

Mogućnost proizvodnje bioplina iz miskantusa (Miscanthus x Giganteus)

Rukavina, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:070674>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet
agrobiotehničkih
znanosti Osijek**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK**

Josip Rukavina, apsolvant

Diplomski studij Biljna proizvodnja

**MOGUĆNOST PROIZVODNJE BIOPLINA IZ MISCANTUSA
(MISCANTHUS X GIGANTEUS)**

Diplomski rad

Osijek, 2019.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Josip Rukavina, apsolvent

Diplomski studij Biljna proizvodnja

MOGUĆNOST PROIZVODNJE BIOPLINA IZ MISKANTUSA
(MISCANTHUS X GIGANTEUS)

Diplomski rad

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. Prof.dr.sc.Bojan Stipešević, predsjednik
2. Prof.dr.sc.Davor Kralik, mentor
3. Prof.dr.sc.Drago Kraljević, član
4. Prof.dr.sc.Ranko Gantner, zamjenski član

Osijek, 2019.

SADRŽAJ

1.UVOD	1
2.PREGLED LITERATURE	2
2.1. Energetika.....	2
2.1.1.Stanje i problemi energije u Hrvatskoj.....	2
2.1.2. Primarna energija.....	3
2.1.3. Energetski sustavi.....	3
2.2. Biomasa.....	4
2.2.1. Proizvodnja električne energije iz biomase.....	4
2.3. <i>Miscanthus</i>	6
2.3.1. Povijest dolaska <i>Miscanthusa</i> u Europu.....	6
2.3.2. Karakteristike.....	6
2.3.3. Uzgoj	10
2.3.4. Klimatski uvjeti.....	10
2.3.5. Priprema tla.....	12
2.3.6. Proces sađenja.....	12
2.3.7. Zaštita i gnojidba.....	13
2.3.8. Žetva.....	14
2.3.9. Prinosi.....	14
2.3.10. Završna obrada	16
2.3.11. Iskorištavanje.....	17
2.4. Bioplin.....	20
2.4.1. Anaerobna fermentacija.....	21
2.4.2.Temperatura.....	22
2.4.3.pH vrijednost.....	23
2.4.4.Amonijak.....	24
2.4.5. Supstrati.....	24
2.4.6. Dijelovi bioplinskog postrojenja.....	25
2.4.7. Potencijal bioplinskih postrojenja u Hrvatskoj.....	26
3.MATERIJALI I METODE	27
3.1. Metoda anaerobne fermentacije.....	27

3.2. Analiza sastava bioplina.....	29
3.3. Analiza suhe tvari.....	30
3.4. Određivanje sadržaja pepela i organske tvari.....	30
3.5. Određivanje pH.....	30
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	31
4.1. Koncentracija pH.....	36
4.2. Količina proizvedenog bioplina.....	38
4.3. Sastav bioplina.....	41
5. RASPRAVA.....	44
6. ZAKLJUČAK.....	47
7. POPIS LITERATURE.....	48
8. SAŽETAK.....	51
9. SUMMARY.....	52
10. PRILOZI	53

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA
BASIC DOCUMENTATION CARD

1.UVOD

U današnjem svijetu potreba za energijom povećava se iz dana u dan. Broj ljudi na Zemlji prešao je brojku od 7 milijardi, te je to ključni faktor u potrebi za povećanjem izvora energije. Ljudi su u stalnoj potrazi za novim izvorima energije koji bi pokrili. Trenutno čovječanstvo svoje potrebe za energijom uglavnom pokriva s neobnovljivim izvorima energije, kao što su ugljen, nafta i zemni plin. Osim što imaju rok trajanja, problem ovakvih vrsta izvora energije je u tom što su štetni za okoliš zbog ispuštanja velikih količina ugljičnog dioksida, ispuštanje nafte u more i ostale bitne vodene površine, te stvaranje smoga i drugih štetnih plinova, čije primjere možemo vidjeti i u nama bližoj okolini. Globalno zagrijavanje se također smatra izravnom negativnom posljedicom korištenja fosilnih goriva. No, iz niza razloga fosilna goriva su i dalje sveprisutna i dominantni izvor energije. Najveći razlog je novac, i prisutnost velikih kompanija u njihovom korištenju i vlasništvu, pa je to često i političko pitanje. Ostali razlozi su ti što su to tradicionalni izvori energije i ljudi se teško odlučuju na nešto novo i manje poznato, zatim početna cijena koja je kod ovakvih energenata inicijalno manja, te je to veliki problem ponajprije za zemlje u razvoju, i na kraju postoji i prednost fosilnih goriva u tome što je i dalje slaba podrška tehnološkom sektoru obnovljivih izvora energije. Iako se s godinama povećavaju i dalje su sredstva koja se izdvajaju za obnovljive izvore energije znatno manja od onih koje se izdvajaju za neobnovljive. Bez velike financijske podrške i dobre promocije teško je postići veći rezultat. Alternativnim izvorima je potrebno da njihova energija bude ekonomski konkurentna fosilnim gorivima s nižim cijenama, jer bi se u tom slučaju gospodarstva okrenula toj čistoj energiji. Ipak, ekonomska konkurentnost je nažalost još daleko. Klimatske promjene su veliki argument na strani obnovljivih izvora energije u ovoj borbi za prevlast. Druga važna stvar je energetska neovisnost. Energetska alternativa je potrebna jer se većina izvora nafte nalazi u politički nestabilnim zemljama svijeta. Okretanje prema obnovljivim izvorima energije je neizbježno, samo je pitanje tempa kojim će se ono odvijati. Glavni sektori obnovljivih izvora energije su: iskorištavanje energije sunca, geotermalna energija, hidroenergija, iskorištavanje energije vjetra te iskorištenje biomase. Najbitniji je tehnološki napredak u tim energijama u smislu efikasnosti i smanjenja cijena. Velike prednosti obnovljivih izvora energije trebale bi na kraju presuditi u pobjedi nad naftnim lobijem.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Energetika

2.1.1 Stanje i problemi energije u Hrvatskoj

Glavna obilježja hrvatskog energetskeg sustava na početku 21. stoljeća su sljedeća:

- umjeren rast potrošnje energije (godišnje 1-3%) temelji se uglavnom na rastu potrošnje fosilnih goriva (nafta i prirodni plin),
- brzi rast uvoza energije zbog iscrpljivanja domaćih obnovljivih izvora energije (nafta i prirodni plin),
- rastuće cijene energije,
- vrlo skromne preostale rezerve nafte i prirodnog plina i odustajanje od proizvodnje ugljena,
- početak procesa restrukturiranja i privatizacije energetskeg sektora, koji je više od 90% u vlasništvu države (INA,HEP),
- pripreme za otvaranje energetskeg tržišta konkurenciji usvajanjem paketa energetskeg zakona sredinom 2001. godine,
- zanemarivo iskorištavanje obnovljivih izvora energije, osim hidroenergije i ogrjevnoga drva,
- povećana osjetljivost javnosti na štetne utjecaje energetike na okoliš i lociranje novih velikih energetskeg postrojenja

Stanje obnovljivih izvora energije u Hrvatskoj zadovoljava samo na području hidroenergije (velike i srednje hidroelektrane) i djelomično kod biomase (ogrjevno drvo). Sva su ostala područja u znatnom zaostatku iza razvijenih europskih i drugih država. Razvoj tih ostalih područja, započet sedamdesetih godina prošlog stoljeća, usporen je u devedesetim godinama zbog zbivanja na ovim prostorima i izostanka bilo kakvih poticaja , osim ograničene potpore Hrvatske elektroprivrede. U ukupnoj potrošnji energije obnovljivi izvori energije u Hrvatskoj sudjeluju s približno 11%, što je relativno dobro, ali je ograničeno na hidroenergiju i ogrjevno drvo. Iako je Hrvatska država sa značajnim energijskim potencijalom u šumarstvu i poljoprivredi, kao i u brojnim neobrađenim površinama zemljišta i neiskorištenim pašnjacima, proizvodnja energije iz biomase, osim iz ogrjevnog drveta, dosad je iskorištavana samo simbolički. Do 1990. razvijene su neke tehnologije proizvodnje energije od biomase („Đuro Đaković“ Slavonski Brod), ali su poslije napuštene zbog nedostatka posla. Energija bioplina,

te deponijskog i muljnog plina u Hrvatskoj se praktički ne iskorištava. Hrvatska energetika opterećena je uglavnom problemima naslijeđenima iz bivše države.

2.1.2. Primarna energija

Skromne preostale rezerve fosilnih goriva znatno ispod svjetskog prosjeka i smanjenje domaće proizvodnje uz stalan rast potrošnje energije rezultiraju ubrzanim rastom uvoza energije s negativnim posljedicama za sigurnost opskrbe energijom i sve veću izloženost hrvatskog gospodarstva promjenama cijena nafte na svjetskom tržištu,

Relativno bogati potencijal obnovljivih izvora energije praktički se ne iskorištava, osim u području hidroenergije (srednje i velike HE) zbog još nedovoljno shvaćene njihove moguće uloge u hrvatskoj energetici sa strane države i energetske monopolne strukture.

2.1.3. Energetski sustavi

Niska energetska efikasnost uglavnom je zbog visokih gubitaka u distribuciji energije, neplaćanja računa za potrošenu energiju i krađe energije, nepovoljni dnevni i godišnji dijagrami potrošnje umreženih energenata (električna energija, prirodni plin) s velikim kolebanjima opterećenja dan-noć i zima-ljeto, što rezultira slabijom iskorištenošću tih sustava i većim troškovima.

Plinski sustav pokriva samo oko trećinu teritorija Hrvatske, a rastući uvoz prirodnog plina ograničen je na samo jednu državu i jedan cjevovod. Posljednjih su godina zimske nestašice prirodnog plina postale redovita pojava, koja se rješava ograničenjem potrošnje najvećim potrošaču (Petrokemija Kutina),

Reforma energetske strukture u Hrvatskoj s otvaranjem energetske tržišne konkurencije može imati i popratne negativne pojave u obliku smanjenja broja zaposlenih u velikim energetskim poduzećima, ometanja razvoja i širenja obnovljivih izvora energije, te smanjenja sigurnosti opskrbe energijom,

Hrvatske rafinerije nafte zahtijevaju velika ulaganja u modernizaciju postrojenja da bi postigle kvalitetu tekućih goriva prema zahtjevima regulative EU-a

2.2. Biomasa

Kruta biogena goriva nalazimo u najraznovrsnijim oblicima, a u skladu s tim postoji i mnogo različitih načina energetskog iskorištavanja krute biomase. U nju se ubrajaju prije svega drvo i drveni otpad koji nastaje krčenjem šuma, u pilanama i u drvnoprerađivačkoj industriji. Brzorastuće vrste drveća, kao što su topola i vrba, sade se na tzv. kratkorotacijskim plantažama, a žanju se već nakon nekoliko godina. Na taj je način moguće proizvesti potencijalno iskoristivih 12 t suhe mase po hektaru godišnje. Trska (*Miscanthus*) potencijalno je vrlo urodna energijska sirovina, ali pretpostavlja tlo vrlo visoke kakvoće i dobru opskrbljenost vodom. Pogodni za proizvodnju također su slama, ali i specijalne žitarice, npr. triticales, hibrid pšenice i raži. Od biljaka s visokim udjelom škroba i šećera može se proizvesti bioalkohol. U biomasu se ubrajaju i uljarice poput uljane repice i suncokreta koji se prešanjem i naknadnom obradom mogu pretvoriti u tekuća goriva (biodizel).

2.2.1. Proizvodnja električne energije iz biomase

Dosad je proizvodnja električne energije iz biomase imala podređenu ulogu. A upravo je kogeneracija, odnosno istodobna proizvodnja topline i struje vrlo efikasan način iskorištavanja biomase. Toplina koja nastaje izgaranjem drva može se iskoristiti u obliku pare za pogon parne turbine. Poslije prolaska kroz nju para se kondenzira, čime se izdvaja toplina. Ovaj se postupak primjenjuje u mnogim industrijskim pogonima kako bi se iskoristilo otpadno drvo. Toplina koja nastaje u procesu izgaranja može se upotrijebiti i u naprednim Stirlingovim motorima, no oni komercijalno još ne stoje na raspolaganju. Postoji niz tehnologija za proizvodnju električne energije iz biomase.

Financijski povoljna mogućnost iskorištavanja biomase jest njezino suizgaranje u postojećim termoelektranama. Relativno mali investicijski troškovi znače i usprkos današnjoj niskoj cijeni kamenog ugljena gospodarski zanimljivu opciju, pogotovo kad se kao bazna sirovina rabi biomasa za čije zbrinjavanje treba platiti naknadu. Problemi koji mogu nastati zbog sastavnih dijelova biomase kao što su alkalni metali, arsen i fosfor, kao i zbog niže točke tališta biomase, uspješno se mogu tehnički riješiti.

Alternativa izgaranju jest proces rasplinjavanja kod kojeg se gorivo samo nepotpuno oksidira. Sintetički plin, koji pritom nastaje, može se upotrijebiti u konvencionalnim plinskim turbinama ili u gorivim ćelijama, za proizvodnju električne energije i topline. Proizvodnja električne energije iz drvnog plina jamči visok stupanj djelovanja čak i kod manjih postrojenja. U ovoj tehnologiji veliki tehnički izazov jest izbjegavanje katrana.

Značajne karakteristike za sagorijevanje biomase su mali sadržaj vlage, pepela, kalija, klor, dušika i sumpora. Prinos suhe materije i toplinska moć usjeva predstavljaju najznačajnije faktore pri određivanju potencijala energetske sirovine kao čvrstog goriva. Zbog toga, treba imati u vidu da prinos suhe mase u velikoj mjeri ovisi o karakteristikama tla i klimatskih uvjeta, dok sadržaj vode i pepela ovisi o vremenu žetve. Biomasa *Miscanthusa* je pogodna za sagorijevanje zbog niskog sadržaja vode, klor, dušika, sumpora, i količine pepela u usporedbi s drugim lignoceluloznim biljkama. Kako kemijski sastav *Miscanthusa* određuje povoljne karakteristike biomase za sagorijevanje, *Miscanthus* se komercijalno uzgaja u Europskoj Uniji kao energetski usjev i to ponajviše u Ujedinjenom Kraljevstvu, Irskoj i Danskoj. Pored korištenja biomase *Miscanthusa* kao obnovljive sirovine za proizvodnju energije, u posljednje vrijeme se proučava mogućnost korištenja ove sirovine za proizvodnju biogoriva, i to najviše etanola. (Han i sur., 2011.)

Kao i u drugim proizvodnjama, tako i za proizvodnju biogoriva, najveća prednost *Miscanthusa* u odnosu na druge sirovine je ta da se može kultivirati i u zagađenim oblastima ili na obradivom zemljištu niskog kvaliteta, neodgovarajućem za druge usjeve.

Tablica 1. Podjela biomase

Vrsta biomase	ENERGIJSKI POTENCIJAL (PJ/god)			KORIŠTENJE 2000. (PJ/god)
	Prirodni	Tehnički	Ekonomski	
Poljoprivredna	23,0	14,5	11,0	0,3
Šumarska	50,0	34,5	30,0	13,6
Otpad	83,0	44,0	33,0	0,1
UKUPNO	156,0	93,0	74,0	14,0

2.3. *Miscanthus*

2.3.1. Povijest dolaska *Miscanthusa* u Europu

U našim krajevima se o ovoj biljci ne zna puno, međutim u europskim okvirima je već duže vrijeme poznata te je uvedena među energetske biljke kao brzorastuća trava. Izvorno potječe iz japanskih nizina i s pacifičkih otoka, a u Europi je prvi put kultiviran 1930-ih godina. Zbog svoje visoke energetske vrijednosti prenesena je u područja u kojima je razvijena industrija. Razvoj *Miscanthusa* potekao je iz nekoliko naučnih institucija i sveučilišta iz Njemačke. Uzgaja se u Danskoj, Nizozemskoj, Poljskoj, Švicarskoj, Austriji, Mađarskoj, Velikoj Britaniji, te Francuskoj već od 1982. Početkom 1990-ih je privukao veliku pozornost kao potencijalna biomasa, prije svega zbog visoke produktivnosti, čak i u hladnijim uvjetima. (Ligero i sur., 2010.)

2.3.2. Karakteristike

Miscanthus x giganteus je latinski naziv ove biljke, hibrid je *Mischantus sinensis* i *Miscanthus sacchariflorus* bambusa. Pripada sorti trstike.

Višegodišnja je kultura, vrlo je ekonomična i ekološka biljka. Eksploatacija *Miscanthusa* traje 20-30 godina od sadnje, što znači da nakon što ju jednom posadite, u idućih 20 godina nećete ju morati ponovno saditi, niti ponovno uzgajati. Za potpuno uspostavljanje plantaža pod *Miscanthusom* i postizanje maksimalne stope prinosa potrebno je 3 do 6 godina. Godišnji prinos koji se dobiva iznosi 20-25 tona po hektaru zemljišta. Prinosi žetve dostižu maksimum nakon 3 do 5 godina.

Miscanthus x giganteus je visoko produktivna, sterilna, rizomska, C4 višegodišnja trava koju treba smatrati sirovinom za proizvodnju energije. Idealne biljke za proizvodnju biomase su:

- višegodišnje biljke,
- pohranjuju ugljik u tlu,
- imaju visoku učinkovitost korištenja vode,
- nisu invanzivne
- nisku potrebu za gnojidbom

Jedina trava koja posjeduje sve ove karakteristike, kao i proizvodnju velike količine biomase je *Miscanthus x giganteus* (Anderson i sur., 2011.).

Korištenje biotehnologije za povećanje produktivnosti biljaka koristi se kao sredstvo za postizanje tri cilja:

- poboljšanje prinosa namjenskih sirovina za energiju biomase
- poboljšanje prinosa usjeva s osnovnom hranom
- povećana podzemna sekvestracija ugljika kako bi se nadoknadile sve veće emisije ugljika

Produktivnost je osobina u biljkama i može se ispitati iz mnogo različitih kutova, ovisno o vrsti usjeva i željenom konačnom rezultatu, ali povećana sposobnost fotosintetizacije ima široke implikacije i može biti izravno povezana s poboljšanom produktivnošću. Fotosinteza C4 predstavlja ogromnu mogućnost za poboljšanje učinkovitosti. Postoji široka lepeza važnih vrsta usjeva C4 (kukuruz, šećerna trska, sirak) s promjenjivim učinkom koji su usmjereni na proizvodnju bioenergije.

