



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Миодраг Вишковић

**УНАПРЕЂЕЊЕ МЕТОДА ЗА
УТВРЂИВАЊЕ УШТЕДЕ ЕМИСИЈА
ГАСОВА С ЕФЕКТОМ СТАКЛЕНЕ
БАШТЕ ПРИ КОРИШЋЕЊУ БИОГАСА
ИЗ КУКУРУЗОВИНЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2019.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Miodrag Višković

**UNAPREĐENJE METODA ZA
UTVRĐIVANJE UŠTEDE EMISIJA
GASOVA S EFEKTOM STAKLENE
BAŠTE PRI KORIŠĆENJU BIOGASA IZ
KUKURUZOVINE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2019.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	-
Идентификациони број, ИБР:	-
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Миодраг Вишковић, мастер
Ментор, МН:	др Ђорђе Ђатков ванредни професор
Наслов рада, НР:	Унапређење метода за утврђивање уштеде емисија гасова с ефектом стаклене баште при коришћењу биогаза из кукурузовине
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски/енглески
Земља публикација, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна Покрајина Војводина
Година, ГО:	2019.
Издавач, ИЗ:	ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	4/97/86/40/11/34/5
Научна област, НО:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Научна дисциплина, НД:	Инжењерство биосистема
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Биогаз, кукурузовина, гасови с ефектом стаклене баште, уштеда емисија, одрживост
УДК	-
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука Нови Сад
Важна напомена, ВН:	-
Извод, ИЗ:	Кукурузовина је жетвени остатак и потенцијални супстрат за производњу биогаза. Директивом 2018/2001 дефинисан је тзв. РЕД метод за обрачунавање уштеде емисија гасова с ефектом стаклене баште– ГХГ. Метод је примењив за силажу кукуруза и стањак као супстрат за производњу биогаза, али се на неадекватан начин обрачунавају емисије ГХГ за кукурузовину. Циљ је био да се предложе унапређења РЕД метода којима би се превазишли идентификовани проблеми, као и да се испита утицај примене унапређеног метода на оцену уштеде емисија ГХГ енергетског искоришћења биогаза из кукурузовине, тј. на оцену одрживости. Уштеде емисија ГХГ за све разматране случајеве примене РЕД метода у основној и унапређеној форми, имале су вредност нижу од постављеног критеријума од 70 %, тј. нису одрживи. Предложено је да се РЕД метод унапреди укидањем правила да се не обрачунавају емисије ГХГ пре убирања жетвених остатака и да је потребно да се наведе да је остатак ферментације ко-продукт производње и коришћења биогаза, као и да је примена алокације емисија ГХГ на биогаз и остатак ферментације обавезна у случају примене остатка ферментације на поља са којих нису убирани жетвени остаци.
Датум прихватања теме, ДП:	12.07.2018.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Милан Мартинов, редовни професор
	Члан: др Дејан Убавин, ванредни професор
	Члан: др Слободан Цветковић, научни сарадник
	Члан: др Немања Станисављевић, ванредни професор
	Члан, ментор: др Ђорђе Ђатков, ванредни професор

Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	-
Identification number, INO :	-
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Ph.D. Thesis
Author, AU :	Miodrag Višković, master
Mentor, MN :	Associate Professor Dr. Đorđe Đatkov
Title, TI :	Improvement of greenhouse gas emission savings evaluation method for biogas made from corn stover
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2019
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	4/97/86/40/11/34/5
Scientific field, SF :	Environmental engineering and occupational safety and health
Scientific discipline, SD :	Biosystem engineering
Subject/Key words, S/KW :	Biogas, corn stover, greenhouse gases, emission saving, sustainability
UC	-
Holding data, HD :	In the Library of the Faculty of Technical Sciences Novi Sad
Note, N :	-
Abstract, AB :	Corn stover is a crop residue and potential substrate for biogas production. Directive 2018/2001 defines so-called RED method for determination of greenhouse gas (GHG) emission savings. In the case of energy utilization of biogas produced from corn stover, savings are calculated in an inadequate manner. The objective was to suggest the improvements of the RED method in order to overcome the identified problems, as well as to investigate the impact of the application of the improved method on the evaluation of GHG emission savings, <i>i.e.</i> the sustainability evaluation. The results of the GHG emission savings, using the basic and the improved forms of RED method, show that all considered cases had a value lower than the set criterion of 70%, <i>i.e.</i> they are not sustainable. It was suggested to improve the RED method by abolishing the rule that GHG emissions prior to collection of crop residue are not accounted. Also, it should be noted that the digestate is a co-product of biogas production as well that the application of the GHG emissions allocation to biogas and the digestate is mandatory in the case when digestate is used on fields other than those used for substrate provision.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	12.07.2018.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Dr. Milan Martinov, Professor
Member:	Dr. Dejan Ubavin, Associate Professor
Member:	Dr. Slobodan Cvetkovic, Scientific associate
Member:	Dr. Nemanja Stanisavljevic, Associate Professor
Member, Mentor:	Dr. Djordje Djatkov, Associate Professor

Mentor's sign

ZAHVALNICA

Doktorska disertacija je realizovana u okviru projekta *Razvoj i unapređenje tehnologija za energetski efikasno korišćenje više formi poljoprivredne i šumske biomase na ekološki prihvatljiv način, uz mogućnost kogeneracije - III 42011* finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. Delovi disertacije realizovani su tokom učešća i uz finansijsku podršku na projektima *IPA project: Establishing the cross-border development of biogas industry via joint determination of biogas potentials, education, research and innovation* i *KEP Austria project: LCA – GHG emissions of RES production and utilization in Serbia*. Takođe, deo disertacije realizovan je tokom istraživačkog boravka na *Institutu za poljoprivrednu tehniku* iz Frajzinga u Nemačkoj finansiranog od strane *Nemačke službe za akademsku razmenu*, a ista služba zaslužna je za donaciju dela korišćene opreme. Ovim putem bih se zahvalio svim institucijama koje su finansirale pomenute projekte i koje su pored *Fakulteta tehničkih nauka, Departmana za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu*, na ovim projektima učestvovala.

Zahvaljujem se svom mentoru dr Đorđu Đatkovu na savetima, pomoći i strpljenju koji su doveli do realizacije disertacije. Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Milanu Martinovu koji je u meni prepoznao potencijal i kroz šansu da postanem deo njegovog tima omogućio da napredujem u svojoj profesionalnoj karijeri.

Zahvaljujem se svim ljudima koji su mi pomogli tokom izrade disertacije, kolegi Marku Golubu, prof. dr Milošu Tešiću, prof. dr Branislavu Veselinovu, dr Mathiasu Effenbergeru i dr Omaru Hijaziu, zatim prof. dr Andreasu Gronaeru i njegovom timu sa univerziteta *BOKU* u Beču i naravno svim ljudima sa *Departmana za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu* predvođenih dr Dejanom Ubavinom i prof. dr Goranom Vujićem.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, ocu Isidoru i majci Katalin što su me usmerili na pravi put i omogućili moje školovanje, a sestri Dragani na stalnoj podršci. Svojoj supruzi Biljani posvećujem ovu disertaciju koja svojim strpljenjem, podrškom i verom u mene omogućava da svaka prepreka bude prevaziđena.

REZIME

Kukuruzovina je žetveni ostatak i potencijalni supstrat za proizvodnju biogasa. Direktivom 208/2001 definisan je zvanični metod, tzv. RED metod, za obračunavanje ušteda emisija gasova s efektom staklene bašte (GHG). Njegovom primenom se na neadekvatan način obračunavaju emisije GHG za energetska iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine u formi biometana koji se ubrizgava u mrežu prirodnog gasa i za generisanje električne energije. Prvi problem predstavlja pravilo da se ne obračunavaju emisije GHG pre ubiranja žetvenih ostataka. Drugi je da u metodi nije precizno opisan pristup kako da se primeni alokacija emisija na biogas i ostatak fermentacije.

Cilj istraživanja bio je da se predlože unapređenja RED metoda kojima bi se prevazišli identifikovani problemi, kao i da se ispita uticaj primene unapređenog metoda na ocenu ušteda emisija GHG energetskog iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine.

Istraživanjem je eksperimentalno određen prinos i sastav biogasa iz kukuruzovine, kao i karakteristike ostatka fermentacije. Utvrđeno je da prinos metana iznosi $242 \text{ Nm}^3/\text{tSM}$ kukuruzovine, da je stepen razgradnje suve materije koji odgovara tom prinosu približno 66 %, i da stepen transformacije organskog u neorganski azot odgovara stepenu razgradnje. Dobijeni podaci iskorišćeni su da se definišu materijalni i energetski tokovi za životni ciklus iskorišćenja energije biogasa iz kukuruzovine. Pri tome su razmotreni različiti načini spremanja kukuruzovine i različite tehnološke opcije proizvodnje i korišćenja biogasa. Za primenu ostatka fermentacije, razmotrena je njegova primena na ista poljoprivredna polja sa kog je kukuruzovina ubirana i na druga. Pri tome je primenjena alokacija emisija, kao i pristupi da se azot sadržan u kukuruzovini i odnosi sa polja, nadoknađuje i ne nadoknađuje.

Vrednosti ukupnih emisija GHG iznosile su 63–138 $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$ generisanog biometana kada se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje, odnosno 50–115 $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$ ako se ostatak fermentacije primenjuje na drugo polje. Ukupne emisije kada se generiše električna energija iznosile su 24–72 i 22–63 $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$ električne energije, respektivno za primenu ostatka fermentacije na ista i druga polja.

Uštede emisija GHG za sve razmatrane slučajeve energetskog iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine, primenom RED metoda u osnovnoj i unapređenoj formi, imale su vrednost nižu od postavljenog kriterijuma od 70 %, tj. nisu održivi. Time je pokazano da se unapređenjem metoda, uz razmatranje različitih načina spremanja kukuruzovine i pristupa nadoknade azota, ne utiče na ocenu održivosti iskorišćenja energije biogasa iz kukuruzovine, već samo na vrednost uštede emisija GHG. Rezultati istraživanja primenjivi su i na druge vrste i forme žetvenih ostataka.

Predloženo je da se RED metod unapredi ukidanjem pravila da se ne obračunavaju emisije GHG pre ubiranja žetvenih ostataka. Zatim, potrebno je da se navede da je ostatak fermentacije ko-produkt proizvodnje i korišćenja biogasa, kao i da je primena alokacije emisija GHG na biogas i ostatak fermentacije obavezna u slučaju primene ostatka fermentacije na polja sa kojih nisu ubirani žetveni ostaci.

ABSTRACT

Corn stover is a crop residue and potential substrate for biogas production. By applying the official, so-called RED method, for determination of greenhouse gas (GHG) emission savings, in the case of energy utilization of biogas produced from corn stover, in the form of biomethane injected into the natural gas grid and electricity generation, savings are calculated in an inadequate manner. The first problem is the rule that GHG emissions prior to corn stover collection are not accounted. The other is that the method does not describe precisely the approach how to apply the allocation of emissions to biogas and digestate.

The objective of the research was to suggest the improvements of the RED method in order to overcome the identified problems, as well as to investigate the impact of the application of the improved method on the evaluation of GHG emission savings, *i.e.* the sustainability evaluation.

The yield and the composition of biogas from corn stover, as well as determination of the digestate properties were experimentally determined. The methane yield was 242 Nm³/tDM of corn stover, a corresponding degradation coefficient approximately 66%, and degree of transformation of the organic into inorganic nitrogen corresponds to the degree of degradation of the corn stover. The obtained data were used to define the material and energy balance of the life cycle of energy utilization of biogas from corn stover. Different pathways of corn stover procurement and various technological options in the production and use of biogas were considered. Regarding the application of the digestate, it has been considered that it is applied on the same field from which the corn stover was harvested or to the other field. Thereby, the emissions allocation was applied, as well as the approaches that the nitrogen contained in the collected corn stover is compensated and not.

The total GHG emission values were 63–138 gCO_{2eq}/MJ of generated biomethane if the digestate was applied to the same field and 50–115 gCO_{2eq}/MJ if the digestate is applied to other field. Total emissions when generating electricity amounted to 24–72 gCO_{2eq}/MJ and 22–63 gCO_{2eq}/MJ of electricity, respectively for the application of the digestate on the same or other fields.

The results of the GHG emission savings, using the basic and the improved forms of RED method, show that all considered cases had a value lower than the set criterion of 70%, *i.e.* they are not sustainable. It has been shown that by improving the method, considering the different ways of corn stover procurement and the principles of nitrogen compensation, it does not influence the evaluation of the sustainability, but only the GHG emissions values. Results of the research are applicable for other crop residues types and forms too.

It was suggested to improve the RED method by abolishing the rule that GHG emissions prior to collection of crop residue are not accounted. Also, it should be noted that the digestate is a co-product of biogas production as well that the application of the GHG emissions allocation to biogas and the digestate is mandatory in the case when digestate is used on fields other than those used for substrate provision.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Problem	6
1.2 Cilj istraživanja i hipoteze	12
2. MATERIJALI I METODI	14
2.1 Određivanje prinosa i sastava biogasa šaržnim eksperimentom	14
2.1.1 Materijal	14
2.1.2 Metod	15
2.1.3 Statistička obrada rezultata	18
2.2 Generisanje ostatka fermentacije kontinualnim eksperimentom i ispitivanje fizičko-hemijskih karakteristika	18
2.2.1 Materijal	18
2.2.2 Metod	18
2.2.3 Utvrđivanje sadržaja i forme azota	30
2.3 Utvrđivanje ušteta emisija GHG iskorišćenja biogasa	31
2.3.1 Pristup RED metoda	31
2.3.2 Definisane osnovnih i unapređenih slučajeva RED metoda	33
2.3.3 Ocenjivanje životnog ciklusa definisanih slučajeva	44
3. REZULTATI I DISKUSIJA	60
3.1 Prinos i sastav biogasa	60
3.2 Karakteristike ostatka fermentacije	65
3.2.1 Step razgradnje kukuruzovine	65
3.2.2 Sadržaj i forma azota u ostatku fermentacije	65
3.3 Vrednosti emisija GHG	68
3.3.1 Emisije GHG u fazi Ekstrakcija sirovina e_{ec} (spremanje kukuruzovine)	68
3.3.2 Emisije GHG u fazi Procesiranje e_p	75
3.3.3 Emisije GHG u fazi Ekstrakcija sirovina e_{ec} i Procesiranje e_p pri primeni alokacije	76
3.3.4 Emisije GHG u fazi Korišćenje e_u	77
3.3.5 Ukupne emisije GHG	77
3.4 Vrednosti ušteta emisija GHG	83
3.4.1 Slučajevi kada se ostatak ferm. primenjuje na ista polja (bez alokacije)	83
3.4.2 Slučajevi kada se ostatak ferm. primenjuje na druga polja (alokacija)	87
4. ZAKLJUČCI	90
LITERATURA	92
PRILOZI	98

SPISAK SLIKA

Slika 1 Delovi biljke kukuruza	2
Slika 2 Primer usitnjene kukuruzovine korišćene za eksperimentalne analize	14
Slika 3 a) Oprema za sprovođenje šaržne analize prinosa biogasa: 1 - inkubator, 2 - protokomer, 3 - gasni analiz., 4 - kese sa crevima. b) reaktori sa uzorcima u inkubatoru .	16
Slika 4 a) Postavka eksperimenta za kontinualnu anaerobnu fermentaciju: 1 - bojler, 2 - kontrolna jedinica, 3 - reaktor, 4 - mešač, 5 - tečnost za uklanjanje vlage, 6 - protokomer, 7 - kesa; b) automatski titrator za određivanje FOS-TAC-a	21
Slika 5 Izgled sadržaja fermentora za kontinualni eksperiment a) Pri započinjanju eksperimenta, b) Nakon završetka eksperimenta	30
Slika 6 Mehanizacija za postupak sakupljanja u dva prohoda: a) kombajn sa ugrađenom sitnilicom žetvenih ostataka kukuruzovine; b) heder za sečenje kukuruzovine i formiranje zboja u jednom proходу;c) presa za velike četvrtaste bale; d) presa za valjkaste bale.....	49
Slika 7 Sakupljanje kukuruzovine iz zboja i usitnjavanje silažnim kombajnom	50
Slika 8 Formiranje zboja a) trakastim grablj.; b) trakastim grabljama sa pikap uređajem ..	51
Slika 9 Skladištenje kukuruzovine u formi, a) velikih četvrtastih bala; b) valjkastih bala; c) usitnjena silirana kukuruzovina sa šećernom repom	53
Slika 10 Univerzalni manipulator – telehendler.....	54
Slika 11 a) Fermentori biogas postrojenja; b) Mehanička mešalica sa dugačkim vratilom	55

SPIŠAK GRAFIKA

Grafik 1 Potencijali OIE u Srbiji (Anonim, 2013)	1
Grafik 2 Uobičajene vrednosti uštede emisija GHG za biogas, sa naglašenim slučajevima korišćenja silaže kukuruza za proizvodnju biogasa (delimično prerađeno iz Giuntoli i dr, 2015)	7
Grafik 3 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz silaže kukuruza za generisanje električne energije – RED metod.....	9
Grafik 4 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – RED metod.....	10
Grafik 5 Kumulativna proizvodnja biogasa u fermentorima, prosečna kumulativna proizvodnja biogasa i kumulativna proizvodnja biogasa iz inokuluma	23
Grafik 6 Vrednosti produkcije biogasa u fermentorima	24
Grafik 7 Kretanje prosečne produkcije biogasa u odnosu na unos kukuruzovine u fermentore	24
Grafik 8 Prosečni udeo metana u proizvedenom biogasu	25
Grafik 9 Vrednosti prosečne produkcije biogasa i FOS-TAC u sva tri fermentora	27
Grafik 10 Prosečan tok mase suve materije poreklom od inokuluma i kukuruzovine u fermentorima	29
Grafik 11 Prosečan tok ukupne mase i prosečan udeo suve materije u fermentorima	29
Grafik 12 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – RED metod	38
Grafik 13 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – unapređen RED metod	39
Grafik 14 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – unapređen RED metod	40
Grafik 15 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – RED metod uz primenu alokacije.....	41
Grafik 16 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – RED metod uz primenu alokacije.....	42
Grafik 17 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – unapređen RED metod uz primenu alokacije.....	43
Grafik 18 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – unapređen RED metod uz primenu alokacije.....	44
Grafik 19 Prečišćavanje biogasa u zavisnosti od tehnologije energetskog korišćenja (FNR, 2016)	56
Grafik 20 <i>Box-plot</i> dijagrami za rezultate merenja prinosa biogasa i metana	62
Grafik 21 Q-Q plot dijagram utvrđenih vrednosti prinosa metana	63
Grafik 22 Kretanje mase azota poreklom iz kukuruzovine i inokuluma tokom trajanja eksperimenta	67
Grafik 23 Udeo emisija GHG pojedinačnih procesa u ukupnim, spremanje kukuruzovine u formi ČB.....	72
Grafik 24 Udeo emisija GHG pojedinačnih procesa u ukupnim, spremanje kukuruzovine u formi VB.....	73

Grafik 25 Udeo emisija GHG pojedinačnih procesa u ukupnim, spremanje kukuruzovine u formi silaže kukuruzovine	73
Grafik 26 Ukupne emisije GHG za sakupljanje kukuruzovine u dva i tri prohoda i više formi kukuruzovine	74
Grafik 27 Uticaj transportnog rastojanja na vrednost emisija GHG u fazi procesiranja.....	74
Grafik 28 Emisije GHG u fazi Procesiranja u slučaju otvorenog rezervoara za ostatak fermentacije.....	76
Grafik 29 Udeo emisija GHG pojedinačnih faza u ukupnim uobičajenim vrednostima, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja.....	79
Grafik 30 Uobičajene vrednosti emisija GHG po procesima, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja	80
Grafik 31 Udeo emisija GHG pojedinačnih faza u ukupnim uobičajenim vrednostima, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja	82
Grafik 32 Uobičajene vrednosti emisija GHG po procesima za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja	82
Grafik 33 Poređenje ušteta emisija GHG za slučajeve generisanja biometana pri istim tehnološkim opcijama i kada se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje sa kog je kukuruzovina ubirana	86
Grafik 34 Poređenje ušteta emisija GHG za slučajeve generisanja električne energije pri istim tehnološkim opcijama i kada se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje sa kog je kukuruzovina ubirana.....	86

SPISAK TABELA

Tabela 1 Navodi iz literature o vrednostima emisija GHG u životnom ciklusu energetskog iskorišćenja kukuruzovine.....	11
Tabela 2 Vrednosti fizičkih karakteristika kukuruzovine i inokuluma korišćenih za kontinualni eksperiment.....	18
Tabela 3 Ocena vrednosti za FOS, TAC, FOS-TAC i pH (Rosato, 2017).....	19
Tabela 4 Vrednosti hemijskih parametara tokom eksperimenta u fermentoru 1	25
Tabela 5 Vrednosti hemijskih parametara tokom eksperimenta u fermentoru 2	26
Tabela 6 Vrednosti hemijskih parametara tokom eksperimenta u fermentoru 3	26
Tabela 7 Vrednosti prinosa i sastava biogasa iz kukuruzovine tokom kontinualnog eksperimenta	28
Tabela 8 Pregled razmatranih slučajeva primene i unapređenja RED metoda za energetsko iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja sa kojih je ubirana kukuruzovina.....	35
Tabela 9 Pregled razmatranih slučajeva primene i unapređenja RED metoda za energetsko iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine kada se ostatak fermentacije primenjuje na drugo polje, primenjuje se alokacija.....	36
Tabela 10 Prosečni prinosi kukuruzovine za analizirane godine (Golub i dr, 2012; Martinov i dr, 2016)	47
Tabela 11 Usvojene vrednosti prinosa kukuruzovine	47
Tabela 12 Pregled navoda za elementarni sastav kukuruzovine.....	58
Tabela 13 Emisioni faktori za gubitke azota (Giuntoli i dr, 2015; IPCC, 2006a, 2006b).....	59
Tabela 14 Rezultati eksperimentalnih merenja prinosa biogasa i metana specificiranih po SM	60
Tabela 15 Rezultati eksperimentalnih merenja prinosa biogasa i metana specificiranih po OSM	61
Tabela 16 Elementi deskriptivne statistike za prinos biogasa.....	61
Tabela 17 Elementi deskriptivne statistike za prinos metana	62
Tabela 18 Rezultati <i>Shapiro-Wilk</i> testa normalnosti za prinos biogasa i metana.....	63
Tabela 19 Pregled literaturenih podataka za hemijski sastav kukuruzovine	64
Tabela 20 Pregled vrednosti prinosa biogasa i metana iz kukuruzovine	64
Tabela 21 Fizičko-hemijske karakteristike korišćene kukuruzovine i inokuluma.....	65
Tabela 22 Fizičko-hemijske karakteristike ostatka fermentacije iz fermentora 1	66
Tabela 23 Fizičko-hemijske karakteristike ostatka fermentacije iz fermentora 2	66
Tabela 24 Fizičko-hemijske karakteristike ostatka fermentacije iz fermentora 3	66
Tabela 25 Sadržaj suve materije i hraniva u ostatku fermentacije(Bachmaier i dr, 2011; Wendland i Lichti, 2012)	68
Tabela 26 Emisije GHG za spremanje kukuruzovine u $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{tSM}$, sakupljanje u dva prohoda	69
Tabela 27 Emisije GHG za spremanje kukuruzovine u $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{tSM}$, sakupljanje u tri prohoda	70
Tabela 28 GHG emisije pri nadoknadi hraniva primenom mineralnih hraniva	77

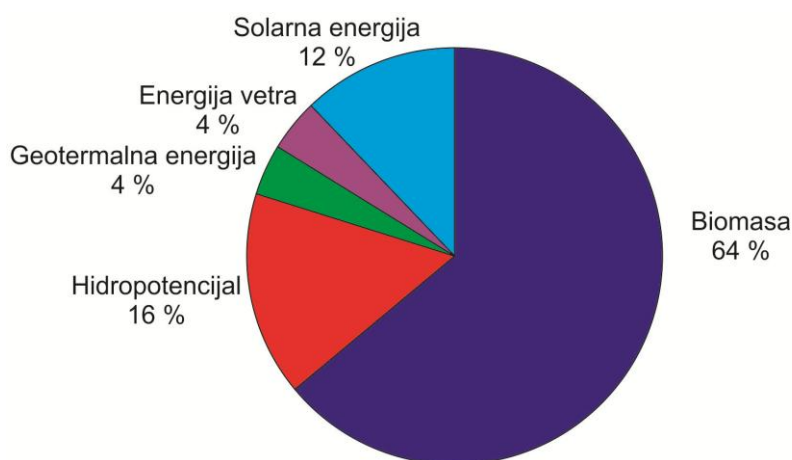
Tabela 29 Tipične vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja	78
Tabela 30 Uobičajene vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja	79
Tabela 31 Tipične vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja	81
Tabela 32 Uobičajene vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja	81
Tabela 33 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom.....	83
Tabela 34 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s unapređenim RED metodom, slučajevi s uključenom distribucijom ostatka fermentacije	84
Tabela 35 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s unapređenim RED metodom, slučajevi s uključenom distribucijom ostatka fermentacije i bonus emisijama za azot	84
Tabela 36 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s unapređenim RED metodom, slučajevi s uključenom distribucijom ostatka ferm. i nadoknadom izgubljenog azota	84
Tabela 37 Vrednosti uštede GHG za energetska iskorišćenje silaže kukuruza	85
Tabela 38 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom, primena alokacije.....	87
Tabela 39 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom, primena alokacije, nadoknada samo fosfora i kalijuma	87
Tabela 40 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom, primena alokacije, nadoknada svih hraniva	88

SPISAK SKRAĆENICA

CNG	Komprimovani prirodni gas
DLUC	Direktna promena namene zemljišta (Direct land use change)
EONR	Ekonomski optimalna količina azota
EU	Evropska unija
FAO	Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
FOS	Sadržaj organskih kiselina (Flüchtige organische Säuren)
GHG	Gasovi s efektom staklene bašte
HRT	Hidrauličko retenciono vreme
ISCC	međunarodni sertifikat za potvrdu održivosti (International Sustainability & Carbon Certification)
LCA	Ocenjivanje životnog ciklusa (Life cycle assessment)
LCB	Lignocelulozni bioetanol
LCI	Inventar životnog ciklusa (Life cycle inventory)
LCIA	Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa (Life cycle impact assessment)
OIE	Obnovljivi izvori energije
OSM	Organska suva materija
RED	Direktiva o promociji i korišćenju energije iz obnovljivih izvora energije
SM	Suva materija
SRPS	Srpski standard
TAC	Ukupan neorganski ugljenik (Total anorganic Carbon, Gehalt an anorganisch gebundenem Kohlenstoff)

1. UVOD

Klimatske promene su posledica intenzivirane emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte (na engleskom, *Greenhouse Gases – GHG*), čiji porast koncentracije u atmosferi pojačava stepen radijativnog forsiranja energije Sunčevog zračenja. Osnovna motivacija za primenu obnovljivih izvora energije (OIE), je da se smanji emisija GHG u sektoru energetike i saobraćaja zamenom fosilnih goriva. U pogledu OIE, Republika Srbija¹ najznačajniji potencijal ima u obliku biomase. Akcionim planom za obnovljive izvore energije (Anonim, 2013) jasno je istaknut značaj biomase kao potencijalno najvećeg resursa za iskorišćenje OIE u Srbiji, Grafik 1. Udeo biomase u ukupnim potencijalima OIE, izražene preko primarne energije, iznosi 64 %, s tim da je neiskorišćeno približno dve trećine, odnosno oko 40 % iskoristivih potencijala OIE predstavlja biomasa.



Grafik 1 Potencijali OIE u Srbiji (Anonim, 2013)

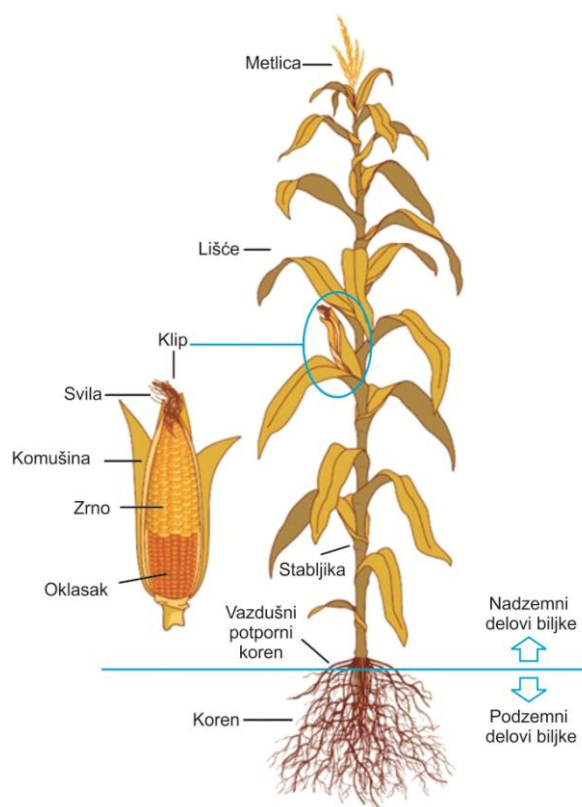
Pojmom biomasa obuhvaćeno je više materija biološkog porekla. Jedna forma biomase su žetveni ostaci koji preostaju nakon ubiranja primarnog poljoprivrednog proizvoda. Prateći striktno klasifikaciju prema standardu SRPS EN ISO 17225, oni spadaju u kategoriju poljoprivredne biomase poreklom od žitarica (Anonim, 2014a). Usled povoljnih agro-ekoloških uslova, kukuruz je najzastupljenija ratarska biljna vrsta u Srbiji. U AP Vojvodini, zauzima oko 40 % površina pod ratarskim biljnim vrstama (Republički zavod za statistiku, 2016). Samim tim, žetveni ostatak pri proizvodnji zrna kukuruza, tj. kukuruzovina, predstavlja najveći potencijal neiskorišćene poljoprivredne biomase kako u AP Vojvodini, tako i u celoj Srbiji.

Kukuruzovina se sastoji od nadzemnog i podzemnog dela biljke, Slika 1. Podzemni deo je korenov sistem i neupotrebljiv je za energetska iskorišćenje usled nemogućnosti ubiranja i nepovoljnih fizičkih karakteristika (na primer, zaprljanje zemljom). Nadzemni deo sastoji se od vazdušnog potpornog korena (dela korenovog sistema), stabljike, lišća i metlice, a od klipa, nakon ubiranja zrna, preostaju oklasak, komušina i svila.

U zavisnosti od načina ubiranja kukuruzovine, na raspolaganju su za korišćenje različiti delovi. Tradicionalno korišćenje kukuruzovine kao OIE je sagorevanje stabljike, lista i komušine, koji preostaju nakon branja klipa, a najčešće posebno oklaska nakon krunjenja zrna. Teži se efikasnijoj upotrebi čvrste ili preradi kukuruzovine u tečnu ili gasovitu formu. Kukuruzovina potencijalno može da se koristi kao gorivo u kogenerativnim postrojenjima, kao sirovina za proizvodnju lignoceluloznog bioetanola (na engleskom, *lignocellulosic bioethanol – LCB*), koji je vrsta naprednog biogoriva (biogoriva druge

¹ U nastavku teksta koristiće se termin *Srbija*

generacije – 2G), a postoji i mogućnost korišćenja kukuruzovine kao supstrata za proizvodnju biogasa u procesu anaerobne fermentacije (Kaltschmitt i dr, 2016).



Slika 1 Delovi biljke kukuruza

Proizvodnja biogasa usled podsticajnih ekonomskih mera može da bude značajan način iskorišćenja kukuruzovine. Naročito se ističe njena perspektiva kao zamene za energetske biljke, trenutno najčešće korišćenih supstrata za proizvodnju biogasa. Biogas predstavlja mešavinu više gasova, dominantno metana – CH_4 (50–75 %) i ugljen-dioksida – CO_2 (25–50 %), dok se gasovi poput vodonika, vodonik sulfida, amonijaka i drugih nalaze u tragovima (FNR, 2016). Nastaje u procesu anaerobne fermentacije (digestije) organske materije. Mikroorganizmi – razne vrste bakterija i arhea, tokom svojih bioloških procesa razgrađuju složene molekule, makromolekule, do CH_4 , CO_2 i drugih produkata fermentacije. Proizvedeni biogas može da se koristi u gasnim motorima kao pogonsko gorivo za generisanje električne ili električne i toplotne energije, što je ujedno i najčešće korišćeni način korišćenja biogasa usled podsticajnih mera. Takođe je moguće da se uz odgovarajuću preradu dobije biometan, smešu gasova koji je po sastavu sličan prirodnom gasu. Zatim biometan može da se utiskuje u mrežu prirodnog gasa ili koristi direktno na lokaciji postrojenja kao biogorivo u formi sličnoj komprimovanom prirodnom gasu (na engleskom, *Compressed Natural Gas – CNG*).

Korišćenjem kukuruzovine kao supstrata za proizvodnju biogasa, a zatim njegovim iskorišćenjem za generisanje električne i električne i toplotne energije (eventualno i za trigeneraciju) ili za dobijanje biometana može da se doprinese ispunjenju obaveza Srbije u pogledu OIE. Srbija se *Ugovorom o osnivanju energetske zajednice* ratifikovanim odgovarajućim zakonom (Anonim, 2006) obavezala da će oblast proizvodnje i iskorišćenja OIE, kao i saradnje sa zemljama članicama, uskladiti sa tendencijama EU u ovoj oblasti.

Oblast proizvodnje i iskorišćenja obnovljivih izvora energije u EU je do 2019. godine okvirno bila definisana sledećim direktivama:

- Direktiva 2009/28/EC o promociji i korišćenju energije iz obnovljivih izvora energije (Renewable Energy Directive – RED direktiva) (European Commission, 2009a),
- Direktiva 98/70/EC o kvalitetu benzina i dizel goriva (Fuel Quality Directive – FQD) (European Commission, 1998) uz amandmane uvedene Direktivom 2009/30/EC (European Commission, 2009b),
- Direktiva 2015/1513 koja uvodi amandmane za Direktivu 2009/28/EC i Direktivu 98/70/EC (European Commission, 2015).

Krajem 2016. godine, objavljen je i predlog nove RED direktive sa pratećim aneksima, a u decembru 2018. ova nova RED direktiva i zvanično stupa na snagu pod nazivom:

- Direktiva (EU) 2018/2001 o promociji i korišćenju energije iz obnovljivih izvora energije (European Commission, 2018).

Obavezni nacionalni ciljevi za članice EU, prvobitno definisani u staroj RED direktivi, ticali su se udela energije iz OIE u bruto finalnoj potrošnji² energije. Cilj je bio da na nivou cele EU, do 2020. godine, najmanje 20 % bruto finalne potrošnje energije bude iz OIE. Obračunavanje udela OIE u bruto finalnoj potrošnji sprovodi se tako da u bilans ulazi električna energija, energija za grejanje i hlađenje, kao i energija biogoriva za transport i biotečnosti (biogoriva koja se koriste za generisanje električne i/ili toplotne energije). Postojao je i dodatni cilj za udeo energije u svim vidovima transporta koja potiče iz biogoriva. Prvobitno je svaka zemlja članica trebala da obezbedi da najmanje 10 % energije u transportu bude obezbeđeno korišćenjem biogoriva. Amandmanima uvedenim Direktivom 2015/1513, cilj za korišćenje biogoriva je korigovan tako da je udeo konvencionalnih biogoriva (na primer, biodizel iz uljane repice) ograničen na 7 %, dok preostalih 3 % treba da se obezbedi nizom alternativnih rešenja između ostalih i naprednim biogorivima druge generacije koja kao sirovinu koriste i lignocelulozne materijale poput kukuruzovine. Njihov minimalni udeo od 0,5 % je trebao da se ratifikuje na nivou zemalja članica do jula 2017. godine, a omogućeno je i da se njihov udeo obračunava dvostruko za ispunjavanje nacionalnih ciljeva. Novom RED direktivom, cilj za OIE do 2030. godine podignut je na 32 % na nivou EU i preuzete su ranije navedene stavke koje se tiču biogoriva.

U skladu sa starom RED direktivom i *Odlukom Ministarskog saveta Energetske zajednice od 18. oktobra 2012. godine (D/2012/04/MC – EnZ)*, Srbija se obavezala da će udeo OIE u bruto finalnoj potrošnji energije do 2020. godine iznositi najmanje 27 %, a u sektoru saobraćaja najmanje 10 %, što je i potvrđeno *Nacionalnim akcionim planom za korišćenje obnovljivih izvora energije* (Anonim, 2013). Dostizanje ovih vrednosti predstavlja nacionalne ciljeve u pogledu korišćenja OIE u Srbiji.

Korišćenjem biomase, pa tako i kukuruzovine u energetske svrhe, ostvaruju se niže vrednosti emisija GHG u poređenju s iskorišćenjem fosilnih goriva iz prostog razloga što se emisije CO₂ koje nastaju prilikom njenog sagorevanja u bilo kom obliku (na primer, kao biogorivo ili biogas za generisanje električne energije), smatraju za biogene, tj. CO₂-neutralne emisije. Međutim, to ne znači da je korišćenje kukuruzovine u potpunosti bez emisija GHG, jer je neophodno da se one posmatraju u celokupnom životnom ciklusu biomase, a ne samo one količine koje direktno nastaju iz procesa sagorevanja. Faze koje podrazumevaju dobijanje biomase – kultivaciju i/ili ekstrakciju³ sirovina ili procesiranje, mogu da imaju emisije GHG približno istih vrednosti kao i iste faze za fosilna goriva (Kiš, 2011). Najčešći razlog za to je korišćenje mineralnih hraniva, pre svega azotnih, za

² Termin "energija se ne troši" nije sa tehničke strane ispravan, ali se ovde citiraju dokumenta

³ Termin ekstrakcija je prevod engleskog termina iz RED direktive i koristiće se u ovom dokumentu

gajenje biljnih vrsta, za čiju proizvodnju i primenu su potrebne velike količine energije iz fosilnih izvora, što je praćeno visokim emisijama GHG. Prednost korišćenja žetvenih ostataka, poput kukuruzovine, je u tome što se u RED direktivi razmatraju kao ostatak proizvodnje zrna (na engleskom, *residue*). Emisije iz proizvodnje zrna, na primer, zbog mineralnih hraniva, ne bi trebale da ulaze u bilans emisija GHG životnog ciklusa kukuruzovine.

Smanjenje emisije GHG predstavlja važan aspekt održivosti primene OIE i u pogledu obavezujućih uslova definisanih navedenim direktivama, uspostavljen je kriterijum održivosti pod nazivom **ušteta emisije GHG** primenjiv za korišćenja biogoriva i biotečnosti, za korišćenje čvrste i gasovite biomase. Pored uštete emisije GHG, definisana su još četiri kriterijuma održivosti koji se odnose na poljoprivrednu praksu i iskorišćenje zemljišta. Za ovo istraživanje, najvažniji je kriterijum koji definiše uštedu emisija GHG za gasovitu biomasu, biogas koji se koristi za generisanje električne energije. Ovaj kriterijum održivosti važi samo za biogas postrojenja nazivne električne snage iznad 2 MW_e, ali članice EU mogu da uvedu obavezu i za manja postrojenja. Kriterijum glasi:

- ušteta emisije GHG treba da je minimalno 70 % u postrojenjima koja generišu električnu energiju, a koja počinju sa radom nakon 01.01.2021, odnosno 80 % u postrojenjima koja počinju sa radom nakon 01.01.2026, u poređenju sa fosilnim komparatorom čija vrednost emisija iznosi 183 gCO_{2ekv}/MJ.

Za oblast biogoriva definisan je i sledeći kriterijum, koji primenu nalazi ukoliko se biogas, biometan, koristi u sektoru saobraćaja:

- ušteta emisije GHG koje nastaju pri korišćenju treba da je minimalno 60 % (u postrojenjima koja počinju sa radom nakon 6.10.2015. i rade do 31.12.2020.) u poređenju s fosilnim gorivima⁴ čija vrednost emisija iznosi 94 gCO_{2ekv}/MJ. Nakon 31.12.2020, ušteta emisije GHG treba da je minimum 65 %.

