio kod jesenske žetve bio je 5,99% dok je kod proljetne bio 6,01%. Uspoređujući dobivene vrijednosti s literaturnim podatcima može se zaključiti da su podatci navedeni u literaturi gotovo jednaki dobivenim. Sadaka i sur. (2014.) navode udio vodika od 6,2% za jesenski rok, David i Ragauskas (2010.) od 5,31% do 6,81% za jesenski rok, Pilon i Lavoie (2011.) od 5,8% za jesenski rok, Clarke i sur. (2011.) od 6,2% za jesenski rok te Kumar i Ghosh (2018.) od 6,2% za siječanjski rok.

Udio vodika, kako navodi McKendry (2002.), kod stabljike ječma iznosi 6,1%, kod stabljike pšenice 5,5%, a kod drvne biomase 6,3%. Clarke i sur. (2011.) donose vrijednosti vodika kod miskantusa od 5,8%, sirka od 5,3%, stabljike ječma od 5,3%, stabljike pšenice od 6,0% i drvne biomase od 5,8% do 6,0%. Literaturni podatci i ovdje pokazuju da je udio vodika kod ovih istraživanih sirovina gotovo jednak udjelu vodika u biomasi divljeg prosa.

5.2.3. Udio sumpora

Kako sumpor formira plinovite komponente, sumpor dioksid (SO_2) i sumpor trioksid (SO_3), s ekološkog aspekta izuzetno je bitan njegov što niži udio u korištenom energentu (McKendry, 2002.; Van Loo i Koppejan, 2008.; Vassilev i sur., 2010.; Garcia i sur., 2012.; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.8. prikazan je udio sumpora u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.8. Udio sumpora (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	0.14a ± 0,011
Proljeće	0,11b ± 0,003

Rezultati istraživanja pokazali su da je udio sumpora u biomasi jesenske žetve 0,14%, a u biomasi proljetne žetve 0,11%, kako pokazuje tablica 5.8. te između njih postoji statistička razlika.

Prema literaturnim podatcima Sadaka i sur. (2014.) navode udio od 0,13% za jesenski rok, Clarke i sur. (2011.) udio od 0,1% za jesenski rok, Kumar i Ghosh (2018.) od 0,3% za siječanjski rok te Lemus i sur. (2002.) od 0,14% za jesenski rok. Iako su neki rezultati veći ili manji od dobivenih rezultata istraživanja može se zaključiti da se dobivene vrijednosti istraživane biomase podudaraju s vrijednostima navedenim u literaturi.

Istraživanja udjela sumpora kod drugih sirovina pokazala su da su vrijednosti gotovo identične. Clarke i sur. (2011.) navode identičan udio od 0,1% kod kukuruza, miskantusa, sirka, stabljike ječma i pšenice te drvne biomase, dok Qian i sur (2013.) za sirak navode udio od 0,2%. Svi uzorci imaju niski udio sumpora što je dobro, jer je povišeni udio sumpora štetan za okoliš.

Niži udio sumpora dobiven je proljetnom žetvom te se stoga preporuča jesenski rok žetve odgoditi do proljeća.

5.2.4. Udio kisika

Kisik je element čija je prisutnost u gorivu nepoželjna, jer isti može uzeti učešće u izgaranju zamjenjujući dio kisika iz zraka, neophodnog za izgaranje (Dimitrijević, 1984.; Obernberger i Thek, 2004.; Vassilev i sur., 2010.; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.9. prikazan je udio kisika u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.9. Udio kisika (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	46,72a ± 0,229
Proljeće	46,27b ± 0,156

Prema tablici 5.9. vidljivo je da je statistički različit udio kisika od 46,72% za jesenski rok, te od 46,27% za proljetni rok žetve. Prema korištenoj literaturi, Clarke i sur. (2011.) navode udio kisika od 41,7% za jesenski rok, Pilon i Lavoie (2011.) od 45,7% za jesenski rok te David i Ragauskas (2010.) od 37,58% do 42,54% za jesenski rok.

Sadaka i sur. (2014.) navode udio kisika od 44% za jesenski rok, Kumar i Ghosh (2018.) od 50,6% za siječanjski rok te Lemus i sur. (2002.) od 41,4% za jesenski rok. Kad se usporede s literaturnim podatcima dobivene vrijednosti udjela kisika istraživane biomase uglavnom su veće.

Uspoređujući dobivene udjele kisika istraživane biomase s ostalim sirovinama koje se koriste u energetske svrhe, može se zaključiti da i u ovom slučaju divlje proso uglavnom ima veći udio kisika. Tako Clarke i sur. (2011.) navode udio kisika kod kukuruza od 48,9%, miskantusa od 43%, sirka od 42,3%, stabljike ječma od 41%, stabljike pšenice od 44,5% te drvne biomase od 41,4% do 45,4%, dok Qian i sur (2013.) za sirak navode udio od 52,2%.

Kako je kisik u gorivu nepoželjan, prema dobivenim rezultatima, poželjno je žetvu odgoditi do proljeća.

5.2.5. Udio hlapivih tvari

Pojam hlapive tvari odnosi se na komponente goriva koje se oslobađaju kada se gorivo zagrijava pri visokim temperaturama. Kod prevelikog sadržaja hlapivih tvari dolazi do naglog oslobađanja energije pri relativno manjim temperaturama pa takva goriva imaju manju energetsku vrijednost te je stoga poželjno da je njihov udio u biomasi što niži (Jenkins i sur., 1998.; McKendry, 2002.; Van Loo i Koppejan, 2008.; Vassilev i sur., 2010.; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.10. prikazan je udio hlapivih tvari u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.10. Udio hlapivih tvari (%)

ROK ŽETVE	
Jesen	79,78a ± 0,562
Proljeće	80,86a ± 0,707

Dobivene vrijednosti istraživane biomase pokazale su da ne postoji statistička razlika između udjela hlapivih tvari od 79,78% za jesenski rok te od 80,86% za proljetni rok žetve (tablica 5.10.). Literatura navodi vrijednosti koje dobivene vrijednosti istraživanja svrstavaju u granice literaturnih podataka. Kumar i Ghosh (2018.) navode udio hlapivih tvari od 83,2% za siječanjski rok, Jackson i sur. (2016.) od 83,65% za kasnu zimu, Sadaka i sur. (2014.) od 73,1% za jesenski rok te Pilon i Lavoie (2011.) od 81% za jesenski rok.

Kada se usporede dobiveni udjeli hlapivih tvari istraživane biomase s literaturnim podatcima ostalih sirovina koje se koriste u energetske svrhe, divlje proso ima ili veći ili manji udio hlapivih tvari. Jackson i sur. (2016.) navode udio hlapivih tvari za miskantus od 82,98% i stabljiku pšenice od 78,61%. Kumar i Ghosh (2018.) navode udio za drvnu biomasu od 82% dok Qian i sur (2013.) za sirak navode udio od 68,1%.