Miscanthus x giganteus je C4 biljka koja je sposobna akumulirati velike količine nadzemne biomase u odnosu na druge C4 biljke u uvjetima dobrog osvjetljenja tijekom jedne vegetacije. C4 fotosinteza, za razliku od C3 sposobna je izbjeći štetne učinke Rubisco oksigenacije Ru-1,5-BP, te je stoga vrlo pogodna za više temperature i visoku radijacijsku okolinu. Međutim, u uvjetima niskog zračenja i u hladnijim temperaturnim uvjetima, kao što su oni u rasponu od 12°C do 14°C, C4 doživljava inhibiciju, smanjujući fiksaciju ugljika. Poboljšanjem slabijeg svjetla i hladnije klime C4 fotosinteza ima potencijal za ranijim sezonskim porastom, povećanim geografskim područjima i povećanim prinosom (Sage i sur., 2012.).

Ove karakteristike pokazuju da *Miscanthus* može imati značajnu ulogu u grupi bioenergetskih usjeva.

Uzgoj *Miscanthusa* ima više posebnosti a to su:

- održavanje ekološke stabilnosti,
- korištenje zaraslih i nekvalitetnih poljoprivrednih tala,
- trajno poboljšavanje pedološkog sastava tla,
- pojačana apsorpcija ugljičnog dioksida iz atmosfere u vegetacijskom razdoblju,
- korištenje obnovljivog energetskog izvora u nekoliko oblika proizvodnje energije,
- lako uzgajanje i održavanje,
- mala potreba za gnojivom,

- niska potrošnja vode,
- neškodljiv za okoliš,
- povećava biodiverzitet,
- pristupačna cijena.

Nakon što se iskoristi osnovna plantaža, tlo koje je s njom bilo pokriveno imat će veću pedološku vrijednost.

Sastav *Miscanthusa* ovisi o sezoni, terminu žetve i bioklimatskoj lokaciji. Literaturni podaci (Han i sur., 2011.) pokazuju da ukupni sadržaj lignina u suhoj masi *Miscanthusa* iznosi 23%, celuloze 37% i hemiceluloze 22% dok suha biomasa *Miscanthusa* sadrži 38% celuloze, 24% hemiceluloze i 24% lignina.



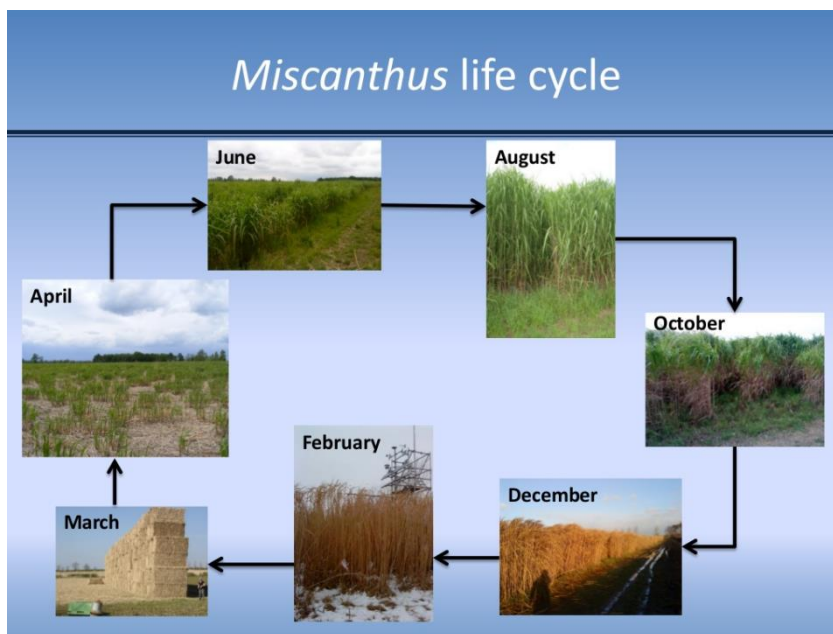
Slika 1. Zasad *Miscanthusa*

Izvor: Josip Rukavina

Prema podacima u Austriji je zasađeno 6000 ha *Miscanthusa*, u Francuskoj 20000 ha, u Engleskoj 60000 ha, a u Njemačkoj 40000 ha. Njemačka kao članica EU subvencionira sadnju *Miscanthusa*, jer kao energetska biljka spada među biljke za čiji se uzgoj daju poticaji.

Prema informacijama koje su dobivene u Ministarstvu poljoprivrede u Hrvatskoj ima oko 420000 ha poljoprivredne zemlje koja zbog njezine kvalitete trenutno nije kultivirana. (Government statistical service)

O sadnji *Miscanthusa* u Republici Hrvatskoj razmišlja se zadnjih desetaka godina. No, osim nekoliko manjih površina koje su uglavnom korištene kao pokusna polja, nije došlo do veće primjene. Najavljivana je bila sadnja većih površina u okolici Slatine pa je u tu svrhu bilo i utemeljeno poduzeće *Miscanthus d.o.o.* od strane vlasnika Tvornice papira Zagreb, budući da se *Miscanthus* u Kini pokazao kao odlična sirovina za proizvodnju papira. Nažalost, taj projekt nikad nije realiziran zbog neriješenih pitanja vezanih za zemljište potrebno za sadnju. Bilo je i pokušaja sadnje uz autoceste jer se taj princip pokazao dobrim na nekim cestama u Italiji i Austriji. Tu bi *Miscanthus* zbog svoje visine i guste vegetacije bio zvučna izolacija a ujedno i štitio da štetne tvari iz vozila ne dolaze na tla uz cestu. Za očekivati je da se ova situacija promijeni i da uskoro *Miscanthus* bude češće zastupljen na našem tlu, prije svega na onim zemljištima koja nisu pogodna za proizvodnju hrane. Zbog svojih osobina pokazao se kao dobra biljka za saniranje zemljišta na kojima je nekad bilo smetlište kao i zemljišta koja se nalaze u neposrednoj blizini cementara, željezara i sličnih postrojenja.



Slika 2. Godišnji ciklus *Miscanthusa*

Izvor: (<https://www.slideshare.net/AndyRobertson4/miscanthus-ceh-ph-d-presentation-8313-25483020>)

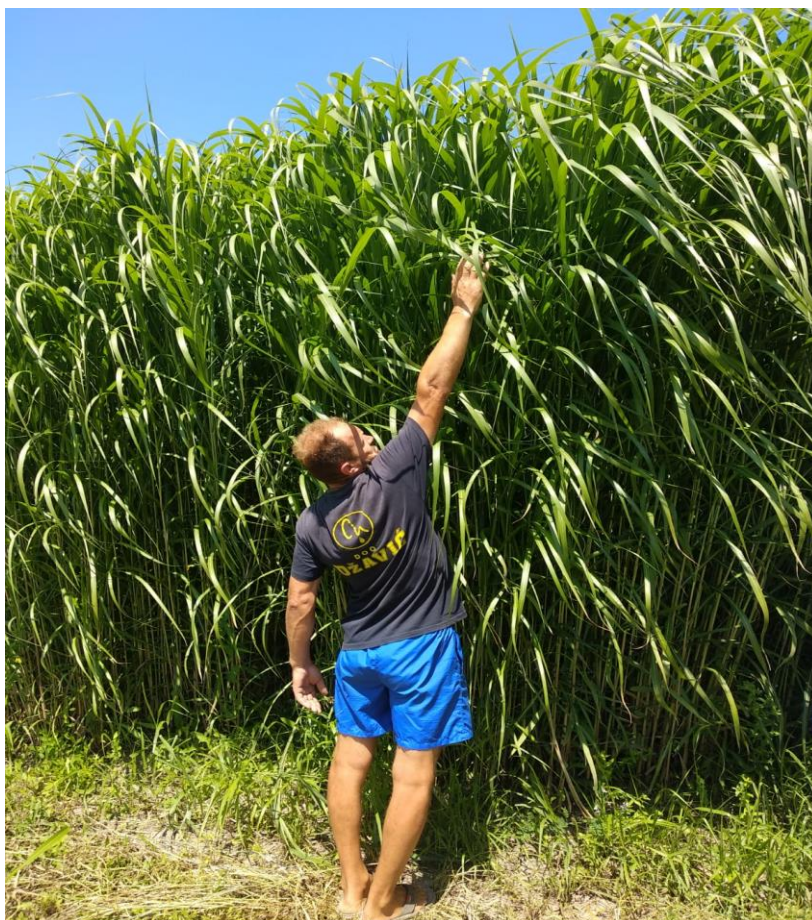
2.3.3. Uzgoj

Miscanthus kao višegodišnja biljka nije zahtjevan za obradu. Temeljna obrada tla ostaje u granicama agrotehničkih zahtjeva. Za njegov uzgoj najbolje zemljište je humusna ilovača koje je dobro opskrbljena vodom. Teška i gusta zemljišta su neprikladna. Poželjan je pH vrijednosti 5-8. Korov s razgranatim korijenjem ne smije imati dominantnu ulogu. Tijekom cijelog životnog razdoblja biljke prihrana je vrlo skromna. Trajnost kulture je 25 godina. U trećoj godini su biljke visoke 3m, kada se i postižu prvi puni prinosi. Maksimalni prinosi se dostižu u 6. i 7. godini. Nakon tog se prinosi održavaju na konstantnom nivou.

Brzorastuća je trava, s uspravnim i tankom nadzemnom stabljikom promjera oko 10 mm koja se obično ne grana. Nadzemni dio može narasti do 4 m visine. Lisna plojka je duljine veće od 50 cm i širine oko 3 cm. Terminalni cvat je metlica duljine oko 30 cm koji se ne razvija svake godine. Biljka cvate uglavnom u toplijim krajevima, dok u klimatskim uvjetima gdje su zime hladne i mraz nastupa rano nema dovoljno vremena da se cvjetovi razviju ili u slučaju cvatnje sjeme sazrije (Matlaga i Davis 2013.).

2.3.4. Klimatski uvjeti

Potencijalne zone za uzgoj *Miscanthusa* su vrlo raširene. Fotosinteza, a time i rast biljke se ne postiže kod vrlo niskih temperatura, međutim, prag za fotosintezu *Miscanthusa* (6°C) znatno je niži nego za kukuruz, pa ima širi potencijal za rast kroz godinu. Glavna opasnost je mraz u kasno proljeće koji može uništiti rano proljetno lišće i smanjiti učinkovitost dužeg trajanja vegetacije.



Slika 3. *Miscanthus* u srpnju, faza porasta

Izvor: Josip Rukavina

Jednom posađen, opstanak *Miscanthusa* ima veliku zavisnost od okoliša. U prvoj godini najveći problem je tolerantnost na hladnoću, odnosno hladne zime i snježni pokrivač u umjerenim područjima, te pojava korova i štetnika (Anderson i sur., 2011.).

Brzorastuća je trava, s uspravnom i tankom nadzemnom stabljikom promjera oko 10 mm koja se obično ne grana. Nadzemni dio može narasti do 4 m visine. Lisna plojka je duljine veće od 50 cm i širine oko 3 cm. Terminalni cvat je metlica duljine oko 30 cm koji se ne razvija svake godine. Biljka cvate uglavnom u toplijim krajevima, dok u klimatskim uvjetima gdje su zime hladne i mraz nastupa rano nema dovoljno vremena da se cvjetovi razviju ili u slučaju cvatnje sjeme sazrije (Matlaga i Davis 2013).

Rast *Miscanthusa* ovisi ne samo o zemljištu nego i o količini i ravnomjernosti padalina do sredine rujna. Idealna količina padalina je između 700 i 900 mm, dobro raspoređena u periodu vegetacije. Minimum padalina mora iznositi 500 mm, te je tada smanjen prinos. Ako potraje sušni period dolazi do prestanka rasta uz djelimično opadanje lišća. U nedostatku oborina mora se izvršiti navodnjavanje. Prosječna temperatura trebala bi biti iznad 7°C. Ne preporučuju se mjesta koja imaju suha ljeta. Sadnja na mjestima većih nadmorskih visina je problematična jer niske temperature imaju negativan utjecaj na rast biljke. Padine koje gledaju na sjever i doline koje zadržavaju hladnoću, kao i lokacije koje su sklone ranim mrazovima nisu pogodne za uzgoj. Lišće mladih izdanaka umire na temperaturi ispod -5°C, ali obično kasnije ponovno izbije. Za dobro prezimljavanje rizoma u oblastima s vrlo niskim temperaturama od koristi je zatvoreni sniježni pokrivač. (Lewandowski i sur., 2000.)

2.3.5. Priprema tla

Planiranje je potrebno započeti bar godinu dana prije sadnje. Kako bi se zemljište što bolje pripremlilo dovoljno je obično tanjuranje, do najmanje 15 cm dubine. Potrebno je voditi računa da ne ostanu veće organske mase od prethodne kulture, jer dušik koji se oslobađa usporava zrijanje u jesen. Jednogodišnje biljke *Miscanthusa* počinju u jesen prilično kasno sa skladištenjem hranjivih tvari u rizome, tako da je oslabljena otpornost na mraz ukoliko dođe do jakog rasta, prvenstveno u jesen. Svaka aktivnost zemljanih radova nakon sadnje rizoma stvara veliki rizik od širenja rizoma izvan planiranog područja (United States Department of Agriculture, 2011.).

2.3.6. Proces sadnja

Na jedan hektar zemljišta sadi se 10000 sadnica. Kako bi biljka dobila dovoljno prostora sadi se 1 sadnica po m². Time se zemljište optimalno iskorištava.

Miscanthus sadnice se mogu samo u laboratoriju „in Vitro“ razmnožavati, jer ne postoji sjeme a biljka je sama po sebi neplodna. Izvan plantaže se ne može ni širiti ni razmnožavati. Ta oba segmenta su vrlo poželjna.

Sadnice se kupuju u rasadnicima *Miscanthus*, a vrlo je bitno da nisu iz starog nasada. Pri rukovanju sa sadnicama i njihovom transportu potrebna je posebna pažnja što će dalje osigurati njihovu održivost. Kvalitetni sadnice su duge barem 8 cm i imaju najmanje 5 izdanaka. Vrlo je bitna ručna klasifikacija korijena. Sadnice se sade na način da se omogući daljnje širenje biljke tijekom njenog životnog vijeka, te na dubinu od 5-10 cm. Na 1 m² se sadi jedna sadnica što je približno 10000 sadnica po ha zemljišta. Cijena jedne sadnice je oko jednog eura. Optimalna temperatura tla za sadnju je 10°C.

Pri preranoj sadnji postoji rizik od kasnih mrazeva, kod kasne sadnje postoji rizik od suše odnosno od toplote. Za uspješan rast važno je ispravno završiti sadnju, a po potrebi se može dodatno povaljati i zaliti površina. Sadnica *Miscanthus* praktički nema ni fito ni zoo neprijatelja pa je upotreba pesticida vrlo rijetko potrebna.

Kao višegodišnja biljka, maksimalnu produktivnost dostiže u svojoj trećoj godini proizvodnje (Dohleman i sur., 2009.).

2.3.7. Zaštita i gnojidba

U prvoj godini je uz kvalitetu sadnice najvažnije istrebljivanje korova. Nakon druge godine može se očekivati žetva s oko 30 posto punog prinosa (Jorgensen i Sander, 1997.)

U trećoj godini slijedi prva puna žetva i od tog trenutka se može obaviti neznatno gnojenje.

Miscanthus se može brati u proljeće. Preko zime biljka ima dovoljno vremena za sušenje, te za opadanje lišća i izrastanje mladica. Nakon tog se suši sve dok ne ostane 10-15 % vode. Žetva se može izvršiti s kombajnom za kukuruz ili s kosilicom za košenje sijena. Za uklanjanje korova koriste se ista sredstva kao i kod kukuruza. Kao zamjena za upotrebu pesticida koristi se okopavanje motikom i pažljiva obrada kultivatorom. Kod mehaničkog uklanjanja korova u prvoj godini obično je potrebno tri puta okopati između biljaka. Napadi štetočina i bolesti su rijetki, ali se na zemljištima s ustajalom vodom ili oslabljenom usjevom znatno povećava njihova mogućnost.

Potreba za dodatnim gnojenjem zemljišta je vrlo mala ili nepostojeća. Lišće *Miscanthus* koje opada na tlo zimi je dovoljno kako bi se tlo prihranilo. Uporaba tekućih gnojiva se ne preporučuje. Gnojidba dušikom se preporučuje najranije od 2.godine, ali se ova kultura može

uzgojiti i bez gnojidbe. Preporučuje se gnojidba u travnju ili svibnju, poslije žetve. Od gnojiva je najbolje koristiti kalij ili nitratno gnojivo. (Dželetović i sur. 2006.)

2.3.8. Žetva

Iako je moguće izvršiti od studenog, najbolje je žetvu odraditi u travnju ili svibnju, jer bi tijekom tog perioda vlažnost stabljike trebala iznositi manje od 15 % vlažnosti. To je vrlo niska razina u odnosu na klasični energent koji ima vlažnost oko 40-50 %. Tako niska vlažnost omogućuje iskorištavanje biljke bez potrebe za sušenjem i time sprječavaju dodatni troškovi. Povoljno bi bilo sunčano vrijeme tjedan dana prije žetve.

Odnos kvantitete i kvalitete požnjevene biomase *Miscanthus* ovisi o vremenu žetve. Zimski gubici (opalo lišće, lišće u procesu raspadanja, vršni dijelovi stabljike) mogu dovesti do smanjenja suhe biomase od 30-50 %, ali sušenje u polju smanjuje i sadržaj vode i mineralnih materija u usjevu, što daje čistiju sirovinu za proizvodnju goriva i omogućuje zadržavanje više nutrijenata u zemljištu (Dželetović i sur., 2009.).

2.3.9. Prinosi

Prinosi *Miscanthus* u velikoj mjeri zavise o lokaciji i klimatskim uvjetima. Tako su najveći prinosi zabilježeni u Južnoj Europi gdje voda nije bila ključni čimbenik. Veliki broj plantaža je pokazao značajnu različitost u prinosima suhe mase, u razmaku od 4-25 t/ha u zemljama Centralne Europe do 30-40 t/ha u Južnoeuropskim zemljama. (Dražić i sur., 2010.)