Novom RED direktivom nije uvedena ušteta emisija za biometan koji se ubrizgava u mrežu prirodnog gasa, nego samo navedeni kriterijum za korišćenje biometana kao komprimovanog gasa za potrebe sektora saobraćaja – biogorivo. Novoj direktivi prethodio je čitav niz dokumenata gde je i mera uštete GHG u slučaju ubrizgavanja biometana u mrežu prirodnog gasa razmatrana, a imala je istu formu kao i u slučaju električne energije stim da je vrednost fosilnog komparatora iznosila 70 gCO_{2ekv}/MJ. Ušteta GHG za ubrizgavanje biometana u mrežu prirodnog gasa pominjana je u izveštaju Evropske komisije Savetu i Evropskom parlamentu iz februara 2010. godine (European Commission, 2010), koji je donešen na osnovu člana 17(9) stare RED direktive, i kojim se predlagalo zemljama članicama da mogu same da uvedu kriterijume održivosti za korišćenje čvrste i gasovite biomase. Radni dokument komisije (European Commission, 2014), potvrdio je da su neke od zemalja članica to i sprovele za čvrstu i gasovitu biomasu (Velika Britanija, Italija i Belgija). Ovaj dokument uveo je jasna pravila za sprovođenje metoda⁵ kojim se obračunavaju uštete emisija GHG i uveo fosilne komparatore za električnu, toplotnu i rashadnu energiju i prirodni gas. Ovaj metod je baziran na principima *Ocenjivanja životnog ciklusa* (na engleskom, *Life Cycle Assessment – LCA*), standardizovanoj tehnici koja proučava aspekte zaštite životne sredine i moguće uticaje na životnu sredinu tokom celokupnog životnog ciklusa proizvoda od ekstrakcije sirovina, preko proizvodnje, upotrebe i postupanja na kraju životnog ciklusa, recikliranja i konačnog odlaganja, a sprovodi se u četiri koraka (definisaniu cilja, predmeta i područja primene; analizi inventara; ocenjivanja uticaja i interpretacije) (Anonim, 2008). Na osnovu RED metoda Giuntoli i dr. (2015) utvrđuju vrednosti ušteta emisije za korišćenje biogasa proizvedenog iz silaže kukuruza,

⁴u nastavku teksta koristiće se termin *fosilni komparator*

⁵u nastavku teksta koristiće se termin *RED metod*, skup jednačina objašnjenih u poglavlju 2

stajnjaka i komunalnog otpada za generisanje električne energije i za ubrizgavanje biometana u mrežu prirodnog gasa. U slučaju električne energije, ove vrednosti su iskorišćene za novu RED direktivu, ali za ubrizgavanje biometana u mrežu prirodnog gasa su zanemarene bez jasnog objašnjenja.

Iskorišćenje biogasa koje se obračunava za postizanje nacionalnih ciljeva za OIE, mora da zadovolji kriterijum održivosti ušteda emisije GHG, a ujedno se to postavlja i kao uslov za dobijanje finansijske podrške za proizvodnju biogasa.

Njegovo ispunjenje mora da bude verifikovano od strane odgovarajućeg tela. To znači da privredni subjekt koji na tržište plasira energiju iz iskorišćenja biogasa (proizvodi biometan za transport ili generiše električnu energiju) treba da navede vrednost uštede emisija GHG. Navedenu vrednost mora da na adekvatan način dokumentuje, a pri utvrđivanju uštede emisija GHG, u obavezi je da primenjuje metod masenog bilansa. Za izveštavanje o vrednostima uštede emisija GHG mogu da se koriste **uobičajene vrednosti** uštede navedene u pratećim aneksima RED direktive, a postoji i mogućnost da se koriste *priznate dobrovoljne šeme* (na primer, *International Sustainability & Carbon Certification – ISCC*) ili *bilateralni* i *multilateralni ugovori*, kojima se garantuje da je proizvodnja i iskorišćenje biogasa u skladu sa kriterijumom održivosti navedenim u RED direktivi. Na ovaj način, olakšano je izveštavanje privrednih subjekata o karakterističnim vrednostima uštede emisije GHG (isti principi su predviđeni za sve načine korišćenja biogoriva i biomase za generisanje električne ili električne i rashladne energije). Korišćenje uobičajenih vrednosti ograničeno je samo za biogas koji se proizvodi iz sirovina gajenih van teritorije EU, gde pripada i Srbija, u okviru teritorija klasifikovanih kao teritorije nivoa 2 prema nomenklaturi teritorijalnih jedinica statistike i ukoliko su u pitanju otpadi, osim poljoprivrednih otpada i otpada iz ribarstva. Moguće je i korišćenje *stvarnih vrednosti* uštede računatih u skladu sa metodom propisanim aneksima RED direktive. Na kraju, postoji mogućnost korišćenja *razvrstanih uobičajenih vrednosti emisija GHG*, navedenih u aneksima RED direktive, za pojedine faze životnog ciklusa, ne bi li se utvrdila stvarna vrednost uštede u emisijama GHG (u kombinaciji sa stvarnim vrednostima emisija za pojedine faze u životnom ciklusu). Primena ovog metoda u slučaju generisanja električne energije detaljno je objašnjena u Giuntoli i dr. (2015).

U Srbiji je obaveza ispunjenja kriterijuma održivosti definisana Zakonom o energetici (Anonim, 2014b) samo za biogoriva. Tek donošenjem odgovarajućih uredbi, uspostavljanjem verifikacionog tela za potvrdu ispunjenosti kriterijuma održivosti, izveštavanja i drugih elemenata od značaja za proizvodnju i održivost biogoriva, u potpunosti će ova oblast da se uredi. Važno je da se napomene da je Akcionim planom za OIE, za ispunjavanje ciljeva iskorišćenja biogoriva kao početna godina definisana 2015, te pomenuti podzakonski akt/akti moraju da se donesu u najskorijem periodu. U pomenutom Zakonu trenutno ne postoje indicije da će se uvoditi kriterijumi održivosti i za korišćenje čvrste i gasovite biomase, što ipak ne isključuje tu mogućnost s obzirom na predstojeću promenu evropskih propisa.

Prema RED direktivi, biogas za čiju proizvodnju bi se kao supstrat koristila kukuruzovina, morao bi da bude proizveden u skladu sa navedenim kriterijumom održivosti. Isključivo u tom slučaju bi se iskorišćene količine biogasa razmatrale za ispunjenje definisanih ciljeva za OIE.

1.1 Problem

Za biogas proizveden iz kukuruzovine koji se koristi za generisanje električne energije ili kao biometan, uobičajene vrednosti uštede emisija GHG, ili razvrstane uobičajene vrednosti emisija GHG za pojedine faze u okviru životnog ciklusa izračunate u skladu sa RED metodom, nisu poznate. Vrednosti se ne nalaze u aneksima RED direktive. U direktivi ove vrednosti postoje za najčešće korišćene supstrate: silažu kukuruza, stajnjak i organsku frakciju komunalnog otpada. Takođe postoje za više slučajeva iskorišćenja energije biogasa proizvedenog iz ko-fermentacije silaže sa stajnjakom. Na primer, vrednosti uštede emisija GHG za silažu ne zadovoljavaju kriterijum održivosti pri monodigestiji, tj. ne može da se dostigne minimum 70 % uštede emisija GHG pri iskorišćenju biogasa za generisanje električne energije, Grafik 2. Prikaz svih uobičajenih vrednosti ušteta za generisanje električne energije i za biometan kao biogorivo nalaze se u aneksima RED direktive, a izdvojene su u Prilogu 1.

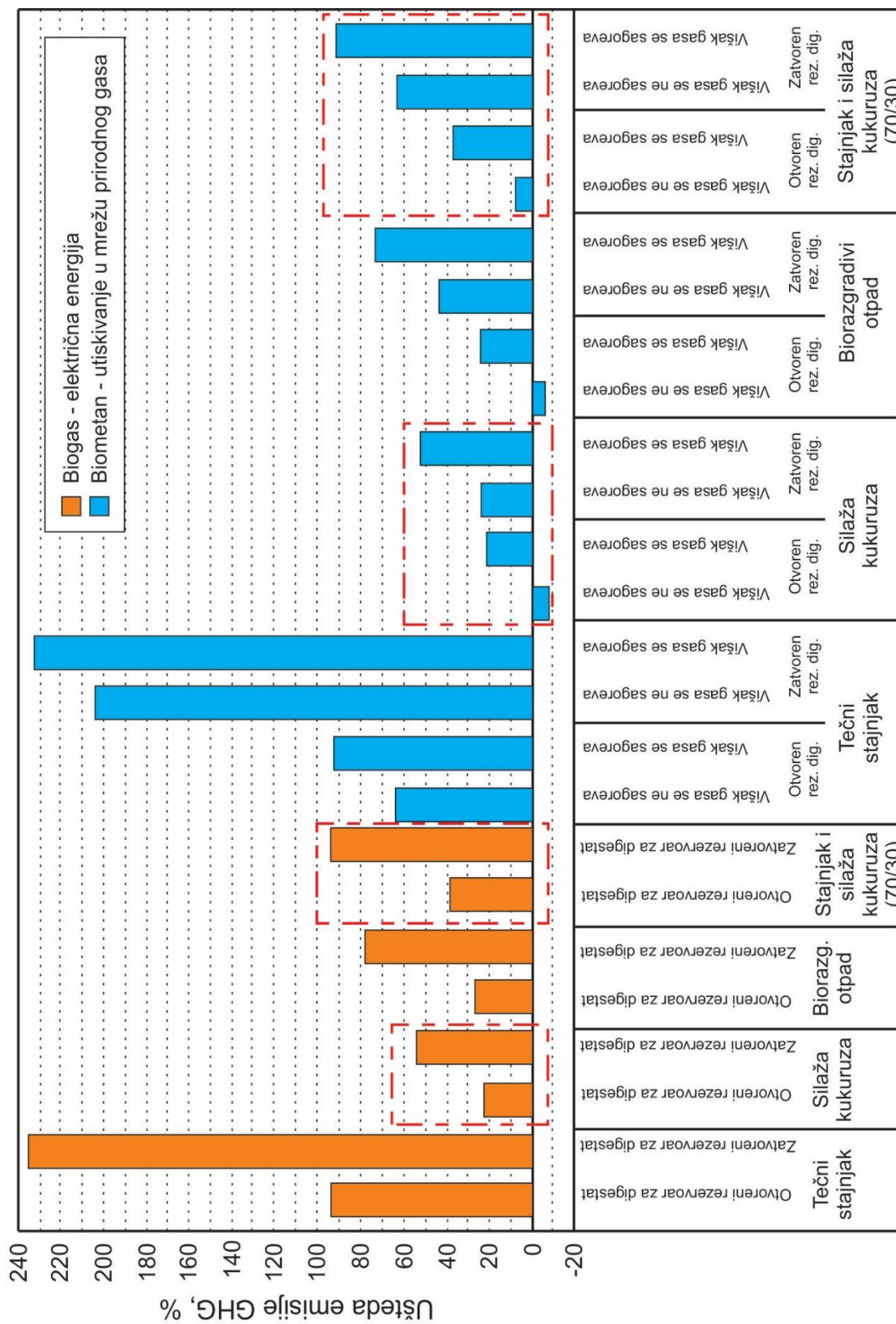
Kukuruzovina do sada nije bila često korišćen supstrat za proizvodnju biogasa iz dva osnovna razloga:

- lignocelulozna struktura kukuruzovine koja onemogućava razgradnju tokom anaerobne fermentacije bez primene predtretmana,
- korišćenja neadekvatnog ubiranja kukuruzovine, jer pri konvencionalnom ubiranju u više prohoda ne može da se obezbedi kvalitet u pogledu zaprljanja zemljom.

Istraživanjima i razvojem u oblasti predtretmana kukuruzovine koja su rezultovala tehničkim rešenjima na nivou rane komercijalne zrelosti (Lizasoain i dr, 2017; Theuretzbacher i dr, 2015), kao i u oblasti ubiranja kukuruzovine (Shinners i dr, 2012; Straeter, 2011), korišćenje ovog supstrata za proizvodnju biogasa može da bude značajno. U skladu s očekivanim tendencijama u pogledu povećanja korišćenja kukuruzovine kao supstrata za proizvodnju biogasa, neophodno je da se analizira i održivost takvog načina iskorišćenja. Korišćenjem RED metoda za utvrđivanje stvarnih vrednosti emisija GHG i uštede emisija GHG, može da se utvrdi da li je kriterijum u pogledu uštede emisija GHG zadovoljen.

Forma i pravila metoda na neodgovarajući način razmatraju aspekte karakteristične za proizvodnju/korišćenje biogasa i slučaj korišćenja kukuruzovine kao supstrata za proizvodnju biogasa, a tu se misli na sledeće:

- emisije GHG nastale kao posledica odnošenja kukuruzovine sa polja,
- alokacija emisija GHG na proizvedeni biogas i ostatak fermentacije.

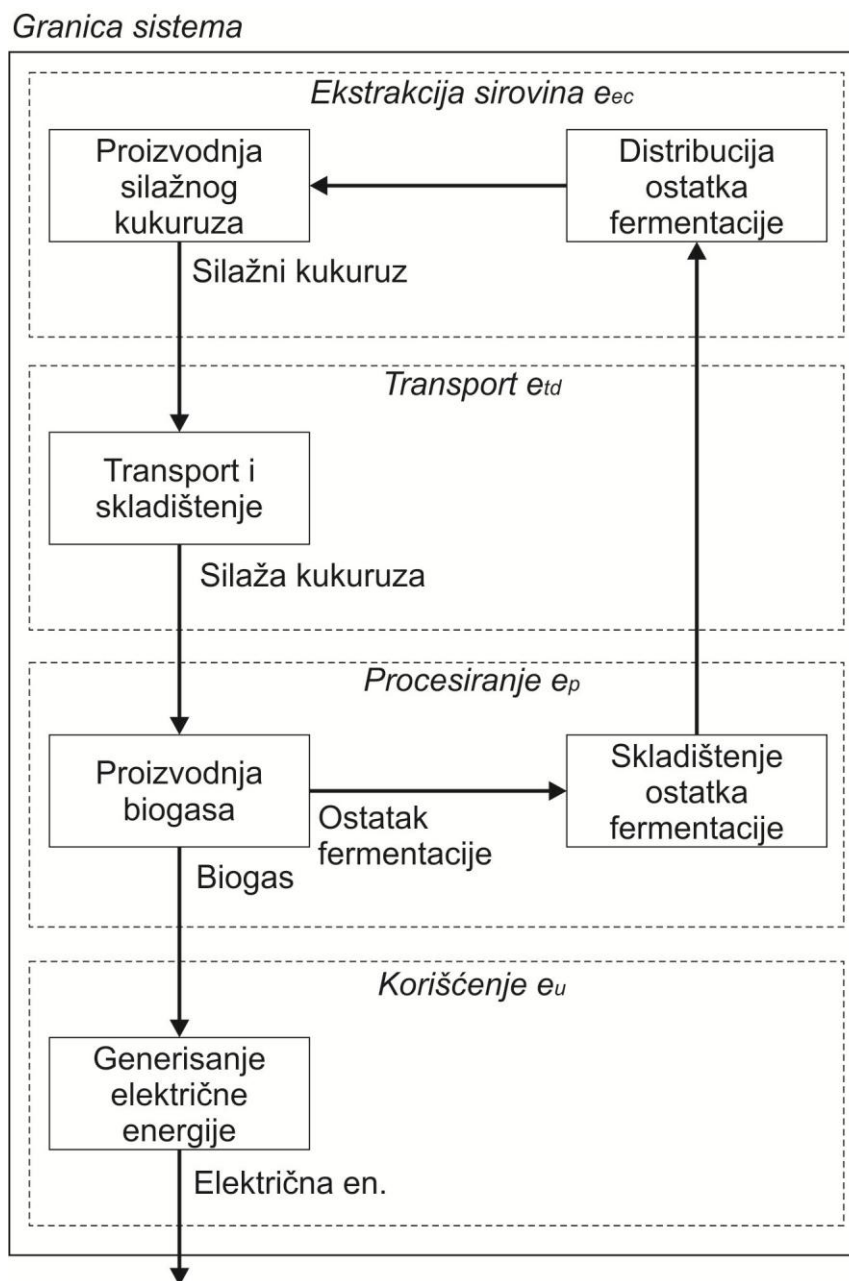


Grafik 2 Uobičajene vrednosti uštede emisija GHG za biogas, sa naglašenim slučajevima korišćenja silaže kukuruza za proizvodnju biogasa (delimično prerađeno iz Giuntoli i dr, 2015)

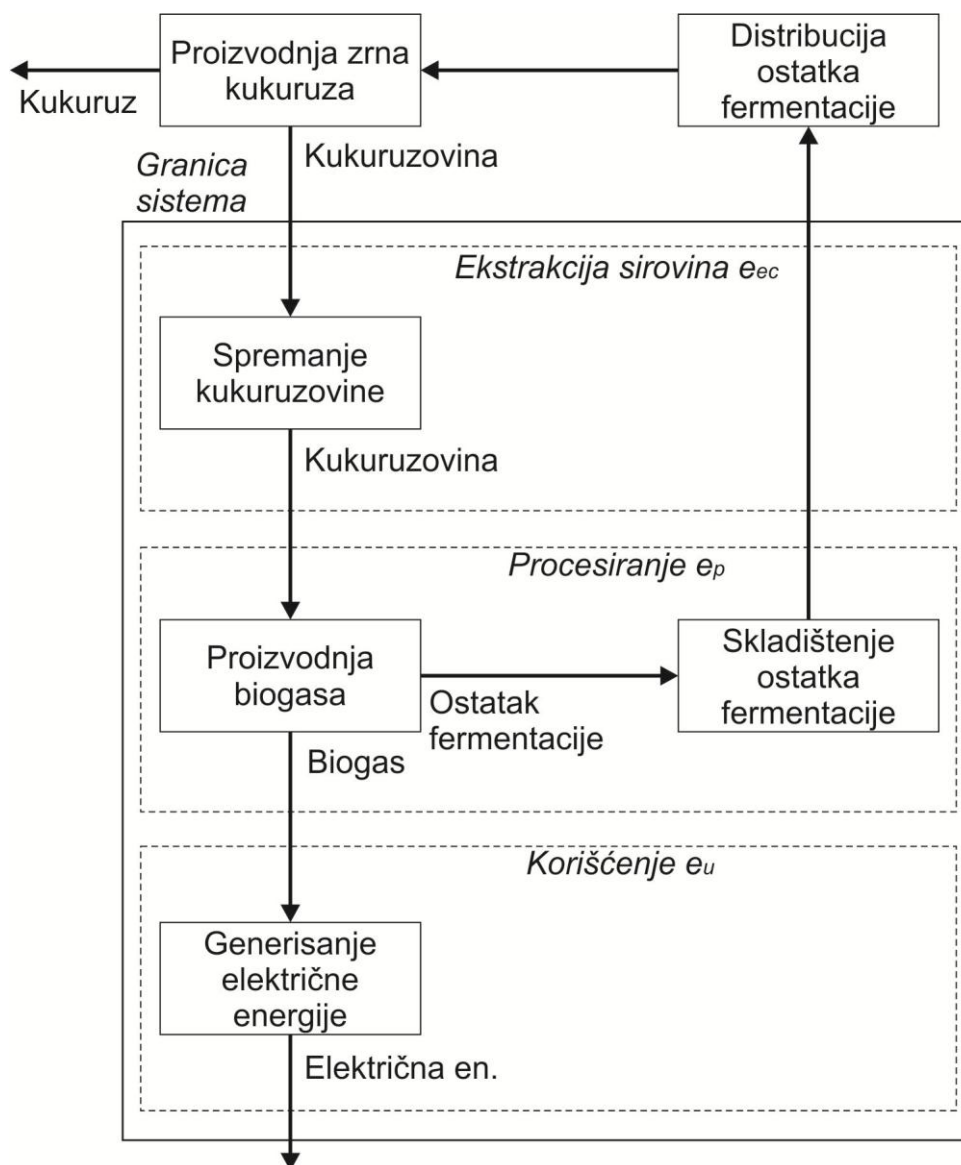
Tokom proizvodnje biogasa, razgradnjom korišćenih supstrata dobija se ostatak fermentacije, koji po karakteristikama predstavlja organsko hranivo. RED metodom u slučaju analize emisija GHG, potrebno je da se koristi alokacija između energetske nosioca za koji se obračunava ušteda emisija i eventualnih ko-proizvoda u životnom ciklusu. Alokacija emisija podrazumeva da se vrednost ukupnih emisija deli između materijalnih tokova, na primer, glavnog proizvoda i ko-proizvoda, u odnosu koji odgovara usvojenom parametru. U slučaju da je taj parametar ekonomska vrednost, alokacija je ekonomska; toplotna moć – energetska; masa – masena alokacija i dr. Korišćenjem alokacije dodeljuju se manje vrednosti emisija GHG čitavom životnom ciklusu krajnjeg energetskeg produkta i samim tim veće vrednosti uštede emisija GHG. European Commission (2018) izostavlja jasnu definiciju kako se posmatra ostatak fermentacije u okviru RED metoda, tj. da li se on smatra za ko-proizvod ili ostatak. Giuntoli i dr. (2015), u slučaju silaže kukuruza, ne sprovode alokaciju nego razmatraju slučaj da se ostatak fermentacije koristi na poljima sa kojeg je supstrat ubiran i da se njegovim vraćanjem na isto polje ciklus zatvara, tj. smatraju ga za ostatak. Pri tome ne uzimaju u obzir emisije nastale tokom transporta ostatka fermentacije, nego samo tokom skladištenja i primene na polju. Emisije pri skladištenju pridružuju fazi procesiranja, a pri primeni ostatka fermentacije fazi ekstrakcije sirovina, Grafik 3. Adams i dr. (2015) pri analizi RED metoda navode mogućnost da se emisije GHG alociraju između proizvedenog biogasa i ostatka fermentacije, odnosno da ostatak fermentacije može da se posmatra i kao ko-proizvod, objašnjavajući navedeno time da ostatak fermentacije primenu nalazi i na poljima sa kojih supstrat nije ubiran. Slično, Rana i dr. (2016) pri primeni RED metoda alokaciju sprovode samo ukoliko se ostatak fermentacije ne koristi na poljima sa kojih su supstrati ubirani.

U slučaju da se ostatak fermentacije kukuruzovine vraća na polje sa kog je ona ubirana, ne treba da se koristi alokacija, pošto se vraćanjem ostatka fermentacije zaokružuje proces kruženja materije, Grafik 4. Ipak, usled toga što se zbog pravila da se ne razmatraju emisije pre ubiranja kukuruzovine, nastaje problem da je bilans emisija koje se pridružuju kukuruzovini neopravdano manji za emisije:

- nastale tokom distribucije ostatka fermentacije od kukuruzovine – direktne i indirektno emisije N_2O , emisije GHG iz rada mehanizacije,
- nastale zbog mineralnih hraniva kojima bi se morao nadoknaditi izgubljeni azot usled volatilizacije azota i direktnih emisija N_2O iz ostatka fermentacije.



Grafik 3 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz silaže kukuruza za generisanje električne energije – RED metod



Grafik 4 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – RED metod

U slučaju da se ostatak fermentacije distribuira (raspodeljuje) na polja sa kojih kukuruzovina nije ubirana, prema RED metodu, morala bi da se primeni alokacija emisija proporcionalna energetsom sadržaju između biogasa i ostatka fermentacije (utvrđenog na osnovu donje toplotne moći, tzv. energetska alokacija) (Adams i dr, 2015; European Commission, 2016). U konkretnom slučaju proizvodnje i iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine (ali i drugih žetvenih ostataka) problem predstavlja to što polje sa kog je kukuruzovina ubirana ostaje uskraćeno za hraniva sadržana u njoj. U naučnoj zajednici prisutna je hipoteza da se odnošenjem kukuruzovine, i uopšte bilo koje vrste žetvenih ostataka, narušavaju karakteristike zemljišta u pogledu sadržaja biljnih hraniva tj. primarnih makrohraniva poput azota – N, fosfora – P i kalijuma – K. Prilikom ostavljanja žetvenih ostataka na polju, većina hraniva prisutna u njima, putem prirodne razgradnje ostaju u zemljištu i vremenom, dostupna je narednim biljnim vrstama koje se uzgajaju na tom polju. U slučaju odnošenja žetvenih ostataka, ujedno se odnose i u njima sadržana hraniva čime se narušavaju (očekivane) karakteristike zemljišta. Da bi se negativan uticaj na karakteristike zemljišta smanjio, nadoknadila uklonjena količina hraniva, treba da se pristupi merama poput primene organskih i mineralnih hraniva u većoj meri nego što bi to poljoprivredna proizvodnja zahtevala (Cherubini i dr, 2009; Cherubini i Ulgiati, 2010;

Whittaker i dr, 2014). Isto tako u slučaju kukuruza i kukuruzovine, trebala bi da se razmatraju dodatna mineralna ili organska hraniva u okviru tog sistema, a posledične emisije GHG morale bi da se pridruže kukuruzovini. Usled pravila da se kukuruzovini ne dodeljuju emisije do trenutka njenog ubiranja, nego da se smatra da su jednake nuli, nije moguće da se uključe u bilans emisija koristeći RED metod u ovoj formi.

Sličan kritički osvrt daju Whittaker i dr. (2014) tokom analize bioetanola baziranog na pšeničnoj slami. Oni navode da taj metod nije u skladu sa Evropskom zajedničkom poljoprivrednom politikom (na engleskom, *European Common Agricultural Policy*) zbog uticaja koji odnošenje žetvenih ostataka ima na očuvanje plodnosti zemljišta i zaštitu od erozije. U naučnoj literaturi, LCA studijama, u kojima je predmet analize energetska iskorišćenje kukuruzovine, ovaj problem prevazilazi se recimo korišćenjem ekonomske alokacije emisija između zrna kukuruza i kukuruzovine (Kral i dr, 2016) ili uključivanjem emisija GHG proisteklih iz dodatne primene, nadoknade, hraniva u životni ciklus (Murphy i Kendall, 2013; Spatari i dr, 2005; Whitman i dr, 2011; Pourbafrani i dr, 2014; Sheehan i dr, 2004), Tabela 1. U navedenoj tabeli dat je pregled utvrđenih emisija GHG za procese ubiranja i transporta, a izostale su za celokupni životni ciklus energetskog iskorišćenja kukuruzovine pošto su to studije koje su za predmet ispitivanja imale LCB (osim studije Kral i dr. (2016), koja je komentarisana u poglavlju 3.3.5).

U slučaju dodatne primene hraniva, posledica su emisije GHG proistekle iz njihove proizvodnje i emisija GHG nastalih tokom same distribucije hraniva. Neophodno je da se te emisije uključe u bilans emisija iskorišćenja žetvenih ostataka pri obračunavanju zadovoljenja kriterijuma održivosti u pogledu uštede emisije GHG. Razlog za to što u studijama čiji su predmet istraživanja emisije GHG pri iskorišćenju energije iz biomase, a koje obuhvataju i emisije koje su nastale kao posledica odnošenja žetvenih ostataka sa polja (Murphy i Kendall, 2013; Spatari i dr, 2005; Whitman i dr, 2011), ove emisije imaju značajan udeo u krajnjem bilansu emisija GHG, mnogo veći nego same agrotehničke operacije pri spremanju kukuruzovine i drugih žetvenih ostataka.

Tabela 1 Navodi iz literature o vrednostima emisija GHG u životnom ciklusu energetskog iskorišćenja kukuruzovine

Izvor	Transport	Ubiranje i nadoknada hraniva
Kral i dr. (2016)	-	174 kgCO _{2ekv} /tSM
Manandhar i Shah (2017)	16 kgCO _{2ekv} /t	-
Murphy i Kendall (2013)	-	348 kgCO _{2ekv} /ha
Pourbafrani i dr. (2014)	-	54 kgCO _{2ekv} /tSM
Sheehan i dr. (2004)	-	58 kgCO _{2ekv} /km
Spatari i dr. (2005)	12 kgCO _{2ekv} /tSM	96 kgCO _{2ekv} /tSM
Whitman i dr. (2011)	71 kgCO _{2ekv} /tSM	166 kgCO _{2ekv} /tSM

Uticaj odnošenja kukuruzovine na količinu hraniva u zemljištu je u naučnoj literaturi predmet istraživanja brojnih autora (Adler i dr, 2015; Coulter i Nafziger, 2008; Johnson i dr, 2013; Karlen i dr, 2014; Khanal i dr, 2014; Sawyer i Mallarino, 2012). Ta naučna saznanja mogu da se iskoriste za utvrđivanje kako se istovremeno odnošenje hraniva putem kukuruzovine sa polja odražava na emisije GHG usled primene dodatnih agrotehničkih mera za neutralisanje tog efekta. U naučnoj literaturi gde je ovaj uticaj razmatran, obično su razmatrana sva tri primarna hraniva (Kral i dr, 2016; Luo i dr, 2009; Murphy i Kendall, 2013; Spatari i dr, 2005). Ovaj pristup je logičan, ali se postavlja pitanje da li je opravdan u

slučaju uklanjanja kukuruzovine. Glavni razlog za dodatnu primenu mineralnih hraniva je postizanje optimalnog prinosa sledećeg useva. Postoje indikacije da, kada se delimično sakuplja kukuruzovina, tj. oko polovine ukupne nadzemne mase, nema negativnog uticaja na prinos sledećeg useva (Johnson i dr, 2013). Prinos može da bude još veći u poređenju sa slučajem kada je kukuruzovina ostavljena na polju (Karlen i dr, 2014). Sawyer i Mallarino (2012) su izneli sličnu tvrdnju i povezali je sa smanjenjem ekonomske optimalne količine azota (na engleskom, *economical optimal nitrogen rate– EONR*). Smanjenje EONR-a se objašnjava manjim dodavanjem ugljenika zemljištu za mikrobiološku obradu. Slično tome, povećanje EONR-a je posledica preostale kukuruzovine na polju (Coulter i Nafziger, 2008). Za ove tvrdnje potrebno je da se uzmu u obzir karakteristike zemljišta, uslovi okoline i primenjenih agrotehničkih mera, ali se može pretpostaviti da uklanjanjem do 75 % kukuruzovine ne može da bude značajnog uticaja na zemljište (Khanal i dr, 2014) i samo dodatna primena mineralnih hraniva koja sadrže kalijum i fosfor su dovoljna za održavanje potrebnih karakteristika (Adler i dr, 2015).

1.2 Cilj istraživanja i hipoteze

U skladu sa definisanim problemom, cilj istraživanja je da se unapredi zvanični, u RED direktivi definisani metod za utvrđivanje ušteda emisija GHG. Ispunjavanjem cilja istraživanja, treba da se daju predlozi za prevazilaženje identifikovanih nedostataka i nedorečenosti RED metoda.

Ispunjavanje postavljenog cilja zahteva proveru sledećih hipoteza:

- H1– Primenom RED metoda u osnovnoj formi na slučajeve energetskog iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine nije zadovoljen kriterijum održivosti od minimum 70 % uštede emisija GHG.
- H2 – Način spremanja kukuruzovine ne može da utiče na ocenu kriterijuma održivosti.
- H3 – Primenom unapređenog RED metoda ne utiče se na ocenu održivosti korišćenja energije biogasa iz kukuruzovine, već samo na vrednost uštede emisija GHG.
- H4 – Razmatranje materijalnog toka azota pri unapređenju RED metoda u životnom ciklusu korišćenja energije biogasa iz kukuruzovine utiče na vrednost uštede emisija GHG, ali ne i na ocenu uštede.

Da bi se proverile postavljene hipoteze, potrebno je da se:

- odredi prinos i sastav biogasa iz kukuruzovine,
- odrede karakteristike ostatka fermentacije kukuruzovine i materijalnog toka kukuruzovine u ostatak fermentacije (stepen razgradnje kukuruzovine i forme azota u kukuruzovini i ostatku fermentacije),
- definiše faza spremanje kukuruzovine (ubiranje i logistika) i odrede emisije u okviru njih odnosno fazi ekstrakcija sirovina,
- odrede emisije u fazi procesiranja tj. proizvodnje biogasa i skladištenja ostatka fermentacije kukuruzovine,
- odrede emisije u fazi korišćenja biogasa tj. pri dobijanju biometana i generisanja električne energije,

- definišu slučajeve primene unapređenog RED metoda tj. da se emisijama iz spremanja kukuruzovine u okviru faze ekstrakcije sirovina dodaju i emisije proistekle iz distribucije ostatka fermentacije i nadoknade hraniva,
- odrede vrednosti uštede emisija GHG uz unapređen RED metod i uporede sa vrednostima uštede emisija pri primeni RED metoda u originalnoj formi.

2. MATERIJALI I METODI

2.1 Određivanje prinosa i sastava biogasa šaržnim eksperimentom

2.1.1 Materijal

Za eksperimentalne analize korišćena je kukuruzovina uzorkovana tokom 2014. i 2015. godine. Uzorci kukuruzovine ubirani su sa poljoprivrednih parcela gde se primenjuju sve agro-tehničke mere (primena mehanizacije, hraniva i sredstava za hemijsku zaštitu bilja). Lokacija parcela je bila okolina Sombora.

Uzorkovane su kompletne biljke kukuruza (kukuruzovina i klip) sa pet mesta na svakoj parceli, a zahvaćena površina po uzorku je 1,4 m². Uzorci su transportovani na Fakultet tehničkih nauka za ispitivanja opisana u (Martinov i dr, 2016). Delovi kukuruzovine su zatim usitnjeni korišćenjem mlina čekićara na Institutu za ratarstvo i povrtarstvo u Bačkom Petrovcu. Mlin je imao snagu 30 kW i produktivnost od 1 t/h. Usitnjena, iščijana, kukuruzovina sa maksimalnom dužinom čestica oko 3 cm, Slika 2, zapakovana je u kese i uskladištena do trenutka eksperimentalnih analiza.

Ostatak fermentacije za potrebe ispitivanja prinosa i sastava biogasa, tzv. inokulum, obezbeđen je iz biogas postrojenja kompanije Global Seed u Čurugu u dva navrata. Postrojenje kao supstrate koristi dominantno čvrsti i tečni goveđi stajnjak i uljne taloge. Inokulum je uzorkovan na prelivnoj cevi iz fermentora, a nakon dopremanja u laboratoriju, sprovedena su potrebna ispitivanja i uzorak uskladišten na sobnoj temperaturi do momenta iskorišćenja za ispitivanja prinosa biogasa.



Slika 2 Primer usitnjene kukuruzovine korišćene za eksperimentalne analize

2.1.2 Metod

Proces anaerobne fermentacije odvija se kroz četiri faze: hidroliza, kiselinosa, sirćetna i metanogena faza. Sve faze odvijaju se prostorno i vremenski paralelno. U svakoj od njih učestvuju druge grupe bakterija, a produkti prethodne polazne su sirovine za odvijanje naredne. U toku hidrolize, složeni molekuli ugljenih hidrata, proteina i masti razlažu se na prostije gradivne jedinice kao što su šećeri, proteini i proste masti. Zatim se u kiselinosa fazi ovi produkti dalje razlažu na volatilne masne kiseline, od kojih je najbitnija sirćetna kiselina, acetat, vodonik, CO₂ i alkoholi. Potom, u sirćetnoj fazi, dolazi do daljeg generisanja sirćetne kiseline, da bi u metanogeno fazi, od generisane sirćetne kiseline (acetoklastični način) i/ili CO₂ i vodonika (hidrogenotrofni način) nastao CH₄. Ispitivanje prinosa biogasa i udela CH₄ pri anaerobnoj fermentaciji kukuruzovine sprovedeno je *šaržnim eksperimentom* u skladu sa *Uputstvom za digestiju organskih materijala VDI 4630*⁶ (VDI, 2006).

Prema uputstvu, prvo se za uzorak ispituju fizičke karakteristike kukuruzovine, sadržaj suve materije (SM) i sadržaj organske suve materije (OSM). Utvrđene su u skladu sa standardnim metodima (ISS, 2013a; 2013b). Približno 5 g usitnjene kukuruzovine stavlja se u pripremljene keramičke vatrostalne posude i mereno vagom tačnosti 0,01 g, model *Birotehna THB 600*. Zatim su ispitivani uzorci sušeni na temperaturi od 105 ± 2 °C do konstante mase koristeći sušaru *Memmert UN 110*. Nakon završetka sušenja, posude sa ispitivanim uzorcima kukuruzovine su ohlađene u eksikatoru i ponovo im je izmerena masa pomoću vage. Nakon toga su posude s uzorcima smeštene u peć za žarenje *Elektron ELP-06* gde je sprovedeno njihovo spaljivanje (žarenje) na 550 °C u trajanju od najmanje 2 h tj. do potpunog sagorevanja uzoraka. Nakon žarenja su posude izvađene iz peći, stavljen u eksikator gde su ohlađene i ponovo je izmerena masa, ovog puta preostalog pepela u posudama.

Zajedno sa kukuruzovinom, navedene fizičke karakteristike ispitivane su i za inokulum i mikrokristalnu celulozu.

Proračun sadržaja SM sproveden je koristeći sledeću jednačinu:

$$SM = \frac{m_c - m_a}{m_b - m_a} * 100 \quad [1]$$

gde je:

- SM – suva materija, %
- m_{SM} – masa suve materije, g
- m_a – masa praznog tigla, g
- m_b – masa tigla i uzorka pre sušenja, g
- m_c – masa tigla i uzorka nakon sušenja, g.

Proračun sadržaja OSM sproveden je koristeći sledeću jednačinu:

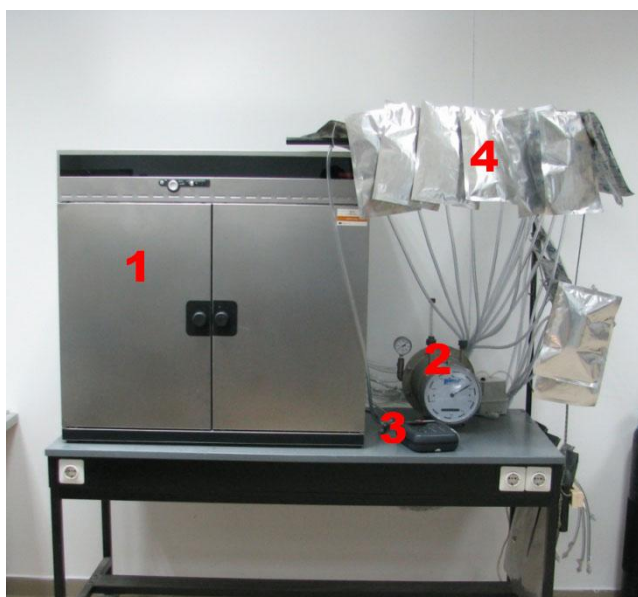
$$OSM = \frac{m_c - m_d}{m_c - m_a} * 100 \quad [2]$$

⁶u nastavku teksta *Uputstvo*

gde je:

- OSM – organska suva materija, %,
- m_a – masa praznog tigla, g,
- m_b – masa tigla i uzorka pre sušenja, g,
- m_c – masa tigla i uzorka nakon sušenja, g,
- m_d – masa tigla i uzorka nakon žarenja, g.

Postupak ispitivanja prinosa i sastava biogasa dalje podrazumeva da se u reaktore, litarske staklene boce, odmeri tačno propisana količina analiziranog supstrata i inokuluma, materije koja obezbeđuje neophodne mikroorganizme za anaerobnu fermentaciju, Slika 3. Količina OSM kukuruzovine u reaktoru iznosila je 5,25 gOSM, a količina inokuluma 10,50 gOSM, čime je obezbeđeno da je odnos organskih masa supstrat/inokulum 0,5. Paralelno s ovim reaktorima se u cilju korekcije dobijenih rezultata postavljaju i reaktori u kojima se nalazi samo inokulum, tzv. negativna kontrola. Vrednosti prinosa biogasa iz reaktora samo sa inokulumom se oduzimaju od vrednosti prinosa biogasa u reaktorima s analiziranim supstratom čime se utvrđuje prinos biogasa nastalog samo iz analiziranog supstrata. Dodatno je u vidu pozitivne kontrole sprovedena analiza prinosa biogasa iz supstrata poznatog prinosa, u ovom slučaju mikrokrystalne celuloze. Ukoliko je prinos biogasa iz mikrokrystalne celuloze bio u skladu sa predviđenim, $750 \text{ Nm}^3/\text{tOSM}$, smatrano je da je inokulum bio odgovarajućeg kvaliteta za sprovođenje analiza.



a)



b)

Slika 3 a) Oprema za sprovođenje šaržne analize prinosa biogasa: 1 - inkubator, 2 - protokomer, 3 - gasni analizator, 4 - kese sa crevima. b) reaktori sa uzorcima u inkubatoru

Reaktori su se tokom analize nalazili u inkubatoru *Memmert IFE 600 D7* na 37°C (mezofilni uslovi) približno 30 dana, odnosno kada je proizvodnja biogasa na dnevnom nivou bila manja od 1 % od ukupno proizvedene količine. Svaki reaktor je preko plastičnih creva i brzih spojnika bio povezan sa aluminijumskom kesom zapremine 2 L. Sakupljeni biogas je koristeći vakuumsku pumpu *KNF-NMP 830 KNE* pogonjen kroz bubnjasti protokomer *Ritter TG1/1* pomoću kojeg je utvrđena količina proizvedenog biogasa.

Tačnost očitavanja protokomera je iznosila ± 1 mL. Zatim je pomoću gasnog analizatora *Geotech BIOGAS 5000* određivan sastav biogasa tj. koncentracija CH₄, CO₂, kiseonika (O₂) i vodonik sulfida (H₂S). Gasni analizator je pre svakog korišćenja kalibrisan gasnim smešama na vrednosti: 60,1 % CH₄, 39,9 % CO₂, 6,1 % O₂ i 18 ppm H₂S. Tačnost očitavanja je iznosila 0,1 % za sve gasove osim za H₂S za koji je tačnost bila 1 ppm.

Očitane vrednosti za temperaturu i pritisak gasa na protokomeru i gasnom analizatoru korišćene su za kvantitativnu evaluacija proizvedenog biogasa. Prvi korak je računanje normalne zapremine proizvedenog biogasa. Utvrđen je sadržaj vodene pare u gasu, zatim oduzet od očitane vrednosti i utvrđena količina suve normalne zapremine proizvedenog gasa. Pri tome je korišćena jednačina 3:

$$V_0^{\text{tr}} = V * \frac{(p - p_w) * T_0}{p_0 * T} \quad [3]$$

gde je:

- V_0^{tr} – zapremina suvog gasa pri normalnim uslovima, Nm³,
- V – očitana zapremina proizvedenog biogasa, m³,
- p – očitani pritisak gasa, Pa,
- p_w – napon vodene pare u funkciji ambijentalne temperature, Pa,
- T_0 – normalna temperature, 273,15 K,
- p_0 – normalni pritisak, 101325 Pa,
- T – temperature proizvedenog biogasa ili ambijetalna temperature, K.