Odgodom žetve do proljeća dobiven je veći udio hlapivih tvari, a kako je veći udio nepoželjan, može se zaključiti da je jesenska žetva bolji odabir.

5.3. Ogrjevna vrijednost

5.3.1. Gornja ogrjevna vrijednost

Gornja ogrjevna vrijednost podrazumijeva sadržaj energije goriva koji uključuje kondenzacijsku toplinu vodene pare, sadržane u dimnim plinovima (Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.11. prikazana je gornja ogrjevna vrijednost u ovisnosti o rokovima žetve

Tablica 5.11. Gornja ogrjevna vrijednost (MJ kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	18,60a ± 0,128
Proljeće	18,73a ± 0,244

Dobivene vrijednosti navedene u tablici 5.11. pokazuju da ne postoji statistička razlika između gornje ogrjevne vrijednosti od 18,60 MJ kg^{-1} za jesenski rok te od 18,73 MJ kg^{-1} za proljetni rok žetve. Kumar i Ghosh (2018.) navode vrijednost od 19,7 MJ kg^{-1} za siječanjski rok, Jackson i sur. (2016.) od 18,61 MJ kg^{-1} za kasnu zimu, Pilon i Lavoie (2011.) od 19,5 MJ kg^{-1} za jesenski rok, David i Ragauskas (2010.) od 18,75 MJ kg^{-1} za jesenski rok te Clark i sur. (2011.) od 18 MJ kg^{-1} za jesenski rok. Prema navedenim literaturnim podatcima vrijednosti dobivene u ovom istraživanju gotovo su jednake.

Literaturni podatci za ostale sirovine koje se koriste u energetske svrhe dovode do zaključka da ne postoji gotovo nikakva razlika u odnosu na vrijednosti dobivene ovim istraživanjem. McKendry (2002.) za miskantus navodi vrijednost od 18,50 MJ kg^{-1}, Kumar i Ghosh (2018.) za drvnu biomasu od 18,6 MJ kg^{-1}, Jackson i sur. (2016.) za miskantus od 18,09 MJ kg^{-1} i za stabljiku pšenice od 18,3 MJ kg^{-1}.

5.3.2. Donja ogrjevna vrijednost

Donja ogrjevna vrijednost označava sadržaj energije goriva bez kondenzacijske topline vodene pare sadržane u ispušnim plinovima tijekom izgaranja. Donja ogrjevna vrijednost uvijek je manja od gornje ogrjevne vrijednosti ali predstavlja jedan od temeljnih parametara za klasifikaciju kvalitete biomase (Jenkins i sur., 1998.; Holtz, 2006.; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.12. prikazana je donja ogrjevna vrijednost u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.12. Donja ogrjevna vrijednost (MJ kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	17,29a ± 0,123
Proljeće	17,42a ± 0,252

Vrijednosti dobivene istraživanjem, a prikazane u tablici 5.12., pokazuju da ne postoji statistička razlika između donje ogrjevne vrijednosti od 17,29 MJ kg^{-1} za jesenski rok te od 17,42 MJ kg^{-1} za proljetni rok žetve. Kumar i Ghosh (2018.) navode donju ogrjevnu vrijednost od 18,2 MJ kg^{-1} za siječanjski rok te Miles i sur. (1995.) od 16,79 MJ kg^{-1}. Vrijednosti dobivene ovim istraživanjem u granicama su navedenih literaturnih podataka.

Kumar i Ghosh (2018.) navode donju ogrjevnu vrijednost za drvnu biomasu od 16,9 MJ kg^{-1}. McKendry (2002.) za drvnu biomasu navodi vrijednost od 18,6 MJ kg^{-1}, za stabljiku pšenice vrijednost od 17,3 MJ kg^{-1}, a za stabljiku ječma od 16,1 MJ kg^{-1}.

5.4. Mikro i makro elementi

Od mikro elemenata utvrđen je udio mangana (Mn), cinka (Zn), željeza (Fe), kadmija (Cd), nikla (Ni), kroma (Cr), kobalta (Co) i olova (Pb), a od makro elemenata udio kalija (K), natrija (Na), kalcija (Ca) i magnezija (Mg). Navedeni elementi, neposredno nakon procesa izgaranja, čine sastav proizašlog pepela. Svi oni kao i pepeo, pojavljuju se tijekom izgaranja biomase te neki od njih mogu uzrokovati niz ozbiljnih problema u ložištima, koji uzrokuju šljaku, koroziju i prljavštinu (Cuiping i sur., 2004.; Cassida i sur., 2005.). S obzirom na to da sastav biomase utječe na sastav pepela, koji među ostalim čine i teški metali (Cr, Co, Pb, Mn, Fe, Cd, Ni, Zn, Si, Cl, Cu i Ti), poželjan je što niži udio istih i to prvenstveno radi krajnjeg, ekološki prihvatljivog, zbrinjavanja pepela nakon izgaranja (Krička i sur., 2017.).

5.4.1. Makro elementi

5.4.1.1. Udio kalija

Kalij u kombinaciji sa klorom i sumporom sudjeluje u pojavi korozije te djelomično hlapi tijekom izgaranja formirajući sulfate i otpuštajući klor. Manji udio kalija znači i kvalitetnije gorivo. (Masia i sur., 2007.; Van Loo i Koppejan, 2008.; Khan i sur., 2009.; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.13. prikazan je udio kalija u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.13. Udio kalija (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	4781,68a ± 0,943
Proljeće	748,76b ± 0,009

Iz tablice 5.13. vidljivo je da je statistički različit udio kalija od 4781,68 mg kg^{-1} za jesenski rok, te od 748,76 mg kg^{-1} za proljetni rok žetve. Prema dostupnoj literaturi, Monti (2008.) navodi vrijednost za list od 1504 mg kg^{-1} do 2126 mg kg^{-1} te za stabljiku od 2628 mg kg^{-1} do 3555 mg kg^{-1} za rok u veljači.

Adler i sur. (2006.) navode vrijednosti od 3330 mg kg^{-1} do 3450 mg kg^{-1} za jesenski rok te od 590 mg kg^{-1} do 690 mg kg^{-1} za proljetni rok dok David i Ragauskas (2010.) navode vrijednosti od 8112 mg kg^{-1} do 10894 mg kg^{-1} za jesenski rok.

Mitchell i sur. (2014.) navode vrijednost od 844 mg kg^{-1} za jesenski rok te Gorlitsky (2012.) vrijednosti od 3211 mg kg^{-1} do 4415 mg kg^{-1} za jesenski rok te od 253 mg kg^{-1} do 431 mg kg^{-1} za proljetni rok. Dobivene vrijednosti udjela kalija istraživane biomase uglavnom su u granicama literaturnih vrijednosti.