Ako prerano padne snijeg, dok još nije lišće opalo, *Miscanthus* se mora skladištiti. Zimski gubici mogu dovesti do smanjenja suhe biomase od 30 do 50%. Kod još mladih biljki stabljike se mogu nakon otapanja ponovno uspraviti. Kod starijih se lome na oko 40-50 cm iznad zemlje. Kod jako zbijenih usjeva lišće ne može otpasti.

Od kraja rujna se skladište rezervne materije u sistem sadnice, posebno u rujnu i listopadu. Zato se sadnja u jesen ne preporučuje, jer je biljka *Miscanthus* po pravilu potpuno zrela tek u prosincu.

Prinosi i prihodi od proizvodnje *Miscanthusa* ovise o različitim karakteristikama. To su:

- kvaliteta zemljišta,
- vodoopskrba,
- temperatura lokacije.

Očekivani prinosi suhe mase su:

- u 2. godini od 4000 do 7000 kg/ha
- u 3. godini od 12000 do 20000 kg/ha

Ukoliko je sadržaj vode 14%, može se računati s prosječnim prinosom od 19000 kg/ha, i to na zemljištima koja su pogodna za kukuruz. (Lewandowski i sur., 2000.)



Slika 4. Vaganje

Izvor: Josip Rukavina



Slika 5. Samljeveni *Miscanthus*

Izvor: Josip Rukavina

2.3.10. Završna obrada

Upotrebom raznih tehnologija sabijanja, biomasa *Miscanthusa* se prevodi u čvrsta biogoriva u obliku briketa, peleta, bala i nakon toga može biti iskorištena za proizvodnju električne energije i u svrhu dobijanja topline. Za proizvodnju peleta i briketa, usjev se reže a zatim se biomasa obrađuje direktno na terenu ili se transportira u pogone za obradu gdje se pod velikom kompresijom pretvara u pelete ili brikete. Baliranje uključuje rezanje i sušenje, a zatim i korištenje velikog stroja za baliranje. *Miscanthus* ima neto kalorijsku vrijednost po suhoj osnovi od 17 MJ/kg s 2,7% sadržaja pepela. Energetska vrijednost 20 tona suhe materije *Miscanthusa* po hektaru bila bi ekvivalentna energetskej vrijednosti od 8 tona uglja.



Slika 6. Balirani *Miscanthus*

Izvor: Josip Rukavina

2.3.11. Iskorištavanje

Sve veći broj publikacija i znanstvenih radova o *Miscanthusu* proteklih godina govori o sve većem interesiranju, istraživanju i komercijalnoj primjeni ovog usjeva. Osim njegove direktne primjene za proizvodnju energije i biogoriva, može se koristiti za dobijanje širokog spektra proizvoda kao što su: papirna pulpa, građevinski materijal, geotekstil, vlaknaste ploče, derivati celuloze. Kao nadomjestak slame se koristi kod uzgoja jagoda. Najjednostavnija upotreba *Miscanthusa* je kao izgarajuće gorivo, za grijanje. Kao ukras u vrtu se koristi usitnjeni *Miscanthus*, koji je kao takav idealan za dekoriranje vrta (Lewandowski i sur., 2000.).

Za nadomjestak treseta se uzima raspadnuti i fermentirani *Miscanthus* te se takav koristi pri sadnji cvijeća. Vlakna *Miscanthusa* mogu biti korištena kao sirovina za proizvodnju komposta. Utvrđeno je da je na kompostiranom supstratu *Miscanthusa* dobro rastao bršljen. Mješavina komposta dobivenog od *Miscanthusa* ima malu ukupnu gustoću, visoku zračnu poroznost i visok koeficijent difuzije kisika u poređenju s tresetom pa se vrše dodatna istraživanja kako bi postao alternativa tresetu (Leth i sur., 2001.).

Velike kompanije trenutno se bave intenzivno razvojnom tehnologijom *Miscanthusa* kao pogonskog goriva ili umjetnog materijala.

Dobijanje papirne pulpe je zapravo proces delignifikacije, pri čemu se lignin kemijski rastvara što omogućava izdvajanje vlakana iz sirovine. Komercijalna proizvodnja pulpe iz nedrvenih resursa procijenjena je 6,5 % od ukupne proizvodnje pulpe s tendencijom daljnog rasta. Kina proizvodi 77 % svjetske nedrvne pulpe. Danas je upotreba vlakana iz nedrvenih usjeva u proizvodnji papirne pulpe u Europi manja od 1 % ukupne proizvodnje, i to se uglavnom koristi u zemljama koje su u razvoju (Ligero i sur., 2010.).

Trenutno se *Miscanthus* uvjerljivo najviše koristi za grijanje, u dva oblika. Prvi oblik su *Miscanthus*-kuglice a drugi *Miscanthus* briketi, a sve se više koristi i kao zamjena drveta direktno s njiva. Visoke vrijednosti silicija i klora, koje su u prošlosti kod konvencionalnih peći pravile probleme zbog naslage pepela se sve više izbacuju, odnosno proizvođači peći su bolje riješili taj problem.

Još jedna važna upotreba je korištenje *Miscanthusa* kao postelja za konje i male životinje. Mali dodatak ulja sprječava stvaranje prašine, na koju su se u početku često žalili. Ova slama ima veću mogućnost upijanja od normalne slame i može se, što je najveća prednost, poslije koristiti za gnojidbu njive.

Proizvodnja bioetanol iz biomase je jedan od načina za smanjenje potrošnje nafte i zagađenja životne sredine. Kao zamjena za benzin, bioetanol ima izuzetan potencijal s obzirom na to da već postoji sistem za tekuća goriva i da motori suvremenih automobila mogu raditi s do 10% bioetanol. Trenutno se sva biogoriva koriste tehnologijom „prve generacije“ a to zahtijeva visoku cijenu nabave usjeva na bazi škroba i ulja kao njihovih sirovina. Drugi je problem što je biljna biomasa koja služi za proizvodnju bioetanol „prve generacije“ također i izvor hrane za ljude i životinje. Takvi usjevi mogu biti štetni za zemljište i imati nepovoljan energetski odnos. Bioetanol „druge generacije“ može biti proizveden iz različitih lignoceluloznih materijala pa tako i iz *Miscanthusa*. Najveća prednost je mogućnost uzgoja na zemljištima neodgovarajućim za produkciju usjeva namijenjenih ishrani ljudi ili životinja. Zahvaljujući visokom sadržaju celuloze i visokom prinosu biomase, *Miscanthus* bi se mogao koristiti za proizvodnju bioetanol (Predojević, 2010.).

Kako lignocelulozna biomasa prirodno ne podliježe enzimskoj hidrolizi, neophodan je predtretman kako bi se pospješila njena podložnost enzimskim procesima i omogućilo dobivanje fermentabilnih šećera. Tijekom posljednjih godina razvijen je veliki broj fizičkih, kemijskih i enzimskih predtretmana. Postupak predtretmana je i dalje jedan od najskupljih koraka, zbog čega je i proizvodnja bioetanol iz lignocelulozne biomase tehnološki zahtjevnija i znatno skuplja. Izbor tehnologije za predtretman određene biomase zavisi od njenog sastava i nusprodukata nastalih kao rezultat predtretmana (Kumar i sur., 2009.).

Ključna pitanja koja se odnose na proces predtretmana lignocelulozne biomase su sljedeća:

1. Optimizacija procesa hidrolize hemiceluloze tako što će se ograničiti njeno razlaganje do furana, koji djeluju kao inhibitori fermentacije;
2. Smanjivanje kristalčnosti celuloze tj. povećavanje reaktivnosti celuloze;
3. Izbjegavanje razlaganja i rekondenzacija lignina;
4. Razvijanje procesa koji mogu biti primijenjeni na pilot, demonstrativnom ili komercijalnom nivou (Brosse i sur., 2010.).

Još neke od primjena su upotreba vlakana *Miscanthusa* za proizvodnju geotekstila, štapova za ukrasne biljke, kao i upotreba pepela *Miscanthusa* nakon sagorijevanja kao gnojiva. Kvaliteta i kvantiteta pepela biomase ovisi o velikom broju faktora uključujući vrstu biljke koja se koristi, dio biljke koji se koristi, uvjeti rasta, gnojidba, termin žetve, žetvene tehnike i sistemima za konverziju (Jones i Walsh, 2007.).



Slika 7. *Miscanthus* kao hrana za životinje

Izvor: Josip Rukavina

2.4. Bioplin

Bioplin je mješavina plinova metana, ugljikovog dioksida, dušika, vodika, i vodikovog sulfida. Najvažniji, i u najvećoj mjeri zastupljen, plin je metan (CH_4) koji ujedno daje energetska vrijednost bioplinu. Sastav bioplina je u velikoj mjeri određen sastavom supstrata, tijekom fermentacijske reakcije, operativnim parametrima i različitim tehničkim preduvjetima bioplinskog postrojenja. Bioplin nastaje procesom anaerobne digestije (AD) u kojem raznovrsni anaerobni mikroorganizmi u anaerobnim uvjetima (bez prisutnosti kisika) razlažu kompleksne organske spojeve do jednostavnijih elemenata. U prirodi se proces AD može naći na morskom dnu ili u želucu preživača, dok se komercijalni pristup proizvodnje metana oslanja na izgradnju visoko sofisticiranih bioplinskih postrojenja. Koncept bioplinskog postrojenja u kojem se iz postojećih resursa (najčešće organskog otpada, stajnjaka i otpada iz poljoprivredne proizvodnje) stvara bioplin, odnosno toplinska i električna energija poznat je već desetljećima, no posljednjih 15-ak godina je doživio naglu ekspanziju i u pogledu

optimizacije biokemijskog procesa i u pogledu istraživanja sirovina koje se mogu koristiti u energetske svrhe. Premda je princip rada bioplinskih postrojenja poznat već dugi niz godina, veličina investicije i nedovoljno operativnih informacija kočili su tržište od daljne ekspanzije. No, s prepoznavanjem vrijednosti bioplina od strane Europske Komisije, tržište energije dobivene iz bioplina bilježi stalni rast. Proizvodnja bioplina iz postojećih resursa ima pozitivan učinak na nekoliko društveno-gospodarskih i ekoloških segmenata.

Tablica 2. Sastav bioplina

Kemijski spoj	Kemijska formula	Udio	Vol %
Metan	CH ₄	50 – 75	%
Ugljikov dioksid	CO ₂	25 – 45	%
Sumporovodik	H ₂ S	<1	%
Amonijak	NH ₃	<1	%
Vodena para	H ₂ O (g)	2 – 7	%
Kisik	O ₂	<2	%
Dušik	N ₂	<2	%
Vodik	H ₂	<1	%

2.4.1. Anaerobna fermentacija

Proces promjene biomase u bioplin u rezervoarima (fermentorima) uz pomoć mikroorganizama naziva se anaerobna fermentacija. Krajnji proizvod ovog biokemijskog procesa je bioplin, a on je smjesa metana, ugljen dioksida i sporednih komponenti. Proces proizvodnje bioplina ima četiri faze a to su:

1. Hidroliza, koja se još odvija u okruženju u kojem se nalazi kisik. Polimerne organske materije (polisaharidi, masti, bjelančevine) se pomoću anaerobnih bakterija razlažu na monomerne (alkohol i masne kiseline), pri čemu se oslobađaju vodik i ugljični dioksid,
2. Acidogeneza je faza u kojoj dolazi do potrošnje preostalog kisika, stvaraju se anaerobni uvjeti i nastaju složene organske kiseline,
3. Acetogeneza je faza u kojoj bakterije pretvaraju složene organske kiseline u octenu kiselinu, vodik i ugljični dioksid,

4. Metanogeneza je posljednja faza u procesu razgradnje, u kojoj metanogene bakterije razlažu octenu kiselinu na metan i ugljični dioksid, a hidrogene bakterije od vodika i ugljičnog dioksida stvaraju metan.

Učinkovitost anaerobne fermentacije ovisi o nekoliko ključnih parametara pa je vrlo važno osigurati optimalne uvjete za razvoj anaerobnih mikroorganizama. Na njihov rast i aktivnost snažno utječu temperatura, pH vrijednost, intenzitet miješanja kao i prisutnost inhibitora. Metanske bakterije su anaerobi i zato se mora spriječiti svaki dotok kisika u digester (Al Seadi i sur., 2008.).

2.4.2. Temperatura

Sam postupak anaerobne digestije može se odvijati na različitim temperaturama. Temperature se klasificiraju u tri temperaturne zone:

- psihrofilnu temperaturnu zonu (ispod 25°C),
- mezofilnu zonu (25-45°C),
- termofilnu zonu (45-70°C)

Duljina trajanja anaerobne fermentacije je u direktnoj vezi s temperaturom na kojoj se postupak odvija. Stabilnost temperature je ključna za anaerobnu fermentaciju. Radna temperatura se odabire prema vrsti supstrata, a neophodna temperatura se održava putem podnih ili zidnih sustava grijanja unutar digestora. Većina suvremenih postrojenja za proizvodnju bioplina rade na termofilnim temperaturama jer to ima brojne prednosti u odnosu na procese koji se odvijaju na mezofilnim i psihofilnim temperaturama:

- učinkovito uništenje patogena,
- viša stopa rasta metanogenih bakterija na višim temperaturama,
- kraće vrijeme digestije, što proces čini bržim i učinkovitijim,
- poboljšana razgradnja i iskoristivost hranjivih tvari i supstrata
- bolja razgradnja krutih tvari i iskoristivost supstrata,
- bolja mogućnost razdvajanja tekuće i krute frakcije supstrata.

Nedostaci procesa proizvodnje pri termofilnim temperaturama očituju se u:

- većem stupnju neravnoteže,

- većoj potrošnji energije radi postizanja većih temperatura zagrijavanjem,
- većem riziku od inhibicije amonijakom.

Viskozitet sadržaja unutar digestora obrnuto je proporcionalan temperaturi. Što su temperature veće supstrat je manjeg viskoziteta, odnosno prelazi u tekuće stanje, čime je olakšana difuzija otopljenih tvari. Postupak na termofilnim temperaturama rezultira bržim kemijskim reakcijama a time i većom učinkovitošću proizvodnje bioplina i manjim viskozitetom. Veći utrošak energije pri termofilnim procesima opravdan je boljim prinosom bioplina. Temperaturnu procesa važno je održati konstantnom jer promjene ili variranja temperature negativno utječu na proizvodnju bioplina (Al Seadi i sur., 2008.).

2.4.3. pH vrijednost

Kiselost, odnosno bazičnost mješavine supstrata izražava se pH vrijednošću. pH vrijednost supstrata utječe na rast i razvoj metanogenih mikroorganizama i kvalitetu odvijanja pojedinih spojeva važnih za uspješnost procesa anaerobne fermentacije (amonijak, sulfidi, i organske kiseline). Nastanak metana odvija se u relativno uskom području pH vrijednosti od otprilike pH 5,5 do 8,5 dok su za acidogene bakterije u mnogim slučajevima optimalne niže vrijednosti pH-a. Optimalne vrijednosti pH za mezofilnu digestiju su u rasponu od 6,5 do 8, a do inhibicije procesa dolazi ako pH vrijednost padne ispod 6 ili poraste preko 8,3. Topivost ugljikovog dioksida u vodi opada s povećanjem temperature pa je pH vrijednost u termofilnim digestorima, budući da otopljeni ugljikov dioksid u reakciji s vodom stvara ugljičnu kiselinu. Amonijak koji nastaje razgradnjom proteina iz organskih tvari ili zbog sadržaja amonijaka unesenog supstratom može uzrokovati povećanje pH vrijednosti, dok akumuliranje hlapivih masnih kiselina u supstratu snižava pH vrijednost. Unutar anaerobnih reakcija pH vrijednost se kontrolira sustavom bikarbonatnih pufera. Stoga pH vrijednost unutar fermentatora ovisi o parcijalnom tlaku ugljikovog dioksida i sadržaju bazičnih i kiselih spojeva u tekućoj fazi supstrata. U slučaju promjene koncentracije bilo kiselih bilo lužnatih spojeva, bikarbonatni puferi sprječavaju promjenu pH vrijednosti do određene razine. Kada se kapacitet puferskog sustava iscrpi, dolazi do drastičnih promjena vrijednosti pH, što dovodi do potpune inhibicije procesa digestije. Iz ovog razloga pH vrijednost nije moguće koristiti kao jedini indikator za

praćenje procesa, već se on uvijek promatra u korelaciji s drugim parametrima (Al Seadi i sur., 2008.).

2.4.4. Amonijak

Amonijak (NH_4) je važna hranjiva tvar i ima značajnu funkciju u procesu anaerobne fermentacije. Amonijak je važna hranjiva tvar koja služi kao prethodnik prehrambenim namirnicama i gnojivima, a obično se susreće kao plin, karakteristično odbojnog mirisa. Glavni izvor amonijaka u procesu anaerobne fermentacije su bjelančevine. Previsoka koncentracija amonijaka, može potpuno zaustaviti proces digestije. Ovakav slučaj je karakterističan za anaerobnu digestiju gnojnice, radi visoke koncentracije amonijaka u urinu. Kako bi se spriječio inhibitorni učinak, koncentraciju amonijaka u smjesi treba održavati ispod 80 mg/l. Metanogene bakterije izuzetno su osjetljive na inhibiciju amonijakom. Koncentracija slobodnog amonijaka direktno je proporcionalna temperaturi te je stoga rizik inhibicije amonijakom veći kod termofilnih procesa nego kod mezofilnih. Razlog tomu je što je za inhibiciju amonijakom odgovoran neionizirani oblik amonijaka. Slobodni amonijak (NH_3) je frakcija amonijaka koja inhibira proces anaerobne razgradnje. Povećanje pH vrijednosti i temperature dovest će do povećanja inhibicije, budući da ovi parametri utječu na udio slobodnog amonijaka. Kada je proces zaustavljen uslijed povećanja koncentracije amonijaka, povećava se i koncentracija HMK što dovodi do smanjenja pH vrijednosti. To će djelomično umanjiti učinak amonijaka radi smanjenja koncentracije slobodnog amonijaka te će doći do smanjenja koncentracije pH (Al Seadi i sur., 2008.).

2.4.5. Supstrati

Za supstrate anaerobne fermentacije radi proizvodnje bioplina mogu poslužiti različiti tipovi sirovina. Najčešće se koriste sljedeće kategorije supstrata:

- stajski gnoj i gnojnice,
- ostaci i nusproizvodi iz poljoprivredne proizvodnje,
- razgradivi organski otpad iz poljoprivredne i prehrambene industrije,
- organski dio komunalnog otpada i otpada iz ugostiteljstva,

- otpadni muljevi,
- energetski usjevi (kukuruz, sirak, različite vrste trava).