Pošto je sadržaj CH₄ izmeren u vlažnom gasu, sadržaj CH₄ u suvom gasu je preračunat pomoću jednačine 4:

$$C_{\text{CH}_4}^{\text{s}} = C_{\text{CH}_4}^{\text{v}} * \frac{p}{p - p_w} \quad [4]$$

gde je:

- $C_{\text{CH}_4}^{\text{s}}$ – koncentracija (udeo) metana u suvom gasu, % (zapremine),
- $C_{\text{CH}_4}^{\text{f}}$ – koncentracija metana u vlažnom gasu, %,
- p – očitani pritisak gasa, hPa (1 hPa=100 Pa),
- p_w – napon vodene pare u funkciji ambijentalne temperature, hPa.

Koncentracije CH₄, CO₂ i O₂ analizirane su istovremeno, te je korigovana koncentracija za posmatrane komponente suvog biogasa izračunata prema jednačini 5. Koncentracija H₂S je zanemarena.

$$C_{\text{kor}}^{\text{s}} = C_{\text{CH}_4(\text{CO}_2, \text{O}_2)} * \frac{100}{C_{\text{CH}_4} + C_{\text{CO}_2} + C_{\text{O}_2}} \quad [5]$$

gde je:

- $C_{\text{kor}}^{\text{s}}$ – korigovana koncentracija komponente biogasa u suvom gasu, %,
- $C_{\text{CH}_4(\text{CO}_2, \text{O}_2)}$ – izmerena koncentracija metana (ugljen-dioksida, kiseonika) u gasu %.

Ukupno je sprovedeno 36 merenja prinosa bogasa tj. 36 reaktora je korišćeno za ispitivanje prinosa biogasa. Zbog kapaciteta inkubatora za 24 flaše, ispitivanje je podeljeno u dve serije. Po seriji je korišćeno 18 flaša s uzorcima kukuruzovine, 3 sa mikrokrystalnom celulozom i 3 samo sa inokulumom.

2.1.3 Statistička obrada rezultata

Dobijeni rezultati su statistički obrađeni da bi se utvrdila jedinstvena srednja vrednost prinosa metana specificirana po jedinici mase suve materije kukuruzovine koja je korišćena u daljem ispitivanju. Normalnost rezultata merenja, odnosno provera da li zadovoljavaju aproksimiranost normalnom raspodelom, testirana je *Shapiro-Wilk* testom normalnosti uz vrednost procenta intervala poverenja 95 % tj. nivoa značajnosti $p < 0,05$. Statistička obrada podataka je sprovedena koristeći softver IBM SPSS.

2.2 Generisanje ostatka fermentacije kontinualnim eksperimentom i ispitivanje fizičko-hemijskih karakteristika

2.2.1 Materijal

Za potrebe ispitivanja korišćena je kukuruzovina pripremljena za potrebe ispitivanja prinosa i sastava biogasa. Korišćeni inokulum je isti koji se koristio u drugoj seriji ispitivanja prinosa i sastava biogasa iz kukuruzovine, poglavlje 2.1.1. Fizičke karakteristike kukuruzovine i inokuluma navedene su u Tabeli 2.

Tabela 2 Vrednosti fizičkih karakteristika kukuruzovine i inokuluma korišćenih za kontinualni eksperiment

Uzorak	Kukuruzovina		Inokulum	
	Vrednost	St. dev.	Vrednost	St. dev.
SM, %	90,1	0,1	6,3	0,1
OSM, %	85,6	0,1	4,6	0,1
OSM, % SM	95,0	0,3	73,8	0,4

2.2.2 Metod

Pomoću kontinualnog eksperimenta generisan je ostatak fermentacije u kom je ispitan sadržaj i forma azota. Eksperiment je iskorišćen i da se utvrdi stepen razgradnje kukuruzovine pri anaerobnoj fermentaciji. Oba parametra su iskorišćena za potrebe analize životnog ciklusa korišćenja biogasa iz kukuruzovine objašnjeno u poglavlju 2.3.3.

Postavka eksperimenta je koncipirana tako da se anaerobnom fermentacijom kukuruzovine, uz praćenje uslova u fermentorima generiše ostatak fermentacije. Tokom

eksperimenta su u više navrata ispitivani sadržaj i forma azota, udeo SM i OSM ostatka fermentacije da bi se definisao njihov materijalni tok.

Generisanje ostatka fermentacije je zahtevalo uspostavljanje stabilnog procesa proizvodnje biogasa iz kukuruzovine. Bakterije metanogene faze najosetljivije su na poremećaje okolnih uslova, pa su zbog toga uslovi prilagođeni ovoj grupi bakterija, da bi se postigao najviši prinos biogasa i obezbedila stabilnost procesa. Sa tehničkog aspekta stabilnost podrazumeva ujednačen prinos biogasa, približno jednakog sastava, a sa biohemijskog približno ujednačen sastav i količinu produkata u svim fazama anaerobne digestije (Kaltschmitt i dr, 2016).

U ovom istraživanju, stabilnost procesa praćena je pomoću fizičkih i hemijskih parametara. Fizičke parametre je najjednostavnije kontrolisati, a najvažniji su: obezbeđenje anaerobnih uslova, mešanje sadržaja fermentora, održavanje temperature u fermentoru, kao i vreme zadržavanja u njemu, usklađeno sa količinom supstrata (Martinov i dr, 2011). Razlog za uspostavljanje anaerobnih uslova je taj što su metanogene bakterije izraziti anaerobi i odumiru u aerobnim uslovima. Mešanjem se ostvaruje kretanje mase unutar fermentora, omogućava se da supstrat dođe u kontakt sa bakterijama svih faza anaerobne fermentacije, poboljšava se njegovo zagrevanje, uspostavlja homogenost unutar njega i sprečava pojava kore. Temperatura kao faktor utiče na razvoj bakterija i samim tim na stepen i brzinu razgradnje supstrata. Opterećenje organskom materijom pokazuje koliko kilograma organske suve materije se dnevno unosi u jediničnu zapreminu fermentora. Od hemijskih parametara ističu se pH vrednost, alkalnost, parameter koji je odnos volatilnih masnih (organskih) kiselina i ukupnog neorganskog ugljenika i provodljivost. pH vrednost, tj. kiselost, treba da se održava u okviru optimalnih granica. U fermentorskoj masi nalazi se skup različitih grupa bakterija kojima pogoduju različite vrednosti pH, a literatura obiluje različitim vrednostima pH, često i kontradiktornim, a dobar pregled daje Rosato (2017). U praksi se pokazalo da pH treba održavati što bliže neutralnoj vrednosti 7, odnosno u opsegu od 7–8. Pad vrednosti pH ispod 7 ukazuje na zakišeljavanje sredine što vrlo često dovodi do prestanka anaerobne fermentacije. Alkalnost koja potiče od rastvorenih karbonata, bikarbonata, amonijaka, fosfata i drugih jedinjenja, obezbeđuje neophodni puferski kapacitet koji se protivi promeni pH vrednosti neutrališući potencijal intenzivnog generisanja volatilnih masnih kiselina da zakisele sadržaj fermentora. Najčešće volatilne masne kiseline koje nastaju tokom anaerobne fermentacije su sirćetna, propionska i izobuterna. Odnos volatilnih masnih kiselina i ukupnog neorganskog ugljenika (na nemačkom, *Flüchtige organische Säuren/Total anorganic Carbon*, FOS-TAC), veoma je često korišćen kontrolni parametar koji ukazuje na stabilnost procesa. Raspon vrednosti od 0,1 do 0,3 smatra se za optimalan, iako je to specifično za svako postrojenje. Vrednosti preko 0,7 smatraju se za kritične, Tabela 3. Provodljivost kao parametar je direktna posledica koncentracije soli u fermentoru. Optimalna vrednost za mezofilni temperaturni režim treba da je manja od 12 mS/cm (Rosato, 2017) i smatra se da uz tu vrednost, može da se očekuje 100 % potencijalne produkcije CH₄.

Tabela 3 Ocena vrednosti za FOS, TAC, FOS-TAC i pH (Rosato, 2017)

Stanje u fermentoru	FOS	TAC	FOS-TAC	pH
Normalan fermentor	2.100	9.000	0,23	7,8
Početak zakišeljavanja	3.300	8.300	0,40	7,6
Zakišeljjen fermentor	4.800	6.800	0,71	7,0
Prestanak fermentacije	7.300	3.800	1,92	5,6

Korišćena su tri kontinualna fermentora sa pratećom opremom *Lehmann Biogasomat BGM 3/5000 MT*, Slika 4a. Zapremina svakog od fermentora je 5 L. Temperatura unutar fermentora je održavana na 37 °C pomoću ugrađenog bojlera. Topla voda iz bojlera je pomoću pumpe distribuirana u zidove reaktora, temperatura unutar reaktora je merena namenskom temperaturnom sondom i ceo proces održavanja konstantne temperature je bio automatizovan kontrolnom jedinicom. Svaki reaktor je bio opremljen mešalicom na poklopcu reaktora koje su pogonjene sopstvenim elektro motorima od 20 W. Mešalice su radile tokom celog trajanja eksperimenta osim u momentima kada se sprovodilo unošenje kukuruzovine i vode ili uzimani uzorci za potrebe analize parametara fermentacije.

Unošenje kukuruzovine i vode u reaktor je realizovano pomoću cevi na poklopcu reaktora koja se na vrhu zatvarala pomoću čepa. Masa kukuruzovine koja se svakodnevno unosila u reaktor je varirala tokom trajanja eksperimenta, a zavisila je od organskog opterećenja reaktora. Prema procedurama definisanim u uputstvu (VDI, 2006), početno organsko opterećenje reaktora treba da je 0,5 kgOSM/m³dan, a povećava se za 0,5 kgOSM/m³dan kada se prinos gasa ustali. Povećanje organskog opterećenja se sprovodi dok se ne primeti preopterećenost reaktora tj. dok ne dođe do pada produkcije biogasa. Unos vode zavisio je od mase unete kukuruzovine tako da je mešavina vode i kukuruzovine sadržala istu količinu suve materije kao i fermentorska masa.

Proizvedeni biogas je sproveden do tečnosti u staklenoj flaši koja je mešavina sumporne kiseline (H₂SO₄), natrijum karbonata dekahidrata i metil oranža (tečnost napravljena u skladu sa DIN 38414, deo 10 standardom, lična komunikacija sa Bauer Alexanderom – Univerzitet BOKU, Beč). Svrha tečnosti je bila da izdvoji vlagu iz proizvedenog biogasa koja se kondenzuje u flaši. Proizvedeni biogas je dalje proticao kroz protokomere *Ritter MilliGascounter MGC-1 PVDF* na kojima se očitavala količina proteklog (proizvedenog) biogasa. Protokomeri su bili podešeni tako da pokazuju minimalno 3,13 ml proteklog biogasa. Zatim je biogas sakupljan u aluminijumskim kesama zapremine 5 L. Svi delovi međusobno su bili povezani silikonskim crevima kroz koje je proticao proizvedeni biogas. Koncentracija CH₄, CO₂, O₂ i H₂S u biogasu je određivana gasnim analizatorom *Geotech BIOGAS 5000*. Preračunavanje rezultata prinosa i sastava gasa na normalne uslove sprovedena je u skladu sa navedenim principima u poglavlju 2.1.2.

Vreme trajanja eksperimenta je zavisilo od uslova u reaktorima i vrednostima operacionih parametara. U reaktore je 17.03.2018. unešeno 4 L inokuluma. Prvi unos kukuruzovine i vode sproveden je 20.03.2018. Svakodnevno je očitavana vrednost proizvedenog gasa na protokomerima i za svaku kesu se određivala koncentracija komponenti biogasa. Uslovi u reaktorima su praćeni pomoću ranije navedenih hemijskih parametara:

- pH,
- sadržaj organskih kiselina (FOS),
- ukupan neorganski ugljenik (TAC),
- FOS-TAC,
- provodljivost, mS/cm,

Uzorci za potrebe analize prva četiri navedena parametra uzimani su jednom nedeljno direktno iz reaktora. Količina jednog uzorka je iznosila 40 mL. pH vrednost uzorka je merena koristeći pH sondu automatskog titratora *SI Analytics Titroline 6000*. pH sonda je prvobitno kalibrisana u dve tačke kalibracije pH 4,0 i pH 7,0. Nakon toga, 20 ml uzorka je odmeravano i korišćeno za analizu sadržaja organskih kiselina, ukupnog neorganskog ugljenika i FOS-TAC-a koristeći pomenuti automatski titrator, Slika 4b, a u skladu sa metodom kompanije *SI Analytics* za njihovo određivanje. Za titraciju je korišćen 0,1 N rastvor sumporne kiseline. Metod podrazumeva titraciju uzorka u dve tačke, do pH 5,0 i pH

4.4. Zatim su se na osnovu potrošnje rastvora sumporne kiseline do navedenih tačaka titracije, koristile jednačina 6 i 7 za proračun sadržaja organskih kiselina, ukupnog neorganskog ugljenika i FOS-TAC-a kao njihovog količnika:

$$\text{TAC} = \text{ml H}_2\text{SO}_4 \text{ do pH } 5,0 * 250 \quad [6]$$

$$\text{FOS} = (\text{ml H}_2\text{SO}_4 \text{ od pH } 5,0 \text{ do pH } 4,4 * 1,66 - 0,15) * 500 \quad [7]$$

Provodljivost unutar reaktora merena je pomoću namenskog uređaja HI 9033 uranjanjem sonde u reaktor.



a)



b)

Slika 4 a) Postavka eksperimenta za kontinualnu anaerobnu fermentaciju: 1-bojler, 2-kontrolna jedinica, 3-reaktor, 4-mešač, 5-tečnost za uklanjanje vlage, 6-protokomer, 7-kesa; b) automatski titrator za određivanje FOS-TAC-a

Analiza ostatka fermentacije na sadržaj i forme azota, udeo SM i OSM je sprovedena četiri puta, na početku eksperimenta, približno nakon 40 dana od početka eksperimenta, zatim 80 dana, a poslednje merenje nakon završetka eksperimenta i otvaranja fermentora. Korišćene su metode objašnjene u poglavlju 2.2.4.

Projekcije materijalnog toka SM, OSM, i azota za inokulum, kukuruzovinu i ukupnu masu, formirane su na osnovu rezultata vrednosti merenja prinosa i sastava biogasa (uzimajući i vlagu u gasu u razmatranje), SM i OSM mase koja je napuštala fermentore za potrebe analiza hemijskih parametara. Procena hidrauličkog retencionog vremena (HRT) kukuruzovine unutar fermentora sprovedena je tako što je svaka dnevna količina unete SM

kukuruzovine pomnožena sa brojem dana od trenutka unosa do trenutka završetka eksperimenta, a zatim suma svih tih proizvoda podeljena sa ukupnim unosom SM kukuruzovine. Stepen razgradnje kukuruzovine je utvrđen na osnovu odnosa nerazgrađene količine kukuruzovine i količine kukuruzovine unete u fermentore, jednačina 8.

$$\eta_{SM} = \frac{SM_{sup} * m_{un} - SM_{iz} * m_{iz}}{SM_{sup} * m_{un}} * 100\% \quad [8]$$

gde je:

- η_{SM} – stepen razgradnje suve materije
- SM_{sup} – udeo SM u unetoj kukuruzovini, %,
- m_{un} – uneta masa kukuruzovine, g,
- SM_{iz} – udeo SM u ostatku fermentacije kukuruzovine, %,
- m_{iz} – količina ostatka fermentacije kukuruzovine, g.

Statistička obrada podataka podrazumevala je da se za tri vrednosti merenja svakog analiziranog parametra koji proističu od postojanja tri paralelna fermentora utvrdi srednja vrednost i standardna devijacija merenja. U slučaju vrednosti do kojih se dolazilo računskim putem i eksperimentalnim merenjima, određivana je relativna greška računskog pristupa.

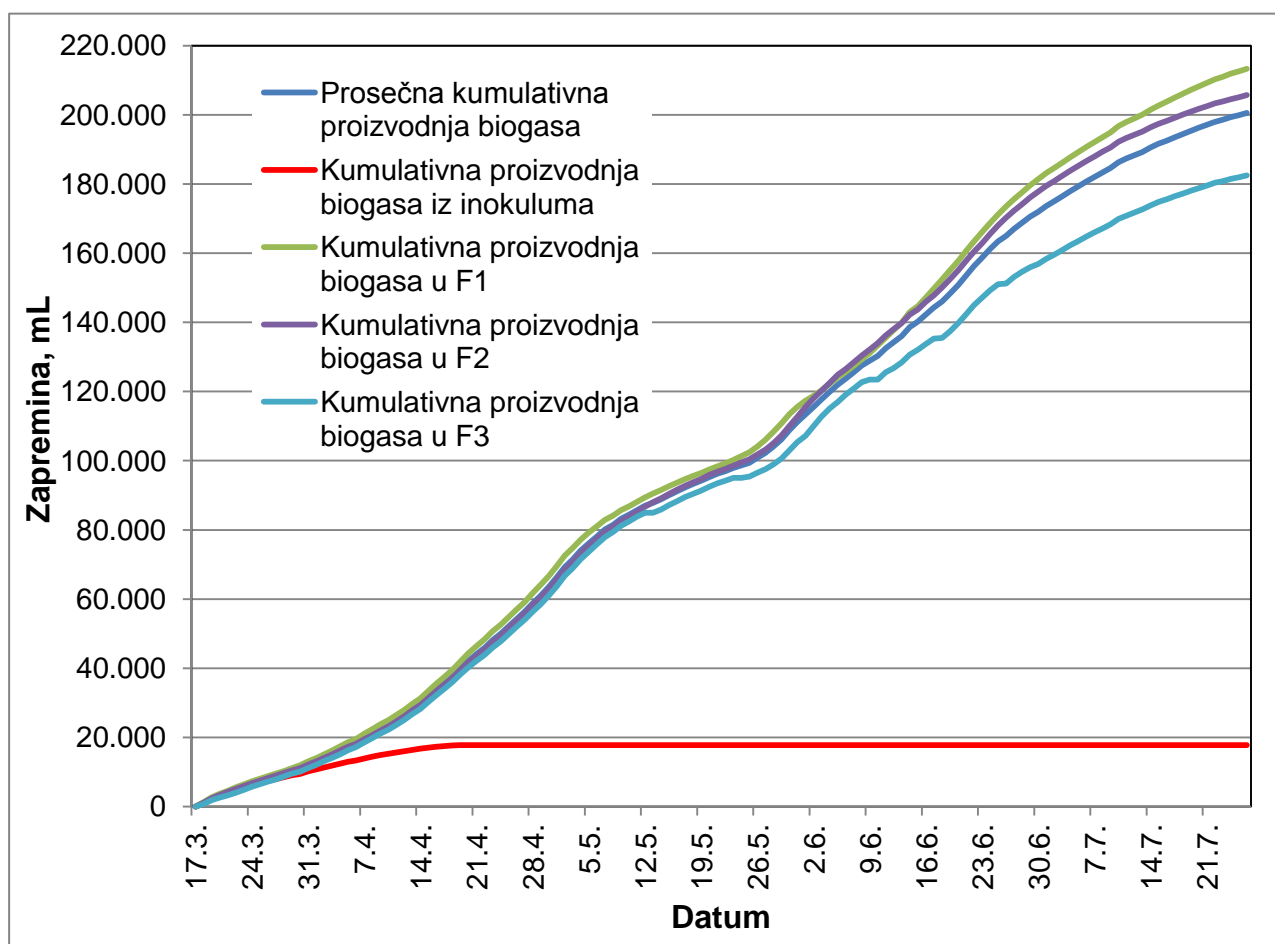
Tok eksperimenta

U toku prva dva dana nakon startovanja kontinualnog eksperimenta, u sva tri fermentora intenzivno je generisan biogas iz inokuluma, a trećeg dana je proizvodnja naglo opala. Pretpostavljeno je da nakon toga ravnomerno dolazi do opadanja proizvodnje biogasa poreklom iz inokuluma i da je kumulativna količina biogasa proizvedena zaključno sa petom nedeljom od početka eksperimenta, Grafik 5. Pri tome je uzeto u obzir da prinos biogasa odgovara vrednosti prinosa biogasa za taj inokulum u šaržnim uslovima, Prilog 4, inokulum 2. Pregled produkcije gasa po fermentorima dat je na Grafiku 6.

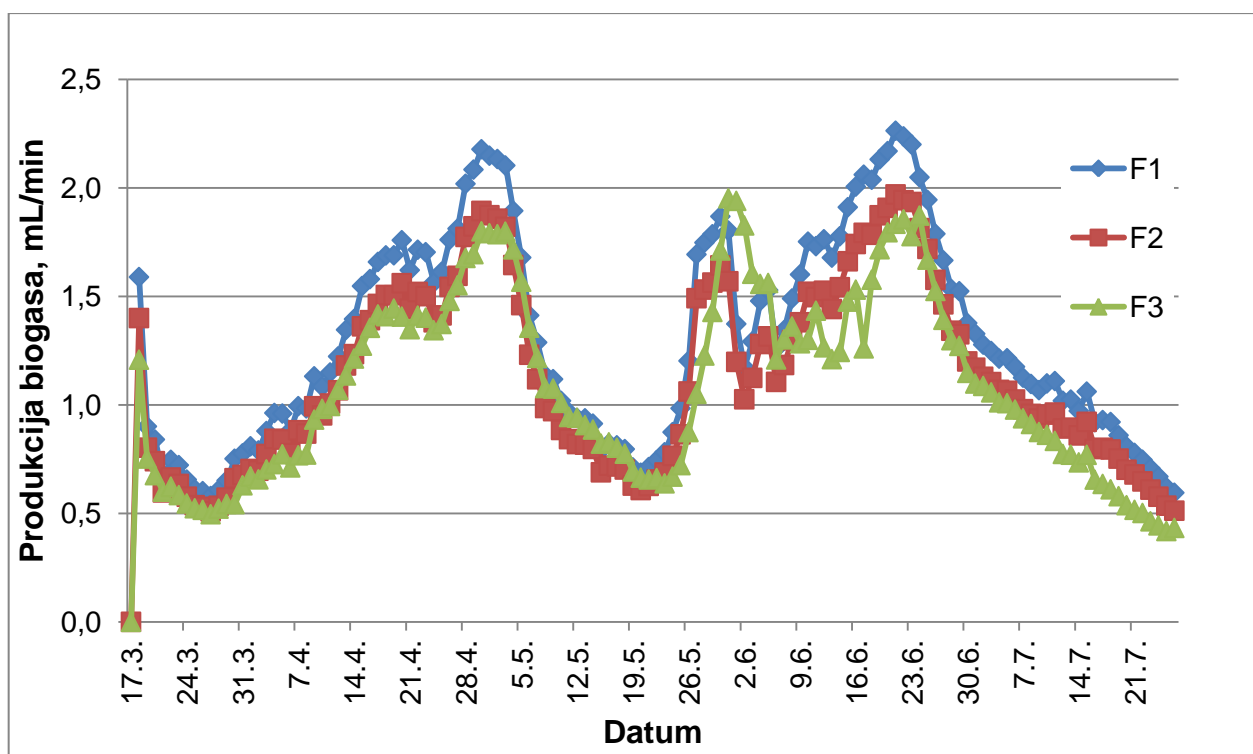
Nakon završetka intenzivne proizvodnje biogasa iz inokuluma, počinje unošenje kukuruzovine u količini kojom se realizuje organsko opterećenje fermentora od 0,5 kgOSM/m³dan (1,71 g/dan), Grafik 7. Taj intenzitet hranjenja fermentora je nastavljen do momenta stabilizacije produkcije biogasa u fermentorima na približno 0,6 ml/min. Postupno dolazi do povećanja unosa kukuruzovine u vrednosti opterećenja organskom materijom od 2 kgOSM/m³dan i stabilizacije prosečne produkcije biogasa od 1,8 ml/min. Ujedno je unos vode tako definisan da se postepeno povećava sadržaj suve materije fermentora od početnih 6,5 do planiranih 10 %, koja je približna vrednost realnog sadržaja SM u poljoprivrednim biogas postrojenjima. Pri tome, fizičko-hemijski parametri u svim fermentorima su bili stabilni i zadovoljavajućih vrednosti, Tabele 4–6. Udeo metana takođe se stabilizovao na vrednost od približno 50 %, Grafik 8.

Nakon postizanja stabilnih uslova u fermentorima i ujednačene proizvodnje biogasa, intenziviran je unos kukuruzovine, organsko opterećenje je bilo 2,5 kgOSM/m³dan (8,55 g/dan), da bi nakon dva dana (ukupno 48 dana) došlo do značajnog pada produkcije biogasa. Udeo SM u fermentorima dostiže vrednost od 9 %, što se pokazuje kao visoka

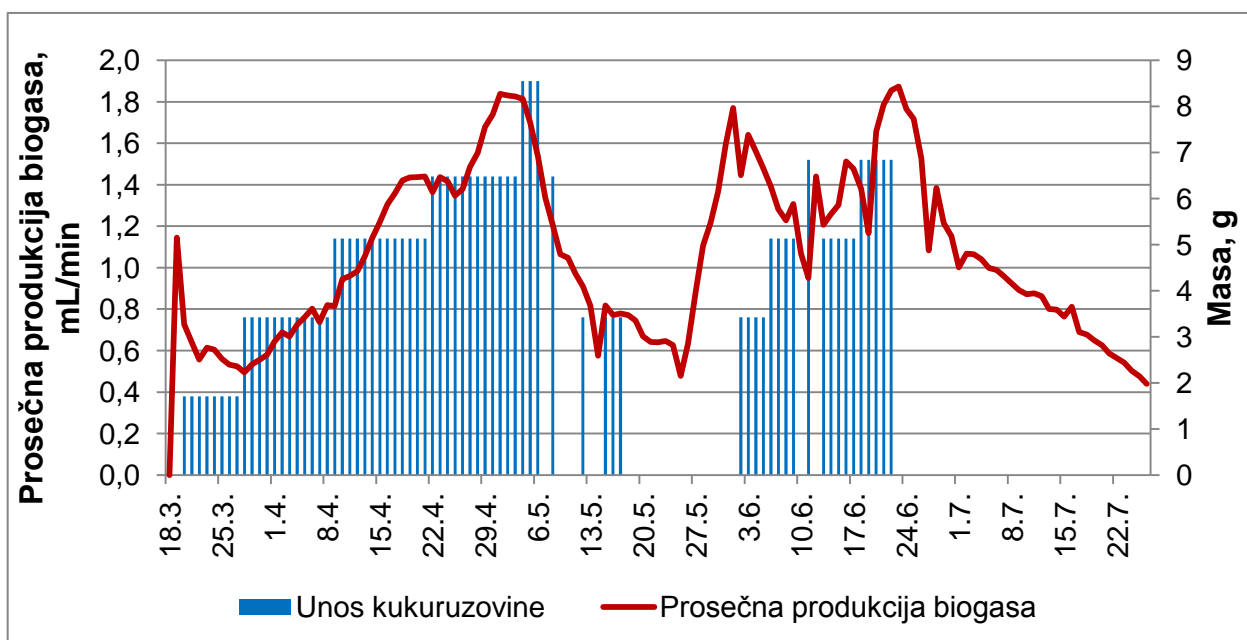
vrednost za korišćene eksperimentalne fermentore. Vrednost FOS-TAC od prvobitno stabilnih vrednosti u sva tri fermentora koje su iznosile do 0,2, počinje da raste da bi sredinom maja dostigla u sva tri fermentora vrednost između 0,5–0,6, Grafik 9. Pri tome, koncentracija organskih kiselina raste i dostiže vrednost 3 do 4 puta višu od ranije zabeleženih stabilnih 1.500–2.000. Usled povećane koncentracije organskih kiselina, dolazi do smanjenja bikarbonata i drugih jedinjenja koje obezbeđuju puferski kapacitet fermentora, te vrednost TAC opada u sva tri fermentora do kritičnih vrednosti što se i odražava na sniženje pH vrednosti u fermentorima u ovom periodu. Iz tog razloga je u dva navrata dodato po tri grama natrijum hidrogen-karbonata (soda bikarbona) da se poveća koncentracija bikarbonata, ali to za posledicu ima nemogućnost utvrđivanja vrednosti FOS-TAC usled povećane koncentracije TAC. U toku te dve nedelje kada dolazi do zakišeljavanja sva tri fermentora, dodaje se i voda povremeno da se smanji udeo SM u fermentorima. Oko 70-og dana od početka eksperimenata, stabilizuju se uslovi u fermentorima, udeo suve materije je snižen na približno 8 % i počinje intenzivna proizvodnja biogasa. Karakteristično za narednih par dana bilo je da udeo metana u proizvedenom biogasu dostiže vrednosti i od 72 % što je posledica visoke koncentracije organskih kiselina u trenucima problema u fermentorima.



Grafik 5 Kumulativna proizvodnja biogasa u fermentorima, prosečna kumulativna proizvodnja biogasa i kumulativna proizvodnja biogasa iz inokuluma

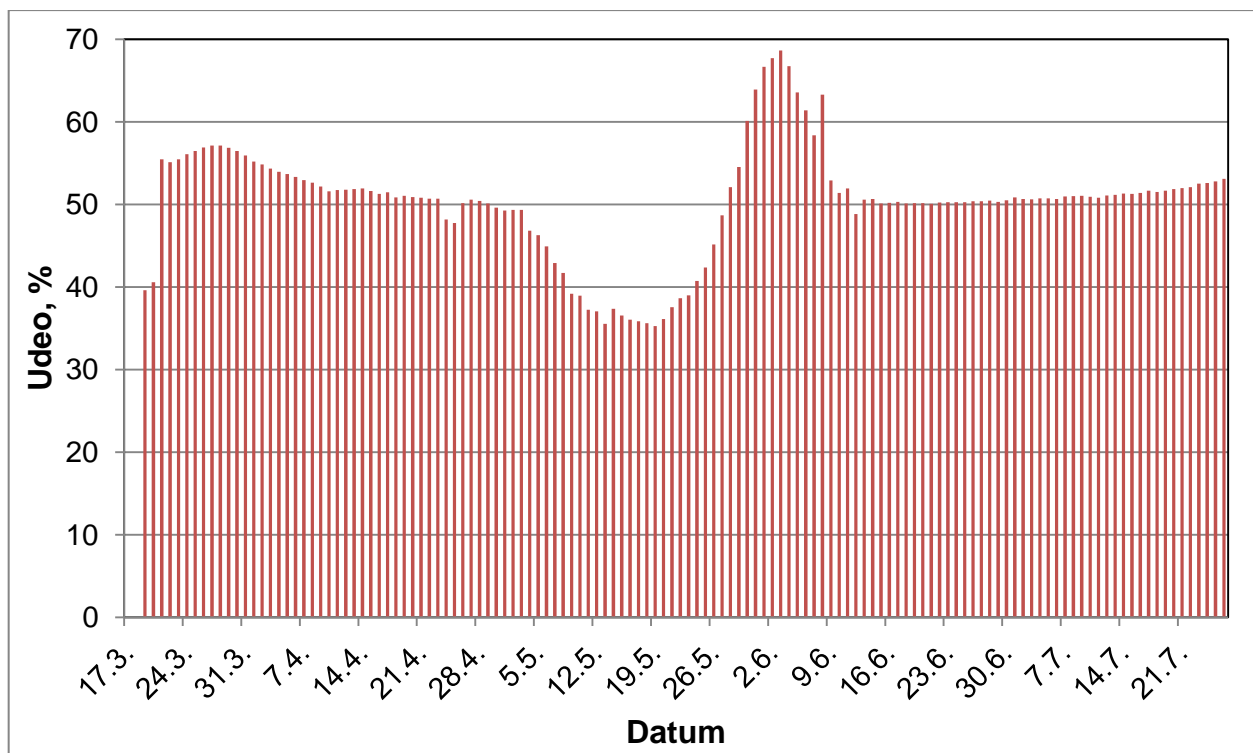


Grafik 6 Vrednosti produkcije biogasa u fermentorima



Grafik 7 Kretanje prosečne produkcije biogasa u odnosu na unos kukuruzovine u fermentore

Stabilnost je dostignuta u narednih nekoliko dana da bi se zatim nastavilo sa unosom kukuruzovine koji odgovara organskom opterećenju vrednosti 1, 1,5 i 2 gOSM/m³dan. Ponovo je dostignuta specifična produkcija biogasa od prosečnih 1,9 mL/min. Udeo SM u fermentorima tada iznosi približno kao i na početku eksperimenta.



Grafik 8 Prosečni udeo metana u proizvedenom biogasu

Tabela 4 Vrednosti hemijskih parametara tokom eksperimenta u fermentoru 1

Datum	FOS	TAC	FOS-TAC	pH	Provodljivost, mS/cm
20-Mar	2.022,4	10.182,3	0,20	7,95	nm
27-Mar	4.665,9	6.682,0	0,70	7,80	nm
3-Apr	1.191,6	7.706,5	0,15	7,75	nm
10-Apr	1.182,4	8.063,3	0,17	7,80	nm
17-Apr	1.431,4	8.334,5	0,17	7,85	nm
24-Apr	1.298,6	8.507,5	0,15	7,91	nm
3-Maj	1.482,1	7.678,5	0,19	7,78	nm
8-Maj	1.812,4	7.334,3	0,25	7,53	nm
10-Maj	2.056,4	7.255,3	0,28	7,73	nm
14-Maj	3.450,0	6.068,3	0,57	7,68	nm
22-Maj	neuspelo	neuspelo	neuspelo	neusp.	nm
28-Maj	5.977,4	11.719,3	0,51	7,81	nm
1-Jun	3.069,9	13.852,3	0,22	7,98	16,1
4-Jun	2.602,6	13.796,8	0,19	7,80	17,9
11-Jun	2.461,5	12.752,8	0,19	7,61	16,4
19-Jun	2.084,1	11.513,0	0,18	7,55	15,3
25-Jun	2.469,6	10.986,5	0,22	7,55	14,2
26-Jul	2.147,7	10.887,8	0,20	7,70	16,8

nm – nije mereno

Tabela 5 Vrednosti hemijskih parametara tokom eksperimenta u fermentoru 2

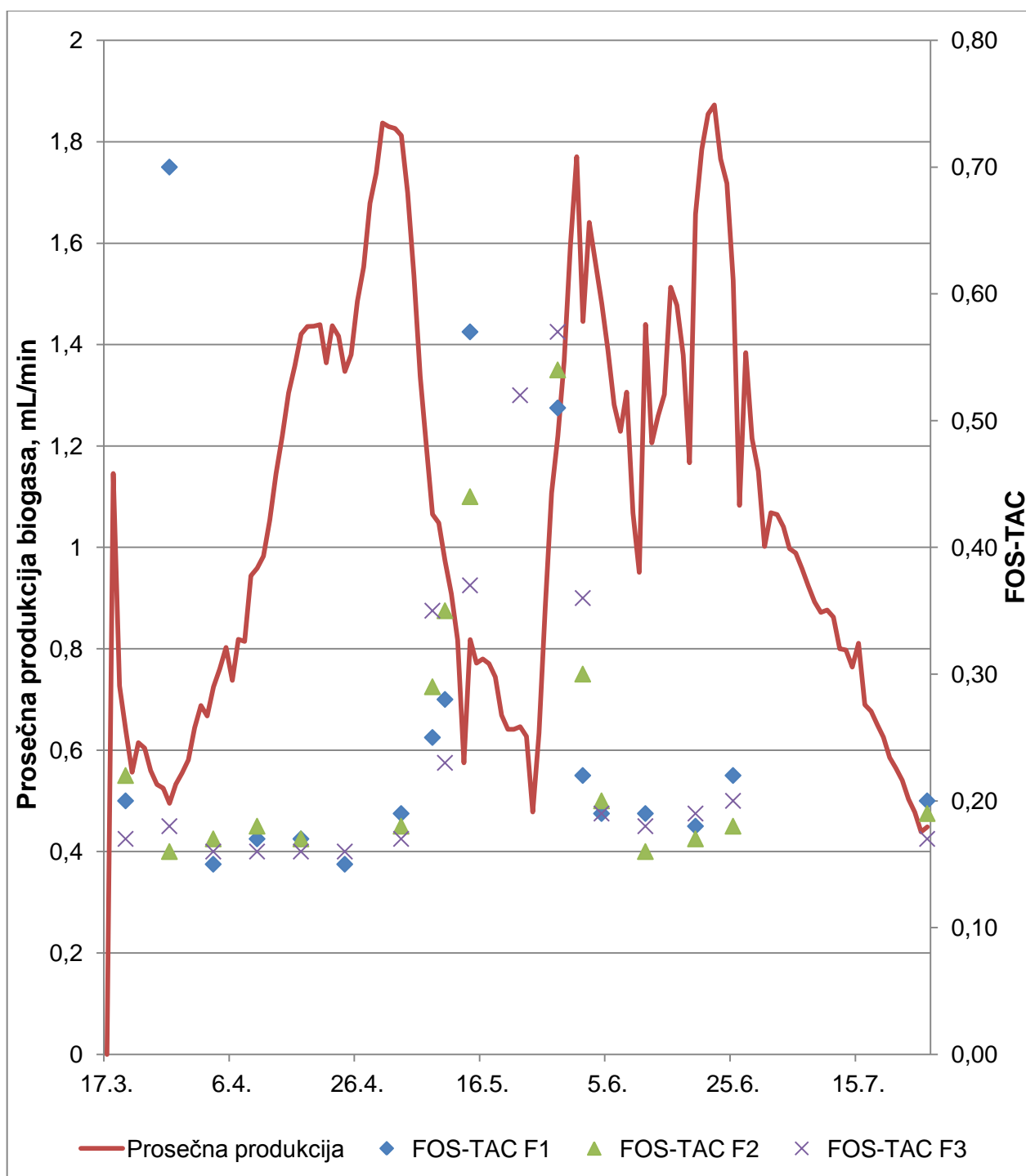
Datum	FOS	TAC	FOS-TAC	pH	Provodljivost, mS/cm
20-Mar	2.193,4	10.126,5	0,22	7,94	nm
27-Mar	1.317,7	7.998,2	0,16	7,85	nm
3-Apr	1.366,7	8.040,5	0,17	7,88	nm
10-Apr	1.487,1	8.124,7	0,18	7,81	nm
17-Apr	1.449,7	8.702,0	0,17	7,90	nm
24-Apr	neuspelo	neuspelo	neuspelo	7,87	nm
3-Maj	1.388,3	7.605,0	0,18	7,83	nm
8-Maj	2.085,5	7.263,2	0,29	7,66	nm
10-Maj	1.997,5	5.691,7	0,35	7,80	nm
14-Maj	2.722,9	6.232,7	0,44	7,63	nm
22-Maj	neuspelo	neuspelo	neuspelo	nm	nm
28-Maj	6.081,0	11.168,0	0,54	7,83	nm
1-Jun	3.905,7	12.846,7	0,30	7,95	16,1
4-Jun	2.610,9	13.098,3	0,20	7,88	17,9
11-Jun	3.148,7	19.654,3	0,16	7,63	16,4
19-Jun	2.000,0	11.640,0	0,17	7,50	15,2
25-Jun	2.033,2	11.559,5	0,18	7,77	14,2
26-Jul	2.153,0	11.258,0	0,19	7,70	16,8

nm – nije mereno

Tabela 6 Vrednosti hemijskih parametara tokom eksperimenta u fermentoru 3

Datum	FOS	TAC	FOS-TAC	pH	Provodljivost, mS/cm
20-Mar	1.761,8	10.373,5	0,17	7,92	nm
27-Mar	1.452,0	8.119,7	0,18	7,81	nm
3-Apr	1.304,5	8.204,0	0,16	7,84	nm
10-Apr	1.352,6	8.477,2	0,16	7,87	nm
17-Apr	1.412,4	8.755,2	0,16	7,85	nm
24-Apr	1.534,4	9.611,5	0,16	7,50	nm
3-Maj	1.504,5	8.674,0	0,17	7,86	nm
8-Maj	2.579,3	7.287,0	0,35	7,58	nm
10-Maj	1.689,6	7.240,0	0,23	7,77	nm
14-Maj	2.449,0	6.648,2	0,37	7,73	nm
22-Maj	6.750,6	12.906,5	0,52	7,68	nm
28-Maj	6.276,9	10.926,5	0,57	7,71	nm
1-Jun	4.499,9	12.442,0	0,36	7,85	15,5
4-Jun	2.429,9	13.065,2	0,19	7,94	17,9
11-Jun	2.884,8	16.004,7	0,18	0,00	17,1
19-Jun	2.196,0	11.519,0	0,19	7,70	16,8
25-Jun	2.273,0	11.555,2	0,20	7,81	17,9
26-Jul	1.955,2	11.279,0	0,17	7,90	16,1

nm – nije mereno



Grafik 9 Vrednosti prosečne produkcije biogasa i FOS-TAC u sva tri fermentora

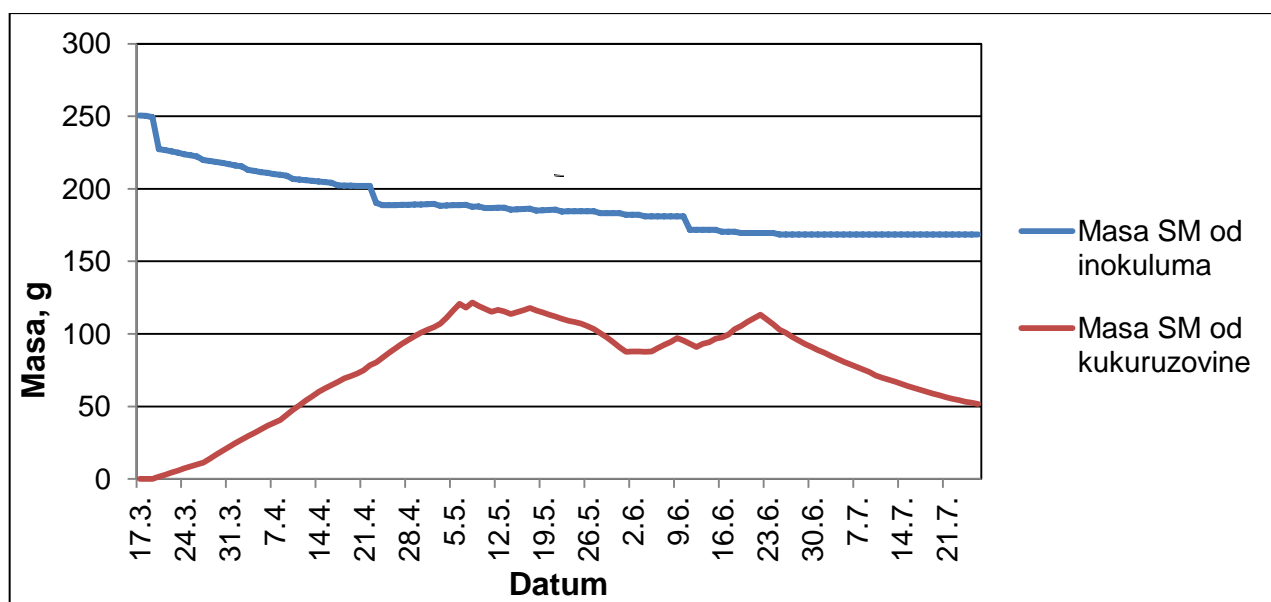
Nakon 130 dana eksperimenta, kumulativna proizvodnja biogasa dostigla je najviši nivo u fermentoru 1 (F1), 213.341 mL, zatim fermentoru 2 (F2), 205.704 mL, i na kraju fermentoru 3 (F3), 182.538 mL (vrednosti su normalizovane i svedene na suvi gas). Smatrano je da je kumulativna proizvodnja biogasa iz inokuluma iznosila je 17.603 mL biogasa, odnosno 9.686 mL metana. U toku eksperimenta ukupno je uneto u svaki od fermentora 311,46 g suve materije kukuruzovine (345,87 g sveže mase) karakteristika ranije navedenih u Tabeli 2. Prosečan prinos biogasa generisanog iz kukuruzivne iznosio je 587,3 Nm³/tSM, odnosno 294,8 Nm³/tSM metana (50,2 % udeo metana).