Uspoređujući dobivene udjele kalija istraživane biomase s literaturnim podatcima za ostale sirovine koje se koriste u energetske svrhe, može se zaključiti da istraživano divlje proso od nekih ima uglavnom ili veći ili manji udio kalija. Tako Monti i sur. (2008.) navode udio kalija kod miskantusa od 3588 mg kg^{-1}, a Bilandžija (2015.) od 796,16 mg kg^{-1} do 1378,76 mg kg^{-1}. Krička i sur. (2017) navode udjele kalija za slamu pšenice od 15 659,31 mg kg^{-1}, a za kukuruzovinu od 14 320,99 mg kg^{-1}.

Veći udio kalija u gorivu je nepoželjan, a prema dobivenim rezultatima istraživanja, poželjno je žetvu odgoditi do proljeća.

5.4.1.2. Udio natrija

Natrij, kao i kalij, u kombinaciji sa klorom i sumporom sudjeluje u pojavi korozije te djelomično hlapi tijekom izgaranja formirajući sulfate i otpuštajući klor. Dakle, što je prisutan manji udio natrija to je gorivo kvalitetnije (Masia i sur., 2007.; Van Loo i Koppejan, 2008.; Khan i sur., 2009.; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.14. prikazan je udio natrija u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.14. Udio natrija (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	99,68a ± 0,005
Proljeće	67,67b ± 0,005

Prema rezultatima iz tablice 5.14., može se zaključiti da je rok žetve statistički značajno utjecao na udio natrija, čije vrijednosti su se kretale od 99,68 mg kg^{-1} za jesenski rok te od 67,67 mg kg^{-1} za proljetni rok žetve. Monti i sur. (2008.), prema dostupnoj literaturi, navode vrijednosti od 317 mg kg^{-1} do 326 mg kg^{-1} za list te od 870 mg kg^{-1} za stabljiku. Vrijednosti udjela natrija istraživane biomase su manje od onih u literaturi.

Usporedbom udjela natrija istraživane biomase s literaturnim podatcima za ostale sirovine koje se koriste u energetske svrhe, istraživano divlje proso ima manji udio. Tako kod miskantusa Monti i sur. (2008.) navode udio natrija od 153 mg kg^{-1} do 193 mg kg^{-1}, dok Bilandžija (2015.) navodi udjele od 60,82 mg kg^{-1} do 138,04 mg kg^{-1}. Krička i sur. (2017) navode udjele natrija za slamu pšenice od 319,17 mg kg^{-1}, a za kukuruzovinu od 571,28 mg kg^{-1}.

Kao i kod kalija, povišena količina natrija je nepoželjna. Zbog toga bi prema dobivenim rezultatima istraživanja bilo poželjno žetvu odgoditi do proljeća.

5.4.1.3. Udio kalcija

Kalcij reagira s kalijem i silicijem pa utječe na pojavu šljake u ložištima. Međutim, isto tako njegov povećani udio doprinosi nižoj mogućnosti pojave šljake te ujedno snižava i točku tališta (Monti i sur., 2008., Bläsing i Müller, 2010.a; Bilandžija, 2015.).

U tablici 5.15. prikazan je udio kalcija u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.15. Udio kalcija (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	2353,50b ± 0,005
Proljeće	2401,25a ± 0,005

Udio kalcija, utvrđen u tablici 5.15., statistički se razlikuje te je u jesenskom roku bio 2353,50 mg kg^{-1}, a 2401,25 mg kg^{-1} kod proljetnog rok žetve.

Prema dostupnoj literaturi Monti i sur. (2008.) navode vrijednosti od 6922 mg kg^{-1} do 8182 mg kg^{-1} za list te od 1097 mg kg^{-1} do 1197 mg kg^{-1} za stabljiku za rok u veljači, a Adler i sur. (2006.) od 3580 mg kg^{-1} do 5050 mg kg^{-1} za jesenski rok te od 2770 mg kg^{-1} do 3750 mg kg^{-1} za proljetni rok.

David i Ragauskas (2010.) navode vrijednosti od 3512 mg kg^{-1} do 3792 mg kg^{-1} za jesenski rok te Mitchell i sur. (2014.) od 3900 mg kg^{-1} za jesenski rok. Vidljivo je iz dobivenih rezultata istraživane biomase, da je udio kalcija manji od onih dostupnih u literaturi.

Kada ga se usporedi s literaturnim podatcima za ostale sirovine koje se koriste u energetske svrhe, udio kalcija kod istraživane biomase divljeg prosa je manji. Krička i sur. (2017) navode udjele kalcija za slamu pšenice od 6527,87 mg kg^{-1}, a za kukuruzovinu od 9226,17 mg kg^{-1}. Za miskantus, Monti i sur. (2008.) navode udio kalcija od 1730 mg kg^{-1} do 5262 mg kg^{-1}, a Bilandžija (2015.) udjele od 1228,03 mg kg^{-1} do 2390,86 mg kg^{-1}.

Veće količine kalcija u gorivu su poželjne, a prema rezultatima istraživanja, najbolji rezultati dobiveni su jesenskom žetvom.

5.4.1.4. Udio magnezija

Magnezij kao alkalni element lako tvori mješavinu dviju ili više krutih faza koje pri tome snižavaju točku tališta i obično povećavaju temperaturu taljenja pepela (Miles i sur., 1996.; Porbatzki i sur., 2011.).

U tablici 5.16. prikazan je udio magnezija u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.16. Udio magnezija (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	487,67a ± 0,943
Proljeće	464,13b ± 0,047

Utvrđena je statistička razlika u udjelima magnezija (tablica 5.16.). U jesenskom roku udio je iznosio 487,67 mg kg^{-1}, a u proljetnom roku žetve 464,13 mg kg^{-1}. Monti i sur. (2008.) navode vrijednosti za rok u veljači od 2626 mg kg^{-1} do 2706 mg kg^{-1} za list te od 1020 mg kg^{-1} do 1171 mg kg^{-1} za stabljiku.

Adler i sur. (2006.) navode vrijednosti od 980 mg kg^{-1} do 1730 mg kg^{-1} za jesenski rok te od 330 mg kg^{-1} do 710 mg kg^{-1} za proljetni rok, Mitchell i sur. (2014.) od 2370 mg kg^{-1} za

jesenski rok te Gorlitsky (2012.) od 1085 mg kg^{-1} do 1593 mg kg^{-1} za jesenski rok. Udio magnezija istraživane biomase u granicama je onih vrijednosti koje su dostupne u literaturi.

Prema literaturnim podatcima za ostale sirovine koje se koriste u energetske svrhe, kod istraživane biomase divljeg prosa, udio magnezija je manji. Monti i sur. (2008.) navode udio kod miskantusa od 1291 mg kg^{-1}, Krička i sur. (2017) navode udjele za slamu pšenice od 2491,50 mg kg^{-1}, a za kukuruzovinu od 4767,23 mg kg^{-1}, dok Bilandžija (2015.) navodi udjele za miskantus od 335,68 mg kg^{-1} do 482,31 mg kg^{-1}.