Supstrati koji imaju visok sadržaj lignina, celuloze i hemiceluloze, primjerice drvo, također se mogu koristiti kodigestiji, ali moraju proći predtretman kako bi se povećala mogućnost digestije. Potencijal nastanka metana vrlo je važan čimbenik za vrednovanje supstrata za anaerobnu fermentaciju. Sam stajski gnoj ima mali metanski potencijal, te se zbog toga stajski gnoj rijetko digestira sam već se često pomiješa sa supstratima koji imaju velik, odnosno veći potencijal od stajskog gnoja za proizvodnju metana. Najčešći supstrati koji se dodaju stajskom gnoju i gnojnicu su uljni ostaci iz prehrambene i ribarske industrije te proizvodnje stočne hrane, ostaci nastali prilikom proizvodnje alkoholnih pića, ostaci iz pivovara i prerade šećera te trave, žitarice ili uljarice uzgojene kao energetski usjevi (Al Seadi i sur., 2008.)

2.4.6. Dijelovi bioplinskog postrojenja

Elementi od kojih će bioplinsko postrojenje biti izgrađeno ovise o nekoliko čimbenika koji se moraju odrediti prije izrade osnovnog dizajna, a koji uključuju:

- tip i kemijski sastav sirovine,
- monodigestijski ili kodigestijski proces,
- odabir temperature reakcije,
- tehnologija obrade proizvoda anaerobne digestije (bioplin, digestat) i sl.

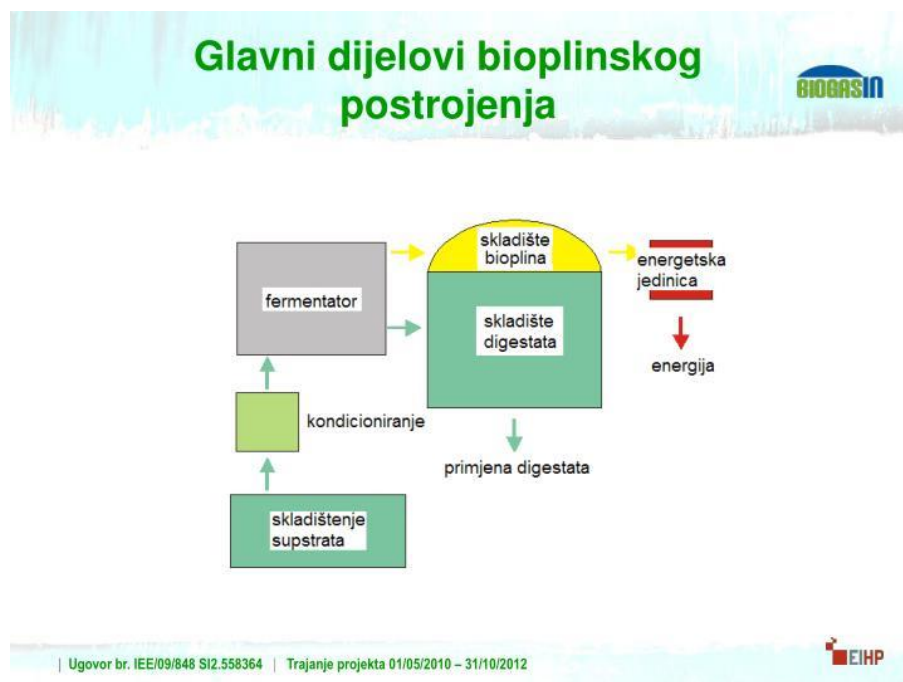
Neovisno o prethodno spomenutim elementima, svako bioplinsko postrojenje se sastoji od sljedećih elemenata:

- skladište sirovina,
- hranidbena jedinica,
- digestor i kogeneracijska jedinica
- spremište bioplina i skladište digestata

Uz osnovne elemente, postrojenje može sadržavati i dodatne tretmane/tehnologije koje prerađuju pojedine nusproizvode anaerobne digestije. Tako npr. postrojenje može sadržavati sljedeće tehnologije:

- jedinica za usitnjavanje sirovine,
- fermentor za predtretman ili higijenzator za predtretman klaoničkog otpada,

- post-digestor,
- tretmana digestata,
- tretmana za pročišćavanje bioplina u biometan i sl.



Slika 8. Glavni dijelovi bioplinskog postrojenja

Izvor: (<https://www.slideserve.com/avel/razvitak-odr-ivog-tr-i-ta-bioplina-u-srednjoj-i-istoj-europi>)

2.4.7. Potencijal bioplinskih postrojenja u Hrvatskoj

Sukladno zajedničkoj energetskej politici Europske unije, Republika Hrvatska sustavno razvija strategiju korištenja obnovljivih izvora energije. Zahvaljujući brojnim prirodnim resursima (geotermalni izvori, energija vjetrova i sunca, šumska biomasa), Hrvatska ima izvrsne preduvjete za dostizanje ciljeva zacrtanih u „EU 2020“ energetske-klimatskom paketu, odnosno u Direktivi 2009/28/EC. U želji za dostizanjem „EU 2020“ ciljeva, Ministarstvo gospodarstva (MINGO) pripremiło je Nacionalni akcijski plan za obnovljive izvore energije do 2020. godine koji je zasnovan na načelima održivog razvoja. Strategija energetskeg razvoja RH (MINGO, 2013.) temelji se na povećanju udjela OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije od 20% u 2020. godini, čime su postavljene sljedeći sektorski ciljevi:

- 35% udjela OIE u proizvodnji električne energije, uključujući velike hidroelektrane,
- 10% udjela OIE u prijevozu,
- 20% udjela OIE u sustavima grijanja i hlađenja.

Tijekom 2013. godine Europska unija je Direktivom 2013/18/EC s namjerom određivanja udjela OIE u Hrvatskoj. Novim napatkom osvojila je udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije od 12,6 % za 2005. godinu, odnosno 20% za 2020. godinu (Ministarstvo gospodarstva, 2013.). Time su izmijenjeni i sektorski ciljevi, koji sada iznose:

- 39% udjela OIE u bruto neposrednoj potrošnji električne energije,
- 10% udjela OIE u bruto neposrednoj potrošnji u prijevozu,
- 20% udjela OIE u bruto neposrednoj potrošnji za grijanje i hlađenje.

Kada se govori o posebnim ciljevima vezanim uz proizvodnju bioplina, a definiranim Strategijom energetskog razvoja Hrvatske, planirano je iskorištavanje minimalno 20% ukupnih uvjetnih grla koji imaju potencijal proizvesti oko 2,6 PJ energije iz bioplina. Drugim riječima, 20% stočarske proizvodnje bi, između ostalog, trebalo biti angažirano u energetske svrhe i kao rezultat bi proizvelo 100 milijuna m³ bioplina. Nadalje, planirano je iskoristiti biomasu u količini potrebnoj za proizvodnju 85 MW energije (Ministarstvo gospodarstva, 2013.).

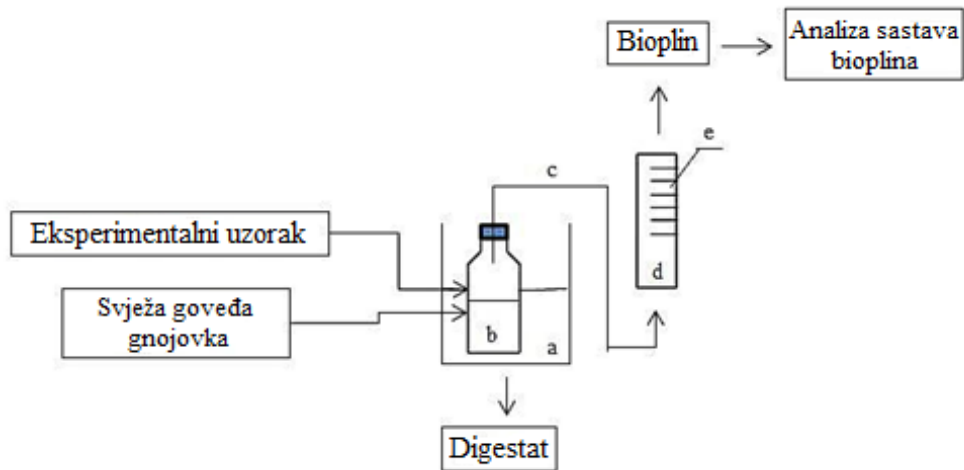
3. MATERIJALI I METODE

3.1. Metoda anaerobne fermentacije

Za proizvodnju bioplina korištene su se 2 skupine uzoraka:

- a) svježa goveđa gnojovka 500 g (ukupna biomasa) prikupljena je s farme Orlovnjak u Tenji iz prijemne jame smještene prije ulaska u bioplinsko postrojenje - kontrolna skupina K;
- b) smjesa 475 g (95% ukupne biomase) svježe goveđe gnojovke + 25 g svježe biomase *Miscanthusa* (5% ukupne biomase) - eksperimentalna skupina M;

Kontrola je postavljena u dva ponavljanja dok su eksperimentalne skupine postavljane u 3 ponavljanja.



Slika 9. Shematski prikaz provedbe procesa anaerobne fermentacije

Izvor: Kovačić (2017.)

Uzorak *Miscanthusa* uzet je 20.07. u fazi porasta biljke, a prinos se utvrdio na temelju broja i mase biljaka. Prinos u svježoj tvari iznosio je $123,75 \text{ t ha}^{-1}$.

Anaerobna fermentacija se provodila u diskontinuiranim bioreaktorima zapremnine 1 L pri termofilnim uvjetima (55°C) u kupelji tijekom razdoblja do 30 dana. Fermentacija se svakodnevno pratila a proizvedeni bioplin sakupljan je kroz prezasićenu otopinu NaCl u graduiranim menzurama (2 L) spojenim na bioreaktore preko PVC cijevi.



Slika 10. Provedba procesa anaerobne fermentacije

Izvor: Josip Rukavina

3.2. Analiza sastava bioplina

Sastav uzorka bioplina i to udio CH_4 , CO_2 i N, analiziran je pomoći plinskog kromatografa Varian 3900 opremljen TCD detektorom prema modificiranoj metodi HRN ISO 6974-4:2000. Temperatura injektora bila je 150°C , Temperatura detektora 150°C , Temperatura kolone 90°C . Tip kolone: $10 \times 1/8$ " od nehrđajućeg čelika (Restek SN: C14030) za analizu metana, dušika, ugljičnog dioksida, a plin nositelj je helij s protokom kroz kolonu 1 mL/min .

3.3. Analiza suhe tvari

Suha tvar u uzorcima utvrđena je sušenjem 100 g svježeg tvari uzorka u sušioniku, na 75°C kroz 24 sata, zatim dodatna 3 sata na temperaturi od 105°C do konstantne mase (Thompson, 2001.). Udio ukupne suhe tvari u uzorku izračunata je prema jednadžbi:

$$\text{Ukupna suha tvar (\%)} = [\text{neto suha tvar (g)} \div \text{neto svježi uzorak (g)}] \times 100$$

3.4. Određivanje sadržaja pepela i organske tvari

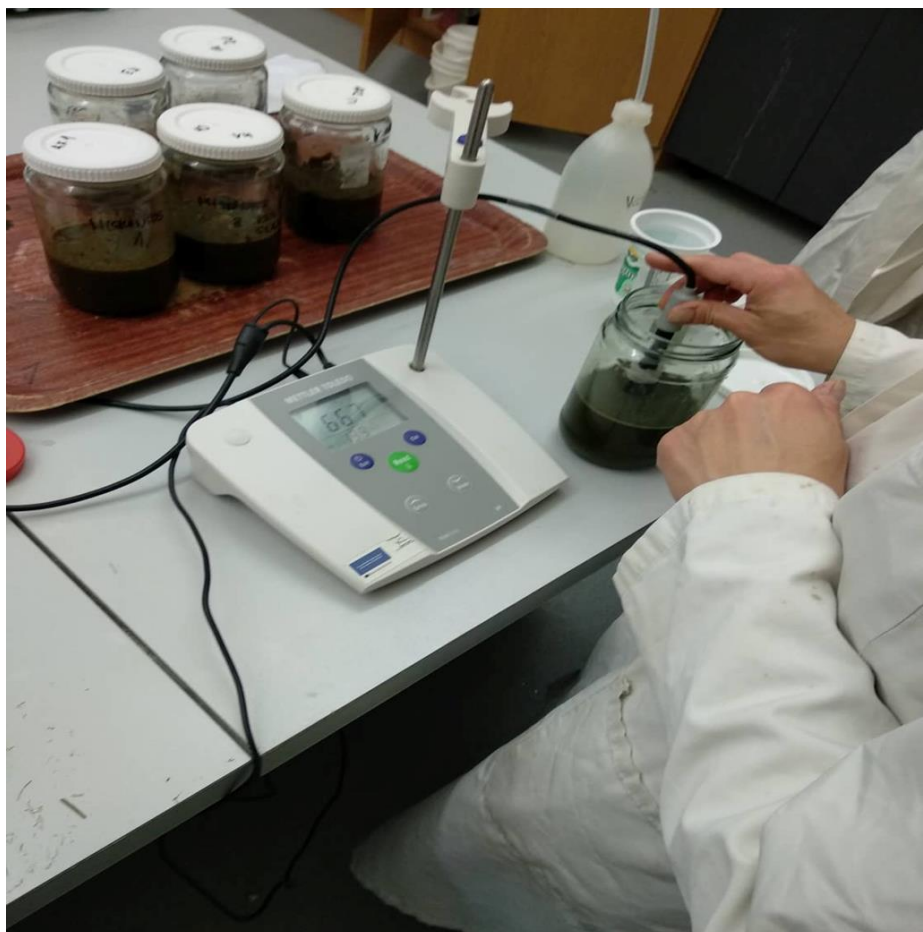
Ukupan sadržaj pepela i organske tvari određen je žarenjem na 550°C tijekom 3-4 sata (Thompson, 2001.) u peći za žarenje, a korišteni su uzorci suhe tvari nakon sušenja na 75°C i sljedeće formule:

$$\text{pepeo (\%)} = [\text{neto masa pepela nakon 550°C (g)} \div \text{neto suhi uzorak (g)}] \times 100$$

$$\text{organska tvar} = [1 - \text{neto pepela nakon 550°C (g)} \div \text{neto suhi uzorak (g)}] \times 100$$

3.5. Određivanje pH

Određivanje pH vrijednosti u uzorcima obavljeno je pH metrom Mettler Toledo FiveEasy.



Slika 11. Ispitivanje koncentracije pH

Izvor: Josip Rukavina

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

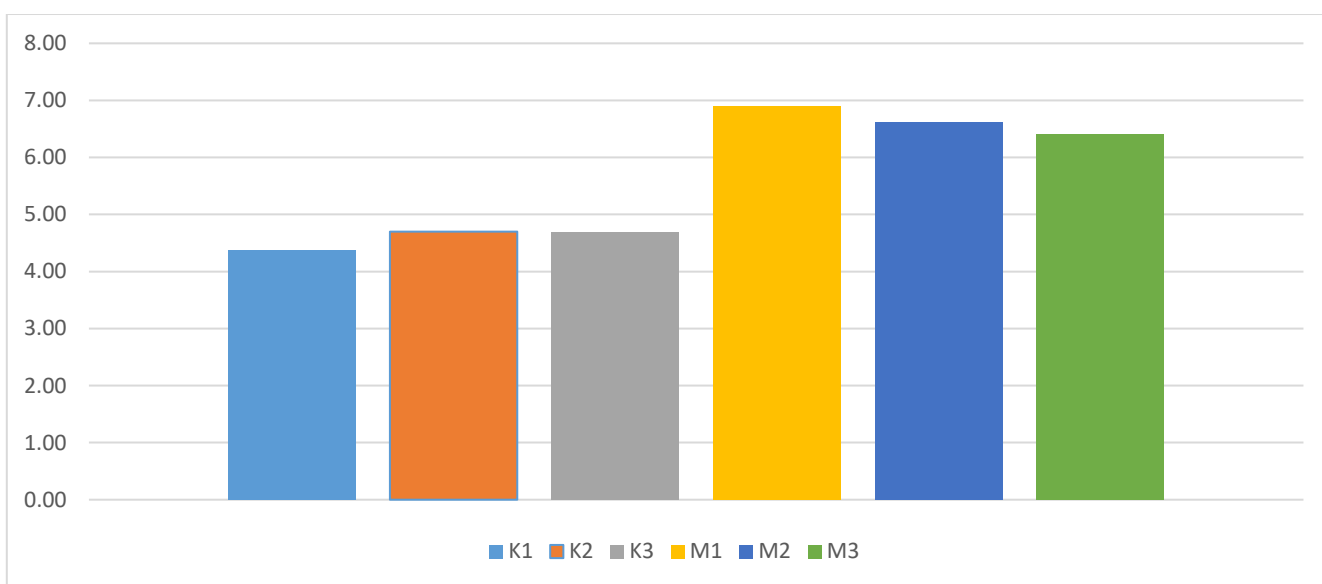
Uzorci su uzeti 20.07. u fazi porasta *Miscanthusa*. Prebrojavanjem se dobio podatak od 75 biljaka po m², što daje 750 tisuća biljaka na 1 ha. Prosječna visina je 3m. Prosječna masa biljke iznosi 164,5 g što daje prinos od 123,38 t ha⁻¹ svježe tvari. Udio suhe tvari iznosi 43 %, što znači da jedna biljka sadrži 72,08 g suhe tvari, od čega je organska suha tvar 69,395 g. Količina prinosa *Miscanthusa* u suhoj tvari iznosi 54,06 tST ha⁻¹, a u organskoj suhoj tvari 52,05 tSOT ha⁻¹.

Količina bioplina koja se dobila u uzorcima s *Miscanthusom* iznosila je 18017,69 m³/ha, odnosno 146,04 m³/t. Iznos bioplina u suhoj tvari je 7895,35 m³ST ha⁻¹, a u organskoj suhoj

tvary 7600,85 m³SOT ha⁻¹. Prosječna količina metana kod *Miscanthusa* iznosi 51,67 %, što daje iznos od 4079,53 m³ST ha⁻¹, a organske suhe tvary 3927,36 m³ SOT ha⁻¹.