Navedeni prinos metana ostvaren u kontinualnim uslovima iznosi 120–125 % prinosa ostvarenog pomoću šaržnog eksperimenta. Prosečno retenciono vreme OSM kukuruzovine iznosilo je 81 dan, što je i potencijalan razlog za tako visok prinos. Kao što je navedeno u poglavlju 3.1, prinos metana specificiran po SM kukuruzovine dostiže visok prinos od oko 330 Nm³/tSM, uz stepen razgradnje OSM i preko 90 %, jedino u slučaju primene složenijih predtretmana kukuruzovine (Lizasoain i dr, 2017; Zhong i dr, 2011). Svrha predtretmana je da se struktura lignina ošteti i celuloza i hemiceluloza učini dostupnijom za mikroorganizme. Lignin jeste podložan razgradnji od strane anaerobnih mikroorganizama, ali potrebno vreme za to ga čini balasnom materijom u slučaju proizvodnje biogasa. Retenciono vreme u realnim biogas postrojenjima bi trebalo da iznosi bar 50 dana, ali nisu retki slučajevi u praksi da bude i kraće. Produženje zadržavanja usitnjene kukuruzovine i drugih sličnih lignoceluloznih materijala značilo bi izgradnju većih fermentora te veće investicione troškove. S obzirom da bi kukuruzovina morala da se koristi kao kosupstrat, isplativost ovakve strategije zahtevalo bi posebnu analizu slučaja.

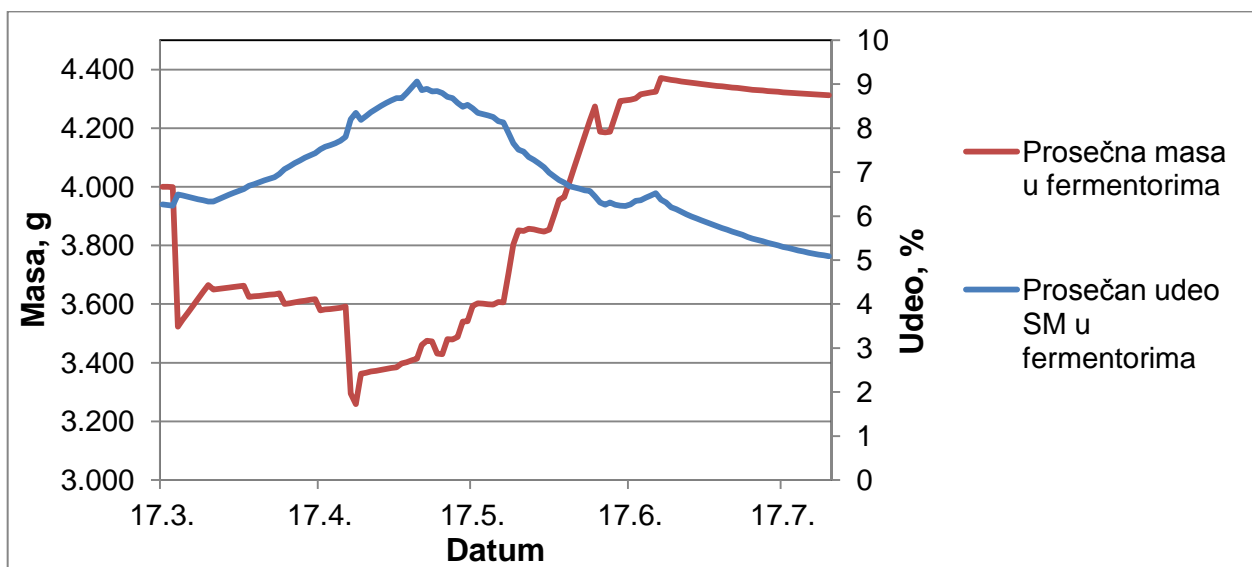
Analizom materijalnih tokova, definisana je promena količine SM i OSM kukuruzovine i inokuluma kao i odnos njihove međusobne mase u fermentorima. Promena količine SM poreklom od kukuruzovine prikazana je na Grafici 10 i 11. Tokom eksperimenta, postojao je problem uzorkovanja ostatka fermentacije i fermentorske mase. Zbog veličine otvora za ispuštavanje ostatka fermentacije i njegove pozicije na samom dnu fermentora, masa koja je ispuštana za potrebe analiza nije imala reprezentativni sadržaj. Pretpostavlja se da je to usled taloženja mase na dnu fermentora koja se ponašala kao filter i propuštala praktično proceđeni sadržaj kroz otvor na fermentorima. U slučaju uzorkovanja fermentorske mase, pipetiranje mase zbog veličine usisnog nastavka isto nije moglo da omogući uzorkovanje i krupnijih suspendovanih čestica u fermentorskoj masi koje su se koncentrisale u površinskom sloju unutar fermentora, Slika 5b. Usled ova dva razloga, rezultati analize uzoraka ostatka fermentacije i fermentorske mase imali su niži sadržaj SM nego što je on bio u fermentorima. Relativna greška između prosečnog krajnjeg sadržaja SM i OSM koji je definisan na osnovu analize materijalnih tokova i onog dobijenog merenjima nakon završetka eksperimenta iznosila je 5,6 %.

Tabela 7 Vrednosti prinosa i sastava biogasa iz kukuruzovine tokom kontinualnog eksperimenta

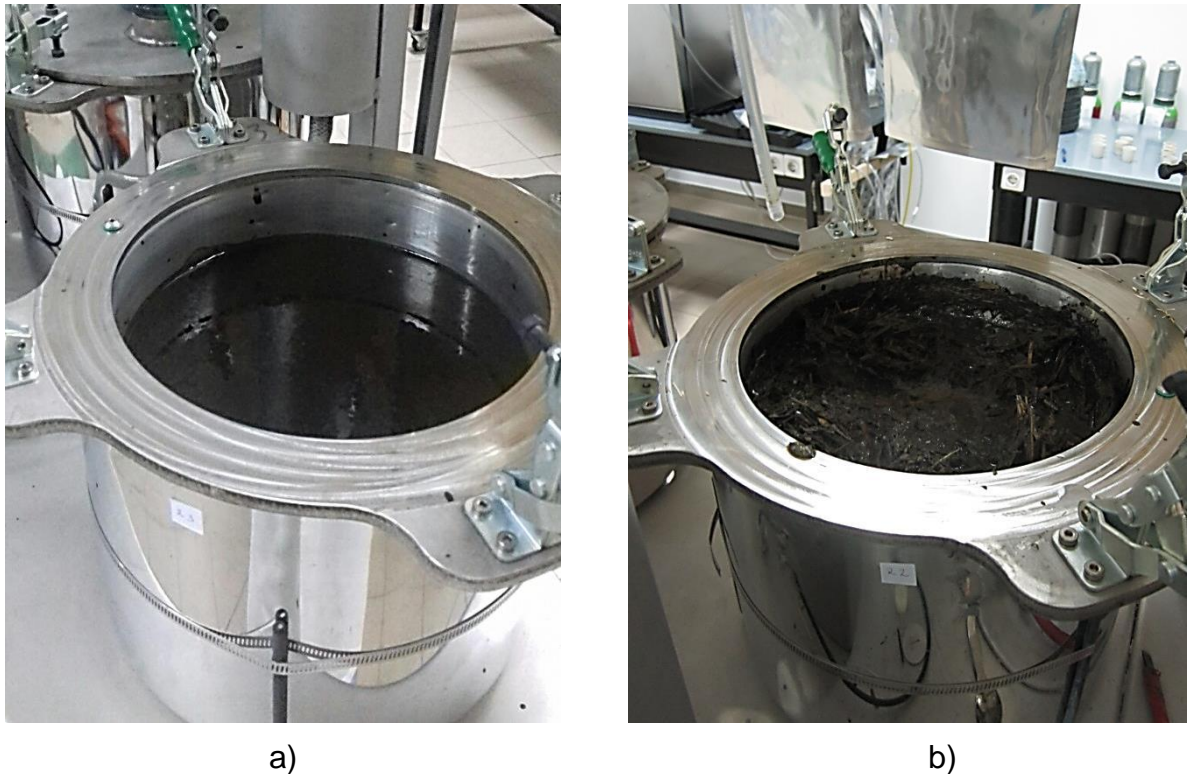
Parametar	F1	F2	F3	Prosek	St. dev.
Prinos biogasa, Nm ³ /tSvM	565,9	543,8	476,9	528,9	46,4
Prinos biogasa, Nm ³ /tSM	628,5	603,9	529,6	587,3	51,5
Prinos biogasa, Nm ³ /tOSM	661,4	635,6	557,3	618,1	54,2
Prinos metana, Nm ³ /tSvM	282,7	273,1	240,5	265,4	22,1
Prinos metana, Nm ³ /tSM	313,9	303,3	267,1	294,8	24,5
Prinos metana, Nm ³ /tOSM	330,3	319,1	281,1	310,2	25,8
Udeo metana, %	49,9	50,2	50,4	50,2	0,2



Grafik 10 Prosečan tok mase suve materije poreklom od inokuluma i kukuruzovine u fermentorima



Grafik 11 Prosečan tok ukupne mase i prosečan udeo suve materije u fermentorima



Slika 5 Izgled sadržaja fermentora za kontinualni eksperiment a) Pri započinjanju eksperimenta, b) Nakon završetka eksperimenta

2.2.3 Utvrđivanje sadržaja i forme azota

U toku trajanja eksperimenta, dva puta su uzorkovani ostaci fermentacije u sva tri fermentora i još jedan put na kraju, nakon otvaranja fermentora.

Ispitivanje sadržaja i forme azota u ostatku fermentacije je sprovedeno na Institutu za ratarstvo i povrtarstvo u Novom Sadu. Primenjeni su sledeći SRPS standard i analitičke metode, prema Pravilniku o uslovima za razvrstavanje i utvrđivanje kvaliteta sredstava za ishranu bilja, odstupanjima sadržaja hranljivih materija i minimalnim i maksimalnim vrednostima dozvoljenog odstupanja sadržaja hranljivih materija i o sadržini deklaracije i načinu obeležavanja sredstava za ishranu bilja (Sl. gl. RS broj 30/2017):

- Metoda za određivanje ukupnog azota (CNS elementarana analiza) DM 8/1-3-091,
- Sadržaj amonijačnog i nitratnog azota: Metoda br. 3.3 – ispitivanje različitih oblika azota u istom uzorku, Pravilnik (Sl. gl. RS 84/2017).

2.3 Utvrđivanje ušteda emisija GHG iskorišćenja biogasa

2.3.1 Pristup RED metoda

Korišćenje biogasa kao biometana

Utvrđivanja stvarne vrednosti emisija GHG i uštede emisija u slučaju korišćenja biogasa kao biometana sprovodi se korišćenjem jednačina 1 i 2 RED metoda, navedenih u aneksu RED direktive. Suština ovog metoda je da se ukupna vrednost emisije GHG utvrdi na osnovu pojedinačnih vrednosti emisija karakterističnih za faze u okviru životnog ciklusa analiziranog biogoriva:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} \quad [9]$$

- e_{ec} – emisije iz kultivacije ili ekstrakcije sirovina,
- e_l – emisije usled promene količine ugljenika nastale zbog promene korišćenja zemljišta,
- e_p – emisije iz procesiranja,
- e_{td} – emisije iz transporta i distribucije,
- e_u – emisije iz korišćenja,
- e_{sca} – uštede emisija nastale kroz akumulaciju ugljenika usled unapređenja poljoprivredne proizvodnje,
- e_{ccs} – uštede emisija kroz zarobljavanje ugljenika i geološka skladišta,
- e_{ccr} – uštede emisija kroz zarobljavanje ugljenika i zamenu,
- E – ukupna emisija GHG.

Ušteda emisija GHG se zatim izračunava pomoću jednačine:

$$\text{ušteda} = (E_{F(t)} - E_B) / E_{F(t)} \quad [10]$$

- E_B – ukupna emisija GHG biogoriva, odnosno vrednost E izračunata pomoću jednačine 9,
- E_F – ukupna emisija GHG fosilnog komparatora koja iznosi 72 gCO_{2ekv}/MJ za slučaj ubrizgavanja biometana u mrežu prirodnog gasa.

U jednačini za ukupnu emisiju GHG, određeni broj članova u slučaju iskorišćenja kukuruzovine za proizvodnju biogasa može da se smatra da je jednak nuli. Vrednost emisije usled promene količine ugljenika nastale zbog promene korišćenja zemljišta, e_l , obračunava se jedino ukoliko, na primer, dolazi do konverzije nepoljoprivrednog zemljišta u poljoprivredno, što je retko slučaj. Na ovaj način omogućava se da direktna promena namene zemljišta (na engleskom, *Direct Land Use Change* –DLUC) bude uključena u obračun GHG emisija. Sve uštede emisija, e_{sca} , e_{ccs} , e_{ccr} , e_{ee} , takođe imaju nultu vrednost. e_{sca} ima vrednost 45 g CO_{2ekv}/MJ za stajnjak (European Commission, 2018). Dakle, od

interesa su samo faze ekstrakcije ili kultivacije sirovina, procesiranja i transporta i distribucije.

Ukoliko se emisije GHG za fazu e_{ec} izražavaju u gCO_{2ekv}/tSM (suve materije) supstrata, konverzija u gCO_{2ekv}/MJ goriva se sprovodi na sledeći način:

$$e_{ec \text{ goriva } a} = \frac{e_{ec \text{ supstrata } a}}{DTM_a} * \text{gorivo supstrat faktor}_a * \text{alokacioni faktor gorivo}_a \quad [11]$$

$$\text{alokacioni faktor gorivo}_a = \frac{\text{energija goriva}}{\text{energija goriva} + \text{energija koprodukta}} \quad [12]$$

Gorivo supstrat faktor je odnos MJ supstrata potrebnog za generisanje 1 MJ goriva.

Emisije po toni suve materije supstrata se obračunavaju prema sledećoj jednačini s tim da je $e_{ec \text{ supstrata } a}$ izraženo u gCO_{2ekv}/t sveže materije:

$$e_{ec \text{ supstrata } a} = \frac{e_{ec \text{ supstrata } a}}{1 - \text{sadržaj vlage}} \quad [13]$$

Standard CEN/TS 16214-4: 2014, u određenoj meri, detaljnije definiše faze u okviru životnog ciklusa biogoriva, ali definiše, nepotpuno, međusobnu korelaciju sa fazama definisanim u RED metodu.

Korišćenje biogasa za generisanje električne energije

Utvrđivanja stvarne vrednosti emisija GHG i uštede emisija u slučaju korišćenja biogasa za generisanje električne energije sprovedi se korišćenjem modifikovanih jednačina za slučaj biogoriva, navedenih u novoj RED direktivi, kojem su prethodili Radni dokumenti Evropske Komisije COM(2010)11 i SWD(2014)259 (European Commission, 2014, 2010). Kao i u slučaju biogoriva, suština ovog metoda je da se ukupna vrednost emisije GHG utvrdi na osnovu pojedinačnih vrednosti emisija karakterističnih za faze u okviru životnog ciklusa analiziranog načina generisanja energije, s tim da se u obzir uzima i stepen efikasnosti energetske konverzije. Vrednost emisija GHG pre energetske konverzije obračunavaju se na osnovu ranije navedene jednačine 9. Dobijene vrednosti emisija GHG su na ovaj način specificirane po MJ proizvedenog biogasa. U sledećem koraku uzima se u obzir konverzija energije biogasa u finalni energetski produkt, pa tako u slučaju električne energije jednačina glasi:

$$EC_{el} = \frac{E}{\eta_{el}} \quad [14]$$

- EC_{el} – ukupna emisija GHG finalnog energetskog produkta – električne energije,
- η_{el} – električna efikasnost, definisana kao količnik godišnje količine generisane električne energije i godišnjeg inputa goriva.

Ušteda emisija GHG se zatim obračunava na sledeći način:

$$\text{ušteta} = (\text{EC}_{\text{F(el)}} - \text{EC}_{\text{el}}) / \text{EC}_{\text{F(el)}} \quad [15]$$

- $\text{EC}_{\text{F(el)}}$ – ukupna emisija GHG fosilnog komparatora za električnu energiju koja iznosi 183 gCO_{2ekv}/MJ,
- EC_{el} – ukupna emisija GHG za električnu energiju.

2.3.2 Definisanje osnovnih i unapređenih slučajeva RED metoda

Predlozi unapređenja RED metoda za primenu na energetska iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine, odnose se na prevazilaženje nedostataka objašnjenih u poglavlju 1.1. Konkretno, unapređenje metoda podrazumeva da se:

- emisije GHG pre ubiranja kukuruzovine uključe u bilans emisija,
- primeni alokacija emisija GHG na biogas i ostatak fermentacije, u slučaju da se ostatak fermentacije ne primenjuje na ista polja sa kog je kukuruzovina ubirana.

Postoji šest osnovnih slučajeva korišćenja biogasa definisanih u RED direktivi. Četiri za korišćenje biogasa kao goriva – biometana i dva za generisanje električne energije. U slučaju biometana, definisane su tehnološke opcije:

- otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa,
- otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa,
- zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa,
- zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanja viška gasa.

Za generisanje električne energije, definisane su tehnološke opcije:

- otvoren rezervoar za ostatak fermentacije,
- zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije.

Definisanjem slučajeva unapređenja i poređenjem sa slučajevima primene RED metoda u osnovnoj formi ispitan je značaj razmatranog unapređenja na održivost i izvedeni zaključci. Za svaku tehnološku opciju koja se razmatra u okviru direktive, definisan je osnovni slučaj i više slučajeva unapređenja koji su objašnjeni u nastavku.

U Prilogu 1, navedene su vrednosti emisija i uštede emisija GHG iz nove RED direktive za tri supstrata (silazu kukuruza, stajnjak i organsku frakciju komunalnog otpada) u navedenim slučajevima. Treba da se naglasi da su u slučaju silaže kukuruza te vrednosti obračunate za slučaj da se ostatak fermentacije koristi na istom polju sa kog je silaža kukuruza ubirana, za slučaj stajnjaka obračunate su bonus emisije za član e_{sca} usled unapređenja upravljanja stajnjakom, nije korišćena alokacija između ostatka fermentacije i biogasa, a za organski otpad isto nije korišćena alokacija između ostatka fermentacije i biogasa niti su dodeljene bonus emisije.

Osnovni slučajevi primene RED metoda odnose se na korišćenje biogasa iz kukuruzovine za biometan i za generisanje električne energije u skladu sa svih šest tehnoloških opcija, a RED metod se primenjuje u potpunosti u skladu sa pravilima iz direktive. Definisani slučajevi unapređenog metoda proističu iz:

- dva različita načina upotrebe ostatka fermentacije:
 - na ista polja sa kojih je kukuruzovina ubirana,
 - na druga polja uz primenu alokacije emisija GHG između biogasa i ostatka fermentacije,
- razmatranja tokova nadoknade azota i ostalih hraniva u slučaju da se ostatak fermentacije koristi na istom polju:
 - računa se bonus za prevođenje organskog azota u neorganski,
 - ne računa se bonus za prevođenje organskog azota u neorganski,
- razmatranja tokova nadoknade azota i ostalih hraniva u slučaju da se ostatak fermentacije koristi na drugom polju:
 - nadoknađuje se celokupan azot i ostala hraniva,
 - nadoknađuju se samo ostala hraniva.

Nomenklatura korišćenih oznaka za definisane slučajeve je sledeća: Šest osnovnih slučajeva primene RED metoda za kukuruzovinu (bez unapređenja), za navedene tehnološke opcije, imaju oznake B1–B4 (koji se odnose na biometan) i E1 i E2 (koji se odnose na električnu energiju).

Kada tok azota nije uključen, i ne razmatra se eventualna nadoknada azota, dodata je oznaka NN. Ukoliko je uključena transformacija azota tokom anaerobne fermentacije, dodata je oznaka TN. Inače, ako je tok azota razmatran pa samim tim i posledična nadoknada azota, dodata je oznaka IN. Za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na drugim poljima, dodato je slovo A na početku oznake.

Tabela 8 Pregled razmatranih slučajeva primene i unapređenja RED metoda za energetska iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja sa kojih je ubirana kukuruzovina

Redni broj	Oznaka slučaja	Kratak opis slučaja
1.	B1	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa.
2.	B2	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa.
3.	B3	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa.
4.	B4	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa.
5.	E1	U skladu sa RED metodom. Generiše se električna energija. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije.
6.	E2	U skladu sa RED metodom. Generiše se električna energija. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije.
7.	B1NN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Ne razmatra se azot, bez nadoknade azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
8.	B2NN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Ne razmatra se azot, bez nadoknade azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
9.	B3NN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Ne razmatra se azot, bez nadoknade azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
10.	B4NN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Ne razmatra se azot, bez nadoknade azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
11.	E1NN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Ne razmatra se azot, bez nadoknade azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
12.	E2NN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Ne razmatra se azot, bez nadoknade azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
13.	B1TN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Računa se sa bonusom za transformaciju azota.
14.	B2TN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Računa se sa bonusom za transformaciju azota.
15.	B3TN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Računa se sa bonusom za transformaciju azota.
16.	B4TN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Računa se sa bonusom za transformaciju azota.

17.	E1TN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Računa se sa bonusom za transformaciju azota.
18.	E2TN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Računa se sa bonusom za transformaciju azota.
19.	B1IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
20.	B2IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
21.	B3IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
22.	B4IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
23.	E1IN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Razmatra se azot, nadoknada azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.
24.	E2IN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Razmatra se azot, nadoknada azota izgubljenog tokom primene ostatka fermentacije.

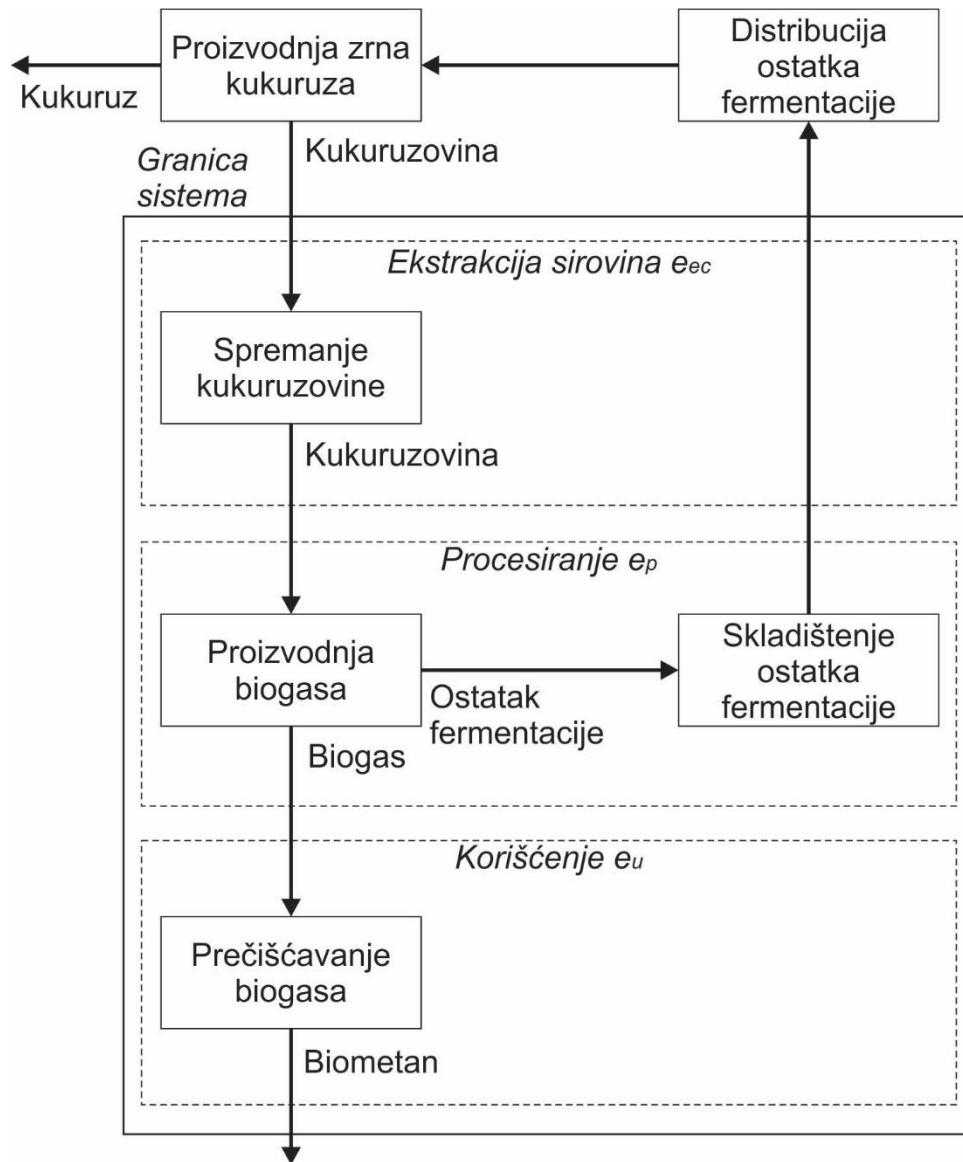
Tabela 9 Pregled razmatranih slučajeva primene i unapređenja RED metoda za energetska iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine kada se ostatak fermentacije primenjuje na drugo polje, primenjuje se alokacija

Redni broj	Oznaka slučaja	Kratak opis slučaja
1.	AB1	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa.
2.	AB2	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa.
3.	AB3	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa.
4.	AB4	U skladu sa RED metodom. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa.
5.	AE1	U skladu sa RED metodom. Generiše se električna energija. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije.
6.	AE2	U skladu sa RED metodom. Generiše se električna energija. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije.
7.	AB1NN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Ne razmatra se azot, nadoknada samo fosfora i kalijuma.
8.	AB2NN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Ne razmatra se azot, nadoknada samo fosfora i kalijuma.
9.	AB3NN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Ne razmatra se

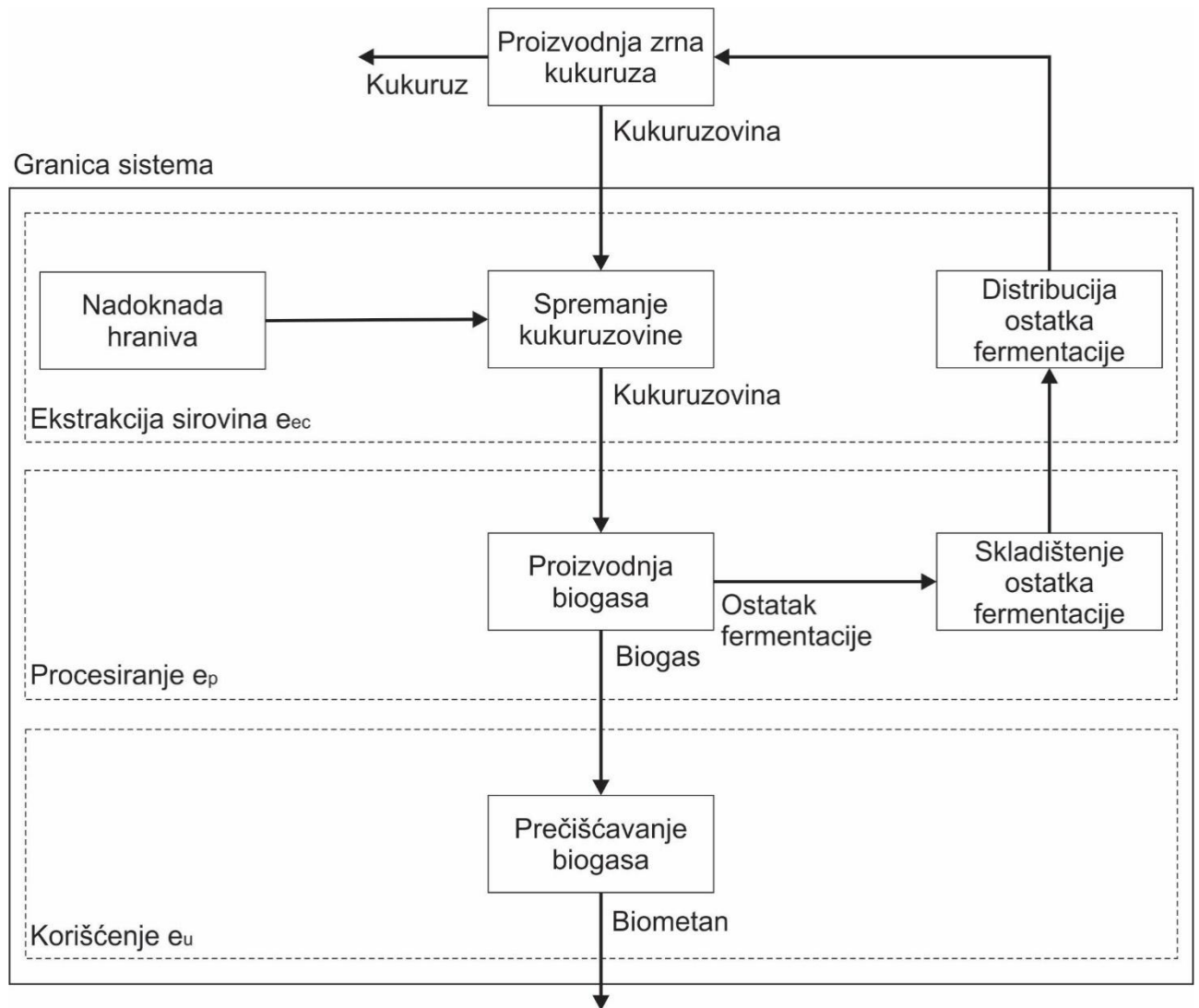
10.	AB4NN	azot, nadoknada samo fosfora i kalijuma. Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Ne razmatra se azot, nadoknada samo fosfora i kalijuma.
11.	AE1NN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Ne razmatra se azot, nadoknada samo fosfora i kalijuma.
12.	AE2NN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Ne razmatra se azot, nadoknada samo fosfora i kalijuma.
13.	AB1IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada svih hraniva.
14.	AB2IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada svih hraniva.
15.	AB3IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Bez sagorevanja viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada svih hraniva.
16.	AB4IN	Unapređenje RED metoda. Koristi se biometan. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Sagorevanje viška gasa. Razmatra se azot, nadoknada svih hraniva.
17.	AE1IN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Razmatra se azot, nadoknada svih hraniva.
18.	AE2IN	Unapređenje RED metoda. Generiše se električna energija. Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Razmatra se azot, nadoknada svih hraniva.

Na graficima 4 i 12–11 dat je pregled dijagrama toka analiza razmatranih slučajeva sa pregledom faza u životnom ciklusu energetskog iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine i operacija u okviru njih:

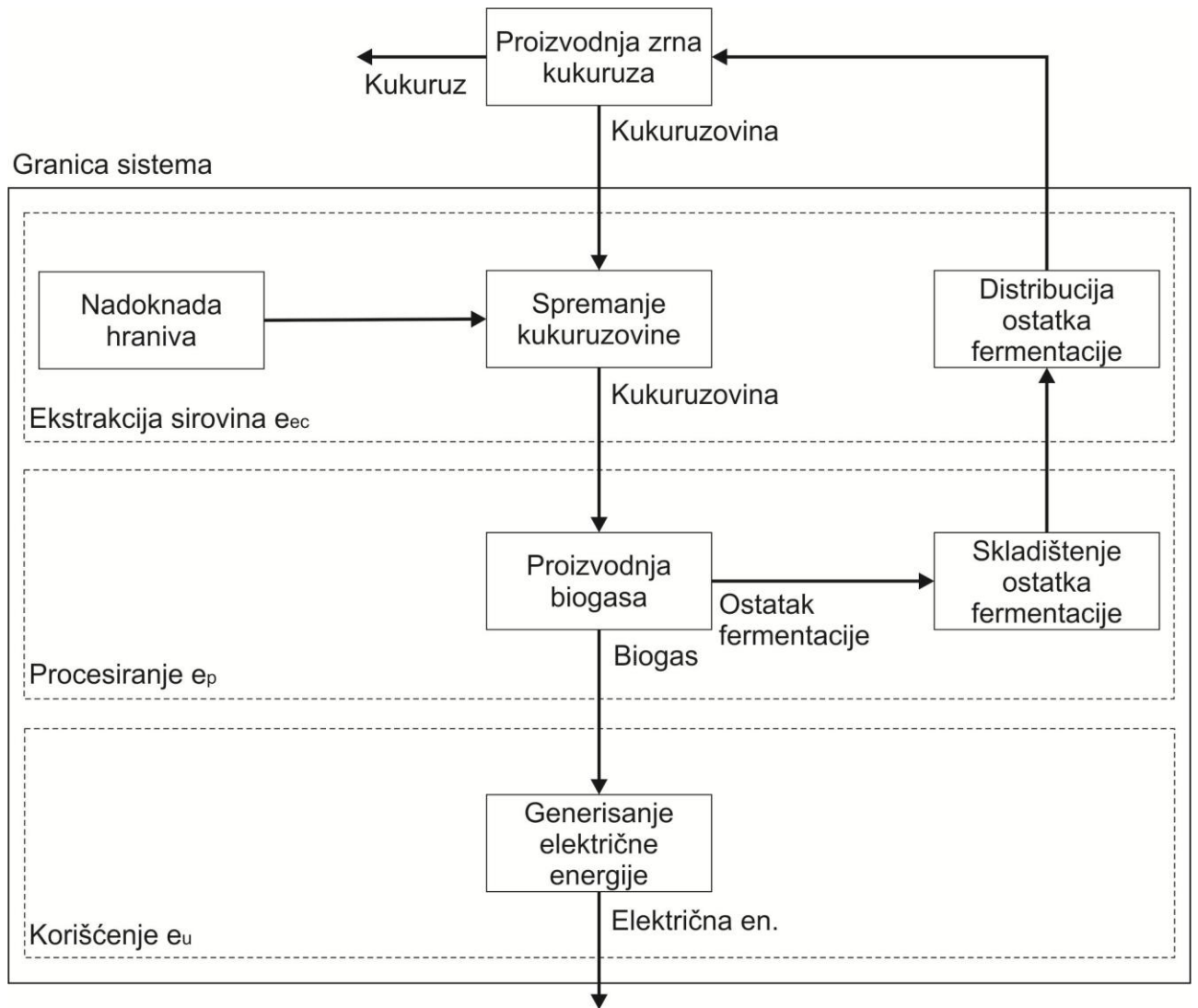
- Grafik 12 odgovara slučajevima 1–4 iz Tabele 8,
- Grafik 4 u prvom poglavlju odgovara slučajevima 5 i 6 iz Tabele 8,
- Grafik 13 odgovara slučajevima 7–10, 13–16, 19–22 iz Tabele 8,
- Grafik 14 odgovara slučajevima 11–12, 17–18, 23–24 iz Tabele 8,
- Grafik 15 odgovara slučajevima 1–4 iz Tabele 9,
- Grafik 16 odgovara slučajevima 5 i 6 iz Tabele 9,
- Grafik 17 odgovara slučajevima 7–10, 13–16 iz Tabele 9,
- Grafik 18 odgovara slučajevima 11–12, 17–18 iz Tabele 9.