5.4.2. Mikro elementi

5.4.2.1. Udio mangana

Kao teški metal, mangan predstavlja nepoželjnu komponentu u sastavu biomase, stoga je poželjna njegova što niža koncentracija (Vassilev i sur., 2010.; Krička i sur., 2017.).

U tablici 5.17. prikazan je udio mangana u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.17. Udio mangana (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	8,89a ± 0,007
Proljeće	3,82b ± 0,002

Razlika u udjelu mangana (tablica 5.17.) između jesenskog roka od 8,89 mg kg^{-1} i proljetnog roka žetve od 3,82 mg kg^{-1} statistički je značajna. Zbog nedostatka literaturnih podataka rezultate nije bilo moguće usporediti. U literaturi je jedino dostupan podatak o udjelu mangana koji prema Qian i sur. (2013.) iznosi 38 ppm u sirovoj biomasi te od 248 ppm do 785 ppm u čađi.

Krička i sur. (2017) navode udjele mangana za slamu pšenice od 94,52 mg kg^{-1} i kukuruzovinu od 103 mg kg^{-1}, dok Bilandžija (2015.) navodi udjele kod miskantusa od 59,24 mg kg^{-1} do 239,80 mg kg^{-1}. Prema literaturnim podatcima ostale sirovine koje se koriste u energetske svrhe imaju signifikantno veći udio mangana.

Kako je poželjna što niža koncentracija mangana, žetvu je najbolje izvršiti u proljeće.

5.4.2.2. Udio cinka

Cink, kao teški metal, nepoželjna je komponenta u sastavu biomase, stoga je poželjna njegova što niža koncentracija (Vassilev i sur., 2010.; Krička i sur., 2017.).

U tablici 5.18. prikazan je udio cinka u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.18. Udio cinka (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	5,77a ± 0,006
Proljeće	4,14b ± 0,089

Udio cinka istraživane biomase (tablica 5.18.) statistički se razlikuje. Udio u jesenskom roku žetve bio je 5,77 mg kg^{-1}, dok je u proljetnom bio 4,14 mg kg^{-1}. Jedini dostupan podatak u literaturi onaj je o udjelu cinka u sirovoj biomasi koji prema Qian i sur. (2013.) iznosi 25 ppm te od 78 ppm do 184 ppm u čađi.

Bilandžija (2015.) navodi udjele cinka kod miskantusa od 45,97 mg kg^{-1} do 60,38 mg kg^{-1}, a Krička i sur. (2017) navode udjele cinka za slamu pšenice od 29,36 mg kg^{-1} i kukuruzovinu od 69,69 mg kg^{-1}. Prema literaturnim podatcima navedene sirovine koje se koriste u energetske svrhe imaju signifikantno veći udio cinka.

Žetvu biomase najbolje je izvršiti u proljeće, kako bi koncentracija cinka bila što niža.

5.4.2.3. Udio željeza

Željezo spada u teške metale i kao takvo predstavlja nepoželjnu komponentu u sastavu biomase te je stoga poželjna njegova što niža koncentracija (Vassilev i sur., 2010.; Krička i sur., 2017.).

U tablici 5.19. prikazan je udio željeza u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.19. Udio željeza (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	199,06a ± 0,009
Proljeće	47,22b ± 0,002

U jesenskom roku žetve udio željeza bio je 199,06 mg kg^{-1}, dok je u proljetnom bio 47,22 mg kg^{-1}. Takvi podatci, prikazani u tablici 5.19., pokazuju da se udio željeza statistički razlikuje u odnosu na istraživane rokove žetve. Monti i sur. (2008.), prema dostupnoj literaturi, za rok u veljači navode udio željeza za list od 283 mg kg^{-1} do 319 mg kg^{-1} te od 83 mg kg^{-1} do

86 mg kg^{-1} za stabljiku, stoga se može zaključiti da je udio željeza istraživane biomase donekle u granicama udjela dostupnih u literaturi.

Za miskantus, Monti i sur. (2008.) navode udio od 324 mg kg^{-1}, a Bilandžija (2015.) udjele od 174,10 mg kg^{-1} do 416,07 mg kg^{-1}. Krička i sur. (2017) navode udio za slamu pšenice od 2918,81 mg kg^{-1}, a za kukuruzovinu od 4867,45 mg kg^{-1}.

Kako bi se dobila što niža koncentracija željeza, žetvu je najbolje izvršiti u proljeće.

5.4.2.4. Udio kadmija

Kao teški metal, kadmij predstavlja nepoželjnu komponentu u sastavu biomase te je poželjna njegova što niža koncentracija (Krička i sur., 2017.).

U tablici 5.20. prikazan je udio kadmija u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.20. Udio kadmija (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	1,30b ± 0,001
Proljeće	1,41a ± 0,005

Razlika je statistički značajna u udjelima kadmija (tablica 5.20.) između jesenskog roka od 1,30 mg kg^{-1} i proljetnog roka žetve od 1,41 mg kg^{-1}. Zbog nedostatka literaturnih podataka rezultate nije bilo moguće usporediti.

Krička i sur. (2017) navode udio kadmija za slamu pšenice od 0,46 mg kg^{-1} te kukuruzovine od 0,55 mg kg^{-1}, što znači da istraživana biomasa ima signifikantno veći udio kadmija.

Jesenski rok žetve donosi nižu koncentraciju kadmija te nije potrebno žetvu odgađati do proljeća.

5.4.2.5. Udio nikla

Nikal spada u grupu teških metala i kao takav predstavlja nepoželjnu komponentu biomase te je poželjna što niža koncentracija (Krička i sur., 2017.).

U tablici 5.21. prikazan je udio nikla u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.21. Udio nikla (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	42,85a ± 0,008
Proljeće	2,58b ± 0,004

Kako je vidljivo iz tablice 5.21., razlika između udjela nikla u jesenskoj i proljetnoj žetvi istraživane biomase je statistički značajna. U jesenskom roku udio je iznosio 42,85 mg kg^{-1}, a u proljetnom 2,58 mg kg^{-1}. Zbog nedostatka literaturnih podataka rezultate nije bilo moguće usporediti. U literaturi, Qian i sur. (2013.) navode podatak o udjelu nikla u sirovoj biomasi od 3 ppm te od 27 ppm do 56 ppm u čađi.

Udio nikla kod slame pšenice iznosi 10,10 mg kg^{-1}, a kod kukuruzovine 16,70 mg kg^{-1}, kako navode Krička i sur. (2017). Proljetna žetva donosi signifikantno niži udio nikla te je poželjno biomasu požeti u tome vremenskom periodu.

5.4.2.6. Udio kroma

Krom je nepoželjna komponenta biomase kao teški metal, pa je poželjan njegov što niži udio (Krička i sur., 2017.).