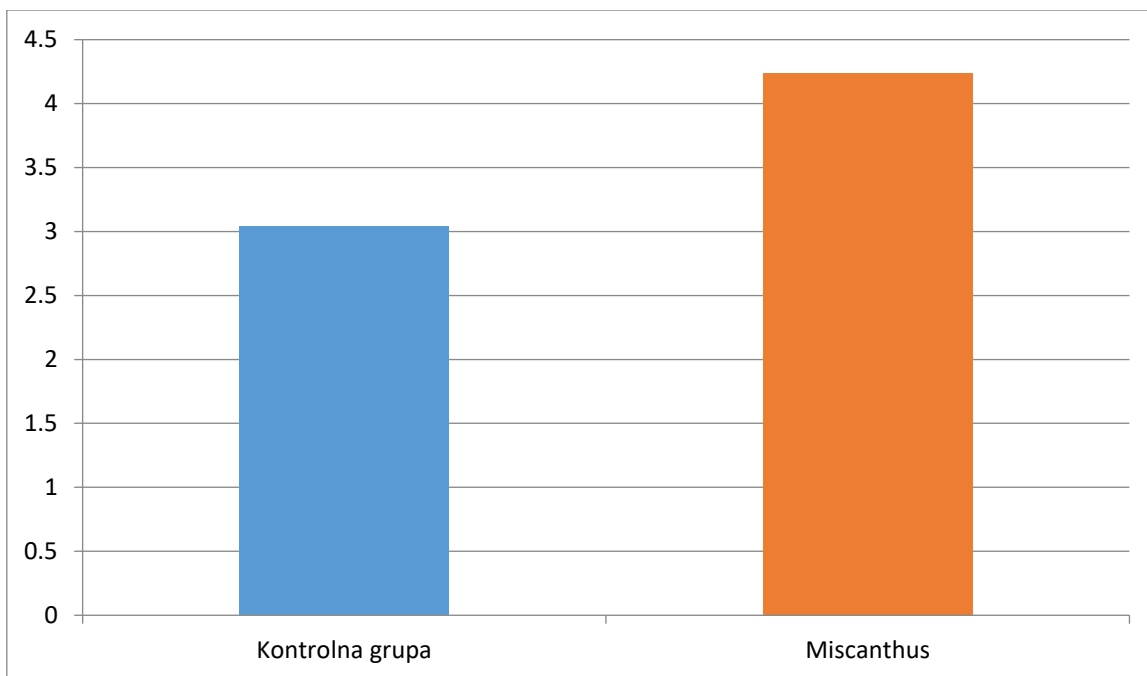
Goveđa gnojovka ima nisku koncentraciju suhe tvary. Dodavanjem *Miscanthusa* u gnojovku mijenja se udio suhe tvary. U eksperimentalni uzorak dodano je 5 % *Miscanthusa*. Zbog toga su očekivane razlike u udjelu suhe tvary između kontrolne i eksperimentalne grupe.

Najveći udio suhe tvary u *Miscanthusu* koji je dodavan gnojovci iznosio je 6,90 %, a prosječna vrijednost suhe tvary u *Miscanthusu* iznosila je 6,64 %. Prosjek postotka suhe tvary u kontrolnim uzorcima K1, K2 i K3 je 4,59 %.

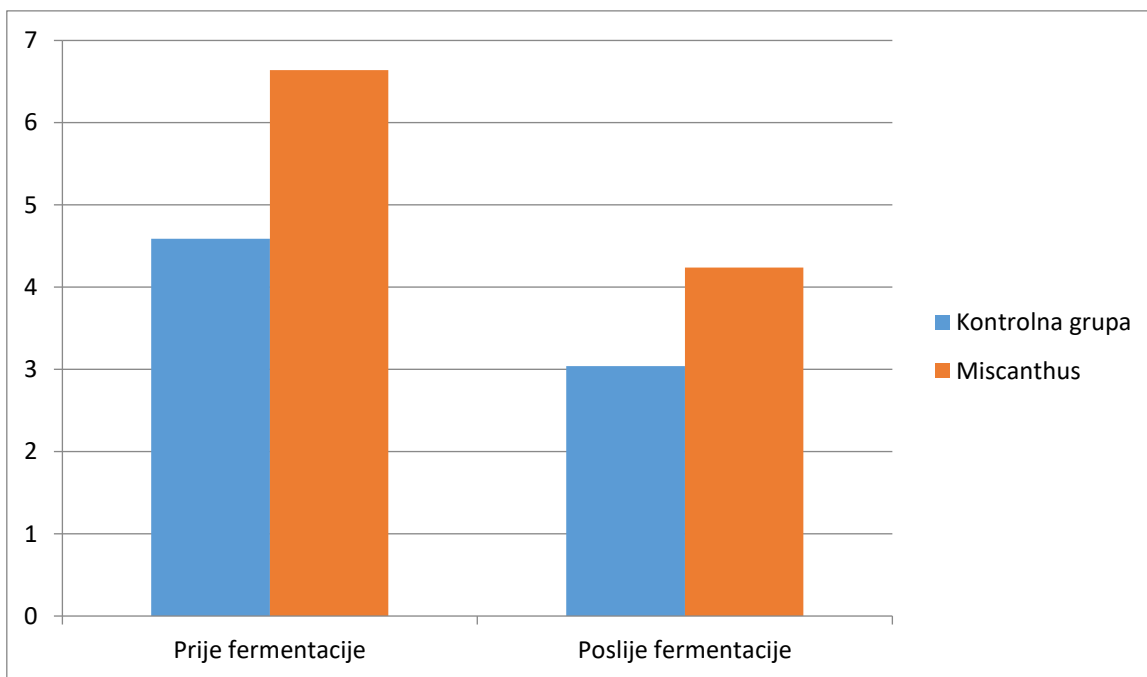


Grafikon 1. Udio suhe tvary u supstratima prije istraživanja

Prosječan postotak suhe tvary nakon fermentacije smanjio se u kontrolnim grupama K1, K2 i K3 na 3,04 %, a u grupama s *Miscanthusom* iznosio je 4,24 %, (grafikon 2.).



Grafikon 2. Udio suhe tvari nakon fermentacije



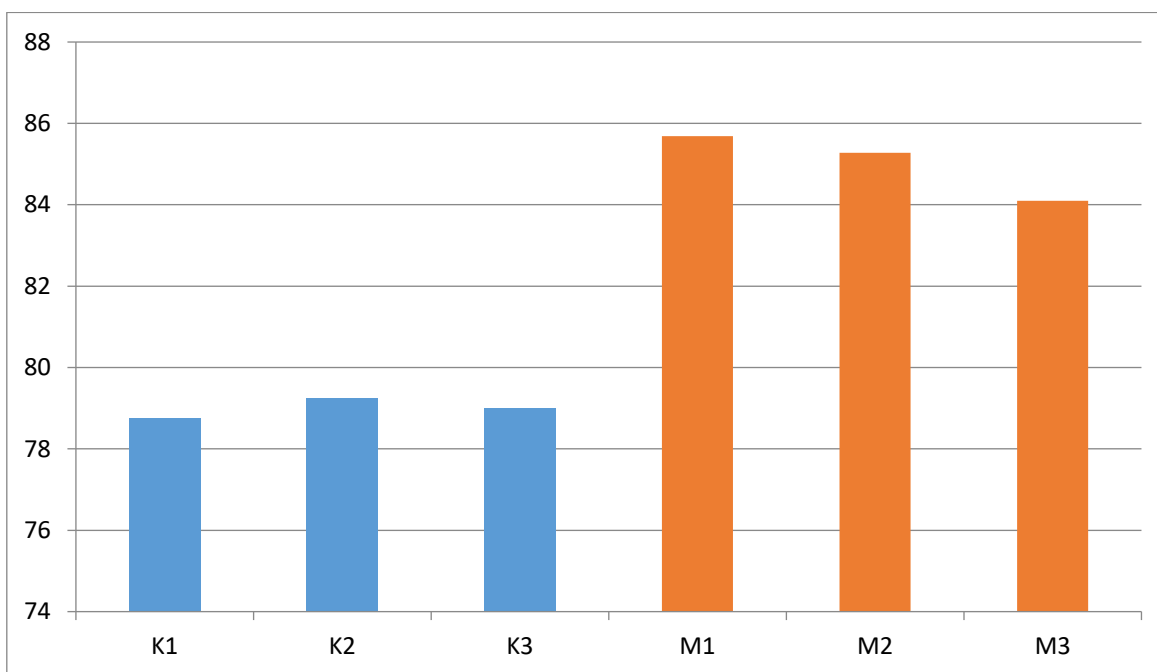
Grafikon 3. Usporedba prosječne vrijednosti suhe tvari prije i nakon fermentacije

Prosječna vrijednost suhe tvari u kontrolnoj grupi prije fermentacije iznosila je 4,59 %, a nakon fermentacije vrijednost je iznosila 3,04 %, odnosno smanjila se za 33,77 %. Prosječna

vrijednost suhe tvari u grupi s *Miscanthusom* iznosila je 6,64 %, a nakon fermentacije iznosila je 4,24 %, odnosno gledajući odnos prije i poslije fermentacije smanjila se za 36,15 % (grafikon 3.).

Količina suhe tvari je bitan parametar u proizvodnji bioplina. Organska tvar u silaži i gnojovci je osnovni izvor koji mikroorganizmi koriste za proizvodnju bioplina tj. metana. Sa većom količinom organske tvari očekuje se i veća proizvodnja bioplina.

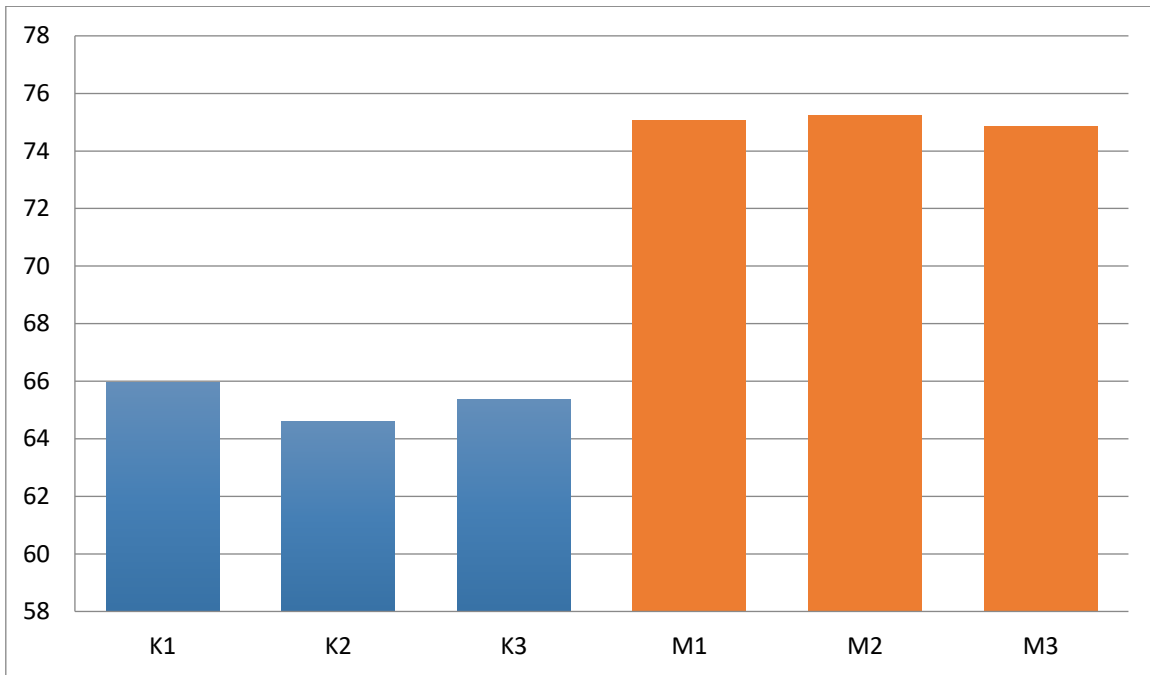
Najveća količina organske tvari prije fermentacije zabilježena je kod smjese M1, a iznosila je 85,69 %. Prosječna organska tvar u kontrolnim grupama K1, K2 i K3 iznosila je 79 %, a u grupama s *Miscanthusom* 85,02 % (grafikon 3.)



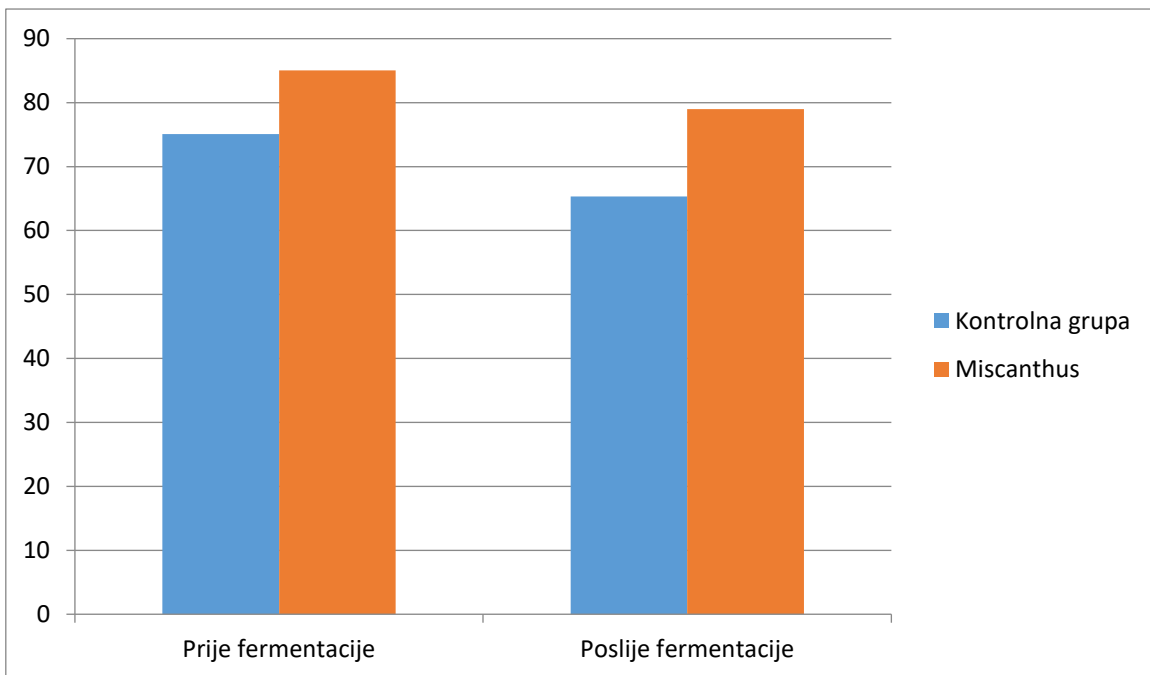
Grafikon 4. Udio organske tvari u supstratima prije fermentacije

Prosječan postotak organske tvari nakon fermentacije smanjio se u kontrolnim grupama K1, K2 i K3 na 65,31 %, a u grupama s *Miscanthusom* na 75,07 % (grafikon 4.)

Od kontrolnih grupa najveći udio organske tvari nakon fermentacije zabilježen je kod K1 a iznosio je 65,95 %. Kod grupa s *Miscanthusom* najveći udio organske tvari nakon fermentacije zabilježen je kod M2 a iznosio je 75,26 %.



Grafikon 5. Udio organske tvari u supstratima nakon fermentacije



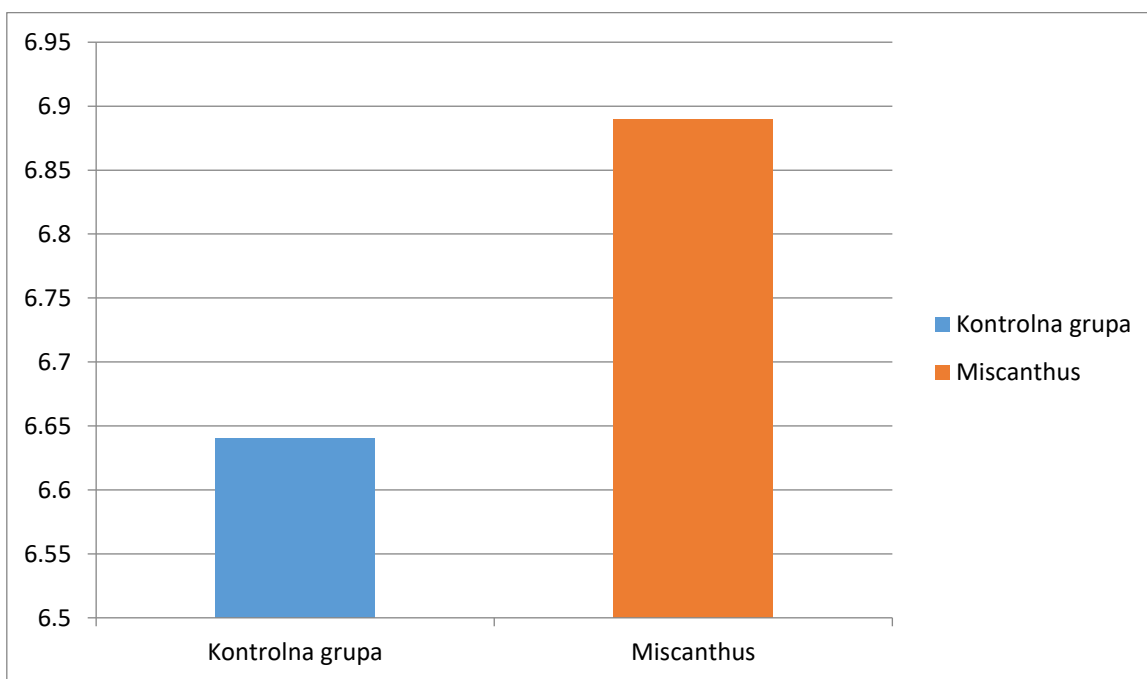
Grafikon 6. Usporedba prosječne vrijednosti organske tvari prije i nakon fermentacije

Prosječna vrijednost organske tvari u kontrolnoj grupi K prije fermentacije iznosila je 75,07 %, a nakon fermentacije vrijednost je iznosila 65,31 %, odnosno došlo je do smanjenja od 13 %. Prosječna vrijednost u grupi s *Miscanthusom* prije fermentacije iznosila je 85,03 %, a nakon fermentacije vrijednost je iznosila 79 %, odnosno gledajući odnos prije i nakon fermentacije smanjila se za 7,1 %.