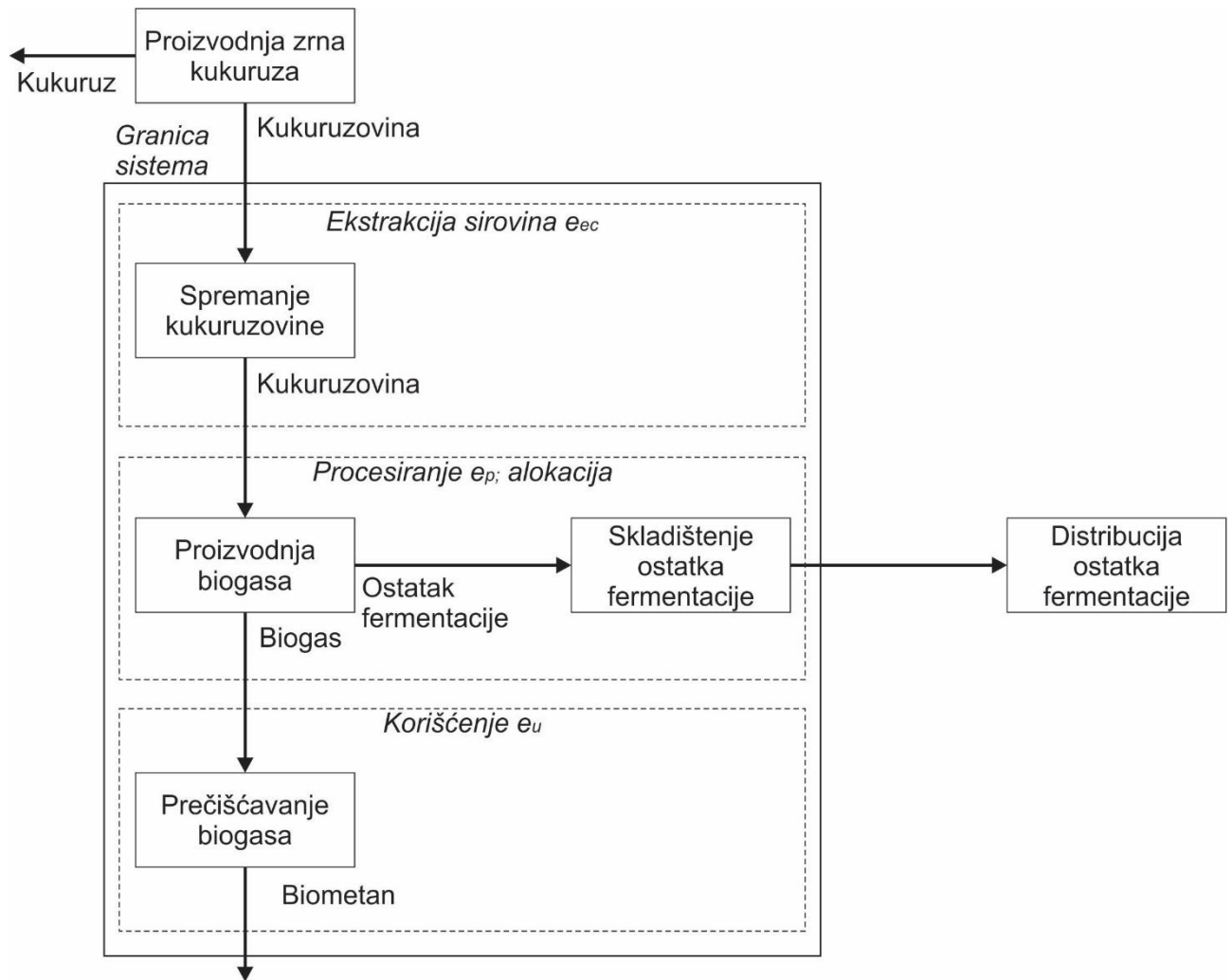
Grafik 12 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – RED metod



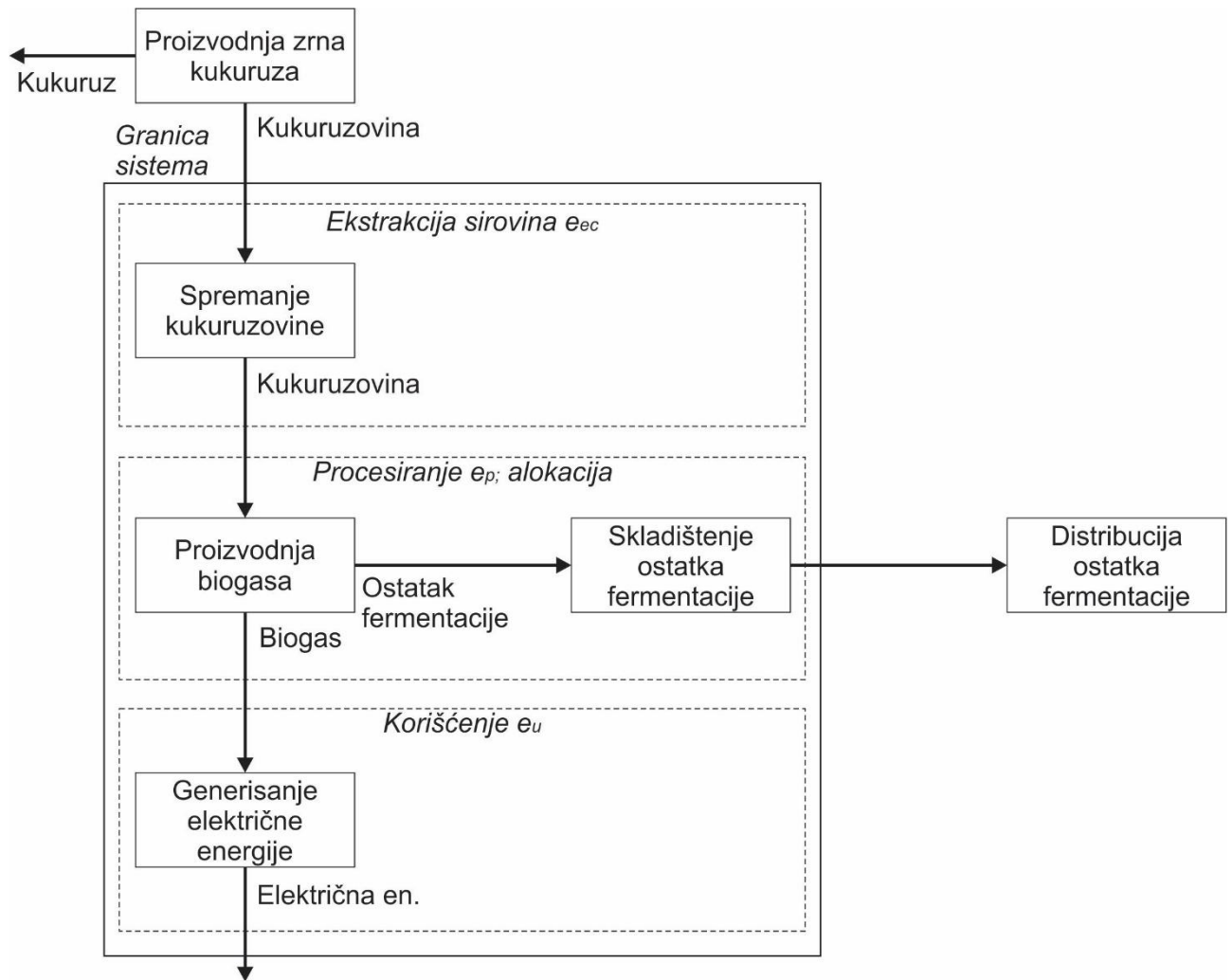
Grafik 13 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – unapređen RED metod



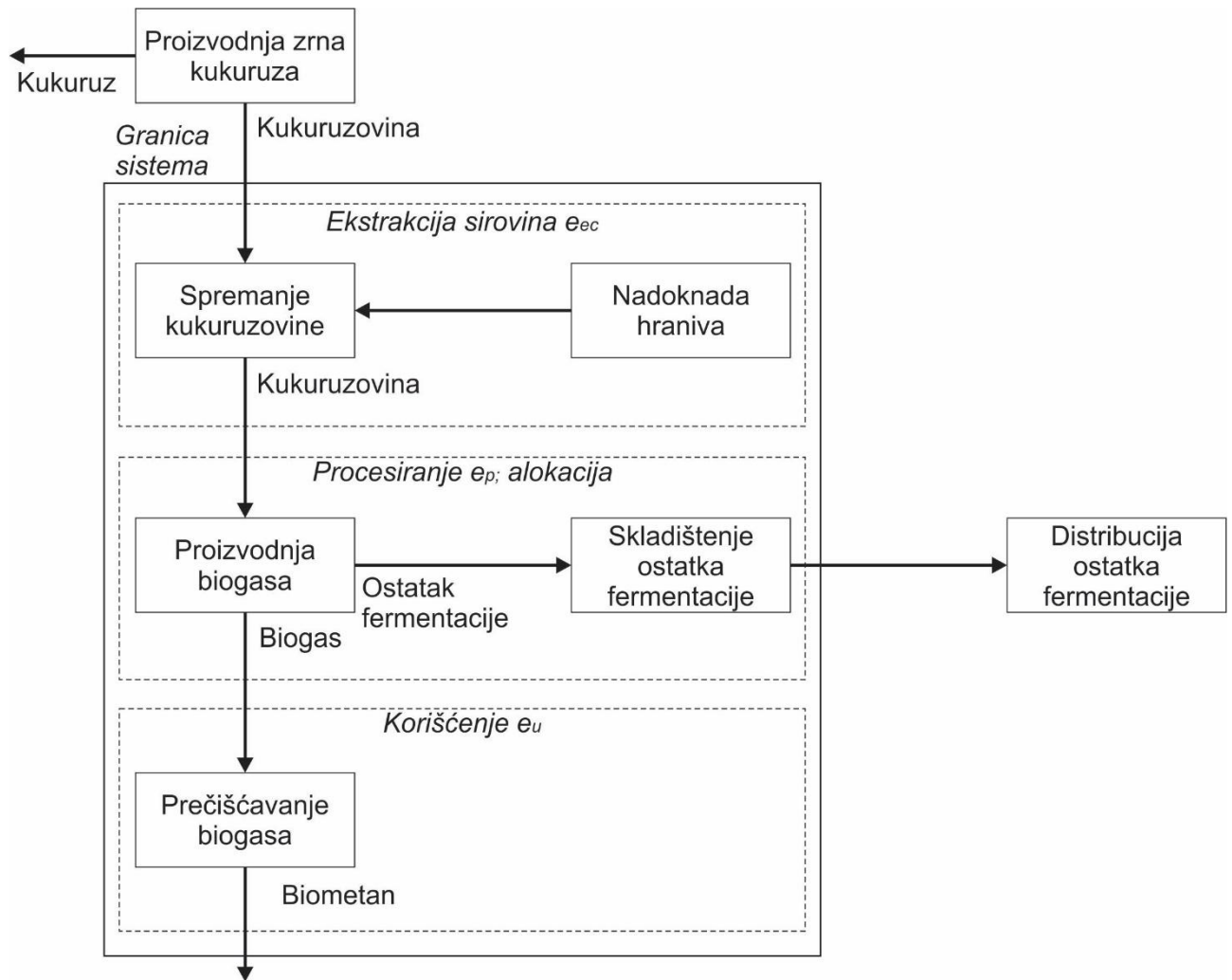
Grafik 14 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – unapređen RED metod



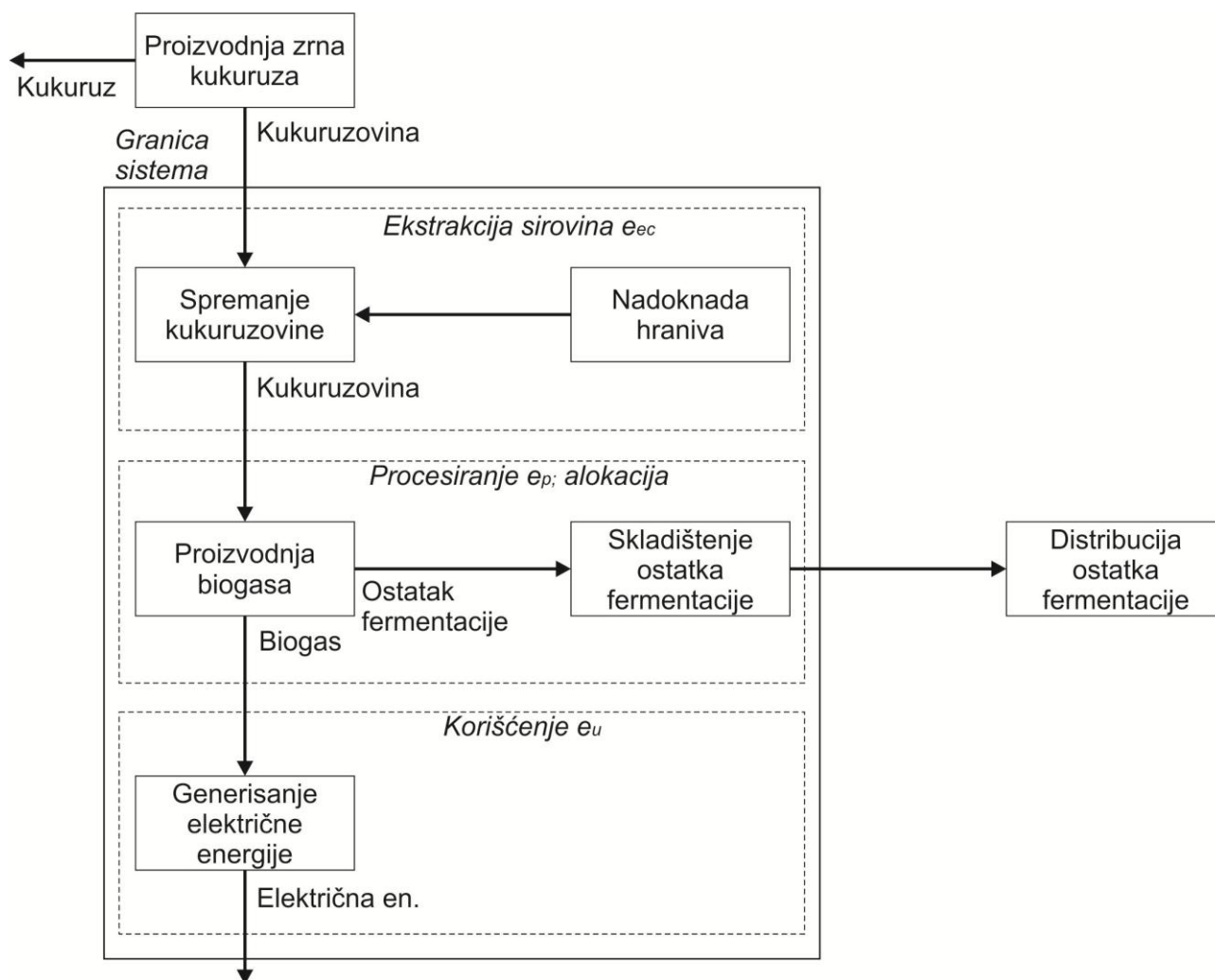
Grafik 15 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – RED metod uz primenu alokacije



Grafik 16 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – RED metod uz primenu alokacije



Grafik 17 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za biometan – unapređen RED metod uz primenu alokacije



Grafik 18 Dijagram toka analize iskorišćenja proizvedenog biogasa iz kukuruzovine za generisanje električne energije – unapređen RED metod uz primenu alokacije

2.3.3 Ocenjivanje životnog ciklusa definisanih slučajeva

Softver *GaBi ts* korišćen je za modelovanje analiziranih slučajeva, uspostavljanje analize inventara životnog ciklusa (LCI) i sprovođenje ocene uticaja životnog ciklusa (LCIA). Rezultat LCIA su vrednosti primenjene u jednačinama RED metoda.

Korišćena je baza podataka *Ecoinvent 3.1* (Wernet i dr, 2016) i *GaBi professional* baza podataka. Granice sistema su obuhvatale odgovarajuće generičke procese i materijalne tokove koji mogu da se smatraju kao reprezentativni za geografsku regiju koja je predmet analize (Srbija), ali i ostale evropske zemlje. Ukoliko su za korišćene procese iz baza podataka postojale emisije koje proističu iz proizvodnje opreme, te emisije su isključivane tj. procesi su modifikovani da budu u skladu sa RED metodom.

S obzirom da LCI sadrži rezultate emisija svih GHG gasova, izdvojene su samo emisije CO_2 , CH_4 i N_2O pošto se prema RED direktivi razmatraju samo ova tri gasa. LCIA je sprovedena koristeći metod CML 2001 (verzija April 2015) razvijena na *Institute of Environmental Sciences - Leiden University*, a izabrana kategorija uticaja je bila *Global warming potential (GWP 100 years) excluding biogenic carbon*. Za ovaj LCIA metod

potencijali globalnog zagrevanja su u skladu sa RED direktivom i iznose: CO₂ – 1; CH₄ – 25; N₂O – 298.

Pošto su razmatrani slučajevi gde su krajnji energetske produkti biometan i električna energija, funkcionalna jedinica bila je 1 MJ biometana odnosno 1 MJ električne energije. Za fazu ekstrakcije je korišćena funkcionalna jedinica bila 1 tSM, a njeno prevođenje u 1 MJ krajnjeg energetskog nosioca je sprovedeno koristeći jednačine 11–13, vrednosti prinosa biogasa i udela CH₄ specificiranoj po tSM dobijenu eksperimentalnim putem, toplotnoj moći CH₄ od 35,89 MJ/Nm³ i toplotnoj moći kukuruzovine 17,7 MJ/kgSM (Kaltschmitt i dr, 2016). U jednačini 14 gde se ukupna vrednost emisija GHG deli sa stepenom efikasnosti gasnog motora η_{el} da bi se dobila vrednost emisija specificirana po MJ generisane električne energije, vrednost η_{el} iznosila je 0,38 (Martinov i dr, 2011).

U RED direktivi navedene su vrednosti tipičnih i uobičajenih emisija GHG za određene supstrate (objašnjeno u poglavlju 1). Uobičajene vrednosti se dobijaju množenjem tipičnih vrednosti u određenim fazama sa korekcionim faktorom. Faze na koje se odnosi ta korekcija su Procesiranje i Korišćenje, a korekcionni faktor iznosi 1,4. Razlog za to je nesigurnost ulaznih podataka i na ovaj način se obezbeđuje da uobičajene vrednosti ne budu manje nego što zaista jesu. Emisije u fazi Ekstrakcija sirovina ostaju identične vrednostima tipičnih emisija. Primenjen je isti princip pretvaranja tipičnih u uobičajene vrednosti u ovom istraživanju.

Vrednosti ušteda emisija GHG su utvrđivane koristeći fosilne komparatore za utiskivanje biometana u mrežu prirodnog gasa, 72 gCO_{2ekv}/MJ, i električnu energiju 183 gCO_{2ekv}/MJ, a smatrano je da je održivo korišćenje energetskog produkta zadovoljeno u slučaju ušteda viših od 70 %. Ukoliko je međusobno poređenje vrednosti uštede za osnovne slučajeve i slučajeve gde je razmotreno unapređenje RED metoda kao rezultat imalo nezadovoljavanje postavljenog limita od 70 %, tada je unapređenje smatrano kao potencijalno značajno.

U nastavku je dat opis korišćenih procesa u okviru operacija koje čine faze u životnom ciklusu energetskog iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine.

Ekstrakcija sirovina e_{ec} (spremanje kukuruzovine)

Spremanje kukuruzovine je pojam koji obuhvata sve operacije koje se sprovode počevši od polja do mesta korišćenja (Martinov i dr, 2016). Spremanje obuhvata sledeće:

- sakupljanje na parceli, što uključuje sve operacije, zaključno sa formiranjem bala,
- utovar na transportno sredstvo,
- transport do primarnog skladišta,
- istovar i uskladištenje, formiranje kamara,
- skladištenje na primarnom skladištu, sa merama zaštite od padavina i zemljišne vlage, zaštite od požara i mere za podsticanje sušenja,
- utovar na transportno sredstvo za dovoženje do korisnika,
- transport do mesta korišćenja,
- istovar i uskladištenje na mestu korišćenja, odnosno prerade.

Sve navedene aktivnosti mogu da se razvrstaju u dve grupe. Ubriranje, koje obuhvata prvih pet tačaka, odnosno sve operacije do skladištenja na primarnom skladištu. Logistika, ili lanac snabdevanja, obuhvataju preostale tri tačke. Određene aktivnosti, pre svega kod

sakupljanja, mogu da se sprovedu na više načina pa organizacija kompletnog spremanja može da isključi određene aktivnosti. Logistika zavisi od količina koje se koriste, udaljenosti i lokalno specifičnih uslova. Korišćenje kukuruzovine kao supstrata za proizvodnju biogasa podrazumevalo bi obe grupe aktivnosti zbog značajnih količina neophodnih za funkcionisanje biogasa postrojenja.

U slučaju sakupljanja kukuruzovine silažnim kombajnom, ubiranje obuhvata sledeće operacije:

- seckanje i sakupljanje na polju, te utovar u prikolicu,
- transport do postrojenja, na kojem se kukuruzovina, najčešće u kombinaciji sa još nekim supstratom, silira, što uključuje sve potrebne operacije za spremanje silaže.

Siliranje na primarnom skladištu, te dovoženje do postrojenja, primenjuje se samo u ređim slučajevima.

Sakupljanje može da se sprovede i u jednom prohodu, ali takav postupak još uvek ima niz nedostataka, pre svega, značajno smanjenje učinka ubiranja zrna. Takođe, postoji više postupaka dva prohoda (na primer, *EZ Balesystem* ili *High cut*), uključujući specijalizovanu mehanizaciju (na primer, *Biochipper* ili *Strohmax 5000*), ali ovi postupci nisu u dovoljnoj meri ispitani, oprema nije dostigla komercijalnu fazu zrelosti, nedostaju podaci o efikasnosti ili jednostavno ne zadovoljavaju osnovne zahteve u produktivnosti (Martinov i dr, 2016).

Ubiranje

Prinos kukuruzovine zavisi od hibrida, FAO grupe zrenja, agroekoloških uslova i načina gajenja kukuruza. Na teritoriji Srbije je sprovedeno petogodišnje istraživanje prinosa zrna kukuruza i kukuruzovine (Golub i dr, 2012; Martinov i dr, 2016). Uzorci hibrida kukuruza različitih FAO grupa zrenja su uzimani na više lokacija u Vojvodini, sa polja gde su primenjene sve neophodne agro-tehničke mere. Uzorci su deljeni na pojedinačne delove, mereni i sušeni. Posebno je posmatrano zrno, a kukuruzovina je deljena na prvih 20 cm, ostatak stabljike i lišća, oklasak, komušinu, a tokom dve godine je razmatrano i prvih 70 cm stabljike. Izdvojeni rezultati za kukuruzovinu navedeni su u Tabeli 10. Ukupan prinos kukuruzovine varirao je u opsegu od 5,6 to 15,6 tSM/ha, Prilog 2. Merenjima je pokazana izuzetna zavisnost ukupnog prinosa od agro-ekoloških uslova, pre svega, agroklimatskih. 2012. godine je bila ekstremno sušna u poređenju sa uobičajenom u tom pogledu kakva je, na primer, bila 2014. godina, kada je količina padavina bila iznad proseka. Iz tog razloga moguće je da se posmatra prosek prinosa samo pojedinačnih godina, Tabela 10. Uberivi prinos odnosi se na masu kukuruzovine ne računajući najnižih 20 cm stabljike. Ovih 20 cm je posledica prosečne visine rada hedera kombajna i ona ni u jednom slučaju ne može da se ubere tj. uvek preostaje na polju. Približno 8–12 % ukupne mase kukuruzovine predstavlja tih prvih 20 cm stabljike. Ostatak stabljike zajedno sa lišćem čini između 60 i 70 % ukupne mase kukuruzovine, oklasak oko 18–20 %, a komušina 8–10 %. Masa ostalih delova je zanemariva.

Za procene o količinama kukuruzovine najčešće se koristi žetveni indeks – udeo zrna u ukupnoj nadzemnoj masi. Pomenutim istraživanjem, prosečni žetveni indeks značajno varira u zavisnosti od godine. U izrazito sušnoj sezoni bio je, u proseku, 0,41, a u uobičajenim sezonama 0,51–0,52. Slične vrednosti, oko 0,5, su uobičajene i za literaturu (CIGR, 1999), te je opravdano reći da je ukupni prinos kukuruzovine, sveden na suhu materiju, približan prinosu zrna.

Tabela 10 Prosečni prinosi kukuruzovine za analizirane godine (Golub i dr, 2012; Martinov i dr, 2016)

Godina	Ukupan prinos, tSM	Uberivi prinos, tSM	Žetveni indeks
2011.	10,2	9,2	0,51
2012.	7,2	6,3	0,41
2013.	8,2	5,6	0,44
2014.	12,6	11,6	0,52
2015.	9,6	8,7	0,52

Merenje 2011. izabrano je za reprezentivni prinos kukuruzovine pri uobičajenim vremenskim uslovima. Za potrebe senzitivne analize, merenja sprovedena 2012. i 2014. godine usvojena su da bi se prikazao prinos u slučaju prinosa iznad proseka i prinosa značajno manjeg od uobičajenog usled suše. U Prilogu 2 navedene su vrednosti pojedinačnih merenja za više hibrida sprovedenih u tim godinama, ukupni prinosi, i prinosi za različite delove kukuruzovine.

Količina ubrane kukuruzovine zavisi od njenog prinosa, karakteristika kukuruzovine (pre svega sadržaja suve materije), organizacije ubiranja, primenjenih tehničkih rešenja, organizacije agrotehničkih operacija (na primer, pravac kretanja mehanizacije) i stanja opreme. Neophodan kvalitet kukuruzovine namenjene za proizvodnju biogasa, pre svega zaprljanje zemljom, isključuje konvencionalno sakupljanje u vidu malih bala. Razmatrana su dva pristupa sakupljanju:

- sakupljanje u dva prohoda,
- sakupljanje u više prohoda.

Sakupljanjem kukuruzovine u dva prohoda uz baliranje ostvaruju se sledeći procenti ubiranja: 70 % stabljike i lišća (ne računajući prvih 20 cm stabljike), 90 % komušine i 90 % oklaska je u zboju nakon njegovog formiranja, a kukuruzovina se balira uz dodatne gubitke od 10 %. U slučaju sakupljanja u više prohoda, procenti ubiranja su: 70 % za stabljiku i lišće, 40 % za komušinu i 40 % za oklasak uz dodatne gubitke od 10 % za baliranje (Martinov i dr, 2016). U slučaju da se umesto baliranja koristi silažni kombajn, računato je sa 10 % gubitaka mase na pikap uređaju. Razmatrane ubrane količine kukuruzovine navedene su u Tabeli 11.

Tabela 11 Usvojene vrednosti prinosa kukuruzovine

Godina merenja	Uberiva masa, tSM/ha	Masa stabljika i lišća, tSM/ha	Masa oklaska, tSM/ha	Masa komušine, tSM/ha	Ubrana masa, tSM/ha		Ubrana masa, %	
					Dva prohoda	Više prohoda	Dva prohoda	Više prohoda
2011.	9,2	6,3	1,9	1,0	6,3	5,0	68,6	54,4
2012.	6,3	4,6	1,1	0,6	4,3	3,5	68,1	55,5
2014.	11,6	8,5	2,0	1,1	7,8	6,5	67,7	55,9

Sadržaj SM (suprotno od sadržaja vlage) je karakterisitka koja pokazuje udeo SM u ukupnoj masi kukuruzovine. SM je zbir OSM i mineralne materije – pepela. Direktno zavisi od vremena ubiranja kukuruzovine (a koje zavisi od vremena žetve zrna kukuruza) i uslova skladištenja. Martinov i dr. (2016) navode vrednosti SM u vreme sakupljanja za različite delove kukuruzovine koji variraju u širokom opsegu, 40–95 %, a to može da se odrazi u negativnom smislu na skladištenje i primenu kukuruzovine. Za potrebe ovog istraživanja,

usvojeno je da od momenta sakupljanja kukuruzovine do momenta iskorišćenja, udeo SM iznosi 75 %. Na ovaj način je istraživanje uprošćeno, a rad agrotehničkih operacija u okviru faze ekstrahovanja sirovina svedene na jedinstvenu vrednost količine sveže materije kukuruzovine.

Za definisanje materijalnog toka, razmatran je i gubitak SM tokom skladištenja kukuruzovine. On zavisi od načina skladištenja, te je i opseg vrednosti za ovaj parameter je u širokom opsegu. Na primer, za baliranu kukuruzovinu u uskladištenu na paletama i prekrivenu ciračom, gubici su oko 4 % (Schon i dr, 2013; Shah i dr, 2011; Shinnars i dr, 2011). Vrednost gubitaka SM od 4 % je usvojena za ovu studiju. Gubici SM su u formi GHG i to dominantno u obliku biogenog CO₂, a gubici u obliku CH₄ i N₂O su zanemarivi (Emery i Mosier, 2015). Iz tog razloga, gubitak SM u formi GHG nije uzet u obzir za formiranje bilansa emisija.

Sakupljanje u dva prohoda

Postupak sakupljanja u dva prohoda ostvaruje se korišćenjem modifikovanog hedera kombajna, takozvanim *cornrower-om*, Slika 6b. Ovim hederima kukuruzovina se usitnjava i formira zboj (Shinnars i dr, 2012; Straeter, 2011). Osim uštede prohoda, pozitivno je to da masa koja napušta kombajn pada na formiran zboj, što rezultira znatno nižim gubicima oklasaka i komušine, kao i smanjenjem zaprljanja zemljom. Pri povoljnim vremenskim uslovima masa u zboju može da se delimično osuši, pa se tako postiže da sadržaj vlage u sakupljenoj kukuruzovini bude niži. Za korišćenje ovog tipa hedera potreban je kombajn veće mase i snage motora. Negativno je to što postupak nije dugoročno proveren u praksi i trenutno tehnička rešenja *Cornrower-a* nisu dostupna na evropskom tržištu.

Za sakupljanje kukuruzovine u dva prohoda, korišćenje *Cornrower* – a povećava potrošnju goriva kombajna za 33 % (Straeter, 2011). Za potrošnju goriva kombajna u Srbiji usvojeno je da iznosi 28 L/ha (Cooperative Union of Vojvodina, 2014), iz čega je proizišlo da ukupna potrošnja goriva kombajna sa pretpostavljenim korišćenjem *Cornrower* – a iznosi 37,2 L/ha. Bez obzira što se usitnjavanje kukuruzovine i formiranje zboja sprovodi istovremeno s ubiranjem zrna kukuruza, opravdano je da se samo dodatna potrošnja goriva uslovljena korišćenjem *Cornrower* – a smatra kao potrošeno gorivo koje je posledica usitnjavanja kukuruzovine i formiranja zboja tj, 9,2 L/ha. Proces *Combine harvesting*, CH iz *Ecoinvent* baze podataka korišćen je kao osnova za definisanje procesa usitnjavanje/formiranje zboja u okviru sistema ubiranja kukuruzovine u dva prohoda.

Nakon toga sledi baliranje kao drugi prohod. Pri baliranju velikih četvrtastih bala (ČB) koriste se plastična veziva odnosno plastične mrežice za valjkaste bale (VB). Za baliranje kukuruzovine nakon formiranog zboja u formi ČB ili VB usvojeno je da efikasnost ubiranja iznosi 60 % za oba tipa baliranja (Shinnars i dr, 2012, 2007). Za ČB smatrano je da su dimenzija 1,2/0,9/2,4 m uz gustinu od 110 kgSM/m³. Usvojene dimenzije VB bile su ϕ 1,5/1,2 m, a gustina 90 kgSM/m³. Proces iz baze podataka koji je korišćen da prikaže baliranje bio je Baling, CH iz *Ecoinvent* baze podataka. Ovaj proces navodi da je potrošnja plastičnog materijala za učvršćivanje bala 1 kg po bali. Ovaj podatak je značajno preuveličan pa je kroz ličnu komunikaciju sa poljoprivrednicima i proizvođačima opreme definisano da približna masa plastičnih veziva za ČB iznosi 0,41 kg, a mreže za VB 0,16 kg. Emisije GHG proistekle iz proizvodnje ovih plastičnih proizvoda su uključene u bilans kroz proces proizvodnje polietilena visoke gustine iz *GaBi professional* baze podataka *Polyethylene high density granulate (PE-HD)*, RER.

Umesto baliranja, samo sakupljanje je moguće da se obavi i korišćenjem silažnog kombajna sa pikap uređajem, Slika 6. Na ovaj način, kukuruzovina je maksimalno usitnjena, sa dužinom seckanja ispod 20 mm. Ovakav materijal može da se skladišti u

anaerobnim uslovima, kao silaža, te da se na taj način smanje gubici organske materije. Dopunsko usitnjavanje silažnim kombajnom predstavlja i fazu prerade, koja može da se pozitivno odrazi na efekte proizvodnje biogasa. Ovakvo sakupljanje ipak ima uticaj na organizaciju logistike. Primenljivo je za rastojanja do 20 km.

Za sakupljanje usitnjene kukuruzovine silažnim kombajnom, za potrošnju goriva usvojena je vrednost 14,5 L/ha uz dužinu sitnjenja od približno 6 mm i uz efikasnost ubiranja od 61 % (Shinners i dr, 2007). Gustina sakupljene kukuruzovine u tom slučaju iznosi približno 68 kgSM/m³ (Schon i dr, 2013). Za emisije GHG proistekle iz rada silažnog kombajna korišćen je proces iz *Ecoinvent* baze podataka *Maize silage production, RoW*

Emisije iz proizvodnje dizel goriva koji se troši za razmatrane agrotehničke operacije, na primer baliranje ili transport, uključene su u bilans emisija pomoću *Ecoinvent* procesa *Diesel, at regional storage, RER*. Emisije za agrotehničke operacije proistekle iz proizvodnje opreme, objekata za skladištenje, potrošnje ostalih materijala za rad (maziva, gume i dr) nisu uzimane u obzir.



a)



b)



c)



d)

Slika 6 Mehanizacija za postupak sakupljanja u dva prohoda: a) kombajn sa ugrađenom sitnilicom žetvenih ostataka kukuruzovine; b) heder za sečenje kukuruzovine i formiranje zboja u jednom prohodu; c) presa za velike četvrtaste bale; d) presa za valjkaste bale



Slika 7 Sakupljanje kukuruzovine iz zboja i usitnjavanje silažnim kombajnom

Utovar, istovar i manipulacija sa balama kukuruzovine sprovode se traktorom sa prednjim utovarivačem opremljenim odgovarajućim nastavkom ili telehandlerom. Vrednost emisija GHG proistekle iz utovara i istovara bala bazirane su na *Ecoinvent* procesu *Loading bales, CH*.

Transport do primarnog skladišta podrazumeva kraća rastojanja do 10 km. Moguće ga je obavljati traktorima sa univerzalnom prikolicom ili sa dve, transportni voz. Učinak može da se poveća korišćenjem prikolica sa produženom platformom. Transport usitnjene kukuruzovine podrazumeva transport direktno na lokaciju biogas postrojenja. Za to je moguće koristiti prikolice za silažu zapremine i do 35 m³.

Pretpostavljeno je da postoji primarno skladištenje bala na polju i skladštenje na lokaciji postrojenja. Za udaljenost primarnog skladišta usvojena je vrednost 5 km (Bojić i dr, 2013). Za transport do primarnog skladišta razmatrano je da se bale utovaraju na dve prikolice koje vuče traktor čime se ostvaruje nosivost od 24 ČB i 26 VB.

Sakupljanje u više prohoda

Na velikim gazdinstvima sa kojih je jedino racionalno da se sakupljaju veće količine kukuruzovine, primenjuje se, gotovo isključivo, branje zrna beračem-krunjačem – univerzalnim kombajnom sa kukuruznim hederom. Neki od kukuruznih hedera imaju ugrađene sečke za kukuruzovinu, najčešće sa vertikalnom osom rotacije, na kojima su klateći (leteći) noževi, te se operacija usitnjavanja kukuruzovine obavlja u istom proходу kao i branje zrna. Za ovu operaciju potrebna je dodatna snaga, te su hederi sa sitnilicama kukuruzovine primenljivi samo na kombajnama sa motorima veće snage, a takvi su u ponudi svih renomiranih proizvođača, Slika 6a. Usitnjena kukuruzovina tada ostaje raspoređena, približno ravnomerno, po površini parcele. Prolazak kombajna uz usitnjavanje kukuruzovine predstavlja prvi prohod. Sakupljanje kukuruzovine sastoji se od još dva prohoda. Ukoliko heder kombajna nema sečku kukuruzovine prvi prohod je seckanje kukuruzovine sitnilicom žetvenih ostataka.

Nakon prolaska kombajna, ili opciono sitnilice žetvenih ostataka, sledi formiranje zboja grabljama. Korišćenje grablji „Sunce“ za ovu operaciju nije odgovarajuće zbog zaprljanja zemljom, naročito ukoliko je viši sadržaj vlage kukuruzovine i zemljišta. Čigrastim i trakastim grabljama, Slika 8, može da se ostvari delimično smanjenje zaprljanja zemljom. Rad i prateće emisije usled iz procesa formiranja zboja predstavljene su procesom iz *Ecoinvent* baze podataka *RoW: swath, by rotary windrower*.



a)



b)

Slika 8 Formiranje zboja a) trakastim grabljama; b) trakastim grabljama sa pikap uređajem

Tokom trećeg prohoda obavlja se baliranje, ili opciono sakupljanje silažnim kombajnom kao i kod sakupljanja u dva prohoda. I ostale operacije u okviru ubiranja su identične kao u slučaju sakupljanja u dva prohoda.

Logistika

Logistika obuhvata transport kukuruzovine i skladištenja kukuruzovine.

Transport

Transport na veća rastojanja primenjiv je samo u slučaju balirane kukuruzovine i to upotrebom kamiona. Količina bala koja je moguće da se utovari na kamionske prikolice ili poluprikolicu zavisi od forme i dimenzija bala. Bitan faktor je i nacionalno zakonodavstvo koje diktira maksimalno dozvoljenu širinu vozila u drumskom saobraćaju od 2,55 m i visinu do 4 m.

Za udaljenost između primarnog skladišta i skladišta na lokaciji postrojenja usvojena je vrednost 20 km kao osnovna, ali je ispitan i uticaj promenljivosti ovog parametra u okviru senzitivne analize tako što je udaljenost povećavana do 100 km. Ova vrednost je izabrana kao granična zbog isplativosti i prakse da se supstrati nabavljaju u blizini biogas postrojenja. Za transport je pretpostavljeno korišćenje kamiona maksimalne nosivosti 27 t, tj. da se prikolicom transportuju 33 ČB i 30 VB. Za transport usitnjene kukuruzovine sakupljene silažnim kombajnom, razmatran je transport silažnom prikolicom zapremine 35 m³ koju vuče traktor. U ovom slučaju nije postojalo primarno skladište i smatrano je da se kukuruzovina transportuje direktno do biogas postrojenja uz usvojenu udaljenost 20 km.

Skladištenje

Organizacija skladištenja kukuruzovine zavisi od forme (četvrtaste, valjkaste bale ili usitnjena kukuruzovina), podrazumeva upotrebu nadstrešnica, ciradi i drugih vrsta pokrivki, namenskih objekata za silažu ili specijalna plastična creva, betonskih i kamenitih podloga, paleta, ali i kamarisanje na zemlji bez ikakve pokrivke (Shah i dr, 2011; Shah i

Darr, 2014; Shinnars i dr, 2007; Vadas i Digman, 2013), Slika 9. Sadržaj vlage kukuruzovine u toku žetve zrna varira u širokom rasponu, što može da predstavlja problem za skladištenje i daljnju preradu i primenu kukuruzovine. Tokom sezone žetve vremenski uslovi su retko pogodni za dodatno prosušivanje na polju. Osnovni zahtev pri skladištenju kukuruzovine je da se očuva do trenutka korišćenja. Usled toga što je sadržaj vlage najčešće iznad ravnotežnog, pogotovo za niže delove stabljika, postoje uslovi za mikrobiološku razgradnju, gubitak organske materije. Sadržaj vlage povećava se ukoliko je kukuruzovina izložena atmosferskoj vlazi. Dakle, treba da se ostvari zaštita od atmosferske i zemljišne vlage (od podloge), te da se omogući sušenje tokom skladištenja (Martinov i dr, 2016). Kompleksnije skladištenje omogućava značajno manji gubitak suve materije, ali su i troškovi skladištenja veći.

Poljoprivredna biogas postrojenja uglavnom poseduju namenske skladištene kapacitete za čvrste supstrate, trenč silose ili betonske platoe (piste). Za skladištenje na lokaciji postrojenja smatrano je da su bale postavljene na plato i pokrivene sa plastičnom folijom izrađenom od polietilena niske gustine koji ima specifičnu masu 130 g/m^2 , a dimenzije $12,5 \times 9 \text{ m}$ (Anonim, 2017). Smatrano je da ova folija može da se upotrebljiva pet godina. Za kamare je usvojeno da se ČB ređaju u tri kolone sa četiri bale u visini za spoljne kolone i pet bala u visinu za srednju kolonu kako bi se od folije formirao oblik krova (Shah i dr, 2011). Emisije proistekle iz korišćenja folije su posledica njene proizvodnje, a za njihovo bilansiranje iskorišćen je proces iz *GaBi professional* baze podataka *Polyethylene film (PE-LD)*, *RER*. Za potrebe definisanja skladištenja kukuruzovine u slučaju njenog ubiranja usitnjene kukuruzovine silažnim kombajnom, usvojeno je da se kukuruzivna skladišti zajedno sa šećernom repom u odnosu 1:1. Silo jama imala je dimenzije $30 \times 18 \text{ m}$, sa dva bočna zida visine 3 m . Za korisnu zapreminu silo jame usvojena da iznosi 70% ukupne, a pretpostavljeno je da kukuruzovina nakon sabijanja traktorom ima gustinu od 80 kgSM/m^3 . Takođe je pretpostavljeno korišćenje dve zaštitne poli-etilenske folije dimenzija $30 \times 10 \text{ m}$, specifične mase 220 g/m^2 (Anonim, 2017). Smatrano je da silo jama ima životni vek 20 godina, dok je za foliju usvojeno, na osnovu navoda proizvođača, 10 godina. Za siliranje je pretpostavljen rad mehanizacije koja sabija kukuruzovinu zajedno sa šećernom repom u trenč silosu, a nastale emisije predstavljene su procesom iz *GaBi professional* baze podataka *GLO: Harvest; Packing silage maize ts*.



a)



b)



c)

Slika 9 Skladištenje kukuruzovine u formi, a) velikih četvrtastih bala; b) valjkastih bala; c) usitnjena silirana kukuruzovina sa šećernom repom

Procesiranje e_p

Proizvodnja biogasa

Biogas postrojenja su objekti u okviru kojih se odvija skladištenje, priprema i manipulacija supstratima, proizvodnja biogasa, njegova eventualna prerada i skladištenje, korišćenje biogasa, te eventualna prerada i skladištenje ostatka fermentacije. Ne postoji jedinstveni tip biogas postrojenja. Na njihovu organizaciju utiču, pre svega, vrste supstrata koje će da se koriste i način krajnjeg iskorišćenja biogasa.

Skladištenje, priprema i manipulacija supstratima razlikuju se za čvrste i tečne supstrate. Manipulacija čvrstim supstratima sprovodi se pomoću univerzalnog manipulatora (telehndlera), Slika 10, ili traktora sa prednjim utovarivačem. Za potrebe ovog istraživanja, emisije nastale pri manipulaciji kukuruzovinom na lokaciji postrojenje predstavljene su procesom iz *Gabi profesional* baze podataka *GLO: Universal Tractor ts*. Usvajeno je da je traktoru potrebno oko 6 minuta za utovar 1 tSM kukuruzovine u fermentor, a u skladu sa tim je softver preračunao potrošnju dizela i prateće emisije GHG.

Supstrati se više puta tokom dana ubacuju u fermentor direktno ili preko dozatora čvrstih supstrata. Čvrsti supstrati najčešće treba da se, pre unošenja u fermentor, tretiraju, da bi se povećala efikasnost proizvodnje biogasa. Predtretman se sprovedi na razne načine koristeći fizičke, fizičko-hemijske, hemijske, biološke metode ili kombinacijom više njih (Kaltschmitt i dr, 2016). Kompleksnost procesa predtretmana varira od veoma

jednostavnog usitnjavanja i mlevenja, pa do složenih procesa poput takozvanog *steam explosion*-a koji je naročito efikasan za tretman za lignocelulozne supstrate kakva je kukuruzovina (proces podrazumeva zagrevanje i naglo snižavanje pritiska u komorama za predtretman).