U tablici 5.22. prikazan je udio kroma u ovisnosti o rokovima žetve.

Tablica 5.22. Udio kroma (mg kg^{-1})

ROK ŽETVE	
Jesen	4,38a ± 0,005
Proljeće	2,99b ± 0,002

Razlika između udjela kroma u jesenskoj i proljetnoj žetvi istraživane biomase je statistički značajna. U jesenskom roku udio je bio 4,38 mg kg^{-1}, a u proljetnom 2,99 mg kg^{-1} (tablica 5.22.). Zbog nedostatka literaturnih podataka rezultate nije bilo moguće usporediti.

Kod slame pšenice, prema Krička i sur. (2017)., udio kroma iznosi 11,70 mg kg^{-1}, a kod kukuruzovine 23,18 mg kg^{-1}, što dovodi do zaključka da istraživana biomasa ima signifikantno niže vrijednosti.

Prema dobivenim vrijednostima udjela kroma u istraživanoj biomasi, žetvu bi trebalo odgoditi do proljeća.

5.4.2.7. Udio kobalta i olova

Udio kobalta i olova nije izmjeren niti u jednom uzorku biomase trave divljeg prosa, uslijed njihove vrlo niske koncentracije, odnosno njihova koncentracija je bila ispod razine osjetljivosti (< 0,25 mg kg^{-1}) instrumenta korištenog u ovom istraživanju.

6. Zaključak

Na temelju provedenih istraživanja gorivih i negorivih tvari, ogrjevnih vrijednosti te mikro i makro elemenata biomase trave divljeg prosa (*Panicum virgatum* L.), uslijed različitih rokova žetve (jesenske i proljetne) provedenih na Pokušalištu Šašinovec, može se zaključiti sljedeće:

1. rokovi žetve imali su značajan utjecaj na udio vode, pepela, dušika, ugljika i sumpora, dok to nije bio slučaj kod udjela vodika, koksa, fiksiranog ugljika, hlapivih tvari i ogrjevne vrijednosti,
2. kod mikro i makro elemenata različiti rokovi žetve imali su najveći utjecaj jer je kod svih elemenata utvrđena signifikantna razlika,
3. u većini istraživanih elemenata potvrđeno je kako je odgoda žetve do proljetnog roka pozitivno utjecala na energetska svojstva istraživane biomase, među kojima je najvažnije izdvojiti smanjenje vode i pepela,
4. određena odstupanja koja su se pojavila kod usporedbe s literaturnim podatcima mogu biti posljedica različitih lokacija uzgoja s obzirom na to da agroekeloški i agrotehnički uvjeti mogu utjecati na kemijske karakteristike biomase,
5. dobiveni podatci definiraju biomasu trave divljeg prosa (*Panicum virgatum* L.) kao kvalitetnu sirovinu u proizvodnji „zelene“ energije.

7. Popis literature

1. Adler, P. R., Sanderson, M. A., Boateng, A. A., Weimer, P. J., ,Hans-Joachim G. (2006) Biomass yield and biofuel quality of switchgrass harvested in fall or spring. Agron. J. 98:1518–1525.
2. AEBIOM (2014) European biomass association, European bioenergy outlook. Brussels, Belgium.
3. Alexopoulou, E., Sharma, N., Papatheohari, Y. (2008) Biomass yields for upland andlowland switchgrass varieties grown in the Mediterranean region. Biomass Bioenergy 32:926–93360.
4. Ashworth, A., Rocateli, A., West, P. C., Brye, R. K., Popp, M. P. (2017) Switchgrass Growth and Effects on Biomass Accumulation, Moisture Content, and Nutrient Removal, Agronomy journal 109(4)
5. Avgustinović, R. (2016) Pepeo biomase, Završni rad, Fakultet kemijskog inţenjerstva i tehnologije, Zagreb
6. Bilandžija, N. (2014) Perspektiva i potencijal korištenja kulture *Miscanthus X Giganteus* u Republici Hrvatskoj, Inženjerstvo okoliša vol.1/No.2
7. Bilandžija, N. (2015) Potencijal vrste *Miscanthus x giganteus* kao energetske kulture u različitim tehnološkim i agroekološkim uvjetima. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.
8. Bilandžija, N., Voća, N. (2014) Klasifikacija i osnovne značajke biogoriva. Gospodarski list, 7: 51-52.
9. Bilandžija, N., Leto, J., Kiš, D., Jurišić, V., Matin, A.,Kuže, I. (2014). The impact of harvest timing on properties of *Miscanthus x giganteus* biomass as a CO2 neutral energy source. Collegium Antropologicum, 38(1), 85-90.
10. Bilandžija, N., Leto, J., Fabijanić, G., Sito, S., Smiljanović, I. (2017.) Tehnike žetve poljoprivrednih energetskih kultura, Glasnik zaštite bilja 2017, Suvremena mehanizacija i poljoprivreda, br. 4/2017, 112-119
11. Bilandžija, N., Jurišić, V., Voća, N., Leto, J., Matin, A., Grubor, M., Krička, T. (2017): Energy valorization of *Miscanthus x giganteus* biomass: A case study in Croatia. Journal of processing and energy in agriculture. Vol. 21 (No.1), 32-36 ISSN 1821-4487.
12. Bläsing, M., Müller, M. (2010a) Mass spectrometric investigations on the release of inorganic species during gasification and combustion of Rhenish lignite. Fuel, 89, 2417–2424.
13. Bläsing, M., Müller, M. (2010b) Mass spectrometric investigations on the release of inorganic species during gasification and combustion of German hard coal. Combust. Flam, 157, 1374–1381
14. Bransby, D. I., Walker, R. H., Miller, M. S. (1997) Development of optimal establishment and cultural practices for switchgrass as an energy crop. Five year summary report. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.