7.1. Koncentracija pH

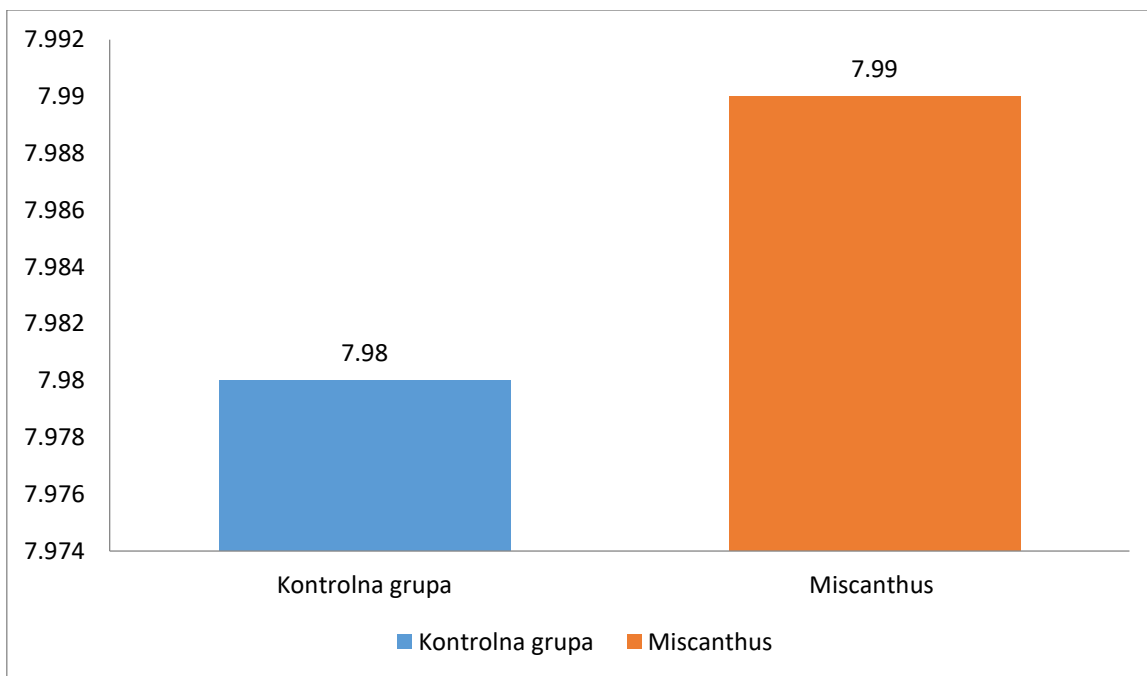
Proces metanogeneze se razvija pri vrijednost pH od 6,6 do 7,6. Tijekom procesa anaerobne fermentacije pH nije stalan nego se mijenja u granicama od 5,5 do 8,2.

U kontrolnom uzorku K prije fermentacije pH vrijednost je 6,64, a kod *Miscanthusa* iznosi 6,89 (grafikon 7.).



Grafikon 7. Visina koncentracije pH u uzorcima prije fermentacije

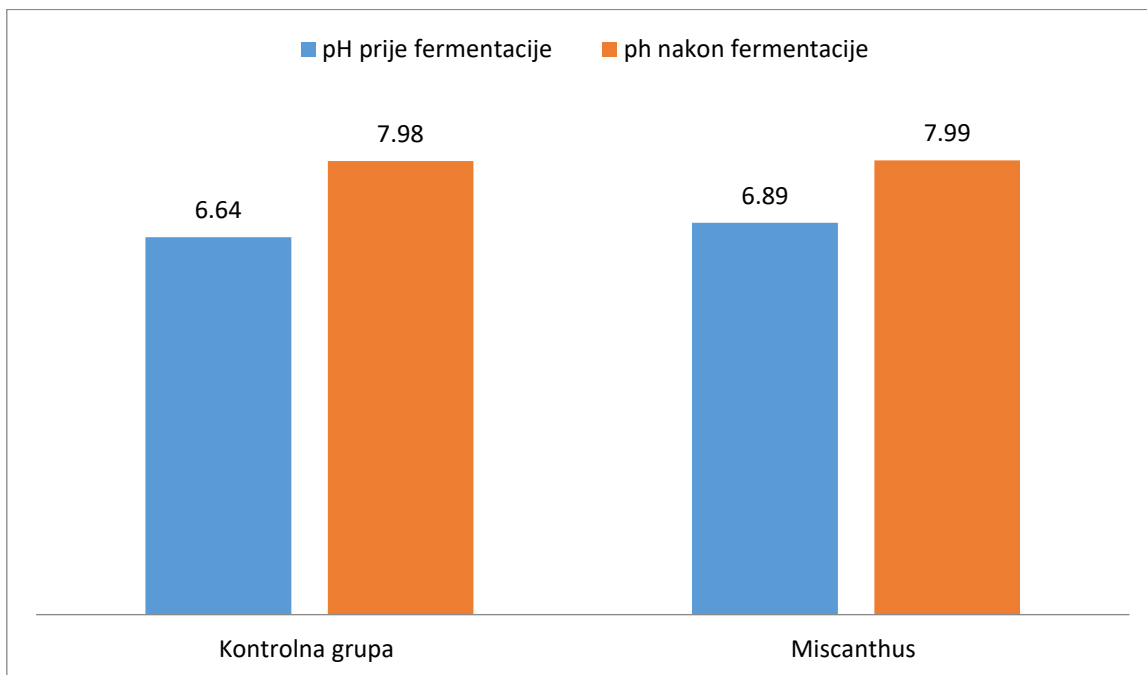
Prosječna pH vrijednost nakon fermentacije povećala se i u kontrolnoj i u kontrolnoj grupi K i u grupi s *Miscanthusom* (A) (grafikon 8.). Najbolji uvjeti za proces metanogeneze su kada je pH neutralan ili blago bazičan.



Grafikon 8. Visina koncentracije pH u uzorcima nakon fermentacije

Prosječna pH vrijednost u kontrolnoj grupi K prije fermentacije iznosila je 6,64 a nakon fermentacije pH vrijednost se povećala na 7,98 odnosno došlo je do povećanja za 20,18 %.

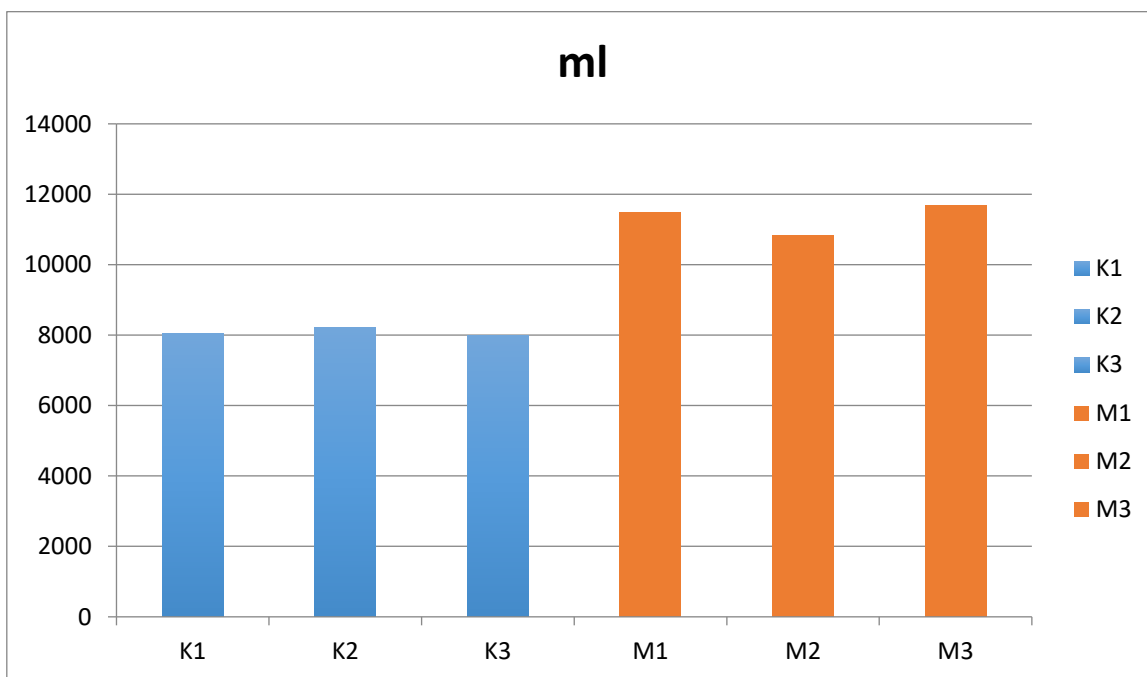
Prosječna vrijednost u grupa s *Miscanthusom* prije fermentacije iznosila je 6,89 a nakon fermentacije iznosila je 7,99, odnosno došlo je do povećanja od 15,96 %.



Grafikon 9. Usporedba prosječne vrijednosti pH

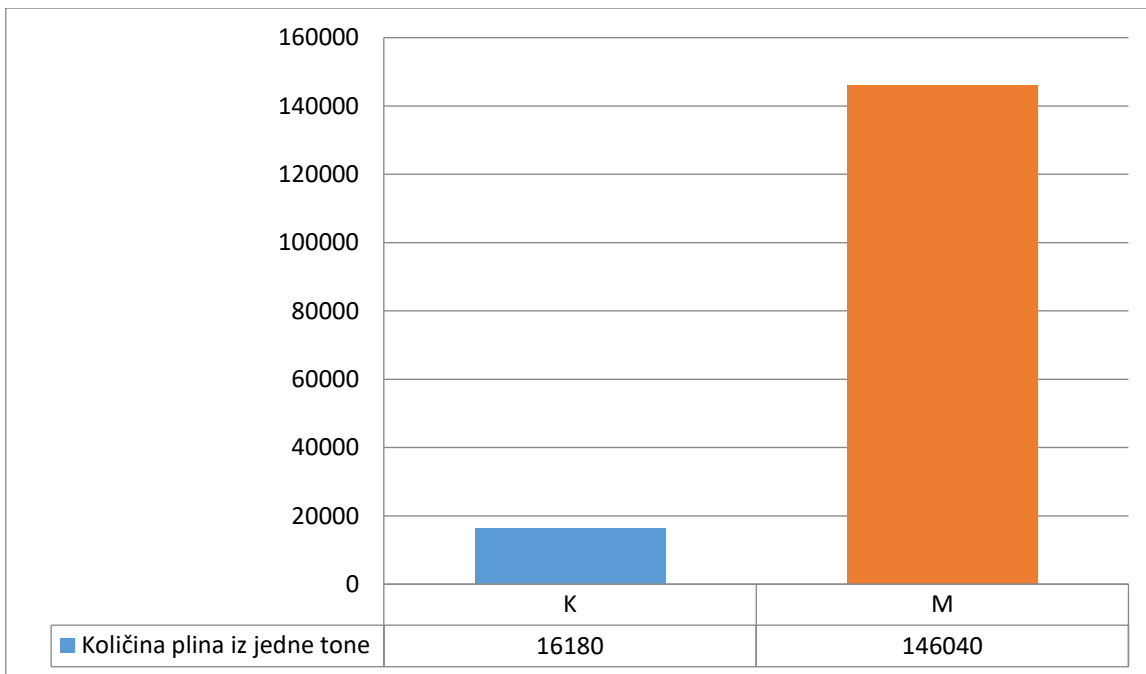
7.2. Količina proizvedenog plina

Ukupna količina proizvedenog bioplina proizvedena tijekom retencijskog vremena od 35 dana iz 500 ml supstrata prikazana je u grafikonu 10.

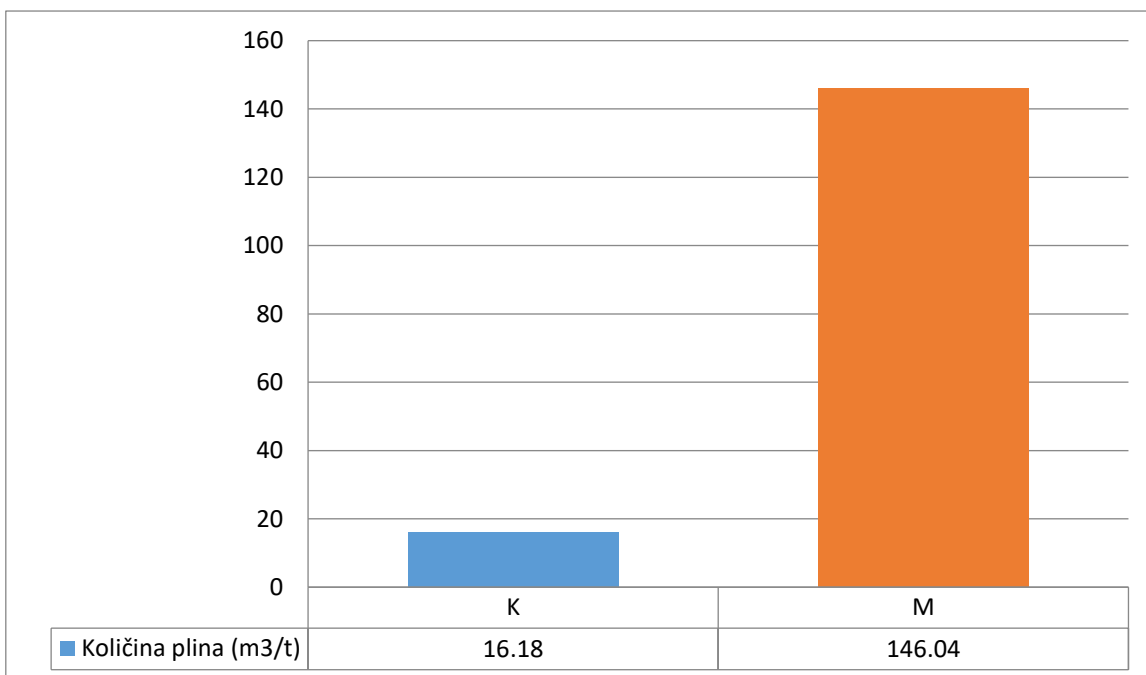


Grafikon 10. Ukupna količina proizvedenog plina

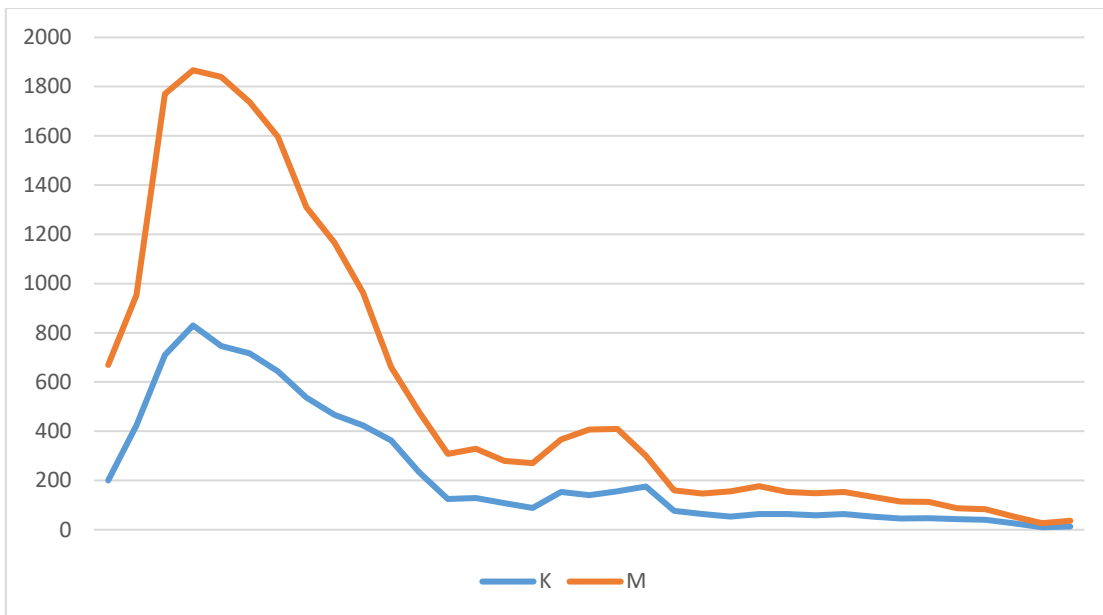
Prosječna vrijednost u kontrolnim grupama K1, K2 i K3 iznosi 8088,33 ml/500 ml, a u grupama s *Miscanthusom* M1, M2 i M3 iznosi 11335 ml/500 ml.