Slika 10 Univerzalni manipulator – telehandler

Fermentori su po izvedbi rezervoari u kojima se odvija proizvodnja biogasa. Karakteristično za njih je da se greju i da je u njima anaerobna sredina (Martinov i dr, 2011), Slika 11. Biogas postrojenja uglavnom imaju kontinualni tip fermentora, u koje se supstrat dozira više puta u toku dana, a iz njega izlazi ostatak fermentacije. Jedan od važnijih segmenata upravljanja procesom proizvodnje biogasa je mešanje sadržaja fermentora. Aktivno mešanje se najčešće ostvaruje mehanički koristeći namenske mešalice pogonjene elektromotorima.

Potrošnja električne energije za rad biogas postrojenja (mešaći, dozatori supstrata, uređaji za predtretman i dr) zavisi od više faktora, ali je prosečna vrednost za biogas postrojenja u Srbiji oko 7 % ukupno generisane električne energije (lična komunikacija Ivan Ilić, Bioenergo 808 doo; Vladan Gvozdrenović, Mirotin Energo). S obzirom da bi za rad postrojenja koje koristi kukuruzovinu bilo potrebno bar njeno usitnjavanje, predviđeno je da se dodatnih 1 % generisane električne energije troši na ovaj proces. To odgovara navodu od potrošnje električne energije od 11 kWh/tSM za sitnjenje slamastih materijala (Mani i dr, 2004). Pretpostavljeno je da se električna energija za ovu namenu obezbeđuje iz nacionalne elektro-mreže. Za emisije nastale iz generisanja električne energije korišćen je proces iz *Ecoinvent* baze podataka, CS: *electricity, production mix CS*, koji predstavlja elektro miks za Srbiju.

Grejanje fermentora se na postrojenjima koja generišu biometan obezbeđuje najčešće sagorevanjem prirodnog biogasa. Na biogas postrojenjima sa CHP jedinicom, otpadna toplotna iz kogenerativne jedinice se troši za potrebe zagrevanja fermentora. Na poljoprivrednim postrojenjima u Srbiji, oko 1 % primarne energije biogasa se troši za potrebe zagrevanja fermentora (lična komunikacija Ivan Ilić, Bioenergo 808 doo). To znači da je približno oko 0,01 MJ toplotne energije potrebno za generisanje 1 MJ primarne energije u biogasu. Emisije proistekle iz sagorevanja prirodnog gasa predstavljene su pomoću procesa iz *Gabi professional* baze podataka *EU-27: Process steam from natural gas 85% ts*.



a)



b)

Slika 11 a) fermentori biogas postrojenja; b) mehanička mešalica sa dugačkim vratilom

Skladištenje ostatka fermentacije

Nakon što se tokom zadržavanja u fermentoru izdvojio biogas iz fermentorske mase, mešavine supstrata, masa koja napušta fermentor je ostatak fermentacije. Primenu nalazi u poljoprivredi kao kvalitetno organsko hranivo.

Ostatak fermentacije i dalje u sebi ima nerazgrađenu organsku materiju, koja može da proizvede biogas tzv. rezidualni biogas. Njegova količina zavisi od retencionog vremena i efikasnosti proizvodnje biogasa kao posledice fizičko-hemijskih uslova u fermentoru.

U praksi se najčešće mehaničkom separacijom izdvaja tečnost iz ostatka fermentacije, a suva frakcija sadrži 20–25 % SM. Nakon izlaska iz fermentora, ostatak fermentacije se skladišti do iznošenja na poljoprivredno zemljište. Tečna frakcija, ili neseparisani ostatak fermentacije, skladiše se u namenskim rezervoarima, neretko i lagunama. Kao što je navedeno, ostatak fermentacije se karakteriše izvesnim rezidualnim prinosom biogasa i s aspekta zaštite životne sredine, dobra praksa je da se takvi rezervoari prekrivaju nepropusnim folijama čime se rezidualni biogas sakuplja. Nekontrolisana emisija rezidualnog CH_4 negativno utiče na efekat staklene bašte, a postoji i ekonomski interes da se ovaj biogas sakupi i iskoristi. Međutim, nije redak slučaj da rezervoari za ostatak fermentacije nisu adekvatno pokriveni i da se rezidualni biogas emituje u atmosferu.

Emisije rezidualnog biogasa u slučaju nepokrivenih rezervoara ostataka fermentacije zavise od niza faktora: atmosferskih uslova, dimenzija i forme rezervoara, stepena razgradnje organske materije u fermentorima biogas postrojenja, mešanja. Potencijal rezidualnog biogasa odnosno CH_4 iznosi u najvećem broju slučajeva od 1,5 do 3,5 % dobijenog CH_4 , ali su u letnjim mesecima moguće emisije i oko 10 % u slučaju neefikasnih biogas postrojenja (Liebetrau i dr, 2010). Za ovo istraživanje, usvojeno je da se iz ostatka fermentacije emituje 2 % generisanog CH_4 . U slučaju pokrivenog rezervoara za ostatak fermentacije, ova količina metana ulazi u energetske iskorišćenje biogasa tj. emisije rezidualnog biogasa su 0 %.

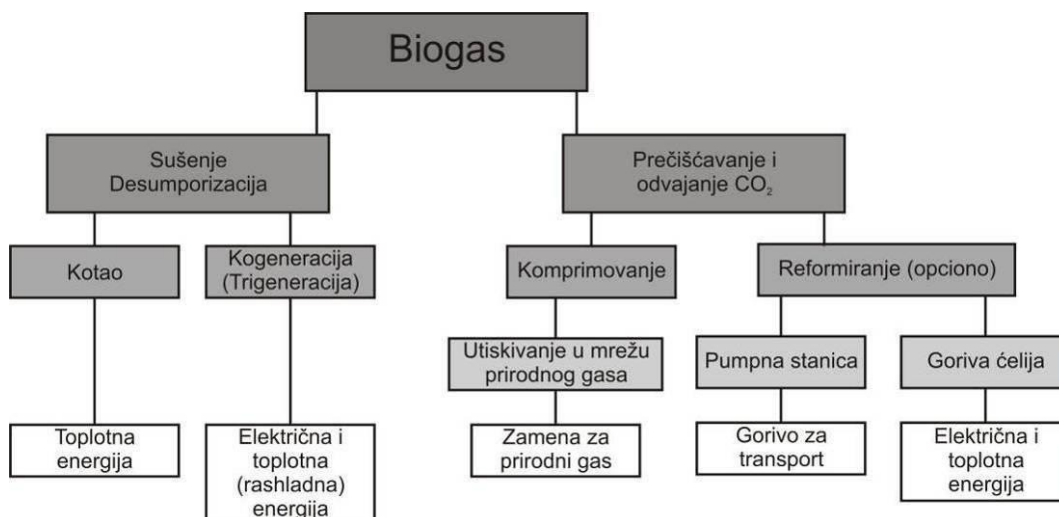
U toku skladištenja ostatka fermentacije, oslobađaju se i gasovite emisije azota. Za kvantifikovanje ovih emisija iskorišćeno je uputstvo u (Giuntoli i dr, 2015) i emisijski faktori

navedeni u izveštaju *Međuvladinog panela za klimatske promene* (IPCC, 2006a), Tabela 13.

Za određene slučajeve, neophodno je bilo primeniti alokaciju između generisanog biogasa i ostatka fermentacije. Pravila RED metoda navode da se alokacija primenjuje u slučaju da se glavni energetski produkt za koji se obračunavaju emisije ima i ko-proizvod. U ovom istraživanju, to su slučajevi kada je pretpostavljeno da se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja, a ne ona sa kojih je sakupljena kukuruzovina. Prema pravilima RED metoda, treba da se uzmu u obzir donje toplotne moći ostatka fermentacije i biogasa. Pravilo je dosta nedorečeno, ali je na osnovu tumačenja od strane Adams i dr, (2015) to sprovedeno tako da je izračunata količina SM kukuruzovine koja preostane nakon odgovarajuće količine neophodne za generisanje biogasa koji sadrži 1 MJ primarne energije, preračunato na osnovu donje toplotne moći biogasa. Ta količina SM kukuruzovine u ostatku fermentacije je zatim pomnožena sa donjom toplotnom moći kukuruzovine od 17,7 MJ/kgSM (Kaltschmitt i dr, 2016). Dobijena vrednost u MJ podeljena sa zbirom iste vrednosti i 1 MJ je predstavljala alokacioni faktor za ostatak fermentacije. Eksperimentalno određene vrednosti prinosa i sastava biogasa i stepena razgranje SM su iskorišćene za računanje donje toplotne moći biogasa i materijalnih tokova biogasa/ostatak fermentacije.

Korišćenje biogasa e_u

Tehnologije energetskog korišćenja primarne energije biogasa su raznovrsne (Kaltschmitt i dr, 2016). Najširu primenu imaju generisanje električne energije i korišćenje kao biogoriva – biometana. Korišćenju biogasa prethodi prečišćavanje, uklanjanje štetnih komponenti biogasa poput H_2S , vodene pare, a u slučaju biometana i CO_2 . U slučaju biometana neophodno je i komprimovanje gasa, Grafik 19.



Grafik 19 Prečišćavanje biogasa u zavisnosti od tehnologije energetskog korišćenja (FNR, 2016)

U slučaju proizvodnje biometana, od posebnog značaja su postupci uklanjanja CO_2 iz biogasa. Njegovim uklanjanjem preostaje biometan sastavljen skoro isključivo od CH_4 . Najčešće primenjivani načini uklanjanja CO_2 , tehnički potpuno zreli, su proces u apsorpcionim kolonama i uklanjanje pomoću membrana. Proces u apsorpcionim kolonama zasniva se na većoj rastvorljivosti CO_2 od CH_4 u vodi. Membransko izdvajanje

podrazumeva da se koristi mikroporozna hidrofobna membrana. Oba postupka rezultiraju time da je koncentracija CH₄ u izlaznom gasu preko 90 %, a za membranski i preko 96 %.

Prečišćeni biogas se zatim utiskuje u mrežu prirodnog gasa, ili koristi kao gorivo i tu do izražaja dolazi čistoća gasa. Pri utiskivanju u mrežu prirodnog gasa, mora da se zna količina isporučene energije, a kod biogoriva, posebno se naglašava ograničen skladišeni kapacitet vozila, pa je neophodno da gas bude što većeg energetskog sadržaja i da ga je moguće koristiti u namenskim CNG motorima.

Tehnologije uklanjanja CO₂ iz biogasa razlikuju se i po tome da li se višak gasa (tzv. *off-gas*), gasni gubici, u procesu prečišćavanja biogasa, ispušta u atmosferu neoksidovan ili oksidovan (sagoreo). U slučaju da se višak gasa ne sagoreva, usvojeno je da su emisije 3 % generisanog CH₄. Ova vrednost varira u opsegu od 0,1 do 8 % u zavisnosti od korišćene tehnologije uklanjanja CO₂, a usvojena vrednost od 3 % je korišćena u (Giuntoli i dr, 2015). Za potrošnju električne energije pri uklanjanju CO₂ je usvojeno da se troši 3 % primarne energije generisanog biometana tj. da se za 1 MJ biometana troši 0,03 MJ električne energije (8,3 Wh).

Biogas postrojenja najčešće proizvedeni biogas sagorevaju u kogeneracionim jedinicama čiji glavni deo je gasni motor s unutrašnjim sagorevanjem, najčešće *Otto* (na engleskom, *Gas sparking engines*; na nemačkom *Gas-Ottomotoren*). Ređe primenu nalaze i gasni motori s inicijalnim paljenjem, koje omogućava dizel gorivo (na engleskom, *Pilot injection gas engines*; na nemačkom, *Zündstrahlmotoren*). Sagorevanjem biogasa i nizom termodinamičkih procesa unutar klipa motora, obezbeđuje se mehanička energija na vratilu motora s unutrašnjim sagorevanjem, koja se zatim prenosi na, najčešće, sinhroni električni generator.

Snaga gasnih *Otto* motora može da bude veća i od 1 MW_e. Karakteriše ih dug radni vek, a mogu da rade sa niskim udelom CH₄ u biogasu, i do 45 %. Električni stepeni korisnosti kogenerativnih postrojenja s ovakvim motorima su oko 38–40 %. Toplotni stepen korisnosti je obično nešto viši od električnog. Toplotna energija se koristi za grejanje fermentora.

Emisije GHG pri sagorevanju biogasa u gasnim motorima potiču od nesagorelog metana i emisija N₂O. Giuntoli i dr. (2015) usvajaju da 1,7 % generisanog metana ne sagoreva nego prolazi u nepromenjenoj formi kroz motor (na engleskom, *methane slip*). Navedenu vrednost navodi kao relevantnu i Liebetrau i dr. (2017), a pri tome zaključuje da se ostale emisije CH₄, iz gasnih instalacija i pri skladištenju biogasa, trebaju smatrati za zanemarive u poređenju sa emisijama CH₄ iz motora u slučaju dobrog održavanja biogas postrojenja. (Giuntoli i dr, 2015) navode da je vrednost emisija N₂O iz motora 0,00141 g/MJ biogasa, tj. 5 % emisija izraženih preko CO_{2ekv} su posledica emisija N₂O. Vrednost emisija GHG pri sagorevanju biogasa u bazi podataka *Ecoinvent* su izuzetno lošeg kvaliteta i neprimenjive za ozbiljnije studije analize emisija GHG. Iz tog razloga su primenjene navedene vrednosti iz (Giuntoli i dr, 2015). Emisije CH₄ kao posledica curenja iz gasnih instalacija su zanemarene za potrebe ovog istraživanja. Emisije CO₂ iz sagorevanja biogasa i one sadržane u biogasu u nepromenjenoj formi, smatrane su za biogene emisije, odnosno nisu ulazile u bilans emisija.

Pri formiranju materijalnog toka generisanih biometana i biogasa, uzeti su u obzir navedeni gubici CH₄.

Odnosnje hraniva i primena ostatka fermentacije kao dodatne operacije u okviru faze Ekstrakcija sirovina e_{ec}

Odnosnje hraniva

Odnosnjem kukuruzovine sa polja odnose se i hraniva sadržana u njima. Potencijalan efekat na obračunavanje emisija GHG je opisan u poglavlju 1.1. Pri razmatranju norme primene mineralnih hraniva nakon kukuruza, za narednu biljnu vrstu, uzimaju se u obzir i hraniva koja sa žetvenim ostacima preostaju na polju. Kako u slučaju njihovog odnošenja sa polja i energetske iskorisćenja ona više nisu na raspolaganju (osim u slučaju vraćanja ostatka fermentacije na isto polje, poseban slučaj u okviru ovog istraživanja), neophodno je da se nadoknade primenom, najčešće, mineralnih hraniva. Količina primene mineralnih hraniva zavisi od sadržaja azota, fosfora i kalijuma u kukuruzovini. Pregled podataka u literaturi naveden je u Tabeli 12. Nadoknada fosfora i kalijuma se razmatra u vidu jedinjenja fosfor pentoksida (P_2O_5) i kalijum oksida (K_2O)

Usvojeno je da se sa tonom SM kukuruzovine odnosi 0,23 kg P_2O_5 i 14 kg K_2O (Cook i Shinnars, 2011). Postoji veliki broj mineralnih hraniva kojima se u zemljište unosi potrebna količina ovih hraniva, a za ovo istraživanje je usvojeno da su to superfosfat za P_2O_5 kalijum nitrat za K_2O . Za bilans emisija GHG poreklom iz proizvodnje ovih mineralnih hraniva korišćeni su procesi iz baze podataka *Gabi Profesional RER: single superphosphate, as P_2O_5 , at regional storehouse* i *RER: potassium nitrate, as K_2O , at regional storehouse*. Emisije proistekle iz rada mehanizacije nisu razmatrane pošto je pretpostavljeno da se mineralna hraniva svakako koriste pri uzgajanju biljne vrste posle kukuruza, a da se izgubljena hraniva u kukuruzovini nadoknađuju kroz povećanje norme primene mineralnih hraniva.

Pri primeni azotnih mineralnih hraniva i organskih hraniva dolazi do gubitaka azota usled ispiranja azota kroz procedne vode, volatilizacije amonijaka i direktnih emisija N_2O usled denitrifikacije. Od volatilizovanog amonijaka nastaje N_2O i to predstavlja indirektnu emisiju N_2O u atmosferu. Kao posledica gubitaka azota neophodno je da se primenjuje veća količina azotnih hraniva da bi se zadovoljila količina potrebnog azota u zemljištu za narednu biljnu vrstu. Za proračun gubitaka azota u vidu gasovitih emisije azotnih jedinjenja i kroz ispiranje, korišćeni su emisioni faktori navedeni u izveštaju *Međuvladinog panela za klimatske promene* (IPCC, 2006a) koji predstavljaju najčešće citirane emisione faktore. Vrednost ovih faktora je navedena u Tabeli 13. Pored vrednosti direktnih i indirektnih emisija N_2O , za bilans emisija GHG poreklom iz proizvodnje ovih mineralnih hraniva korišćen je proces iz *Ecoinvent* baze podataka *Urea production, as N, RER*. da bi se u proračun uključile emisije proistekle iz proizvodnje azotnog mineralnog hraniva.

Tabela 12 Pregled navoda za elementarni sastav kukuruzovine

Parametar	Izvor					
	Evans i dr. (1988)	Zhong i dr. (2011)	Avila-segura i dr. (2011)	Hoskinson i dr. (2008)	Johnson i dr. (2010)	Cook i Shinnars (2011)
Ugljenik, % SM	46,500	46,860	-	-	-	-
Vodonik, % SM	5,810	-	-	-	-	-
Azot, % SM	0,560	0,660	0,645	0,800	0,816	-
Fosfor, % SM	-	-	0,084	0,079	0,075	0,235*
Kalijum, % SM	-	-	1,120	0,674	1,220	1,4**

* u formi P_2O_5 , ** u formi K_2O

Tabela 13 Emisioni faktori za gubitke azota (Giuntoli i dr, 2015; IPCC, 2006a, 2006b)

Emisioni faktor	Vrednost	Jedinica	Objašnjenje
Skladištenje ostatka fermentacije			
EF 1	0,005	kgN ₂ O-N/kgN ostatka fermentacije	Direktna emisija N ₂ O
EF 2	0,2	kgNH ₃ -N/kg neorg. N	Volatilizacija NH ₃
EF 3	0,0001	kgNO-N/kg neorg. N	Volatilizacija NO
EF 4	0,003	kgN ₂ -N/kg neorg. N	Volatilizacija N ₂
Primena ostatka fermentacije i mineralnih hraniva			
EF 5	0,01	kgN ₂ O-N/kgN primenjenog	Direktna emisija N ₂ O
EF 6	0,01	kgN ₂ O-N/(kgNH ₃ -N+kgNO _x -N)	Indirektna emisija N ₂ O, volatilizacija i redepozicija
EF 7	0,0075	kgN ₂ O-N/kgN ispranog	Indirektna emisija N ₂ O, od ispiranja
FracGASF	0,10	(kgNH ₃ -N+kgNO _x -N)/kgN primenjenog	Volatilizacija N iz mineralnih hraniva
FracGASM	0,20	(kgNH ₃ -N+kgNO _x -N)/kgN primenjenog	Volatilizacija N iz organskih hraniva
FracLEACH-(H)	0,30	kgN ispranog/kgN primenjenog	N ispiranje

Primena ostatka fermentacije

Kada je u okviru istraživanja razmatrano da se ostatak fermentacije distribuira na ista polja sa kojih je kukuruzovina ubirana u obzir su uzete emisije GHG proistekle iz same operacija distribucije i emisije koje su posledica denitrifikacije azota iz ostatka fermentacije kao direktne i indirektna emisije N₂O. Identično kao i kod mineralnih hraniva, indirektna emisija N₂O potiču od volatilizacije amonijaka iz ostatka fermentacije. Kao što je navedeno u poglavlju, ostatak fermentacije može da se separiše i na polje distribuira u tečnom ili čvrstom stanju. Usvojeno je da se ostatak fermentacije u formi tečnog ostatka distribuira na polja korišćenjem distributera (raspodeljivača) tečnog stajnjaka sa udarnom pločom što predstavlja najčešće korišćeni oblik distribucije tečnih organskih hraniva u Srbiji. Transport ostatka fermentacije nije uzet u razmatranje da bi analize bile u skladu sa metodom iz Giuntoli i dr (2015) tj. (European Commission, 2017). Za emisije nastale iz rada mehanizacije za distribuciju, korišćen je proces *Liquid manure spreading, by vacuum tanker, RoW* iz *Ecoinvent* baze podataka. Emisije CH₄ tokom primene ostatka fermentacije su zanemarene pošto su u poređenju sa emisijama N₂O zanemarive (Wulf i dr 2002). Za obračunavanje azota u N₂O emitovanog kroz direktne i indirektna emisije ovog oksida, primenjeni su IPCC (*Intergovernmental Panel for Climate Change*) emisioni faktori, Tabela 13. Za izgublenu količinu azota usled volatilizacije i direktnih emisija N₂O usvojeno je da se nadoknađuje primenom uree s 46 % azota u svom sastavu. Pošto se, kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, direktno i indirektno emituje N₂O, opet su primenjeni IPCC emisioni faktori za utvrđivanje vrednosti ovih emisija. Za emisije proistekle iz proizvodnje ovog mineralnog hraniva korišćen je proces iz *Ecoinvent* baze podataka *Urea production, as N, RER*. Količina ostatka fermentacije je određena po principu objašnjenom u poglavlju 2.2, s tim da je za proračun količine ostatka fermentacije usvojeno da je sadržaj SM 6,5 %.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Prinos i sastav biogasa

U Tabeli 14 navedene su vrednosti prinosa biogasa i metana specificiranih po tSM za 36 sprovedenih merenja, a u Tabeli 15 vrednosti specificiranih po tOSM. Rezultati merenja specificiraju se po SM jer se ta vrednost koristi za proračun emisija GHG, a po OSM jer je to jedini merodavan parametar da se porede rezultati istraživanja koji ukazuje na energetski sadržaj. U Tabelama 16 i 17 navedene su vrednosti elemenata deskriptivne statistike za četiri grupe rezultata – prinosa biogasa i metana, oba specificirana po SM i OSM. Zatim su dati *Box plot* dijagram za navedena merenja, vrednosti *Shapiro-Wilk* testa normalnosti, Tabela 18, i Q-Q plot dijagram za slučaj prinosa metana po toni SM, Grafik 20, a u Prilogu 3 se nalaze Q-Q plot dijagrami za ostale vrednosti merenja prinosa biogasa i CH₄ specificirani po tOSM i tSM.

Vrednosti merenja sadržaja SM kukuruzovine dobijene pri pripremi eksperimentalne analize prinosa i sastava biogasa varirale su u opsegu od 89,4 do 93,1 %, a sadržaja OSM od 87,4 do 96,5 % SM. Dobijene vrednosti za sadržaj SM očekivane su s obzirom da su uzorci prethodno prosušeni tokom stajanja u prostoriji laboratorije.

Tabela 14 Rezultati eksperimentalnih merenja prinosa biogasa i metana specificiranih po SM

Merenje	Prinos biogasa Nm ³ /tSM	Prinos metana Nm ³ /tSM	Merenje	Prinos biogasa Nm ³ /tSM	Prinos metana Nm ³ /tSM
1	447,7	248,3	19	379,1	209,7
2	457,3	254,4	20	409,5	221,9
3	445,9	249,9	21	414,4	224,7
4	413,3	245,2	22	497,9	268,7
5	397,5	238,1	23	427,8	233,3
6	396,5	233,7	24	418,3	222,3
7	459,5	247,3	25	417,4	225,7
8	452,1	240,7	26	449,1	210,2
9	418,6	230,4	27	449,1	242,6
10	465,3	304,9	28	415,5	232,3
11	444,0	293,9	29	412,4	231,0
12	431,2	285,7	30	423,0	237,3
13	462,8	283,2	31	439,9	207,7
14	418,0	255,0	32	441,3	209,8
15	467,2	282,6	33	409,5	201,6
16	410,4	246,7	34	406,3	199,7
17	435,1	262,6	35	398,2	196,8
18	466,5	280,2	36	493,6	266,5

Tabela 15 Rezultati eksperimentalnih merenja prinosa biogasa i metana specificiranih po OSM

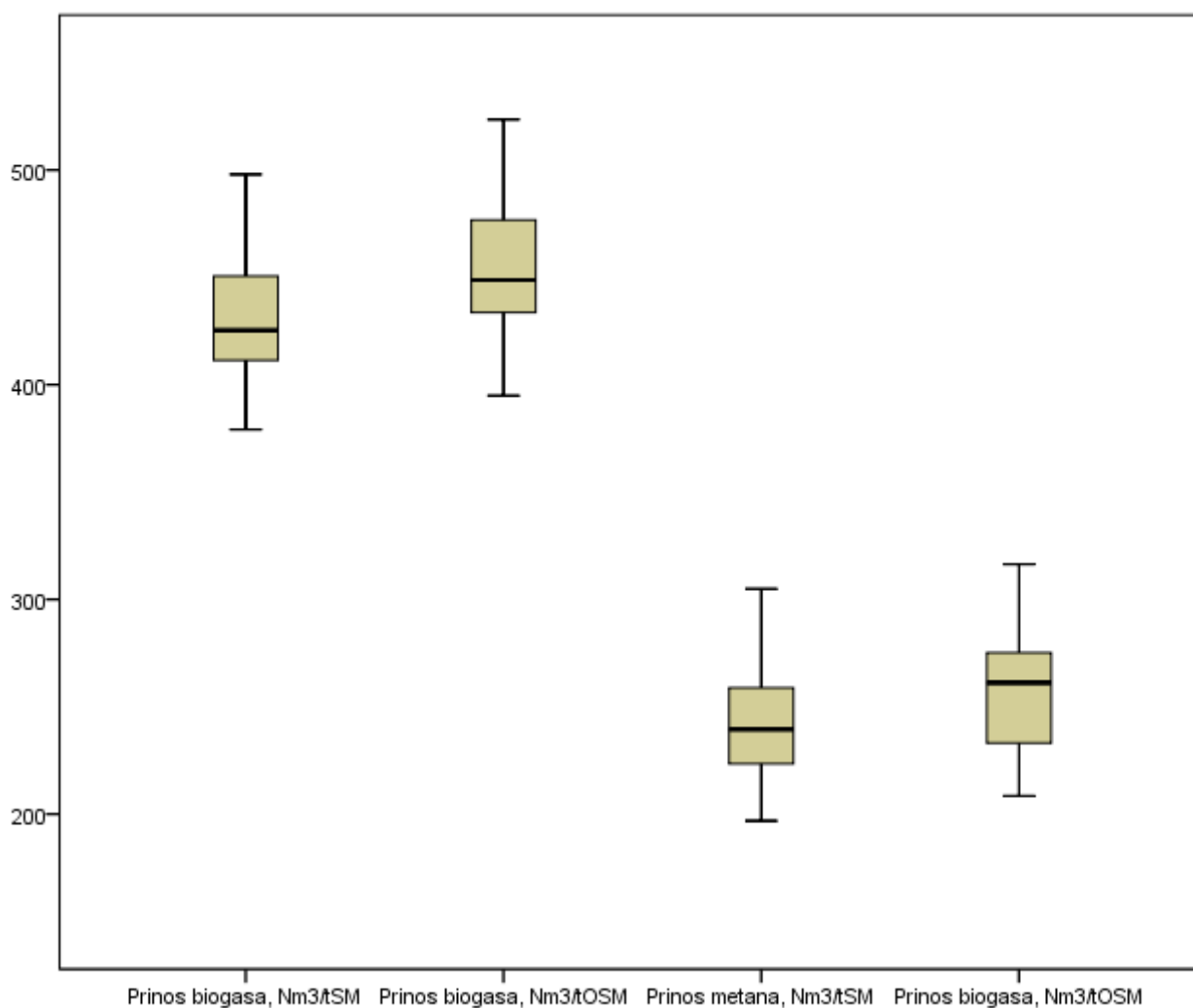
Merenje	Prinos biogasa Nm ³ /tOSM	Prinos metana Nm ³ /tOSM	Merenje	Prinos biogasa Nm ³ /tOSM	Prinos metana Nm ³ /tOSM
1	470,8	261,1	19	394,9	218,5
2	480,9	267,5	20	426,7	231,2
3	468,8	262,7	21	431,8	234,1
4	462,2	274,2	22	523,5	282,5
5	444,5	266,3	23	446,5	243,5
6	443,3	261,3	24	436,7	232,0
7	521,6	280,8	25	435,7	235,6
8	513,3	273,3	26	402,6	219,1
9	475,2	261,6	27	467,9	252,8
10	482,8	316,4	28	436,9	244,2
11	460,7	305,0	29	433,6	242,8
12	447,5	296,5	30	444,8	249,5
13	478,3	292,7	31	454,2	214,4
14	432,0	263,6	32	455,6	216,6
15	482,9	292,1	33	433,7	213,5
16	424,6	255,2	34	430,3	211,5
17	450,1	271,7	35	421,7	208,4
18	482,7	289,8	36	511,5	276,1

Tabela 16 Elementi deskriptivne statistike za prinos biogasa

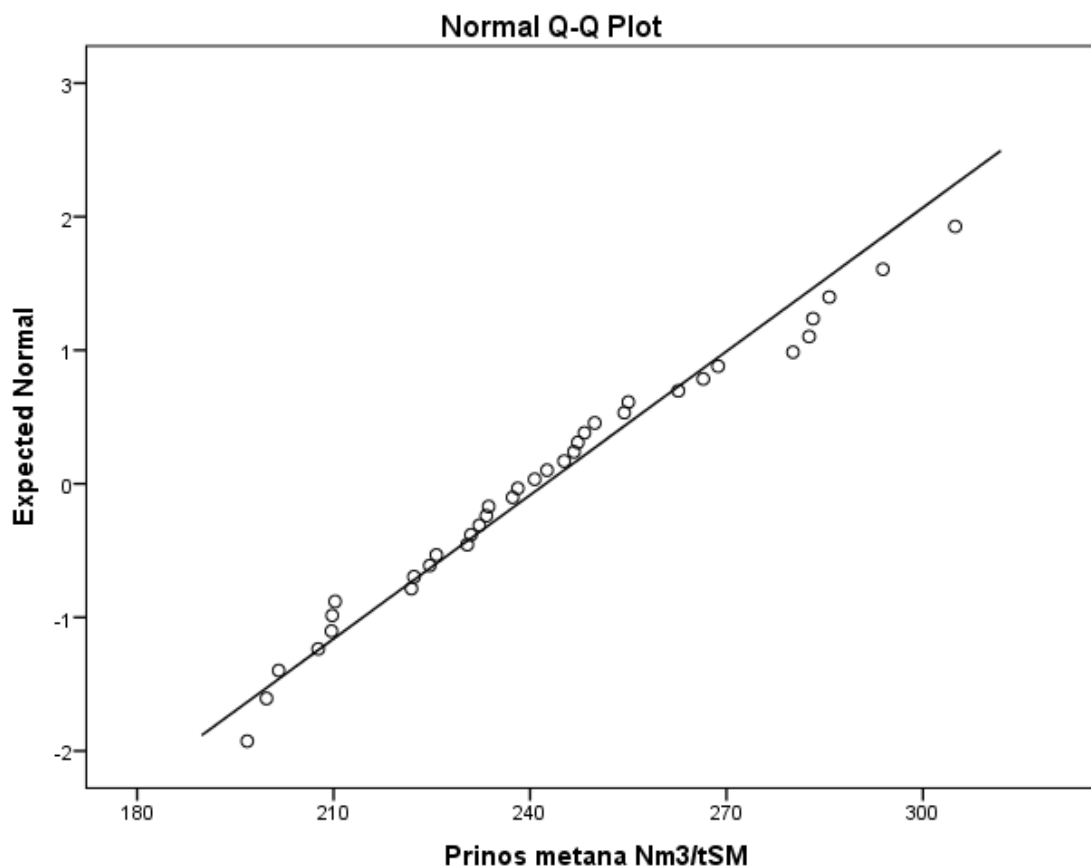
	Biogas Nm ³ /tSM		Biogas Nm ³ /tOSM	
	Vrednost	St. greška	Vrednost	St. greška
Sr. vrednost	431,4	4,3	455,8	5,2
95 % interval znač. Gornja gr.	421,7	-	445,4	-
za sr. vr. Donja gr.	440,9	-	466,3	-
Medijana	425,4	-	448,8	-
Varijansa	807,1	-	961,1	-
St. devijacija	28,4	-	31,0	-
Minimum	379,1	-	394,9	-
Maksimum	497,9	-	523,5	-
Opseg	118,9	-	128,6	-

Tabela 17 Elementi deskriptivne statistike za prinos metana

	Metan Nm ³ /tSM		Metan Nm ³ /tOSM	
	Vrednost	St. greška	Vrednost	St. greška
Sr. vrednost	242,3	4,6	256,0	4,8
95 % interval znač. za sr. vr.	Gornja gr.	-	246,3	-
	Donja gr.	-	265,8	-
Medijana	239,4	-	261,2	-
Varijansa	777,3	-	834,7	-
St. devijacija	27,9	-	28,9	-
Minimum	196,8	-	208,4	-
Maksimum	304,9	-	316,4	-
Opseg	108,1	-	108,0	-



Grafik 20 Box-plot dijagrami za rezultate merenja prinosa biogasa i metana



Grafik 21 Q-Q plot dijagram utvrđenih vrednosti prinosa metana

Tabela 18 Rezultati *Shapiro-Wilk* testa normalnosti za prinos biogasa i metana

	Rezultat	df	Znač.
Prinos biogasa Nm ³ /tSM	0,969	36	0,392
Prinos biogasa Nm ³ /tOSM	0,958	36	0,184
Prinos metana Nm ³ /tSM	0,968	36	0,385
Prinos metana Nm ³ /tOSM	0,970	36	0,415

Srednja vrednost rezultata merenja prinosa biogasa iznosi 431,4 Nm³/tSM, a metana 242,3 Nm³/tSM, tj. udeo metana je 56 %. Specificirano po OSM, srednja vrednost rezultata prinosa biogasa iznosi 455,9, a metana 256,1 Nm³/tOSM. *Box plot* dijagrami za navedena merenja ukazuju da pri srovedenim merenjima nisu dobijene sumnjive vrednosti merenja. Vrednosti *Shapiro-Wilk* testa normalnosti (vrednost značajnosti je viša od nivoa značajnosti od 0,05) i Q-Q plot dijagrami, Grafik 20 i Prilog 3, ukazuju na zadovoljenje uslova normalnosti dobijenih rezultata merenja.

U pogledu hemijskog sastava, najveći udeo SM kukuruzovine čine ugljeni hidrati, koji grade celulozu i hemicelulozu, Tabela 19. Proteini i masti predstavljaju zbirno oko 10 % SM. Na osnovu elementarnog sastava kukuruzovine, maksimalan teoretski prinos CH₄ izračunat na osnovu prinosa makromolekula i tzv. Bušvelove metode (Angelidaki i Sanders, 2004; Buswell i Mueller, 1952) iznosi oko 470 Nm³/tOSM (Xu i Li, 2012). Na osnovu hemijskog sastava i koeficijenta razgradnje za makromolekule od 90 %, prinos CH₄ iznosi oko 350 Nm³/tOSM (Zhong i dr, 2011). Eksperimentalno dobijena vrednost prinosa metana od 256,1 Nm³/tOSM je značajno manja od nevedenih teorijskih, ali

očekivana. Sadržaj lignina od 13,1 do 16,9 % u SM, predstavlja nedostatak za proizvodnju biogasa pošto fizičko-hemijska povezanost sa celulozom i hemicelulozom onemogućava mikroorganizmima njihovu nesmetanu razgradnju. Iz tog razloga se smatra da je preduslov maksimizirane proizvodnje biogasa iz lignoceluloznih vrsta biomase, kao što je kukuruzovina, primena predtretmana. Njime se složeni kompleks lignina sa celulozom i hemicelulozom narušava (oštećuje).

Dobijeni rezultati uporedivi su s eksperimentalnim rezultatima drugih istraživanja. Prema navodima u literaturi, eksperimentalno utvrđen prinos biogasa i metana iz kukuruzovine po OSM varira u širokom opsegu, Tabela 20. Razlog za to je najčešće uticaj primenjenog predtretmana za povećanje prinosa metana. U Tabeli 20, vrednosti prinosa metana netretirane kukuruzovine uporedivi su s eksperimentalnim rezultatom prinosa metana iz ovog istraživanja. Prinos metana, uz najefikasnije sisteme predtretmana, dostiže do 350 Nm³/tOSM (Lizasoain i dr, 2017; Schroyen i dr, 2014), a iz toga proističe da anaerobnom fermentacijom, u realnim uslovima, i bez primene predtretmana, može da se dostigne do 75 % maksimalnog prinosa metana.

Tabela 19 Pregled literaturenih podataka za hemijski sastav kukuruzovine

Parametar	Izvor			
	Evans i dr. (1988)	Demirbaş (1997)	Zhong i dr. (2011)	Jin i dr. (2014)
Suva materija, %	95,0	89,4	94,7	-
Organska suva materija, %	88,0	-	-	-
Organska suva materija, % SM	92,6	96,3	91,2	93,6
Celuloza, % SM	36,8	51,2	-	28,9
Hemiceluloza, % SM	25,4	30,7	-	15,9
Lignin, % SM	16,9	14,4	-	13,1
Pepeo, % SM	7,4	3,7	8,8	6,5
Proteini, % SM	-	-	4,1	-
Masti, % SM	-	-	5,3	-
Ugljeni hidrati, % SM	-	-	81,8	-

Tabela 20 Pregled vrednosti prinosa biogasa i metana iz kukuruzovine

Prinos biogasa, Nm ³ /tOSM	Prinos metana, Nm ³ /tOSM	SM, %	OSM, %	OSM, % SM	Izvor
467	285	86,0	94,3	-	Lizasoain i dr. (2017) ⁷
370-585	206-348	-	-	-	Lizasoain i dr. (2017) ⁸
374-492	262-344	-	-	-	Schroyen i dr. (2014)
-	238	92,2	87,5	-	Xu i dr. (2013)
260	-	88,8	83,6	-	Li i dr. (2013)
395	200	94,7	-	91,2	Zhong i dr. (2012)
-	304	92,2	87,5	-	Xu i Li. (2012)
450	-	92,5	85,2	-	Zhou i dr. (2012)
335	-	30,8	-	89,1	Chen i dr. (2010)

Prinos i sastav biogasa za dva kontrolna uzorka celuloze potvrdila su odgovarajući kvalitet korišćenih inokuluma, Prilog 4. Dobijene vrednosti prinosa predstavljaju približno

⁷ netretirana kukuruzovina

⁸ tretirana kukuruzovina

80–85 % maksimalnog prinosa od 740 Nm³/tOSM prema korišćenom uputstvu (VDI, 2006).

3.2 Karakteristike ostatka fermentacije

3.2.1 Stepenu razgradnje kukuruzovine

Prosečan stepen razgradnje SM iznosio je 80,4 %, a OSM 84,3 %. Pri tome uzeti su u obzir svi materijalni izlazi u vidu generisanog biogasa i uzorkovane mase. Ove vrednosti uporedive su s ostvarenim maksimalnim prinosima metana i sa njihovim stepenima razgradnje koji imaju vrednost oko 90 %.

U slučaju nižih prinosa biogasa, i stepen razgradnje je niži. Za ostvarenu prosečnu vrednost prinosa bogasa navedenu u poglavlju 3.1, 242,1 Nm³/tSM, stepen razgradnje SM iznosi približno 66,1 %. Navedena vrednost proporcionalna je stepenu razgradnje ostvarenom u kontinualnom eksperimentu. Korišćena je za potrebe definisanja materijalnog toka energetskog iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine.

3.2.2 Sadržaj i forma azota u ostatku fermentacije

Fizičko hemijske-karakteristike korišćene kukuruzovine i inokuluma za kontinualni eksperiment, nalaze se u Tabeli 21.

Tabela 21 Fizičko-hemijske karakteristike korišćene kukuruzovine i inokuluma

Uzorak	Kukuruzovina		Inokulum	
	Vrednost	Udeo, %	Vrednost	Udeo, %
Parametar				
SM, %	90,05	-	6,26	-
OSM, %	85,57	-	4,62	-
OSM, % SM	95,04	-	73,81	-
Ukupni N, % SM	0,72	100,00	3,94	100,00
NH ₄ -N, % SM	0,05	6,36	2,47	62,75
NO ₃ -N, % SM	0,00	0,00	0,00	0,00
Organski N, % SM	0,67	93,64	1,47	37,25

U pregledu literature u Tabeli 12, sadržaj ukupnog azota u kukuruzovini varira u opsegu od 0,56 do 0,82 % SM, te je dobijena vrednost za ispitivanu kukuruzovinu uporediva. Sadržaj azota nije jednak u svim frakcijama kukuruzovine, najviši je u stabljici, a najniži u kumušini, a s obzirom da je ispitivani uzorak mešavina svih frakcija, dobijena vrednost može da se smatra za reprezentativnu. Približno 94 % azota se nalazi se u formi organskog, kao integralni deo proteina. Neorganski deo, oko 6 %, u potpunosti je u formi amonijačnog azota (NH₄-N).