15. Bridgwater, A. V., Toft, A. J., Brammer, J. G. (2002) A technoeconomic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. Renew. Sustain. Energy Rev. 6, 181–246.
16. Brodowska, Muszyński, P., Brodowski, R., Kowalczyk-Juśko, A., Sekutowski, T., Kurzyna-Szklarek, M. (2018) Agronomic aspects of switchgrass cultivation and use for energy purposes, Applied Ecology and Environmental Research 16(5):5715-5743
17. Brosse, N., Dufour, A., Meng, X., Ragauskas,A. (2012) Miscanthus: a fast- growing crop for biofuels and chemicals production, Biofuels, Bioprod. Bioref.
18. Caillat, S., Vakkilainen, E. (2013) Biomass Combustion Science, Technology and Engineering, *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, Pages 296-302
19. Cassida, K. A., Muir, J. P., Hussey, M. A., Read, J. C., Venuto, B. C., Ocumpaugh, W. R. (2005) Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in South central US environments. Crop Science, 45: 682 – 692.
20. Cherney, J. H. (2005) Management of grasses for biofuel. Bioenergy Info. Sheet #4. Cornell Univ. Coop. Ext. (http:// grassbioenergy.org/ downloads/ Bioenergy _Info_ Sheet_4.pdf) – pristupljeno 13.03.2019.
21. Christian, D. G., Riche, A. B. (2001) Estimates of rhizome weight of Miscanthus with time androoting depth compared to switchgrass. Asp Appl Biol 65:1–557.
22. Christian, D. G., Riche, A. B., Yates, N. E. (2002) The yield and composition of switchgrass andcoastal panic grass grown as a biofuel in Southern England. Bioresour Technol 83:115–124
23. Clarke, S., Eng, P., Preto, F. (2011) Biomass Burn Characteristics, Factsheet,ISSN 1989-712X, 11–033.
24. Cuiping, L., Chuangzhi, W., Yanyongjie, M., Haitao, H. (2004) Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. Biomass and Bioenergy, 27: 119 - 130.
25. Čakija, A. (2007) Značaj poljoprivrede u korištenju obnovljivih izvora energije. Zbornik radova: "Obnovljivi izvori energije u Republici Hrvatskoj". Osijek, Hrvatska, 199 - 208.
26. David, K., Ragauskas, A. J. (2010) Switchgrass as an energy crop for biofuel production: A review of its ligno-cellulosic chemical properties, Energy Environ. Sci.
27. Dimitrijević, R. (1984) Goriva i izgaranje. Savez energetičara Hrvatske, Zagreb, Hrvatska
28. Đonlagić, M. (2005) Energija i okolina. Printcom – Tuzla, Bosna i Hercegovina.
29. Dunović, M. (2011) Energetsko pitanje u Europskoj uniji –Geopolitika EU u kontekstu energetskih izvora i energetske učinkovitosti, Split: Protuđer
30. Eggemeyer, K. D., Awada, T., Harvey, F. E., Wedin, D.A., Zhou, X., Zanner, C. W. (2008) Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees juniperus virginiana and pinus ponderosa and two dominant C4 grasses in a semiarid grassland. Tree Physiol 29: 157–169
31. Elbersen, H. W., Christian, D. G., El Bassam, N., Alexopoulou, E., Pignatelli, V., van den Berg, D. (2001) Switchgrass (*Panicum virgatum L.)* as an alternative energy crop in Europe: initiationof a productivity network. Final report FAIR 5-CT97-3701:91

32. Elbersen, W., Poppens, R., Bakker, R. (2013) Switchgrass (*Panicum virgatum L.*). A perennial biomass grass for efficient production of feedstock for the biobased economy. June 2013. A report for the Netherlands Programmes Sustainable Biomass of Agency
33. El-Halwagi, M. M., (2003) "Industry and environmental biocomplexity: impact, challenges, and opportunities for multidisciplinary research" J. Clean Technologies and Environmental Policy, 4(3), 135,
34. Garcia, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., Bueno, J. L. (2012) Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. Bioresource Technology, 103: 249 – 258.
35. Garland, C. D. (2008) Growing and harvesting switchgrass for ethanol production in Tennessee. Ext. Bull. SP701–A. (http:// utextension. tennessee. edu/ publications/ spfiles/ SP701-A.pdf) – pristupljeno 13.03.2019.
36. Gorlitsky, L. E. (2012) "Management of Switchgrass for the Production Of Biofuel" Open Access Dissertations. 548.
37. Hancock, D.W., (2017) The Management and Use of Switchgrass in Georgia, UGA Cooperative Extension Bulletin 1358
38. Holtz, T. (2006) Holzpellet – Heizungen. Ökobuch. Freiburg, Deutshland.
39. Jackson, J., Turner, A., Mark, T.B., Montross, M. (2016) Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill, Fuel Processing Technology 148:43-49
40. Jelčić, B. (2016) Energetski potencijal peleta proizvedenih iz poljoprivredne biomase u Hrvatskoj. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.
41. Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, Jr. T. R., Miles, T. R. (1998) Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology, 54: 17 – 46.
42. Kemmerer, B., Liu, J. (2014) Effect of Harvesting Time and Moisture Content on Energy Consumption of Compressing Switchgrass, American Journal of Plant Sciences, 2014, 5, 3241-3249
43. Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., Spliethoff, H. (2009) Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel processing technology, 90: 21 – 50.
44. Khodier, A. H. M., Hussain, T., Simms, N. J., Oakey, J. E., Kigallon, P. J. (2012) Deposit formation and emissions from co-firing miscanthus with Daw Mill coal: Pilot plant experiments. Fuel, 101, 53-61.
45. Kiesel, A., Wagner, M., Lewandowski, I. (2016) Environmental Performance of Miscanthus, Switchgrass and Maize: Can C4 Perennials Increase the Sustainability of Biogas Production? *Sustainability* 2017, 9 (1),
46. Krička, T. (2010) Potencijal proizvodnje energije iz biljnih ostataka u poljoprivredi i šumarstvu. Završno izvješće VIP projekta. Ministarstvo poljoprivrede, ribarstva i ruralnog razvitka.
47. Krička, T. (2014). Uvođenje trave Miscanthus kao energetske kulture za grijanje plastenika na OPG-u. Završno izvješće. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb.