Grafikon 11. Količina plina iz jedne tone supstrata (l t⁻¹)

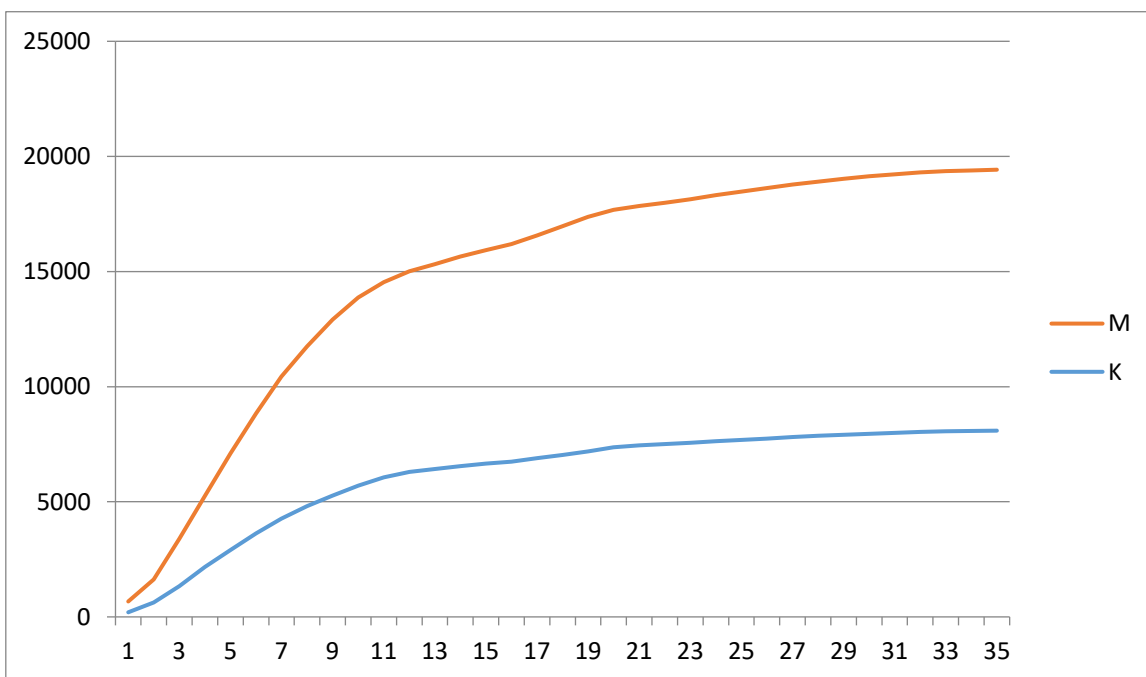


Grafikon 12. Količina plina iz jedne tone supstrata (m³t⁻¹)



Grafikon 13. Dinamika proizvodnje bioplina

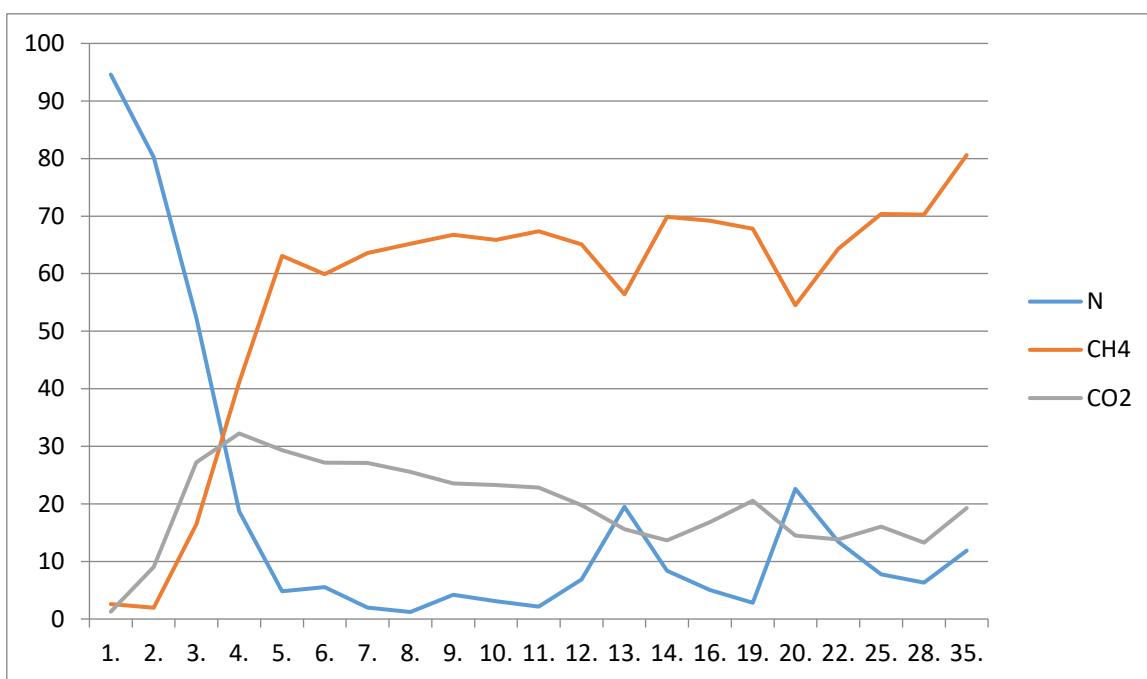
Dinamika proizvodnje plina slična je i kod kontrolne i kod grupe s *Miscanthusom*. Najveći intenzitet je u prvih 5 dana kada naglo pada te se još samo malo povećava oko dvadesetog dana i nakon tog opadanje je u kontinuitetu do kraja retencijskog razdoblja.



Grafikon 14. Kumulativni prikaz količine plina

7.3. Sastav bioplina

Sastav bioplina se mijenja tijekom pojedinih faza razgradnje organske mase. Kretanje pojedinih sastojaka bioplina su ovisna o vremenskom periodu. U sljedećim grafikonima prikazana su kretanja koncentracija dušika, metana i ugljičnog dioksida. Količina dušika ima negativan utjecaj na tijek metanogeneze, tj, dušik ima inhibitorski učinak na proces metanogeneze.

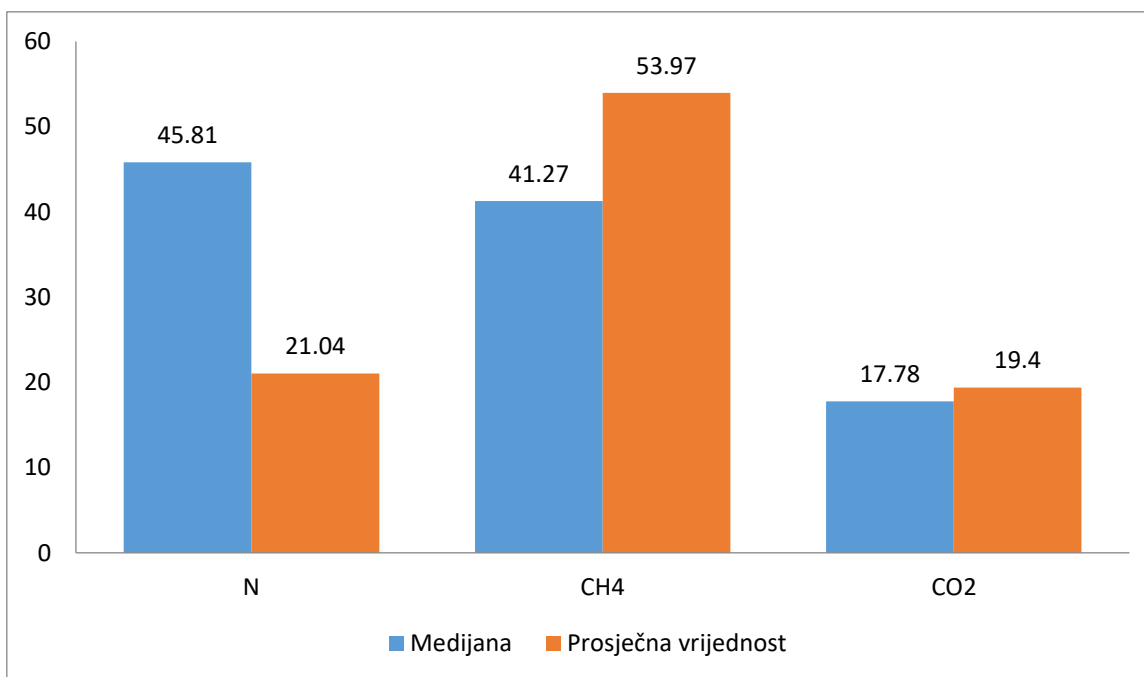


Grafikon 15. Koncentracija dušika, metana i ugljičnog dioksida u kontrolnoj grupi

Koncentracija dušika najveća je u prva dva dana nakon čega značajnije pada do petog dana, te je idućih dana količina stabilnija a malo veći porast se još događa u trinaestom i dvadesetom danu. Na kraju retencijskog razdoblja količina dušika iznosila je 10-12 %.

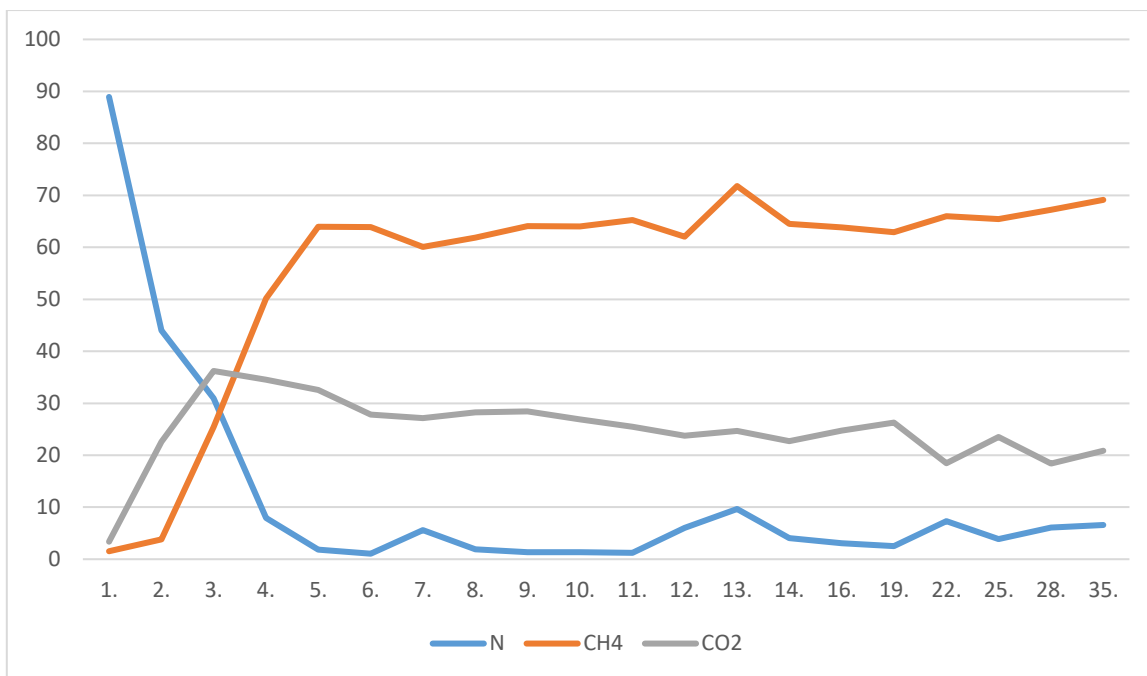
Razina metana na početku je minimalna nakon čega slijedi veliki rast do petog dana kada iznosi više od 60 %. Do petnaestog dana razina je stabilna nakon koga slijedi period s velikim oscilacijama do 29. dana. Na kraju retencijskog razdoblja razina iznosi malo više od 80 %.

Koncentracija ugljičnog dioksida prvog dana iznosi 2-3 % a najveća je iznosila u četvrtom danu kada je bila preko 30 %. Nakon toga konstantno pada do 15. dana a nakon toga počinju oscilacije koje traju do 29. dana. Na kraju retencijskog razdoblja koncentracija iznosi 20 %.



Grafikon 16. Vrijednost medijana i prosječna vrijednost dušika, metana i ugljičnog dioksida u kontrolnoj grupi

Medijan (Med ili centralna vrijednost) predstavlja vrijednost središnjeg rezultata kad su rezultati poredani po veličini. Izračunavanjem vrijednosti medijana u kontrolnoj grupi K, dušik se nalazi u koncentraciji od 45,81 %, metan od 41,27 % a ugljični dioksid od 17,78 %. Izračunavanjem prosječne vrijednosti u kontrolnoj grupi K, prosječna vrijednost dušika je 21,04 %, metana 53,97 % a ugljičnog dioksida 19,4 %.

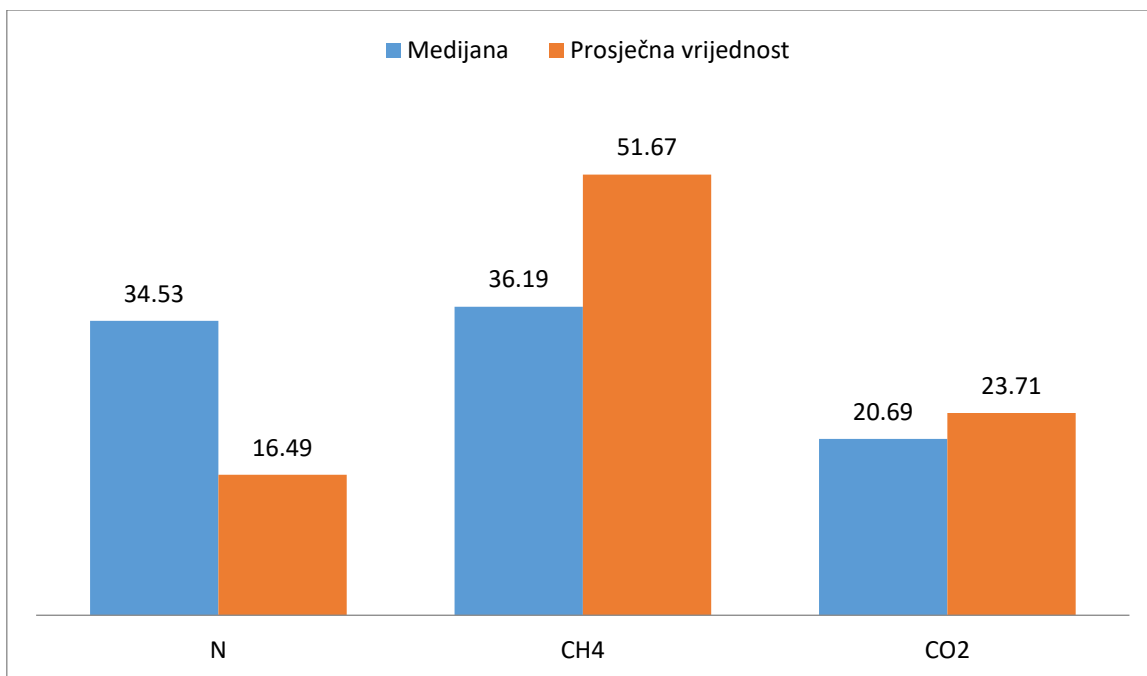


Grafikon 17. Koncentracija dušika, metana i ugljičnog dioksida u eksperimentalnoj grupi

Koncentracija dušika najveća je u prvom danu kada iznosi 88,93 % nakon čega značajnije pada do šestog dana, te u sedmom danu raste na 5,61 % idućih dana količina je stabilnija a malo veći porast se još događa u 13. i 22. danu. Na kraju retencijskog razdoblja količina dušika iznosila je 6,59 %.

Razina metana na početku je minimalna nakon čega slijedi veliki rast do petog dana kada iznosi više od 60 %. U 13. danu dostiže svoj maksimum od 71,79 %. Na kraju retencijskog razdoblja razina iznosi 69,13 %.

Koncentracija ugljičnog dioksida prvog dana iznosi 1,5-3,5 % a najveća je iznosila u četvrtom danu kada je bila preko 36 %. Nakon toga konstantno pada do 15. dana a nakon toga počinju oscilacije koje traju do 29. dana. Na kraju retencijskog razdoblja koncentracija iznosi 20,87 %.



Grafikon 18. Vrijednost medijana i prosječna vrijednost dušika, metana i ugljičnog dioksida u eksperimentalnoj grupi

Izračunavanjem vrijednosti medijana u grupama s *Miscanthusom*, dušik se nalazi u koncentraciji od 34,53 %, metan od 36,19 % a ugljični dioksid od 20,69 %. Izračunavanjem prosječne vrijednosti, dušik je iznosio 16,49 %, metan 51,67 % a ugljični dioksid 23,71 %.

5. RASPRAVA

Za proizvodnju bioplina najčešće korištene sirovine su gnojovka i stajski gnoj koji mogu biti različitog porijekla, zatim ostaci iz prehrambene i poljoprivredne industrije, te energetske usjevi. U ovom je istraživanju korišten *Miscanthus* kao sirovina za proizvodnju bioplina. Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti *Miscanthus* ima velik potencijal za proizvodnju bioplina. Količina proizvedenog bioplina ovisi o udjelu suhe tvari i organske tvari u biomasi koja se koristi za proizvodnju. Proizvodnja i energetska vrijednost bioplina bit će veća ukoliko je postotak suhe i organske tvari veći.

Rezultati dobiveni u ovom istraživanju pokazuju da je udio suhe tvari u *Miscanthusu* veći nego u kontrolnim uzorcima s gnojovkom. Usporedbom dobivenih podataka vrijednosti

organske tvari u suhoj tvari prije i nakon fermentacije vidljivo je da je eksperimentalna grupa s *Miscanthusom* imala veći sadržaj organske tvari od kontrolne grupe. Veći postotak smanjenja prosječnog udjela organske tvari poslije fermentacije se dogodio u kontrolnoj grupi (K) i iznosio je 13 % u odnosu na eksperimentalnu grupu (M) gdje je iznosio 7,1 %. Djelovanje metanogenih mikroorganizama koji koriste organsku tvar kao energetski izvor za proizvodnju bioplina ima za posljedicu smanjenje organske tvari. Povećanje udjela organske tvari i masti u suhoj tvari djeluje na povećanje postotka metana u sastavu bioplina (Majkovčan i sur., 2010.).

Uz organsku i suhu tvar, pH je vrlo važan čimbenik u odvijanju anaerobne fermentacije. Acidogeneza se najbolje odvija ako je iznos pH između 5,5 i 6,5, dok su najbolji uvjeti za odvijanje metanogeneze ako je pH 7,8-8,2, dakle ako je pH neutralan ili blago bazičan. Ako vrijednost padne ispod 6,5 udio CO₂ se diže u plinu, aktivnost metanogenih bakterija se zaustavlja i udio metana u plinu opada. Ako je pH iznad 8 dolazi do pretvorbe amonijačnog iona u amonijak koji inhibira metanogene mikroorganizme (Bohutskyi i Bouwer, 2013.). pH vrijednost supstrata utječe na rast i razvoj metanogenih mikroorganizama. pH vrijednost je funkcija bikarbonatskog alkaliteta, parcijalnog pritiska CO₂ i koncentracije hlapljive masne kiseline (HMK). U provedenom eksperimentu pH vrijednosti prije fermentacije su iznosile i u kontrolnoj grupi (K) i u eksperimentalnoj grupi (M) manje od 7. Nakon fermentacije vrijednosti su se gotovo izjednačile, tako da su iznosile malo manje od 8, što znači da su u rasponu idealnih uvjeta za odvijanje anaerobne fermentacije. Ako vrijednost padne ispod 6,5 udio CO₂ se diže u plinu, aktivnost metanogenih bakterija se zaustavlja i udio metana u plinu opada.

U dinamici proizvodnje bioplina u razdoblju od 35 dana, najintenzivnije je razdoblje u prvih 5 dana, kada se postižu najveće količine plina, što govori o početku procesa metanogeneze. Tijekom cijelog retencijskog razdoblja zabilježena je veća proizvodnja plina kod eksperimentalne grupe (M) u odnosu na kontrolnu grupu (K).