Vrednost sadržaja ukupnog azota u inokulumu je na donjoj granici očekivanog. Analize sa biogas postrojenja iz kog je uziman uzorak inokuluma pokazuje vrednosti udela azota 4 do 6 % SM (lična komunikacija Kosta Radanović, kompanija Global Seed).

Dobijene vrednosti fizičko-hemijskih karakteristika ostatka fermentacije prikazane su u Tabelama 22–24. Primetno je i da sadržaj ukupnog azota specificiran po SM uzorka raste tokom prva dva merenja u svim fermentorima. Pretpostavlja se da je uzrok toga u vezi sa načinom uzorkovanja i nemogućnosti da krupnije suspendovane čestice budu u uzorku. Treće merenje na kraju eksperimenta je podrazumevalo da je masa unutar fermentora izmešana što se i odrazilo na krajnji, približno isti sadržaj azota u sva tri fermentora s inicijalnim početnim sadržajem inokuluma.

Tabela 22 Fizičko-hemijske karakteristike ostatka fermentacije iz fermentora 1

Uzorak	Merenje 1		Merenje 2		Merenje 3	
	Vrednost	Udeo, %	Vrednost	Udeo, %	Vrednost	Vrednost
Parametar						
SM, %	4,18	-	4,12	-	5,18	-
OSM, %	3,30	-	3,16	-	4,17	-
OSM, % SM	78,95	-	76,63	-	80,56	-
Ukupni N, % SM	6,29	100,00	6,97	100,00	3,59	100,00
NH ₄ -N, % SM	4,33	68,82	3,67	52,61	2,72	75,81
NO ₃ -N, % SM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Org. N, % SM	1,96	31,18	3,30	47,39	0,87	24,19

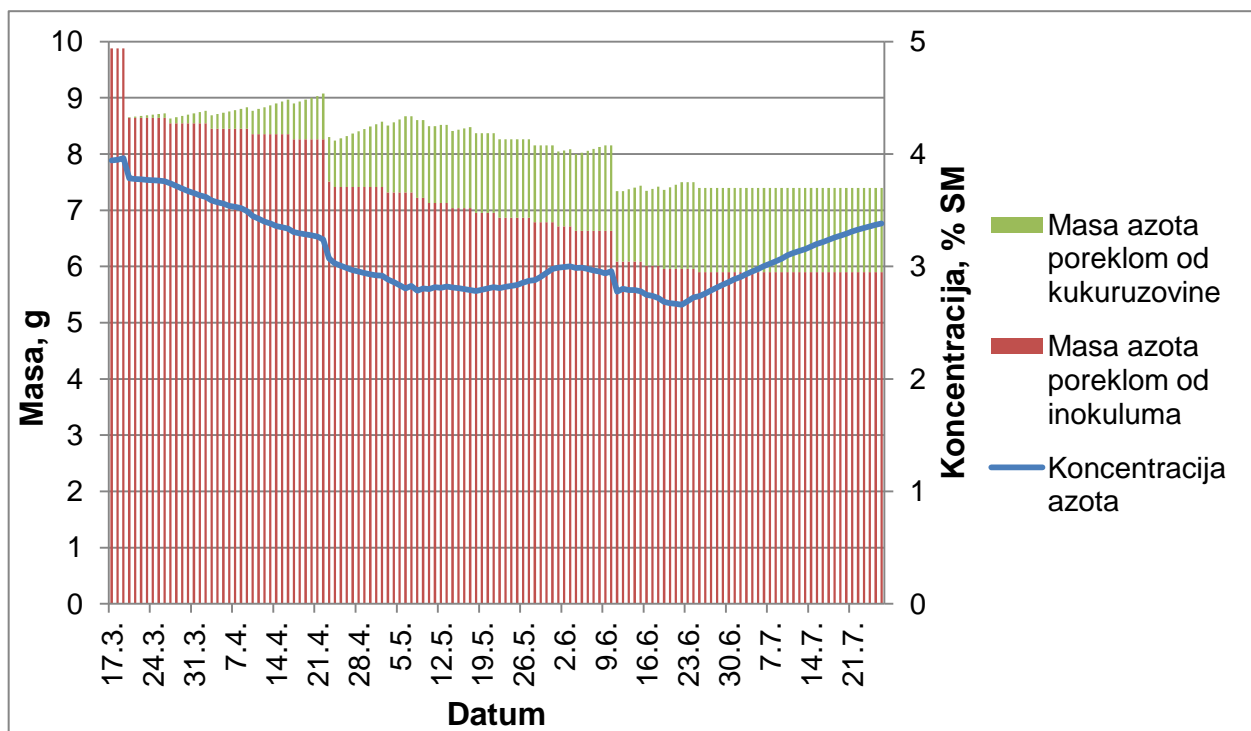
Tabela 23 Fizičko-hemijske karakteristike ostatka fermentacije iz fermentora 2

Uzorak	Merenje 1		Merenje 2		Merenje 3	
	Vrednost	Udeo, %	Vrednost	Udeo, %	Vrednost	Vrednost
Parametar						
SM, %	4,78	-	4,26	-	5,06	-
OSM, %	3,72	-	3,26	-	4,04	-
OSM, % SM	77,90	-	76,50	-	79,80	-
Ukupni N, % SM	5,92	100,00	5,42	100,00	3,69	100,00
NH ₄ -N, % SM	3,95	66,78	3,69	67,97	2,43	65,97
NO ₃ -N, % SM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Org. N, % SM	1,97	33,22	1,74	32,03	1,26	34,03

Tabela 24 Fizičko-hemijske karakteristike ostatka fermentacije iz fermentora 3

Uzorak	Merenje 1		Merenje 2		Merenje 3	
	Vrednost	Udeo, %	Vrednost	Udeo, %	Vrednost	Vrednost
Parametar						
SM, %	4,11	-	4,06	-	5,24	-
OSM, %	3,14	-	3,23	-	4,11	-
OSM, % SM	76,5	-	79,60	-	78,37	-
Ukupni N, % SM	6,47	100,00	5,96	100,00	3,69	100,00
NH ₄ -N, % SM	4,45	68,4	4,09	68,6	2,53	68,59
NO ₃ -N, % SM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Org. N, % SM	2,02	31,2	1,87	31,4	1,16	31,41

Na Grafiku 22 predstavljena je promena prosečne mase azota u fermentorima određena na osnovu materijalnih ulaza i izlaza. Eksperiment je započet sa približno 10 g ukupnog azota u fermentorima, a završen sa prosečnom vrednošću od oko 7,5 g. Prosečna relativna greška između sadržaja azota dobijene merenjem i proračunate iznosi 9,4 %. U inokulumu, udeli organskog i amonijačnog neorganskog azota iznosili su 62,7 i 37,3 %, respektivno. Prosečan sadržaj ovih formi azota je na kraju eksperimenta iznosio 67,3 i 32,7 %. Zbog malog obima uzoraka nije bilo moguće da se odredi da li je razlika statistički značajna. Tokom eksperimenta, usled razgradnje organske materije u kojoj je sadržan organski azot, raste udeo neorganskog.



Grafik 22 Kretanje mase azota poreklom iz kukuruzovine i inokuluma tokom trajanja eksperimenta

Sadržaj ukupnog azota poreklom od kukuruzovine rastao je sa njenim unosom. Tokom 5 meseci eksperimenta, 20 % azota u fermentoru je na kraju predstavljao azot poreklom od kukuruzovine, iako je masa kukuruzovine i vode unošenih nakon inokuluma predstavljala oko 44 % ukupne mase. U fermentore je uneto oko 2,2 g azota kukuruzovinom, a smatrano je da je na kraju eksperimenata oko 1,5 g preostalo u njima na osnovu količine i karakteristika materijalnih izlaza. U slučaju inokuluma, uneto je približno 10 g, a proračunato je da je u fermentorima preostalo u proseku približno 5,9 g azota. Kako je za formu azota poreklom iz inokuluma pretpostavljeno da ostaje nepromenjena tokom eksperimenta, bilo je moguće da se odredi forma azota poreklom od kukuruzovine na kraju eksperimenta. Utvrđeno je da 85 % ukupnog azota poreklom od kukuruzovine ima formu amonijačnog azota, a preostalih 15 % organskog azota. Uzimajući u obzir početni odnos, približno 80 % organskog azota je promenilo formu u neorganski tokom anaerobne fermentacije i razgradnje organske materije. Ova vrednost je približna vrednošću stepena razgradnje suve materije kukuruzovine u fermentorima tokom eksperimenta. Usled toga, pretpostavlja se da stepen razgradnje kukuruzovine odgovara i stepenu transformacije organskog u neorganski azot u toku fermentacije.

Kranji sadržaj azota u ostatku fermentacije dobijen kontinualnim eksperimentom uporediv je sa sadržajem azota za četiri uzorka ostatka fermentacije, Tabela 25.

Tabela 25 Sadržaj suve materije i hraniva u ostatku fermentacije (Bachmaier i dr, 2011; Wendland i Lichti, 2012)

Postrojenje	1	2	3	4
Korišćeni supstrati, %	SK(57), TS(24), SZK(10), SCB(8), O(1)	SK(45), TS(2), SZK(23), SCB(17), O(3)	SK(63), TS(6), SZK(11), SCB(18), O(2)	-
Suva materija, %	6,4	6,4	7,4	6,5
N _{ukupno} , kg/m ³	5,0	5,0	4,5	5,1
NH ₄ , kg/m ³	3,4	2,5	2,6	3,2
P ₂ O ₅ , kg/m ³	2,0	1,3	1,9	2,3
K ₂ O, kg/m ³	4,7	4,9	5,4	5,5

SK– silaža kukuruza; TS– tečni stajnjak; SZK– silaža zrna kukuruza; SCB– silaža cele biljke žitarica; O– ostalo.

3.3 Vrednosti emisija GHG

U ovom potpoglavlju navedene su tipične vrednosti emisija GHG za sve razmatrane faze energetskog iskorišćenja kukuruzovine. Navedene vrednosti odnose se na emisije izražene u gCO_{2ekv} po odgovarajućoj funkcionalnoj jedinici, a inventar emisija izražen kroz pojedinačne GHG nalazi se u Prilogu 5. Uobičajene vrednosti emisije navedene su zbirno za sve faze u poglavlju 3.3.5.

3.3.1 Emisije GHG u fazi Ekstrakcija sirovina e_{ec} (spremanje kukuruzovine)

Osnovna operacija u okviru faze ekstrakcije sirovina je ubiranje kukuruzovine. Unapređenjem RED metoda, ovoj operaciji dodate su emisije u okviru distribucije ostatka fermentacije i nadoknade hraniva.

Spremanje kukuruzovine

U Tabelama 26 i 27 navedene su utvrđene vrednosti emisija za ovu fazu u slučaju različitih načina sakupljanja kukuruzovine. Sve vrednosti emisija specificirane su po funkcionalnoj jedinici 1 tSM. U nastavku su navedene vrednosti za uobičajen prinos kukuruzovine, tj. kada je uberivo 6,3 tSM/ha.

Tabela 26 Emisije GHG za spremanje kukuruzovine u gCO_{2ekv}/tSM, sakupljanje u dva prohoda

	Operacija	Normalan prinos ¹	Nizak prinos ²	Visok prinos ³	
Četvrtaste bale	Formiranje zboja <i>cornrower</i>	908,7	1.335,2	736,1	
	Formiranje zboja <i>cornrower</i> , dizel	146,9	215,9	119,0	
	Baliranje ČB	2.283,3	3.354,9	1.849,5	
	Baliranje ČB, dizel	367,4	539,8	297,6	
	Vezivo baliranje ČB	2.847,1	2.847,1	2.847,1	
	Utovar ČB	1.871,5	1.871,5	1.871,5	
	Utovar ČB, dizel	300,1	300,1	300,1	
	Transport ČB do primarnog sk.	705,0	705,0	705,0	
	Transport ČB do primarnog sk, dizel	113,1	113,1	113,1	
	Kamionski transport ČB	3.062,2	3.062,2	3.062,2	
	Kamionski transport ČB, dizel	512,0	512,0	512,0	
	Folija skladištenje ČB	696,5	696,5	696,5	
	Ukupno	13.813,8	15.553,2	13.109,6	
	Valjkaste bale	Formiranje zboja <i>cornrower</i>	908,7	1.335,2	736,1
		Formiranje zboja <i>cornrower</i> , dizel	146,9	215,9	119,0
Baliranje VB		2.283,3	3.354,9	1.849,5	
Baliranje VB, dizel		367,4	539,8	297,6	
Mreža baliranje VB		1.660,7	1.660,7	1.660,7	
Utovar VB		2.797,3	2.797,3	2.797,3	
Utovar VB, dizel		448,5	448,5	448,5	
Transport VB bala do primarnog sk		972,7	972,7	972,7	
Transport VB bala do primarnog sk, dizel		156,0	156,0	156,0	
Kamionski transport VB		4.676,3	4.676,3	4.676,3	
Transport VB bala, dizel		781,9	781,9	781,9	
Folija skladištenje VB		676,7	676,7	676,7	
Ukupno		15.876,4	17.615,8	15.172,2	
Silaža kukuruzovine		Formiranje zboja <i>cornrower</i>	908,7	1.335,2	736,1
		Formiranje zboja <i>cornrower</i> , dizel	146,9	215,9	119,0
	Rad silažnog kombajna	7.290,4	7.290,4	7.290,4	
	Rad silažni kombajn, dizel	1.013,9	1.013,9	1.013,9	
	Traktora pri sakupljanju silaže	1.512,3	1.512,3	1.512,3	
	Traktora pri sakupljanju silaže, dizel	230,8	230,8	230,8	
	Transport silaže	6.576,5	6.576,5	6.576,5	
	Transport silaže, dizel	1.054,7	1.054,7	1.054,7	
	Siliranje	2,9	2,9	2,9	
	Siliranje, dizel	0,5	0,5	0,5	
	Folija za pokrivanje silaže	56,6	56,6	56,6	
	Ukupno	18.794,2	19.289,6	18.593,6	

¹Normalan uberivi prinos kukuruzovine, ²nizak uberivi prinos kukuruzovine, ³visok uberivi prinos kukuruzovine

Tabela 27 Emisije GHG za spremanje kukuruzovine u gCO_{2ekv}/tSM, sakupljanje u tri prohoda

	Operacija	Normalan prinos ¹	Nizak prinos ²	Visok prinos ³
Četvrtaste bale	Formiranje zboja grabljama	1.926,3	2.751,8	1.481,7
	Formiranje zboja grabljama, dizel	309,6	442,3	238,2
	Baliranje ČB	2.885,2	4.121,7	2.219,4
	Baliranje ČB, dizel	464,2	663,2	357,1
	Vezivo baliranje ČB	2.847,1	2.847,1	2.847,1
	Utovar ČB	1.871,5	1.871,5	1.871,5
	Utovar ČB, dizel	300,1	300,1	300,1
	Transport ČB do primarnog sk.	705,0	705,0	705,0
	Transport ČB do primarnog sk, dizel	113,1	113,1	113,1
	Kamionski transport ČB	3.062,2	3.062,2	3.062,2
	Kamionski transport ČB, dizel	512,0	512,0	512,0
	Folija skladištenje ČB	696,5	696,5	696,5
	Ukupno	15.692,8	18.086,5	14.403,9
	Valjkaste bale	Formiranje zboja grabljama	1.926,3	2.751,8
Formiranje zboja grabljama, dizel		309,6	442,3	238,2
Baliranje VB		2.885,2	4.121,7	2.219,4
Baliranje VB, dizel		464,2	663,2	357,1
Mreža baliranje VB		1.660,7	1.660,7	1.660,7
Utovar VB		2.797,3	2.797,3	2.797,3
Utovar VB, dizel		448,5	448,5	448,5
Transport VB bala do primarnog sk		972,7	972,7	972,7
Transport VB bala do primarnog sk, dizel		156,0	156,0	156,0
Kamionski transport VB		4.676,3	4.676,3	4.676,3
Transport VB bala, dizel		781,9	781,9	781,9
Folija skladištenje VB		676,7	676,7	676,7
Ukupno		17.755,3	20.149,0	16.466,4
Silaža kukuruzovine		Formiranje zboja grabljama	1.926,3	2.751,8
	Formiranje zboja grabljama, dizel	309,6	442,3	238,2
	Rad silažnog kombajna	7.290,4	7.290,4	7.290,4
	Rad silažni kombajn, dizel	1.013,9	1.013,9	1.013,9
	Traktora pri sakupljanju silaže	1.512,3	1.512,3	1.512,3
	Traktora pri sakupljanju silaže, dizel	230,8	230,8	230,8
	Transport silaže	6.576,5	6.576,5	6.576,5
	Transport silaže, dizel	1.054,7	1.054,7	1.054,7
	Siliranje	2,9	2,9	2,9
	Siliranje, dizel	0,5	0,5	0,5
	Folija za pokrivanje silaže	56,6	56,6	56,6
	Ukupno	19.974,4	20.932,6	19.458,4

¹Normalan uberivi prinos kukuruzovine, ²nizak uberivi prinos kukuruzovine, ³visok uberivi prinos kukuruzovine

U slučaju sakupljanja kukuruzovine u dva prohoda, usled rada *cornrowera*, emituje se 1.056 gCO_{2ekv}. U slučaju sakupljanja u tri prohoda, kada usitnjena kukuruzovina iz kombajna preostane rasuta na polju, usled rada mehanizacije za formiranje zboja emituje se 2.236 gCO_{2ekv}. Pri baliranju kukuruzovine u zboju u formi ČB, emituje se 5.498 gCO_{2ekv},

a skoro 52 % emisija je posledica proizvodnje vezivne plastike koja obezbeđuje postojanost ČB. U slučaju VB, emisije iznose oko 4.311 gCO_{2ekv} uz udeo 40 % emisija od vezivne mrežice. Ukupne vrednosti emisija pri baliranju, kada ovaj proces predstavlja treći prohod, iznose 6.197 gCO_{2ekv} za ČB i 5.010 gCO_{2ekv} za VB. Više vrednosti emisija za baliranje posledica su manje mase kukuruzovine po dužini zboja usled neefikasnijeg grabljenja u poređenju sa *cornrower*-om. Za pravljenje bale potrebna je uvek ista količina kukuruzovine, te je u slučaju da je ova operacija treći prohod nakon grablji, potrebno je da se zahvati kukuruzovina iz zboja veće dužine. U slučaju da se kukuruzovina sakuplja pomoću silažnog kombajna, emisije GHG su posledica rada kombajna, ali i traktora koji se paralelno sa kombajnom kreće po parceli. Emisije kao posledica sakupljanja silažnim kombajnom iznose 8.304 gCO_{2ekv}, a traktora 1.743 gCO_{2ekv}, ukupno oko 10.048 gCO_{2ekv}. Kada je rad silažnog kombajna treći prohod, emisije su istog iznosa.

U slučaju balirane kukuruzovine, pre transporta do primarnog skladišta, neophodno je da se bale utovare na prikolicu. Emisije GHG pri utovaru ČB iznose 2.172 gCO_{2ekv}, a VB 3.246 gCO_{2ekv} (ovde su uračunate i emisije pri utovaru bala na kamionsku prikolicu za transport do biogas postrojenja). Nakon utovara, transport na 5 km udaljeno primarno skladište kao posledicu ima emisije od 818 za ČB, odnosno 1.129 gCO_{2ekv} za VB. Niže vrednosti emisija za navedene procese u slučaju ČB su veća masa ČB u odnosu na VB.

U slučaju kukuruzovine sakupljene silažnim kombajnom, ne postoji primarno skladište, nego se usitnjena kukuruzovina transportuje direktno na lokaciju biogas postrojenja gde se silira. Posledica transporta su emisije od 7.631 gCO_{2ekv}. Nakon toga sledi siliranje kukuruzovine teškim traktorima pri čemu se emituje 3,4 gCO_{2ekv}.

Za pretpostavljeni transport kamionom maksimalne nosivosti 27 t, od primarnog do skladišta u okviru biogas postrojenja, iskorišćeno je 46 % nosivosti u slučaju ČB i oko 28 % u slučaju VB. Emisije pri transportu ČB iznose 3.574 gCO_{2ekv}. Ista vrednost za VB iznosi 5.458 gCO_{2ekv}. I ovde do izražaja dolazi prednost ČB, a ovog puta ta prednost se ogleda u boljoj iskorišćenosti zapremine prikolice. U vrednost emisija uključen je i povratak prazne prikolice do početnog odredišta.

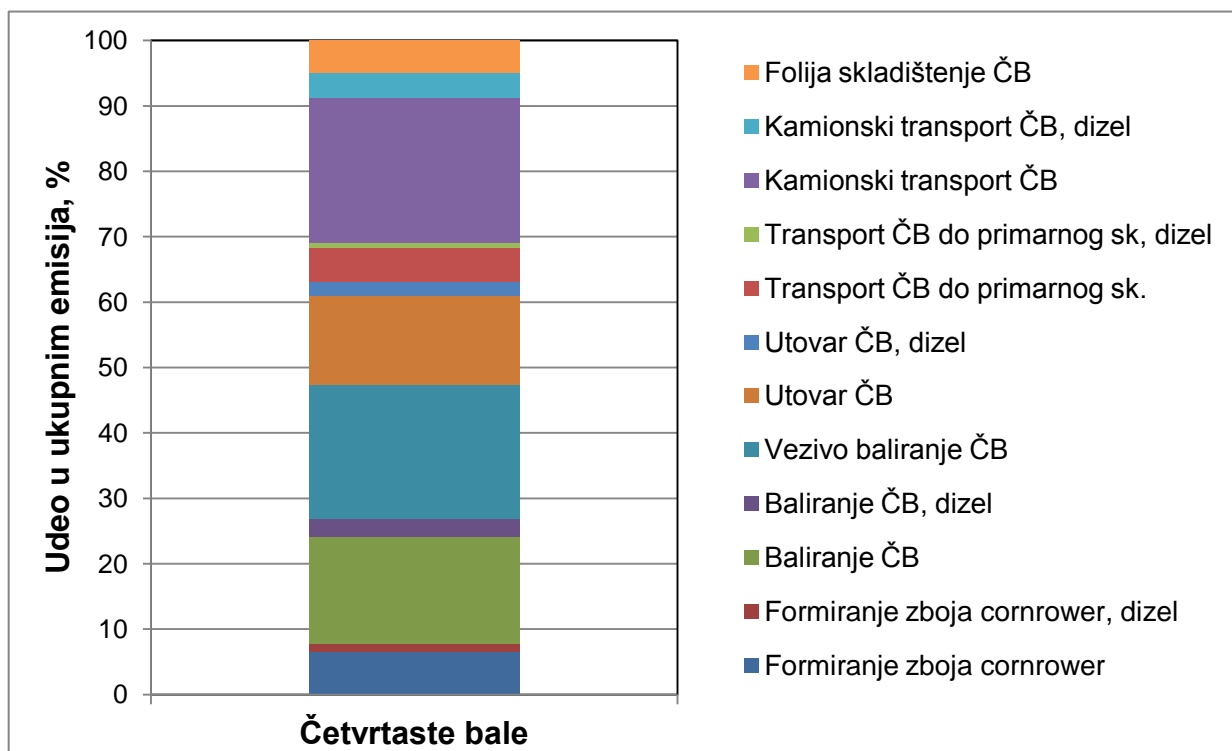
Emisije usled proizvodnje zaštitne folije kojima se prekrivaju kamare bala ili silirana kukuruzovina iznose 696, 677 i 57 gCO_{2ekv} respektivno za ČB, VB i silažu kukuruzovine. Značajno manja vrednost u slučaju silirane kukuruzovine je veća gustina uskladištenog materijala po površini pokrivke.

Na Graficima 23–25, predstavljeni su udeli pojedinačnih procesa u ukupnim emisijama generisanih tokom spremanja kukuruzovine. Karakteristično za sve procese gde je prisutan rad mehanizacije je što su emisije dominantno posledica rada mašina, tj. sagorevanja dizela, a manjim delom su one posledica proizvodnje dizela. Baliranja se ističe kao proces u okviru kog se emituje najveća količina GHG (zbir emisija od samog baliranja, vezivo i proizvodnja dizela). U slučaju silaže kukuruzovine, preko 50 % emisija je posledica procesa sakupljanja.

Ukupne vrednosti emisija za spremanje kukuruzovine u formi ČB iznose 14.528 gCO_{2ekv}, VB 16.590 gCO_{2ekv}, i 19.508 gCO_{2ekv} u slučaju silaže kukuruzovine. Ispitani uticajni faktori na vrednosti emisija su primena sakupljanja u tri prohoda, transportno rastojanje od primarnog skladišta do biogas postrojenja i prinos kukuruzovine na polju. U slučaju sakupljanja kukuruzovine u tri prohoda, povećanje emisija je u proseku 13 % za sva tri načina sakupljanja kukuruzovine, Grafik 26.

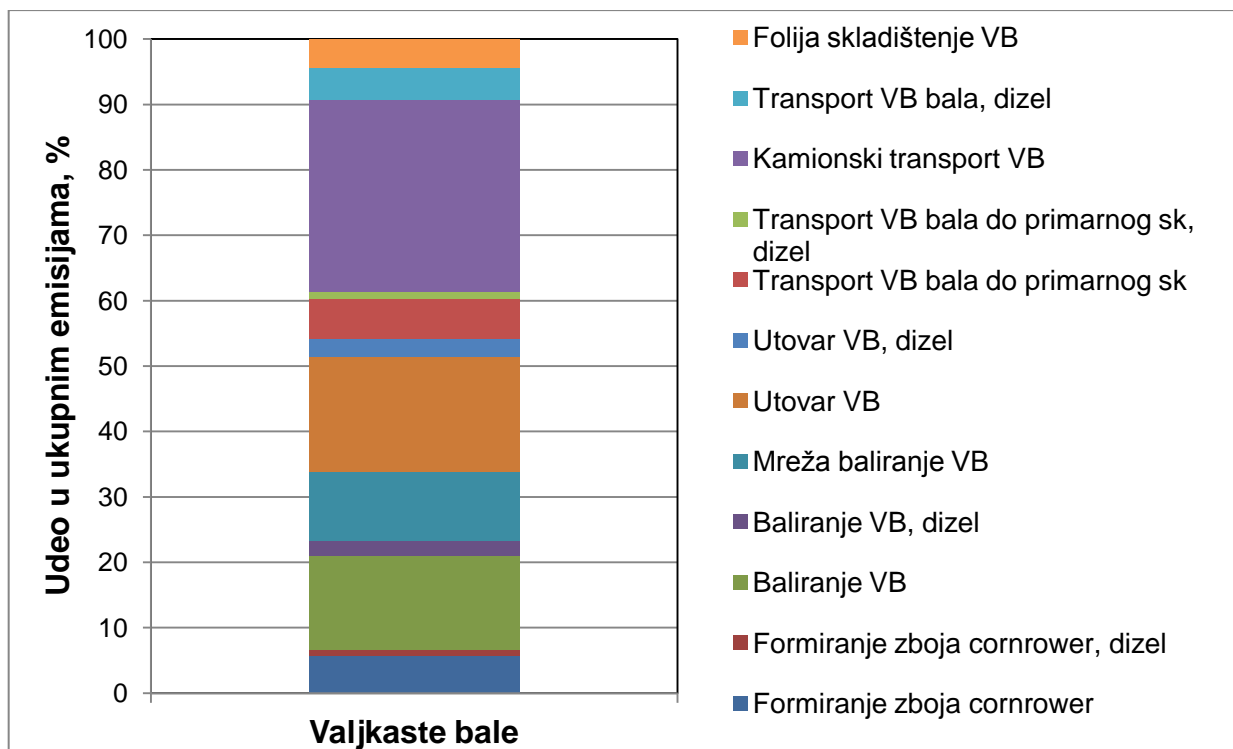
Promena prinosa kukuruzovine utiče na vrednosti emisija za procese formiranja zboja i baliranja. U slučaju nižeg prinosa, manja količina kukuruzovine po jedinici površine ili u formiranom zboju po njegovoj dužini zahteva veću potrošnju goriva za navedene operacije. Suprotan slučaj je sa većim prinosom kukuruzovine. U pogledu ukupnih emisija,

varijacija prinosa kukuruzovine ima potencijal da vrednosti ukupnih emisija GHG varira u opsegu oko $\pm 10\%$.

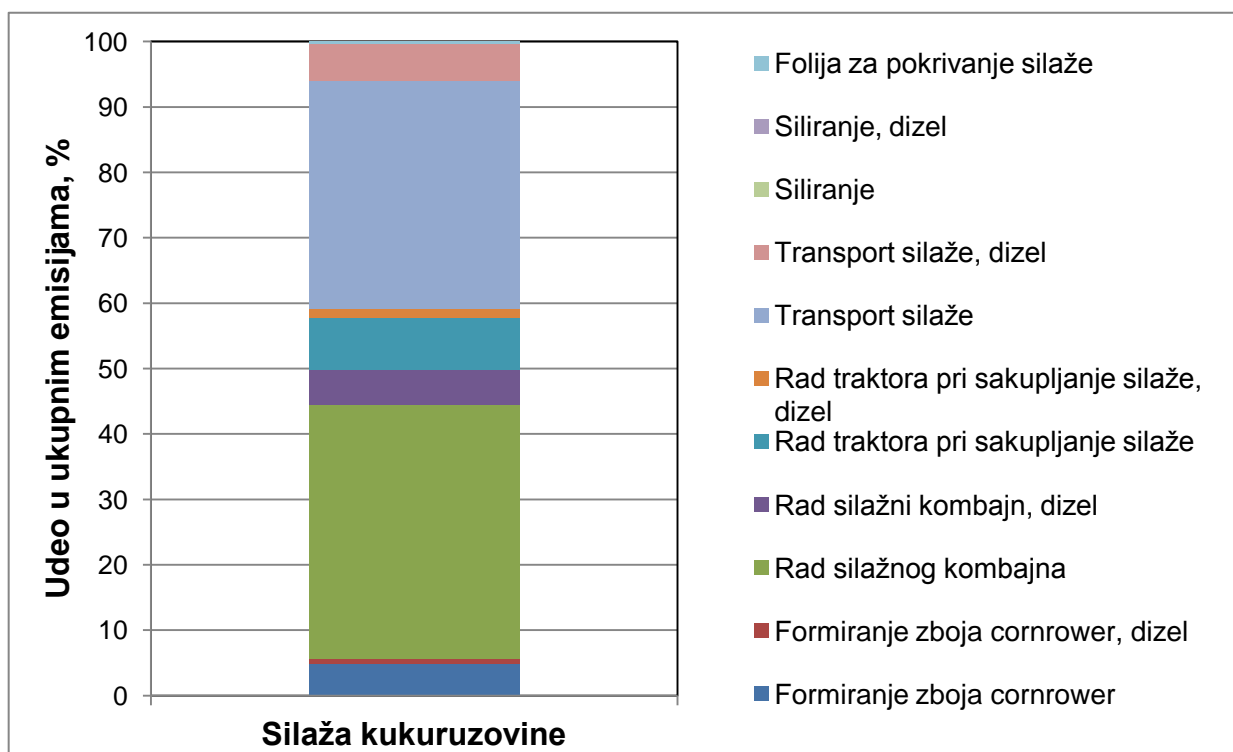


Grafikon 23 Udeo emisija GHG pojedinačnih procesa u ukupnim, spremanje kukuruzovine u formi ČB

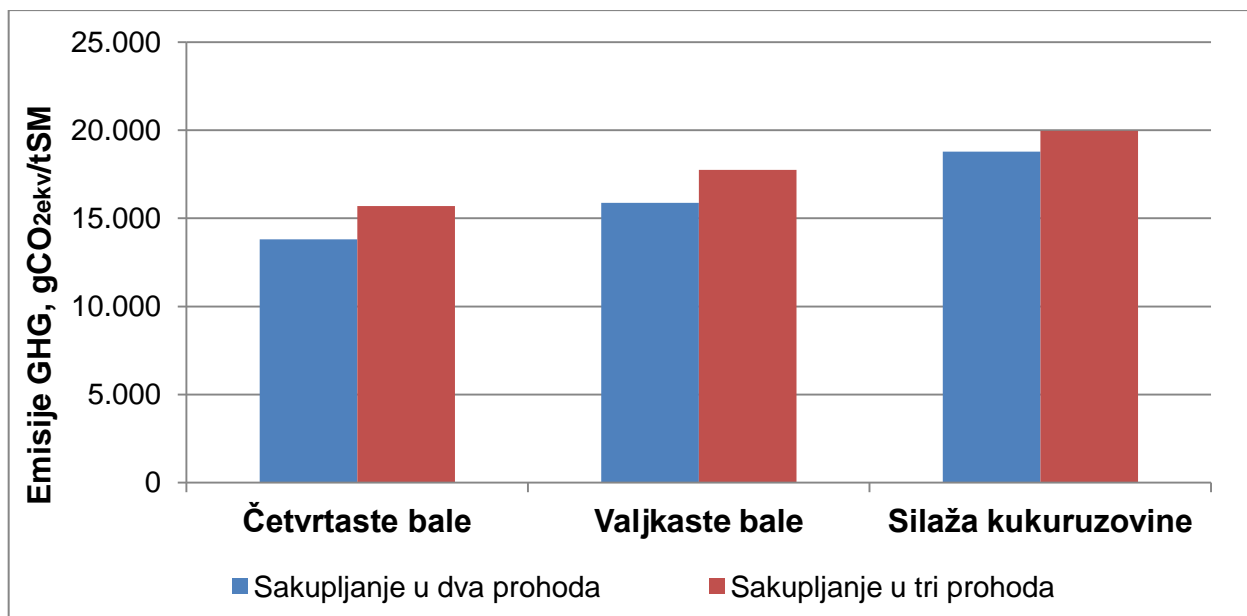
Uticaj transportnog rastojanja od mesta primarnog skladišta do lokacije biogas postrojenja prikazano je na Grafikonu 27. Rastojanje od 100 km je razmotreno kao gornja granica i u tom slučaju, vrednost emisija je, za ČB, približno dva puta viša od osnovne vrednosti pri transportnom rastojanju od 20 km. U slučaju VB, to uvećanje je 2,4 puta. Na većim transportnim rastojanjima izraženiji je negativan uticaj forme VB na iskorišćenost kapaciteta kamionske prikolice. Za svaki dodatni kilometar transporta ČB, emituje se približno $179 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}$, a za VB oko $232 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}$.



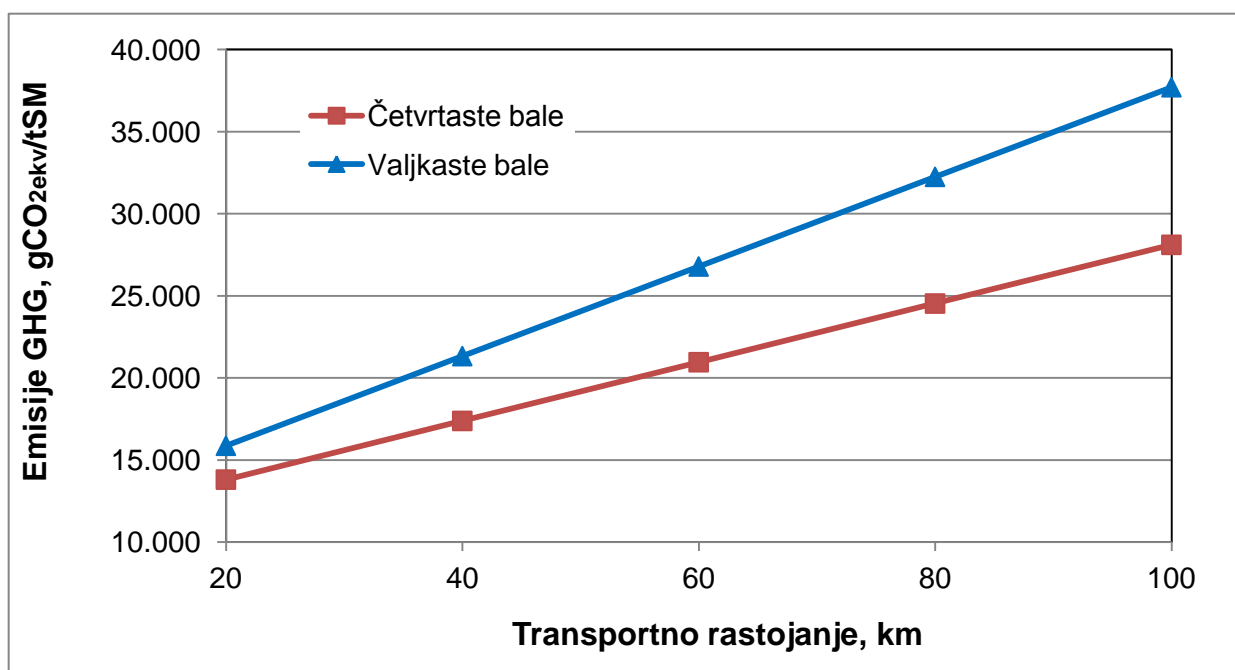
Grafik 24 Udeo emisija GHG pojedinačnih procesa u ukupnim, spremanje kukuruzovine u formi VB



Grafik 25 Udeo emisija GHG pojedinačnih procesa u ukupnim, spremanje kukuruzovine u formi silaže kukuruzovine



Grafik 26 Ukupne emisije GHG za sakupljanje kukuruzovine u dva i tri prohoda i više formi kukuruzovine



Grafik 27 Uticaj transportnog rastojanja na vrednost emisija GHG u fazi procesiranja

Distribucija ostatka fermentacije i nadoknada hraniva

Proizvodnjom biogasa iz kukuruzovine uz prinos biogasa 431,4 Nm³/tSM odnosno metana 242,3 Nm³/tSM, stepen razgradnje iznosi 66 %. Iz jedne tone SM kukuruzovine generiše se 5,22 m³ ostatka fermentacije s udelom SM od 6,5 %. Početna količina azota u ovoj količini kukuruzovine iznosi 7,5 kg azota, s tim da je na početku 94 % azota bilo u formi organskog azota (u obzir su uzeti gubici SM). Kako je navedeno u poglavlju 3.2.1,

stepen razgradnje suve materije odgovara stepenu transformacije organskog u neorganski azot tako da u momentu početka skladištenja ostatka fermentacije oko 2,9 kg azota je u formi organskog, a 4,6 kg u formi neorganskog. U toku skladištenja, oko 0,9 kg azota se gubi usled volatilizacije i direktnih emisija N_2O tako da u momentu distribucije, 5,22 m³ ostatka fermentacije sadrži 6,6 kg azota. Celokupni fosfor i kalijum sadržan u kukuruzovini na početku fermentacije takođe je sadržan u razmatranoj količini ostatka fermentacije.

U toku distribucije ostatka fermentacije, emisije GHG kao posledica rada mehanizacije i proizvodnje potrošenog dizela iznose 3.543 i 570 gCO_{2ekv}. Ukupni gubici azota usled volatilizacije, direktnih emisija N_2O i ispiranja azota iznose 3,3 kg. U pogledu GHG emisija, ovi azotni gubici iznose 49.458 gCO_{2ekv}.

U slučaju nadoknade izgubljenog azota ureom, neophodno je da se primeni 7,3 kg azota da bi nakon gubitaka nje bilo nadoknađeno 4,2 kilograma izgubljenog tokom skladištenja i distribucije ostatka fermentacije. Gubici iz uree pri primeni iznose oko 2,9 kg azota, uz emisije GHG 44.826 gCO_{2ekv}. Tokom proizvodnje 7,3 kg uree, emituje se 31.831 gCO_{2ekv}.

Za određene slučajeve analize emisija GHG, razmotreno je da transformacija azota u toku anaerobne fermentacije u neorgansku formu i njegova distribucija kroz ostatak fermentacije na polje za posledicu imaju manju primenu azotnih mineralnih hraniva. Usled toga, opravdano je da se procesu distribucije fermentacije dodele bonus emisije u vrednosti neprimenjenih mineralnih hraniva. Ako je iskoristiva količina azota u ostatku anaerobne fermentacije poreklom od kukuruzovine oko 2 kg neorganskog azota, to znači da je potrebno primeniti oko 3,3 kg manje uree. Usled izbegnutih emisija u proizvodnji i emisija usled gubitaka azota pri primeni, bonus emisije iznose respektivno -14.500 gCO_{2ekv} i -20.400 gCO_{2ekv}, tj. ukupno oko -34.900 gCO_{2ekv}.