48. Krička, T., Voća, N., Tomić, F., Janušić, V. (2007) Experience in production and utilization of renewable energy sources in EU and Croatia, Zbornik radova: "Integrated systems for agri-food production. Sibiu, 203 - 210.
49. Krička, T., Kiš, D., Jurišić, V., Bilandžija, N., Matin, A., Voća, N. (2014) Ostaci poljoprivredne proizvodnje kao visokovrijedni "zeleni" energent u istočnoj Hrvatskoj. Hrvatska Akademija znanosti i umjetnosti - Zagreb. Zbornik radova Poljoprivreda i šumarstvo kao proizvođači obnovljivih izvora energije, 143 – 152.
50. Krička, T., Leto, J., Bilandžija, N., Grubor, M., Jurišić, V., Matin, A., Voća, N., Dović, D., Horvat, I. (2017) Tehnologija uzgoja, dorade i skladištenja energetske kulture Sida hermaphrodita (L.) Rusby, Zagreb
51. Kumar, S., Ghosh, P. (2018) Sustainable bio-energy potential of perennial energy grass from reclaimed coalmine spoil (marginal sites) of India, Renewable Energy 2018 Vol.123 pp.475-485 ref.35
52. Labudović, J. (2002) Obnovljivi izvori energije, str. 452., Zagreb
53. Lemusa, R., Brummerb, E. C., Moore, K. J., Molstad, N. E., Lee Burras, C. L., Barker, M. F.(2002) Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, US, Biomass and Bioenergy 23 (2002) 433–442
54. Lewandowski, I., Kicherer, A. (1997) Combustion quality of biomass: Practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. Eur. J. Agron. 6: 163 – 177.
55. Masia, A. A. T., Buhre, B. J. P., Gupta, R. P., Wall, T. F. (2007) Characterising ash of biomass and waste. Fuel Process. Technol., 88, 1071–1081.
56. Matin, A., Krička, T., Grubor, M., Leto, J., Bilandžija, N., Voća, N., Jurišić, V., Zmaić, K., Kiš, D., Kopilović I. (2019) Iskoristivost posliježetvenih ostataka za proizvodnju zelene energije, Osijek.
57. McCarl B. A., Schneider, U. A. (2001) "The Cost of Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry", Science, Vol 294, 2481-2482,
58. McKendry, P. (2002) Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology, 83: 37 – 46.
59. McLaughlin, S. B., Kszos, L. A. (2005) Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. Biomass and Bioenergy 28:515–535.
60. Miles, T. R., Miles Jr. T. R., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B. M., Oden, L. L. (1995) Alkali deposits found in biomass power plants. A preliminary investigation of their extend and nature, NREL/TP-433-8142, 82 p.
61. Miles, T. R., Miles Jr. T. R., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B. M., Oden, L. L. (1996) Boiler deposits from firing biomass fuels. Biomass Bioenergy 10:125–138.
62. Mitchell, R.B., Schmer, M. (2012) Chapter 5 Switchgrass Harvest and Storage, Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. 1273.
63. Mitchell, R.B., Lee, D.K., Casler, M. (2014) Switchgrass, Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. 1438.
64. Monti, A. (2012) Switchgrass A Valuable Biomass Crop for Energy, Springer-Verlag, London

65. Monti, A., Pritoni, G., Venturi, G. (2004) Evaluation of productivity of 18 genotypes of switchgrass for energy destination in northern Italy. In: Swaaij WPM, Fjallstrom T, Helm P,Grassi A (eds) 2nd world biomass conference, vol 1. Rome, pp 240–243
66. Monti, A., Di Virgilio, N., Venturi, G. (2008) Mineral composition and ash content of six major energy crops, Published in Biomass and Bioenergy 32:216-223
67. Obernberger, I. (1997) Nutzung Fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter Besonderer Berucksichtigung des Verhaltens Aschebildender Elemente. Schriftenreihe "Thermische Biomassenutzung"; Dbv-Verlag der Technischen Universitat Graz: Graz, Austria, ISBN 3-7041-0241-5.
68. Obernberger, I., Thek, G. (2004) Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. Biomass and Bioenergy, 27: 653 – 669.
69. Ocumpaugh, W. R., Sanderson, M. A., Hussey, M. A., Read, J. C., Tischler, C. R., Reed, R.L. (1997) Evaluation of switchgrass cultivars and cultural methods for biomass production in the southcentral U.S. Final report. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. contract #19X - SL128C.
70. Ogden, C. A., Ileleji, K. E., Johnson, K. D., Wang, Q. (2010) In-field direct combustion fuel property changes of switchgrass harvested from summer to fall. Fuel Processing Technology 91: 266-271.
71. Pandžić, H., Rajšl, I., Capuder, T., Kuzle, I. (2016) Obnovljivi izvori energije, Priručnik za nastavnike, Slavonski Brod.
72. Parrish, D. J., Fike, J. H. (2005) The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. Critical Reviews in Plant Sciences 24:423–459.
73. Parrish, D. J., Casler, M. D., Monti, A. (2012) Chapter 1: The evolution of switchgrass as an energy crop, 1-29, University of Nebraska – Lincoln Digital Commons @University of Nebraska - LincolnPublications from USDA-ARS / UFaculty
74. Pilon, G., Lavoie, J-M. (2011) Switchgrass char formation, BioResources 6(4), 4824-4839.
75. Porbatzki, D., Stemmler, M., Müller, M. (2011) Release of inorganic trace elements during gasification of wood, straw, and miscanthus. Biomass Bioenergy, 35, 79–86.
76. Qian, K., Kumar, A., Patil, K., Bellmer, D., Wang, D., Yuan, W., Huhnke, R. L. (2013) Effects of Biomass Feedstocks and Gasification Conditions on the Physiochemical Properties of Char, Energies 2013, 6, 3972-3986.
77. Qin, X., Mohan, T., El-Halwagi, M., Cornforth, G., McCarl, B.A. (2006) Switchgrass as an alternate feedstock for power generation: an integrated environmental, energy and economic life-cycle assessment, Clean Technologies and Environmental Policy, Volume 8, Issue 4, pp 233–249
78. Reumerman, P. J., Van den Berg, D. (2002) Reduction of Fouling, Slagging and Corrosion Characteristics of Miscanthus (the BIOMIS Project); European Commission: Brussels, Belgium,
79. Ross, C. J. (2008) Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power. Northwest CPH Application Center. USA.

80. Sadaka, S., Sharara, A. M., Ashworth, A., Keyser, P., Allen, F., Wright, A. (2014) Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization, Energies 2014, 7, 548-567.
81. Sami M., Annamalai K., Wooldridge, (2001) Co-firing of Coal and biomass fuel blends, Progress in Energy and Combustion Science 27, pp. 171-214.
82. Samson, R. (2007) Resource Efficient Agricultural Production (REAP) – Canada
83. Samson, R., Mehdi, B. (1998) Strategies to reduce ash content of perennial grasses. Expanding Bioenergy Partnership, Bioenergy 98, Great Lakes Regional Biomass Energy Program, Chicago, Illinois, pp. 1124-1131.
84. Samson, R., Duxbury, P., Drisdale, M., Lapointe, C. (2000) Assessment of Pelletized Biofuels. PERD Program, Natural Resources Canada, Contract 23348-8-3145/001/SQ.
85. Samson, R., Delaquis, E., Deen, B., DeBruyn, J., Eggimann, U. (2019) A Comprehensive Guide to Switchgrass Management, Ontario
86. Sanderson, M. A., Adler, P. R., Boateng, A. A., Casler, M. D., Sarath, G. (2006) Switchgrass as a biofuels feedstock in the USA. – Canadian Journal of Plant Science 86: 1315-1325.
87. Schmer, M. R., Vogel, K. P., Varvel, G. E., Follett, R. F., Mitchell, R. B., Jin, V. L. (2014) Energy potential and greenhouse gas emissions from bioenergy cropping systems on marginally productive cropland. – PLoS ONE 9(3): e89501.
88. Stolarski, M. J., Niksa, D., Krzyżaniak, M. (2017) Elemental composition of willow short rotation crops biomass depending on variety and harvest cycle. Biomass Bioenergy, 105, 342–350.
89. Šimić, Z. (2010) Energija biomase, Korištenje energije biomase za proizvodnju el. energije (topline i goriva).
90. Šljivac, D., Šimić, Z. (2009) Obnovljivi izvori energije. Energija iz biomase, Osijek, Hrvatska.
91. Tilvikiene, V. (2014) Miscanthus biomass quality composition and methods of feedstock preparation for conversion into synthetic diesel fuel, Zemdirbyste 101(1):27-34
92. Tumuluru, S., J. (2015) Comparison of Chemical Composition and Energy Property of Torrefied Switchgrass and Corn Stover, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, ID, USA
93. Van Loo, S., Koppejan, J. (2002) Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing; IEA: Paris, France, ISBN 9036517737.
94. Van Loo, S., Koppejan, J. (2008) The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing; Earthscan: London, UK, ISBN 9781844072491.
95. Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G. (2010) An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89: 913 – 933.
96. Vermerris, W. (2008) Genetic Improvement of Bioenergy Crops, Springer, New York, NY