U sastavu bioplina analiziran je udio dušika (N), ugljičnog dioksida (CO₂) te metana (CH₄). Koncentracija dušika i u kontrolnoj i u eksperimentalnoj grupi je vrlo visoka na početku retencijskog razdoblja. U kontrolnoj grupi najnižu razinu postiže u osmom danu, a nakon toga

se najveći porast događa u 13. i 20. danu, kada dostiže 20 %. Nakon početne visoke razine koncentracija dušika u eksperimentalnoj grupi u šestom danu pada do minimalne razine i do kraja retencijskog razdoblja koncentracija iznosi manje od 10 %. Obrnuti proces se događao kod metana, pa je tako koncentracija metana vrlo niska u početnim danima, a počela se povećavati kada je dušik počeo padati. Nakon petog dana u obje grupe razina metana dosegla je 60 %, a na kraju retencijskog razdoblja veća koncentracija je iznosila kod kontrolne grupe gdje je dosegla razinu iznad 80 % dok se kod eksperimentalne grupe na kraju zadržala ispod 70 %. Koncentracija CO₂ najveća je u prva tri dana kod kontrolne, odnosno u prva četiri dana kod eksperimentalne grupe, kada je iznosila malo iznad 30 %. Nakon toga je u blagom padu u obje grupe da bi na kraju retencijskog razdoblja iznosio oko 20 %.

Ukupna količina proizvedenog bioplina znatno se razlikovala između kontrolne (K) grupe i eksperimentalne (M). Veća količina bioplina je dobivena u grupama s *Miscanthusom*, a prosjek u grupama M1, M2 i M3 iznosio je 11335 ml/500 ml. Kod kontrolnih grupa prosjek je iznosio 8088,33 ml/500 ml.

Za usporedbu dobivenih rezultata u pokusu korišten je podatak o količini bioplina i sadržaju metana u kukuruznoj silaži (Al Seadi i sur., 2008.). Količina dobivenog bioplina iz *Miscanthusa* iznosi 1.8017,7 m³ ha⁻¹, a kod kukuruzne silaže 1.5150 m³ ha⁻¹, što je razlika od 2.867,7. Iako je prinos u svježoj tvari znatno veći kod *Miscanthusa* (123-75 t ha⁻¹) ukupna količina bioplina po jednoj toni veća je kod kukuruzne silaže i iznosi 202 m³t⁻¹ u odnosu na *Miscanthus* kod kojeg količina iznosi 146,04 m³t⁻¹. Metan je u kukuruznoj silaži zastupljen s 52% dok je u *Miscanthusu* 51,67%. Ukupna količina metana kod kukuruzne silaže iznosi 105,04 m³t⁻¹, dok je kod *Miscanthusa* manja i iznosi 75,46 m³t⁻¹.

6. ZAKLJUČAK

Svjetska industrija traži nove izvore energije. Sve je veća potreba za biljnim gorivom koje bi jednog zamijenilo fosilna goriva poput ugljena, nafte i zemnog plina. Energetska biljka mora ispunjavati nekoliko uvjeta: mora brzo rasti, ne isušivati previše tlo, i biti upotrebljiva u razne svrhe. Sve ove uvjete ispunjava *Miscanthus*, visoko energetska usjev porijeklom iz tropskih i suptropskih dijelova Azije i Afrike. Mnogi smatraju *Miscanthus* gorivom budućnosti. To je energetska kultura koja se može uspješno uzgajati i u Republici Hrvatskoj. Agrotehnički je slabo zahtjevan i može se uzgajati unutar svakog OPG-a. Energetski je vrlo vrijedna kultura i može zamijeniti 1 kg loživog ulja s 2,56 kg *Miscanthusa*. Prilikom izgaranja je CO₂ neutralno gorivo i sadrži mali postotni udio sumpora. U procesu skladištenja ne gubi svoja energetska svojstva. Ovim radom prikazana je mogućnost dobivanja bioplina iz *Miscanthusa*. Na proizvodnoj površini od 20 ha može se proizvesti oko 400 tona *Miscanthusa* s udjelom vlage do 10% što dovodi do 360 tona suhe tvari za biomasu. U radu je pokazano kako ima visok potencijal prinosa a za usporedbu se uzela kukuruzna silaža koja ima dobre karakteristike za proizvodnju bioplina. Iako su rezultati dobiveni u ovom istraživanju pokazali kako je potencijal za bioplin nešto niži kod *Miscanthusa* u odnosu na kukuruznu silažu, prinos je bioplina po hektaru veći kod *Miscanthusa*. Daljnim istraživanjima trebalo bi se utvrditi najoptimalnije vrijeme košnje *Miscanthusa* za proizvodnju bioplina a da ne ugrozi opstojnost biljke. Kako se ova kultura može uzgajati i na tlima nepogodnim za ratarsku kulturu ne mora se ulaziti u hranidbeni lanac niti iskorištavati zemljišta namijenjena proizvodnji stočne i ljudske hrane. Jedna od najvažniji stavki je ta da ovaj uzgoj nema nikakvih štetnih utjecaja za okoliš. Prvenstveno se radi o ekološkom uzgoju, jer značajnije bolesti i drugi neprijatelji nisu identificirani. To je vrlo bitno i za ekonomski aspekt, budući da je upotreba herbicida i pesticida vrlo mala, pa se samim tim smanjuju troškovi. Zbog velikih površina zapuštenog zemljišta u Hrvatskoj uzgoj ove kulture je vrlo poželjan, te bi se uzgojem *Miscanthusa* mogle zadovoljiti određene potrebe za bioplinom.

7. Popis literature

1. Al Seadi T., Rutz D., Prassl H., Kottner M., Finsterwalder T., Volk S., Janssen R. (2008.) Bioplin priručnik, Zagreb
2. Anderson E., Arundale R., Maughan M., Oladeinde A., Wycislo A., Voigt T., (2011.) Growth and agronomy of *Miscanthus x giganteus* for biomass production, *Biofuels*, 2:1, 71-87.
3. Bohutskyi P., Bouwer E. (2013.) Biogas production from algae and cyanobacteria through anaerobic digestion: A review, analysis and research needs. Springer science+ Business media, New York, USA. 873-975.
4. Brosse N., El Hage R., Sannigrahi P., Ragauskas A. (2010.) Dilute sulphuric acid and ethanol organosolv pretreatment of *Miscanthus x Giganteus*. *Cell. Chem. Technol.* 44 (2010) 71-78.
5. Dohleman F.G., Heaton E.A., Leakey A.D.B., Long S.P. (2009.) Does greater leaf-level photosynthesis explain the larger solar energy conversion efficiency of *Miscanthus* relative to switchgrass? *Plant, Cell & Environment* 32, 1525-1537.
6. Dražić G., Sekulić S., Milovanović J., Aleksić J., (2010.) Master plan plantaže energetskog useva *Miscanthus x giganteus*, *Energ. Ekon. Ekol.* 2 (2010.) 96-99.
7. Dželetović Ž., Dražić G., Blagojević S., Mihailović N., (2006.) Specifični agrotehnički uslovi gajenja miscantusa, *Polj. Teh.* 31.
8. Dželetović Ž., Mihailović N., Glamočlija Đ., Dražić G., (2009.) Odložena žetva *Miscanthus x giganteus*- uticaj na kvalitet i količinu obrazovane biomase, 13, 2, pp. 170-173.
9. Han M., Choi G.W., Kim Y., Koo B.C., (2011.) Bioethanol production by *Miscanthus* as a lignocellulosic biomass: Focus on high efficiency conversion to glucose and ethanol, *Bio Res.* 6.
10. Jones M.B., Walsh M. (2007.) *Miscanthus* for energy and fibre. James & James, London
11. Jorgensen U., Sander B., (1997.) Biomass requirements for power production: How to optimise the quality by agricultural management, *Biomass Bioenerg.* 12 145–147.
12. Kovačić Đ., (2017.) Razvoj procesa predobrade lignoceluloznih materijala toplinom i električnim poljem u svrhu primjene u proizvodnji bioplina anaerobnom kodigestijom s

goveđom gnojivkom. Doktorski rad. Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku i Institut Ruđer Bošković, Osijek

13. Kumar S., Singh S.P., Mishra I.M., Adhikari D.K. (2009.) Recent Advances in Production of Bioethanol from lignocellulosic Biomass, *Chemical & Engineering Technology*, 32, 4, 517-526.

14. Leth M., Kresten Jensen H.E., Lonsmann Iversen J.J. (2001.) Growth of *Hedera helix* L. container plants in compost substrates made with *Miscanthus ogiformis* Honda straw and various N-sources, *Comp. Sci. Util.* 12 206-214.

15. Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Scurlock J.M.O., Huisman W., (2000.) *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop, *Biomass Bioenerg.* 19 209–227.

16. Ligeró P., Villaverde J.J., de Vega A., (2010.) *Miscanthus x giganteus* as a source of biobased products through organosolv fractionation: A mini review, *Open Agric. J.* 4 102–110.

17. Majkovčan, I., Kralik, D., Kukić, S., Spajić, R., Lamza, S., Jovičić D. (2010) Utjecaj suhe tvari na sastav bioplina proizvedenog iz svinjske gnojovke. *Krmiva* 52: 15-20.

18. Matlaga D.P. i Davis A.S., (2013.) Minimizing invasive potential of *Miscanthus x giganteus* grown for bioenergy: identifying demographic thresholds for population growth and spread. *J Appl Ecol* 50:479-487.

19. Predojević, Z.J. (2010.) Postupci pripreme lignocelulozne sirovine za dobijanje bioetanola, *Hem. Ind.* 64, 283-293.

20. Sage R.F., Sage T.L., Kocacinar F., (2012.) Photorespiration and the evolution of C4 photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology* 63, 19-47.

21. Thompson W.H. (2001.) Test Methods for the Examination of Composting and Compost. The United States Composting Council Research and Education Foundation. The United States Department of Agriculture.

Web stranice:

1. <http://www.gov.uk> (pristupljeno: 12.03.2019.)
2. <http://www.energiepflanzen.com/rs/chinaschilf-miscanthus-sinensis-giganteus/> (pristupljeno: 12.03.2019.)
3. <http://www.miskantus.rs/index.php/miscanthusgiganteus4> (pristupljeno: 13.03.2019.)
4. <http://alternativa-za-vas.com/index.php/clanak/article/miskantus> (pristupljeno: 15.03.2019.)
5. <http://www.progresys.hr/pdf/miscanthus.pdf> (pristupljeno: 25.03.2019.)
6. http://slatina.hr/grad/images/stories/dokumenti/miscanthus_giganteus.pdf. (15.04.2019.)
7. <https://www.usda.gov/> (pristupljeno: 03.05.2019.)
8. <https://www.mingo.hr/> (pristupljeno: 03.05.2019.)

8. SAŽETAK

U radu je prikazana mogućnost dobivanja bioplina iz *Miscanthusa*, nove energetske biljke koja u Hrvatskoj nije dovoljno razvijena. Zbog sve veće potrebe za obnovljivim izvorima energije, potraga je za alternativnim izvorima a tu se *Miscanthus* može iskoristiti kao jedno od rješenja. U pokusu dobivanja bioplina korištene su dvije skupine uzoraka. U prvoj skupini je korištena samo goveđa gnojovka a drugoj smjesa goveđe gnojovke i *Miscanthusa*. Proizvodnja i energetska vrijednost bioplina bit će veća ukoliko je postotak suhe i organske tvari veći, a kod *Miscanthusa* se pokazao većim nego u kontrolnoj skupini s goveđom gnojovkom. Ukupna količina proizvedenog bioplina u eksperimentalnoj grupi je vrlo dobra. Zbog bogatstva prirodnim resursima Hrvatska ima potencijal za korištenje bioplinskih postrojenja, a ovaj rad je pokazao da se u tu svrhu može koristiti i *Miscanthus*.

Ključne riječi: *Miscanthus*, obnovljivi izvori energije, bioplin, bioplinska postrojenja, energetika

9. SUMMARY

The paper presents the possibility of obtaining biogas from *Miscanthus*, new energy plant which is underdeveloped in Croatia. Because of the growing need for renewable energy, the search is for alternative sources and *Miscanthus* used as one of the solutions. In the biogas test two groups were used. In the first group was used only beef manure, and in a second mixture of beef manure and *Miscanthus*. Production and energy value of biogas will be higher if the percentage of dry and organic matter is bigger, and *Miscanthus* showed more than the control group with beef manure. The total amount of biogas produced in the experimental group is very good. Because of the wealth of natural resources, Croatia has the potential to use biogas plant, and this work has shown that *Miscanthus* can also be used for this purpose.

Keywords: *Miscanthus*, renewable energy, biogas, biogas plant, energy

10. PRILOZI

Popis slika:

Redni broj	Naziv slike	Stranica
1.	Zasad <i>Miscanthusa</i>	8.
2.	Godišnji ciklus <i>Miscanthusa</i>	9.
3.	<i>Miscanthus</i> u srpnju, faza porasta	11.
4.	Vaganje	15.
5.	Samljeveni <i>Miscanthus</i>	16.
6.	Balirani <i>Miscanthus</i>	17.
7.	<i>Miscanthus</i> kao hrana za životinje	20.
8.	Glavni dijelovi bioplinskog postrojenja	26.
9.	Shematski prikaz provedbe anaerobne fermentacije	28.
10.	Provedba procesa anaerobne fermentacije	29.
11.	Ispitivanje koncentracije pH	31.

Popis tablica:

Redni broj	Naziv tablice	Stranica
1.	Podjela biomase	5.
2.	Sastav bioplina	21.

Popis grafikona:

Redni broj	Naziv grafikona	Stranica
1.	Udio suhe tvari u supstratima prije istraživanja	32.
2.	Udio suhe tvari nakon fermentacije	33.
3.	Usporedba prosječne	33.

	vrijednosti prije i nakon fermentacije	
4.	Udio organske tvari u supstratima prije fermentacije	35.
5.	Udio organske tvari u supstratima nakon fermentacije	36.
6.	Usporedba prosječne vrijednosti organske tvari prije i nakon fermentacije	36.
7.	Visina koncentracije pH u uzorcima prije fermentacije	37.
8.	Visina koncentracije pH u uzorcima nakon fermentacije	38.
9.	Usporedba prosječne vrijednosti pH	38.
10.	Ukupna količina proizvedenog bioplina	39.
11.	Količina proizvedenog bioplina (l/t)	40.
12.	Količina proizvedenog bioplina (m³/t)	40.
13.	Dinamika proizvodnje bioplina	41.
14.	Kumulativni prikaz količine bioplina	41.
15.	Koncentracija dušika, metana i ugljičnog dioksida u kontrolnoj grupi	42.
16.	Vrijednost medijana i prosječna vrijednost dušika,	43.

	metana i ugljičnog dioksida u kontrolnoj grupai	
17.	Koncentracija dušika, metana i ugljičnog dioksida u eksperimentalnoj grupi	44.
18.	Vrijednost medijana i prosječna vrijednost dušika, metana i ugljičnog dioksida u eksperimentalnoj grupi	45.

Mogućnost proizvodnje bioplina iz miskantusa (*Miscanthus x Giganteus*)

Josip Rukavina

Sažetak:

U radu je prikazana mogućnost dobivanja bioplina iz *Miscanthusa*, nove energetske biljke koja u Hrvatskoj nije dovoljno razvijena. Zbog sve veće potrebe za obnovljivim izvorima energije, potraga je za alternativnim izvorima a tu se *Miscanthus* može iskoristiti kao jedno od rješenja. U pokusu dobivanja bioplina korištene su dvije skupine uzoraka. U prvoj skupini je korištena samo goveđa gnojovka a drugoj smjesa goveđe gnojovke i *Miscanthusa*. Proizvodnja i energetska vrijednost bioplina bit će veća ukoliko je postotak suhe i organske tvari veći, a kod *Miscanthusa* se pokazao većim nego u kontrolnoj skupini s goveđom gnojovkom. Ukupna količina proizvedenog bioplina u eksperimentalnoj grupi je vrlo dobra. Zbog bogatstva prirodnim resursima Hrvatska ima potencijal za korištenje bioplinskih postrojenja, a ovaj rad je pokazao da se u tu svrhu može koristiti i *Miscanthus*.

Rad je izrađen pri: Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Mentor: prof.dr.sc. Davor Kralik

Broj stranica: 57

Broj slika: 11

Broj grafikona: 18

Broj tablica: 2

Broj literaturnih navoda: 37

Broj priloga: 3

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: *Miscanthus*, obnovljivi izvori energije, bioplin, bioplinska postrojenja, energetika

Datum obrane:

Stručno povjerenstvo za obranu:

1.Prof.dr.sc. Bojan Stipešević, predsjednik

2.Prof.dr.sc. Davor Kralik, mentor

3.Prof.dr.sc. Drago Kraljević, član

Rad je pohranjen u: Knjižnica Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku, Sveučilište u Osijeku, Vladimira Preloga 1, Osijek

BASIC DOCUMENTATION CARD
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek
University graduate Studies, Plant production

Graduate thesis

The possibility of producing biogas from miscanthus (*Miscanthus x Giganteus*)

Josip Rukavina

Summary:

The paper presents the possibility of obtaining biogas from *Miscanthus*, new energy plant which is underdeveloped in Croatia. Because of the growing need for renewable energy, the search is for alternative sources and *Miscanthus* used as one of the solutions. In the biogas test two groups were used. In the first group was used only beef manure, and in a second mixture of beef manure and *Miscanthus*. Production and energy value of biogas will be higher if the percentage of dry and organic matter is bigger, and *Miscanthus* showed more than the control group with beef manure. The total amount of biogas produced in the experimental group is very good. Because of the wealth of natural resources, Croatia has the potential to use biogas plant, and this work has shown that *Miscanthus* can also be used for this purpose.

Thesis performed at: Faculty of Agrobiotechnical Sciences in Osijek

Mentor: prof.dr.sc. Davor Kralik

Number of pages: 57

Number of figures: 11

Number of charts: 18

Number of tables: 2

Number of references: 37

Original in: Croatian

Keywords: *Miscanthus*, renewable energy, biogas, biogas plant, energy

Date of the thesis defense:

Reviewers:

1.Prof.dr.sc. Bojan Stipešević, predsjednik

2.Prof.dr.sc. Davor Kralik, mentor

3.Prof.dr.sc. Drago Kraljević, član

Thesis deposited at: Library, Faculty of agrobiotechnical sciences in Osijek, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Vladimira Preloga 1