97. Voća N. (2009). Energetska iskoristivost biomase i biogoriva u poljoprivredi 1. Interna skripta Zavoda za Poljoprivrednu tehnologiju, skladištenje i transport. Agronomski fakultet, Zagreb.
98. Vogel, K. P., Brejda, J. J., Walters, D. T., Buxton, D. R. (2002) Switchgrass biomass production in the Midwest USA. Harvest and Nitrogen Management. Agron J. 94:413–420.
99. Vukadinović, V., Jug, I., Đurđević, B. (2014) Ekofiziologija bilja, Poljoprivredni fakultet Osijek, Osijek

Web stranice (pristupljeno datuma):

https://configure.deere.com/cbyo/#/en_us/configure/70241229

http://www.ethanolproducer.com/articles/3334/miscanthus-versus-switchgrass (18.04.2019.)

https://farm-energy.extension.org/switchgrass-panicum-virgatum-for-biofuel-production/#Introduction – 16.05.2019.

https://gospodarski.hr/uncategorized/biomasa-obnovljivi-izvor-energije/7965/ (22.04.2019.)

https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_09_100_1937.html (05.03.2019.)

https://ontariobiomassproducersgroup.wildapricot.org/Resources/Documents/AgBiomassDay2015/AgBiomassDay2015Presentations/10-SwitchgrasstoBiogasEvaluation,ChrisFergusonCCS-Biogas,AgBiomassDay2015.pdf (27.05.2019.)

https://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_7 (05.03.2019.)

https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_home (06.03.2019.)

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/IEA_Bioenergy_Task43_PR2011-03.pdf (03.03.2019.)

https://www.kmbdg.com/articles/sun-centuries-history-solar/ (03.03.2019.)

https://www.mzoip.hr/hr/klima/obnovljivi-izvori.html (05.03.2019.)

https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1042293.pdf (13.03.2019.)

https://www.smithsonianmag.com/innovation/next-generation-biofuels-could-come-from-these-five-crops-180965099/ (25.05.2019.)

Popis slika (pristupljeno datuma):

Slika 1. https://www.123rf.com/photo_53823512_stock-vector-renewable-energy-types-power-plant-icons-set-renewable-alternative-solar-wind-hydro-biofuel-geotherm.html (10.03.2019.)

Slika 2. https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/biomass-energy/ (07.03.2019.)

Slika 3. https://www.bambooplants.ca/product/giant-chinese-silver-grass-miscanthus/ (11.03.2019.)

Slika 4. Vlastita arhiva – Božidar Matin (08.03.2019.)

Slika 5. http://www.brightseeds.co.uk/products/canary_grass_gamecover/90/ (11.03.2019.)

Slika 6. Monti, A. (2012) Switchgrass A Valuable Biomass Crop for Energy, Springer-Verlag, London (11.03.2019.)

Slika 7. Casler, M. D., Tobias, C. M., Kaeppler, S. M., Buell, C. R., Wang, Z.Y., Cao, P., Schmutz, J. Ronald, (2011) The switchgrass genome: tools and strategies. Plant Genome 4(3):273-382 (11.03.2019.)

Slika 8. Monti, A. (2012) Switchgrass A Valuable Biomass Crop for Energy, Springer-Verlag, London (11.03.2019.)

Slika 9. https://tallgrassprairiecenter.org/curriculum_images (12.03.2019.)

Slika 10. https://www.deere.com/en/seeding-equipment/1590-no-till-drill/#/plant (13.03.2019.)

Slika 11. https://www.deere.com/en/seeding-equipment/455-front-folding-grain-drill/#/ (14.03.2019.)

Slika 12. https://lter.kbs.msu.edu/ngg_tag/switchgrass/ (14.03.2019.)

Slika 13. https://www.wnif.co.uk/2014/09/kuhn-front-mounted-shredder-for-biomass-harvesting/ (02.04.2019.)

Slika 14. Vlastita arhiva – Božidar Matin (08.03.2019.)

Slika 15. https://www.deere.com/en/hay-forage/mowing/windrowers-platforms/ (14.03.2019.)

Slika 16. https://www.fginsight.com/vip/vip/on-test-john-deere-l1533-large-square-baler-7184 (14.03.2019.)

Slika 17. https://www.agriland.ie/farming-news/john-deere-feature-new-balers-mower-grass-muck-event/#lg=1&slide=1 (14.03.2019.)

Slika 18. http://www.agriexpo.online/prod/velitex-sas/product-170530-38291.html (25.03.2019.)

Slika 19. http://nwdistrict.ifas.ufl.edu/phag/2014/10/03/are-you-getting-your-moneys-worth-from-your-hay/ (15.03.2019.)

Slika 20. https:/ /www.iowaswitchgrass.com/__ images/pictures/ 7YJD6transporting 1174900533.jpg (15.03.2019.)

Slika 21. https://www.google.com/ maps/ @45.8488829, 16.1762955,189a, 35y,39.44t/data =!3m1!1e3?hl =hr (03.04.2019.)

Slika 22. – 24. Vlastita arhiva – Božidar Matin (08.03.2019.)

Slika 25. – 26. Vlastita arhiva – Božidar Matin (01.04.2019.)

Slika 27. – 31. Vlastita arhiva – Božidar Matin (11.04.2019.)

Životopis

Božidar Matin rođen je 25. prosinca 1976. godine u Zagrebu, Republika Hrvatska. Osnovnu školu završio je u Zagrebu 1991. godine, a srednjoškolsko obrazovanje završava u I. gimnaziji u Zagrebu, 1995. godine.

Na Visokom gospodarskom učilištu u Križevcima 2008. godine diplomirao je na preddiplomskom studiju Poljoprivreda ratarskog smjera.

Iskusni je korisnik u razumijevanju, govoru i pisanju engleskog jezik te ima osnovna znanja iz njemačkog jezika. Vrlo dobro se služi računalom.

U slobodno vrijeme bavi se nogometom, košarkom, streljaštvom i lovom kao član lovačke udruge. Trenutačno živi u Zagrebu sa suprugom i dvoje djece.