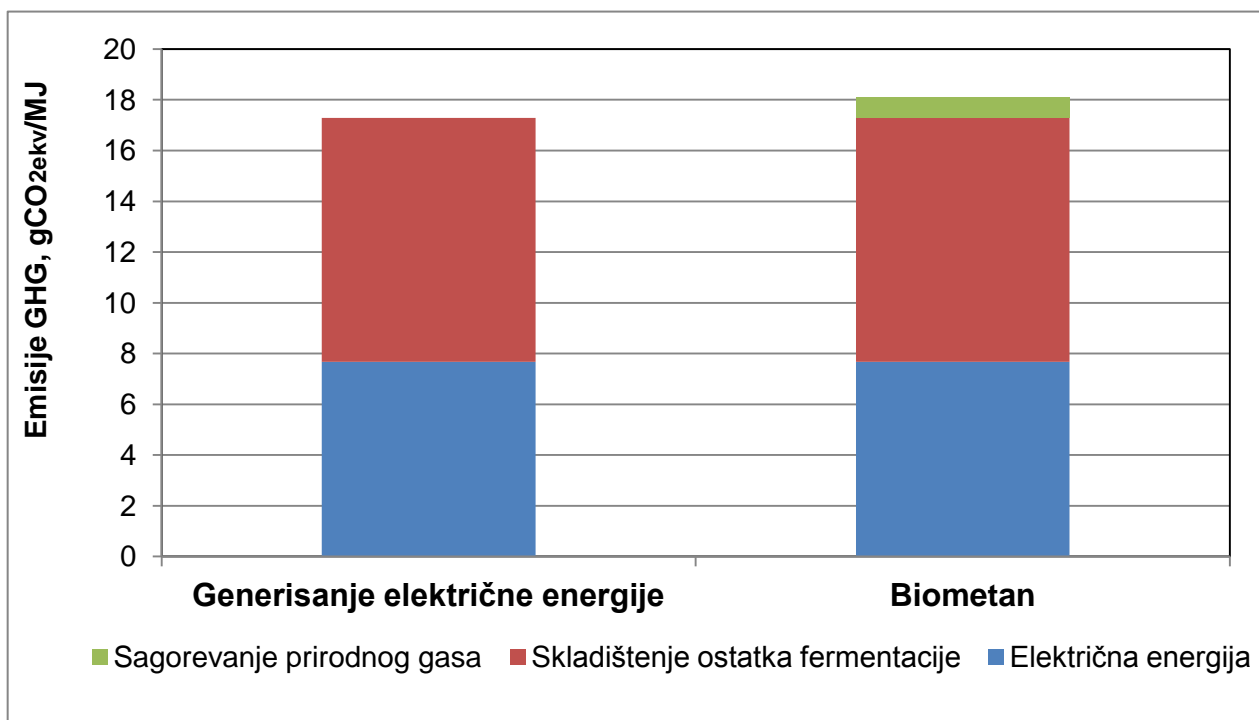
3.3.2 Emisije GHG u fazi Procesiranje e_p

Operacije u okviru faze procesiranja su iz proizvodnje biogasa i skladištenja ostatka fermentacije. Na vrednosti emisija utiče to da li je rezervoar za ostatak fermentacije otvoren ili zatvoren. Emisije su specificirane po 1 MJ generisanog biogasa kao funkcionalne jedinice. Na osnovu prinosa i sastava biogasa dobijenog šaržnim eksperimentom, 1 MJ sadržan je u 0,049 Nm³ biogasa.

Emisije iz operacije proizvodnja biogasa posledica su korišćenja električne energije za pogon biogas postrojenja i emisije usled rada mehanizacije za izuzimanje kukuruzovine sa mesta skladištenja. U slučaju generisanja biometana, emisije GHG dodatno su posledica i sagorevanja prirodnog gasa za zagrevanje fermentora. Za generisanje 1 MJ energije sadržanog u biogasu, potrebno je da se uloži približno 0,03 MJ električne energije. Pri tome se emituje 7,68 gCO_{2ekv}. Od toga, 99,8 % emisija su CO₂, a ostatak N_2O i CH₄. Emisije generisane radom mehanizacije za izuzimanje, iznose najviše za VB 0,005 gCO_{2ekv} i zbog niske vrednosti u poređenju s emisijama iz korišćenja električne energije, zanemarene su. Potrošnja prirodnog gasa za zagrevanje fermentora u slučaju generisanja biometana iznosi oko 0,3 L po MJ energije biometana, a emisije GHG iznose 0,79 gCO_{2ekv}.

U slučaju otvorenog rezervoara za ostatak fermentacije, emisije rezidualnog biogasa uključujući direktne i indirektno emisije N_2O , doprinose bilansu emisija GHG sa 9,61 gCO_{2ekv}. Od toga, 87 % su posledica emisije CH₄, a ostatak N_2O .

Ukupne emisije GHG u fazi Procesiranja pri generisanju biometana iznose 18,09 gCO_{2ekv} za tehnološku opciju otvorenog rezervoara i 8,47 gCO_{2ekv} za opciju zatvorenog rezervoara. Kada je cilj sagorevanje proizvedenog biogasa da bi se generisala električna energija, emisije iznose respektivno 17,29 i 7,68 gCO_{2ekv}. Na Grafiku 28 prikazane su emisije GHG za fazu Procesiranja kada se razmatra tehnološka opcija otvorenog rezervoara za ostatak fermentacije. U slučaju zatvorenog rezervoara, potrebno je da se vrednosti na grafiku posmatraju bez procesa skladištenje ostatka fermentacije.



Grafik 28 Emisije GHG u fazi Procesiranja u slučaju otvorenog rezervoara za ostatak fermentacije

3.3.3 Emisije GHG u fazi Ekstrakcija sirovina e_{ec} i Procesiranje e_p pri primeni alokacije

Distribucija ostatka fermentacije na drugo polje zahteva primenu alokacije. Vrednost emisija u fazama Ekstrakcija sirovina i Procesiranje deli se na biogas kao energetskog nosioca i ostatak fermentacije.

Vrednost alokacionog faktora emisija za navedene faze iznosi 59,1 %. To znači da se u prethodna dva poglavlja navedene vrednosti emisija za spremanje kukuruzovine, proizvodnju biogasa i skladištenje ostatka fermentacije množe sa navedenim alokacionim faktorom. Distribucija ostatka fermentacije u ovom slučaju ne ulazi u bilansiranje emisija GHG.

Niži faktor alokacije u ovom istraživanju u poređenju sa na primer 80 % koji navodi Adams i dr. (2015) posledica je stepena razgradnje kukuruzovine. Preostala nerazgrađena OSM kukuruzovine u ostatku fermentacije uzrokuje vrednost donje toplotne moći 0,69 MJ/MJ generisanog biogasa.

Kada se ostatak fermentacije primenjuje na drugo polje, potreba za nadoknadom hraniva odneta odnetih sa kukuruzovinom iznosi ranije navedenih 7,5 kg azota, 2,5 kg P_2O_5 i 14,6 kg K_2O . Primenom mineralnih hraniva za nadoknadu uzrokuju se emisije 18.890 gCO_{2ekv} ako se azot ne razmatra, ili 147.508 gCO_{2ekv} ako je predviđena nadoknada azota. U Tabeli 28 date su vrednosti za pojedinačne procese.

Tabela 28 GHG emisije pri nadoknadi hraniva primenom mineralnih hraniva

Proces	Vrednost emisije, gCO_{2ekv}/tSM
Proizvodnja hraniva, azot	53.407
Proizvodnja hraniva, fosfor	6.350
Proizvodnja hraniva, kalijum	12.539
Emisije iz primene azotnog hraniva	75.211

3.3.4 Emisije GHG u fazi Korišćenje e_u

U slučaju generisanja biometana, emisije u fazi Korišćenje odnose se na uklanjanje CO_2 iz biogasa. Korišćenje električne energije u tom slučaju iznosi 0,03 MJ/MJ generisanog biometana, a emituje se 7,50 gCO_{2ekv} . Ukoliko se višak gasa ispušta bez sagorevanja u atmosferu, emituje se dodatno oko 0,25 g CH_4 , tj. ukupne emisije tada iznose 13,79 gCO_{2ekv} . U protivnom ako se višak gasa na odgovarajući način oksiduje, sagoreva, emisije u ovoj fazi u slučaju generisanja biometana iznose samo 7,50 gCO_{2ekv} .

U slučaju generisanja električne energije, ukupne emisije u fazi korišćenja biogasa iznose 8,24 gCO_{2ekv} . Od toga, 95 % emisija je posledica nesagorelog metana u gasnom motoru, a 5 % su emisije N_2O .

3.3.5 Ukupne emisije GHG

Emisije po fazama i ukupne emisije energetskog iskorišćenja kukuruzovine, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje sa kog je kukuruzovina ubirana, prikazane su u Tabeli 29. Za slučajeve generisanja električne energije, vrednost ukupne emisije $E_{c_{el}}$ dobijena je deljenjem električnim stepenom efikasnosti. U ovoj tabeli predstavljene su tipične vrednosti emisija GHG.

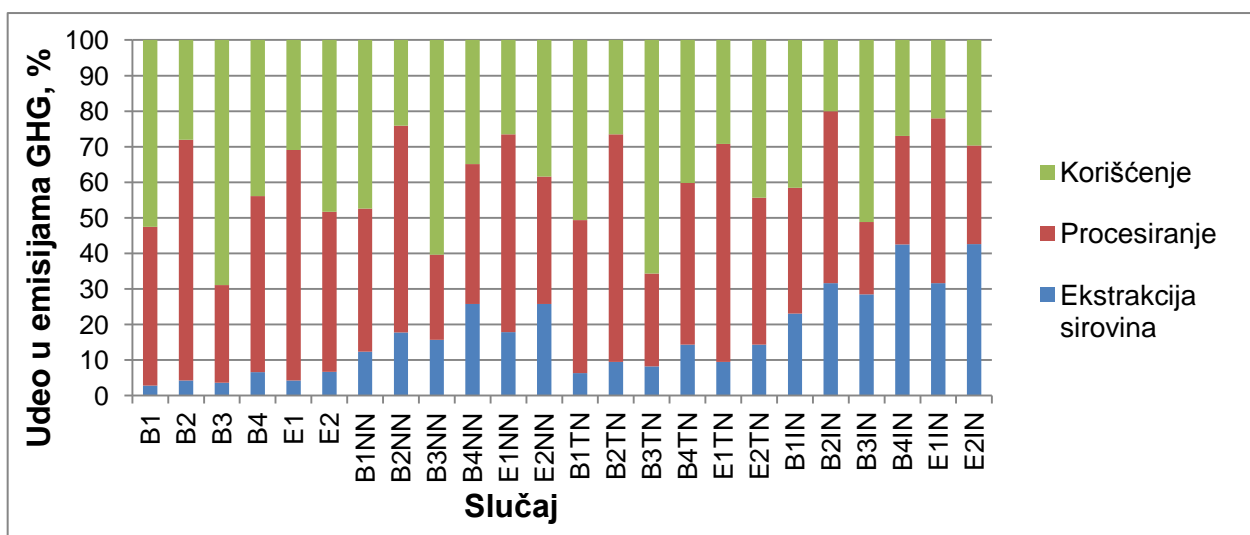
Uobičajene vrednosti emisija predstavljene su u Tabeli 30. Na grafiku 29 predstavljeni su udeli faza u ukupnim uobičajenim vrednostima emisija. Za slučajeve kada je primenjen RED metod u osnovnoj formi, faza Ekstrakcija sirovina doprinosi ukupnoj emisiji do 10 %, a emisije iz faza Procesiranje i Korišćenje učestvuju i sa preko 90 % u ukupnim emisijama. Tehnološke opcije sa zatvorenim rezervoarom za ostatak fermentacije i s adekvatnim tretmanom viška gasa uzrokuju niže emisije GHG u odnosu na druge tehnološke opcije. Za slučajeve kada je primenjen unapređeni RED metod, razmatranjem emisija iz distribucije ostatka fermentacije i nadoknade hraniva, bilans emisija povećava se i do 40 %. Primenom unapređenog metoda, udeo emisija iz faze Ekstrakcija sirovina u nekim slučajevima je viši od 40 % ukupnih emisija.

Tabela 29 Tipične vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja

Slučaj	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/tSM$	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_p, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_u, gCO_{2ekv}/MJ$	$E, gCO_{2ekv}/MJ$	$E_{cel}, gCO_{2ekv}/MJ$
B1	13.814	1,59	18,09	21,29	40,97	-
B2	13.814	1,59	18,09	7,50	27,17	-
B3	13.814	1,59	8,47	21,29	31,35	-
B4	13.814	1,59	8,47	7,50	17,56	-
E1	13.814	1,59	17,29	8,24	27,12	71,36
E2	13.814	1,59	7,68	8,24	17,50	46,06
B1NN	67.385	7,75	18,09	21,29	47,12	-
B2NN	67.385	7,75	18,09	7,50	33,33	-
B3NN	67.385	7,75	8,47	21,29	37,51	-
B4NN	67.385	7,75	8,47	7,50	23,72	-
E1NN	67.385	7,75	17,29	8,24	33,27	87,56
E2NN	67.385	7,75	7,68	8,24	23,66	62,26
B1TN	32.485	3,73	18,09	21,29	43,11	-
B2TN	32.485	3,73	18,09	7,50	29,32	-
B3TN	32.485	3,73	8,47	21,29	33,50	-
B4TN	32.485	3,73	8,47	7,50	19,71	-
E1TN	32.485	3,73	17,29	8,24	29,26	77,01
E2TN	32.485	3,73	7,68	8,24	19,65	51,70
B1IN	144.042	16,56	18,09	21,29	55,94	-
B2IN	144.042	16,56	18,09	7,50	42,15	-
B3IN	144.042	16,56	8,47	21,29	46,32	-
B4IN	144.042	16,56	8,47	7,50	32,53	-
E1IN	144.042	16,56	17,29	8,24	42,09	110,76
E2IN	144.042	16,56	7,68	8,24	32,47	85,45

Tabela 30 Uobičajene vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja

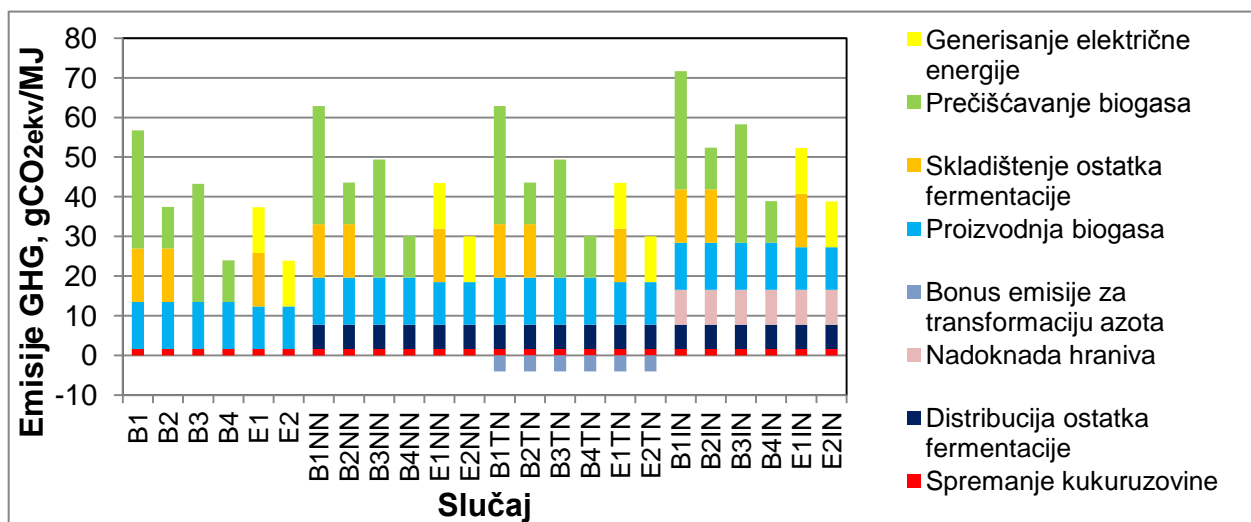
Slučaj	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/tSM$	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_p, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_u, gCO_{2ekv}/MJ$	$E, gCO_{2ekv}/MJ$	$E_{Cel}, gCO_{2ekv}/MJ$
B1	13.814	1,59	25,32	29,81	56,72	-
B2	13.814	1,59	25,32	10,50	37,41	-
B3	13.814	1,59	11,86	29,81	43,26	-
B4	13.814	1,59	11,86	10,50	23,95	-
E1	13.814	1,59	24,21	11,53	37,33	98,23
E2	13.814	1,59	10,75	11,53	23,87	62,81
B1NN	67.385	7,75	25,32	29,81	62,88	-
B2NN	67.385	7,75	25,32	10,50	43,57	-
B3NN	67.385	7,75	11,86	29,81	49,41	-
B4NN	67.385	7,75	11,86	10,50	30,11	-
E1NN	67.385	7,75	24,21	11,53	43,49	114,44
E2NN	67.385	7,75	10,75	11,53	30,03	79,01
B1TN	52.885	6,08	25,32	29,81	61,21	-
B2TN	52.885	6,08	25,32	10,50	41,90	-
B3TN	52.885	6,08	11,86	29,81	47,75	-
B4TN	52.885	6,08	11,86	10,50	28,44	-
E1TN	52.885	6,08	24,21	11,53	41,82	110,05
E2TN	52.885	6,08	10,75	11,53	28,36	74,63
B1IN	144.042	16,56	25,32	29,81	71,69	-
B2IN	144.042	16,56	25,32	10,50	52,38	-
B3IN	144.042	16,56	11,86	29,81	58,23	-
B4IN	144.042	16,56	11,86	10,50	38,92	-
E1IN	144.042	16,56	24,21	11,53	52,30	137,63
E2IN	144.042	16,56	10,75	11,53	38,84	102,21



Grafik 29 Udeo emisija GHG pojedinačnih faza u ukupnim uobičajenim vrednostima, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja

Emisije za pojedinačne procese u okviru faza Ekstrakcija, Procesiranje i Korišćenje, navedene su na Grafiku 30. Karakteristično je to da, emisije u vidu viška gasa, rezidualnog CH_4 iz otvorenih rezervoara za ostatak fermentacije i nesagorelog CH_4 iz motora, najviše

doprinosu bilansu emisija. Proizvodnja biogasa je isto značajan proces u pogledu emisija, a spremanje kukuruzovine najmanje doprinosi. Kao što je rečeno u poglavlju 3.3.1, emisije iz spremanja kukuruzovine zavise od organizacije, ali i u najnepovoljnijem slučaju kada su emisije približno 20.000 gCO_{2ekv}, njihov doprinos ne bi bio viši nego proizvodnja biogasa. Primenom unapređenog RED metoda, emisije iz distribucije ostatka fermentacije i nadoknade hraniva u većoj meri doprinose ukupnoj emisiji GHG od spremanja kukuruzovine s kojom čine fazu Ekstrakcije.



Grafik 30 Uobičajene vrednosti emisija GHG po procesima, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja

Ukupne emisije i emisije za pojedinačne faze energetskog iskorišćenja kukuruzovine, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na polja sa kojih kukuruzovina nije ubirana, prikazane su u Tabeli 31. U ovoj tabeli predstavljene su tipične vrednosti emisija GHG, a uobičajene u Tabeli 32.

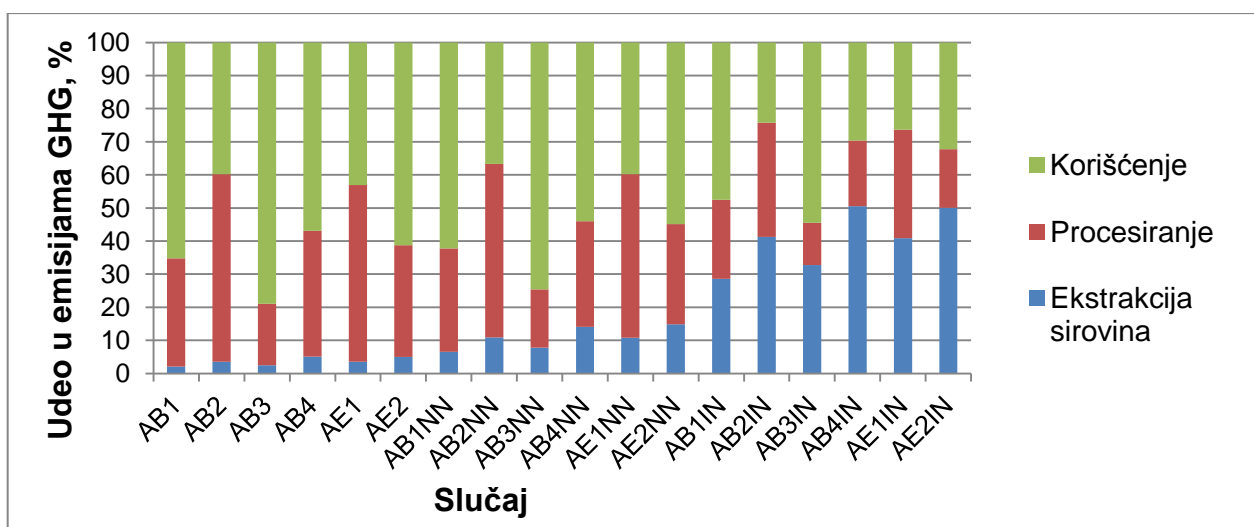
U poređenju sa emisijama iz Tabela 29 i 30, navedene vrednosti niže su usled primene alokacije u fazama Ekstrakcija sirovina i Procesiranje, a ne postoje ni emisije iz distribucije ostatka fermentacije. Udeli emisija GHG pojedinačnih faza u ukupnim vrednostima, kao i vrednosti emisija GHG za pojedinačne procese dati su na Graficima 31 i 32, respektivno. Udeo pojedinačnih faza u ukupnim emisijama je sličan kao i u slučajevima kad se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja sa kojih je kukuruzovina ubirana, a jedina razlika se uočava u tome što je udeo emisija iz faze Korišćenja delimično viši usled neprimenjivanja alokacije emisija na ovu fazu. Emisije usled nadoknade hraniva variraju u zavisnosti od razmatranog načina unapređenja RED metoda, tj. da li su razmatrani slučajevi kada se azot nadoknađuje ili ne.

Tabela 31 Tipične vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja

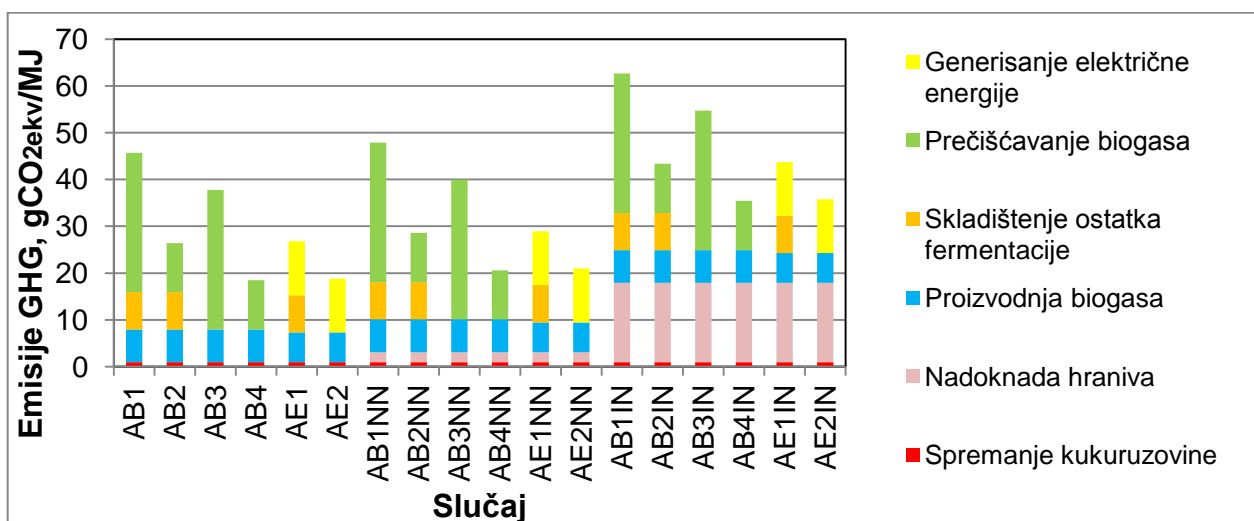
Slučaj	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/tSM$	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_p, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_u, gCO_{2ekv}/MJ$	$E, gCO_{2ekv}/MJ$	$E_{Cel}, gCO_{2ekv}/MJ$
AB1	8.169	0,94	10,70	21,29	32,93	-
AB2	8.169	0,94	10,70	7,50	19,14	-
AB3	8.169	0,94	5,01	21,29	27,24	-
AB4	8.169	0,94	5,01	7,50	13,45	-
AE1	8.169	0,94	10,23	8,24	19,40	51,06
AE2	8.169	0,94	4,54	8,24	13,72	36,09
AB1NN	27.059	3,11	10,70	21,29	35,10	-
AB2NN	27.059	3,11	10,70	7,50	21,31	-
AB3NN	27.059	3,11	5,01	21,29	29,41	-
AB4NN	27.059	3,11	5,01	7,50	15,62	-
AE1NN	27.059	3,11	10,23	8,24	21,57	56,77
AE2NN	27.059	3,11	4,54	8,24	15,89	41,81
AB1IN	155.677	17,90	10,70	21,29	49,88	-
AB2IN	155.677	17,90	10,70	7,50	36,09	-
AB3IN	155.677	17,90	5,01	21,29	44,20	-
AB4IN	155.677	17,90	5,01	7,50	30,41	-
AE1IN	155.677	17,90	10,23	8,24	36,36	95,68
AE2IN	155.677	17,90	4,54	8,24	30,67	80,72

Tabela 32 Uobičajene vrednosti emisija GHG, po fazama i ukupne, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja

Slučaj	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/tSM$	$e_{ec}, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_p, gCO_{2ekv}/MJ$	$e_u, gCO_{2ekv}/MJ$	$E, gCO_{2ekv}/MJ$	$E_{Cel}, gCO_{2ekv}/MJ$
AB1	8.169	0,94	14,97	29,81	45,72	-
AB2	8.169	0,94	14,97	10,50	26,41	-
AB3	8.169	0,94	7,01	29,81	37,76	-
AB4	8.169	0,94	7,01	10,50	18,45	-
AE1	8.169	0,94	14,32	11,53	26,79	70,49
AE2	8.169	0,94	6,36	11,53	18,83	49,54
AB1NN	27.059	3,11	14,97	29,81	47,89	-
AB2NN	27.059	3,11	14,97	10,50	28,59	-
AB3NN	27.059	3,11	7,01	29,81	39,93	-
AB4NN	27.059	3,11	6,00	10,50	22,50	-
AE1NN	27.059	3,11	14,32	11,53	28,96	76,20
AE2NN	27.059	3,11	6,36	11,53	22,23	58,51
AB1IN	155.677	17,90	14,97	29,81	62,68	-
AB2IN	155.677	17,90	14,97	10,50	43,37	-
AB3IN	155.677	17,90	7,01	29,81	54,72	-
AB4IN	155.677	17,90	7,01	10,50	35,41	-
AE1IN	155.677	17,90	14,32	11,53	43,74	115,12
AE2IN	155.677	17,90	6,36	11,53	35,78	94,17



Grafik 31 Udeo emisija GHG pojedinačnih faza u ukupnim uobičajenim vrednostima, za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja



Grafik 32 Uobičajene vrednosti emisija GHG po procesima za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja

Kral i dr. (2016) navode da je ukupna vrednost emisija GHG za električnu energiju generisanu iz biogasa proizvedenog od kukuruzovine 66 gCO_{2ekv}/MJ. Pri tome, oni koriste ekonomsku alokaciju emisija GHG u fazi koja odgovara Ekstrakciji sirovina e_{ec} i ono što je naročito bitno, čak četiri puta viši faktor emisija metana iz motora pri sagorevanju. Razmatrani životni ciklus u toj studiji odgovara samo približno slučaju E2IN u ovom istraživanju čija vrednost iznosi približno 31 gCO_{2ekv}/MJ. Uporedivost dobijenih rezultata nije moguća u potpunosti zbog različitih pristupa sprovođenja studije (korišćenih podataka i granica sistema). Jedino može da se navede da vrednost emisije koje odgovara fazi e_{ec} u navedenoj studiji iznosi približno 174.000 gCO_{2ekv}/tSM, što je oko 20 % viša vrednost od približno 144.000 gCO_{2ekv}/tSM za slučaj E2IN.

3.4 Vrednosti uštede emisija GHG

3.4.1 Slučajevi kada se ostatak fermentacije primenjuje na ista polja (bez alokacije)

Na osnovu vrednosti ukupnih emisija GHG za sve razmatrane slučajeve u poglavlju 3.3.5, nadalje su prikazane izračunate vrednosti uštede emisija GHG. U Tabeli 33 date su vrednosti uštede za primenu RED metoda u osnovnoj formi. Za biometan, tehnološka opcija sa najmanjom uštedom od 21 % ima otvoren rezervoar za ostatak fermentacije i ne sagoreva se višak gasa. Slično je i kod električne energije, najmanju uštedu podrazumeva tehnološka opcija sa otvorenim rezervoarom za ostatak fermentacije, 46 %. Najveću uštedu kod biometana ostvaruje slučaj sa zatvorenim rezervoarom za ostatak fermentacije uz sagorevanje viška gasa, 67 %. Na taj način su delom sprečene GHG emisije u atmosferu i to pre svega metana. U slučaju električne energije, bolja tehnološka opcija podrazumeva da se koristi zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije kada ostvarena ušteda iznosi 66 %. Međutim, ni u jednom slučaju uobičajena⁹ vrednost uštede ne dostiže minimalnih 70 %, što bi energetske iskorisćenje biogasa iz kukuruzovine, ako se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje sa kog je ona ubirana, činilo održivim.

Tabela 33 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom

Biometan u mreži prirodnog gasa			
Oznaka	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
B1	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	43	21
B2	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	62	48
B3	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	56	40
B4	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	76	67
Biogas za električnu energiju			
	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
E1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	61	46
E2	Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	75	66

Unapređenjem RED metoda, vrednosti uštede emisija GHG smanjuju se u poređenju s osnovnim slučajevima, Tabele 34–36. Međusobni redosled uspešnosti tehnoloških opcija za ostvarenje uštede emisija GHG ostaje isti kao i pri primeni RED metoda u osnovnoj formi. Čak i u slučaju da se razmatraju bonus emisije za prevođenje organskog azota u neorganski koji je dostupan biljkama, a time umanjuje primena mineralnih hraniva za narednu biljnu vrstu, emisije GHG su niže nego u osnovnim slučajevima i ne zadovoljava se kriterijum održivosti.

⁹ Uobičajena vrednost je jedina relevantna. Značajnija je od tipične zato što se uzima u obzir neodređenostkorišćenih podataka

Tabela 34 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s unapređenim RED metodom, slučajevi s uključenom distribucijom ostatka fermentacije

Biometan u mreži prirodnog gasa			
Oznaka	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
B1NN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	35	13
B2NN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	54	39
B3NN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	48	31
B4NN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	67	58
Biogas za električnu energiju			
	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
E1NN	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	52	37
E2NN	Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	66	57

Tabela 35 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s unapređenim RED metodom, slučajevi s uključenom distribucijom ostatka fermentacije i bonus emisijama za azot

Biometan u mreži prirodnog gasa			
Oznaka	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
B1TN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	40	18
B2TN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	59	45
B3TN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	53	37
B4TN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	73	64
Biogas za električnu energiju			
	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
E1TN	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	58	43
E2TN	Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	72	63

Tabela 36 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s unapređenim RED metodom, slučajevi s uključenom distribucijom ostatka fermentacije i nadoknadom izgubljenog azota

Biometan u mreži prirodnog gasa			
Oznaka	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
B1IN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	22	0
B2IN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	41	27
B3IN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	36	19
B4IN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	55	46
Biogas za električnu energiju			
	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
E1IN	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	39	25
E2IN	Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	53	44

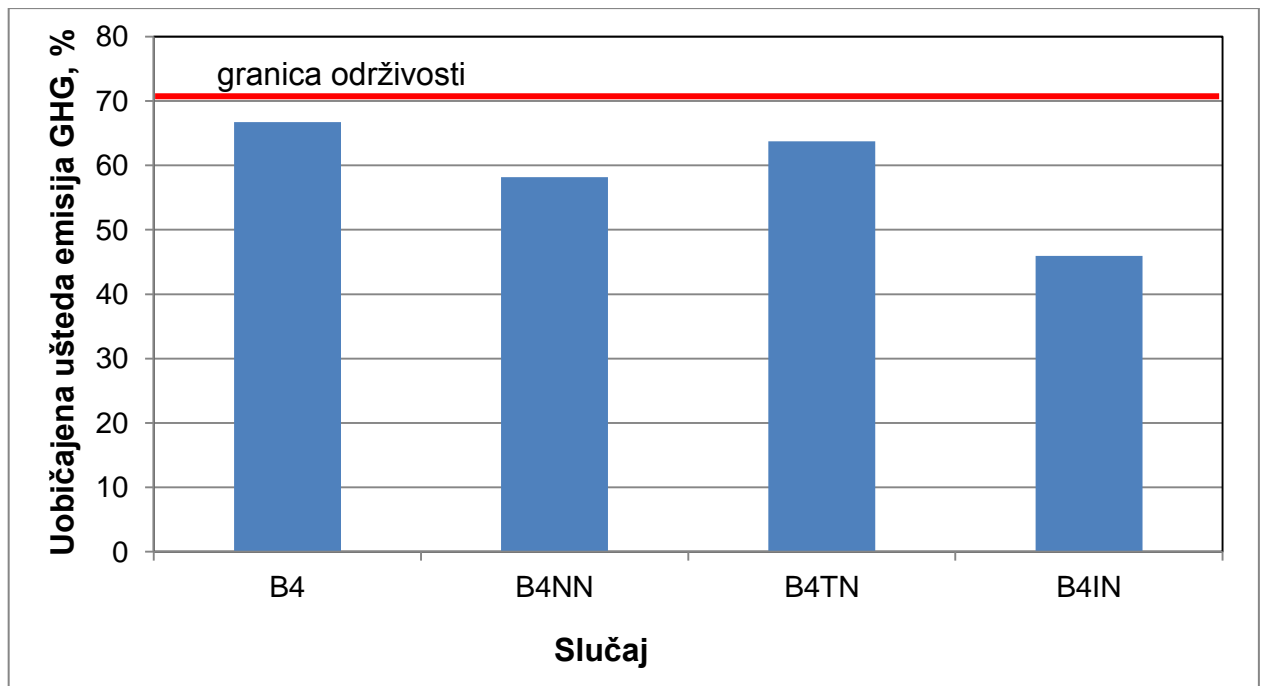
U dokumentu European Commission (2018) nalaze se vrednosti uštede emisija GHG za generisanje električne energije iz biogasa poreklom od silaže kukuruza, a u Giuntoli i dr. (2015) dodatno i vrednosti pri iskorišćenju biogasa za generisanje biometana i ubrizgavanja u mrežu prirodnog gasa. Vrednosti uštede emisija GHG iz oba dokumenta sumirane su u Tabeli 37. U poređenju s osnovnim slučajevima energetske iskorisćenja kukuruzovine, Tabela 33, u slučaju kukuruzovine ostvaruju se veće vrednosti uštede emisija GHG, osim u slučaju nadoknade hraniva, uključujući azot, Tabela 36, kada su vrednosti približno jednake.

Tabela 37 Vrednosti uštede GHG za energetska iskorišćenje silaže kukuruza

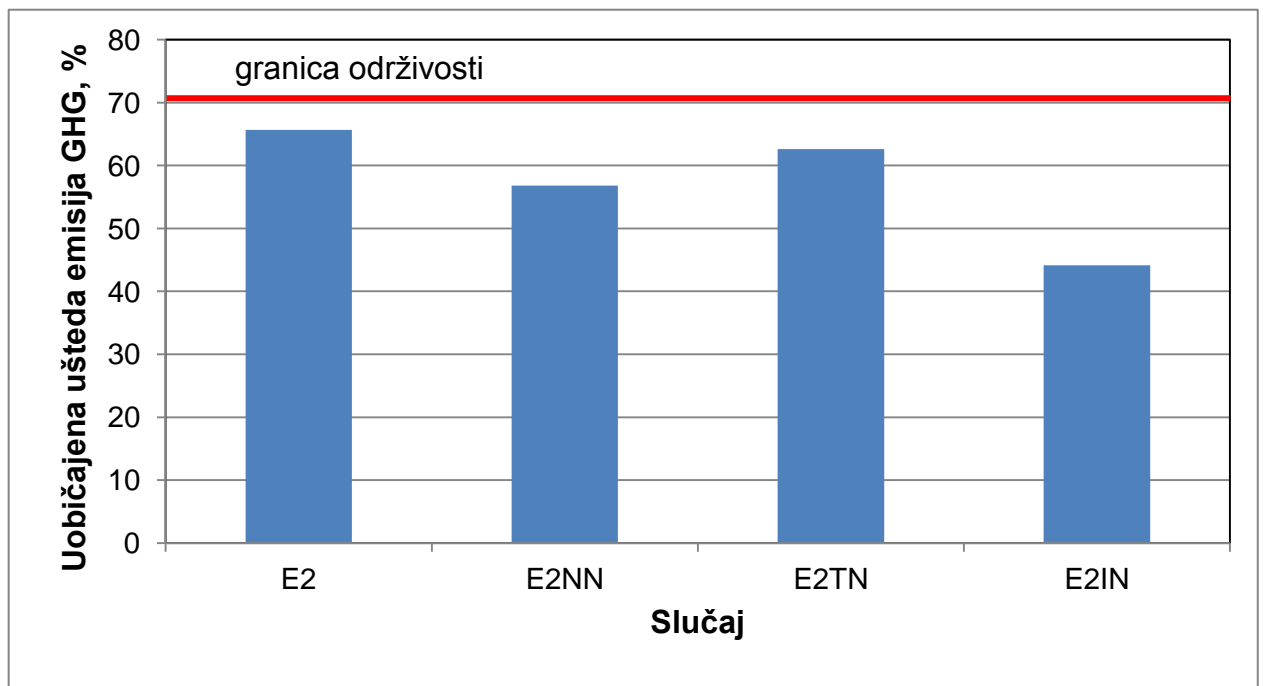
Biometan u mreži prirodnog gasa		
Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	15*	-9*
Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	36*	20*
Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	37*	22*
Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	58*	51*
Biogas za električnu energiju		
Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	34** (32)*	18** (14)*
Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	55** (53)*	47** (43)*

*Giuntoli i dr, 2015**; *European Commission, 2018***

Na Grafiku 33 prikazano je poređenje najviših uobičajenih vrednosti ušteda emisija GHG ostvarenih za biometan. Upoređen je slučaj primene RED metoda u osnovnoj formi za tehnološku opciju zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije i sagorevanje viška (B4), s vrednostima slučajeva kada se primenjuje unapređen RED metod uz opcije da se ne razmatra nadoknada azota (B4NN), da se razmatra transformacija azota (B4TN), i da se razmatra nadoknada azota (B4IN). Sličan princip, ali za električnu energiju kao krajnjeg energetskog produkta prikazan je na Grafiku 34.



Grafik 33 Poređenje ušteda emisija GHG za slučajeve generisanja biometana pri istim tehnološkim opcijama i kada se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje sa kog je kukuruzovina ubirana



Grafik 34 Poređenje ušteda emisija GHG za slučajeve generisanja električne energije pri istim tehnološkim opcijama i kada se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje sa kog je kukuruzovina ubirana

3.4.2 Slučajevi kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja (alokacija)

Vrednosti uštede emisija GHG za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na druga polja navedeni su u Tabelama 38–40. U slučaju da se RED metod primenjuje u osnovnoj formi, uz alokaciju emisija za faze Ekstrakcija sirovina i Procesiranje, izdvajaju se dva slučaja kada je kriterijum održivosti zadovoljen. Ušteda emisija GHG od 74 % za biometan ostvarena je u slučaju da je rezervoar za ostatak fermentacije zatvoren i da se sagoreva višak gasa. Takođe, ušteda emisija GHG je 73 % u slučaju generisanja električne energije uz zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije. Zadovoljenje kriterijuma održivosti u ovim slučajevima direktna je posledica neadekvatnog razmatranja svih relevantnih emisija, što je jedan od identifikovanih problema u ovom istraživanju. Time su emisije, za narednu biljnu vrstu na polju sa kog je ubrana kukuruzovina, više za nadoknadu hraniva. U slučajevima unapređenog RED metoda, kada se ta nadoknada hraniva, tj. emisije GHG proistekle iz nje pripisuju energetskom iskorišćenju biogasa iz kukuruzovine, tada su vrednosti ušteda emisija GHG takođe ispod 70 %. Dakle, isto kao i za slučajeve kada se ostatak fermentacije primenjuje na isto polje sa kog je kukuruzovina ubirana.

Tabela 38 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom, primena alokacije

Biometan u mreži prirodnog gasa			
Oznaka	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
AB1	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	54	36
AB2	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	73	63
AB3	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	62	48
AB4	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	81	74
Biogas za električnu energiju			
	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
AE1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	72	61
AE2	Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	80	73

Tabela 39 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom, primena alokacije, nadoknada samo fosfora i kalijuma

Biometan u mreži prirodnog gasa			
Oznaka	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
AB1NN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	51	33
AB2NN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	70	60
AB3NN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	59	45
AB4NN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	78	69
Biogas za električnu energiju			
	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
AE1NN	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	69	58
AE2NN	Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	77	68

Tabela 40 Vrednosti uštede emisija GHG, analiza u skladu s RED metodom, primena alokacije, nadoknada svih hraniva

Biometan u mreži prirodnog gasa			
Oznaka	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
AB1IN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	31	13
AB2IN	Otvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	50	40
AB3IN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	39	24
AB4IN	Zatvoren rez. za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	58	51
Biogas za električnu energiju			
	Tehnološka opcija	Tipična, %	Uobičajena, %
AE1IN	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	48	37
AE2IN	Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	56	49

Ovim istraživanjem pokazano je da se primenom RED metoda u osnovnoj formi, održivost energetskog iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine ostvaruje samo u dva slučaja (AB4 i AE2), odnosno kada se primeni alokacija emisija usled distribucije ostatka fermentacije na drugo polje. S obzirom da su u pitanju slučajevi kada se na neodgovarajući način obračunavaju nastale emisije GHG (objašnjeno u prethodnom pasusu), ova dva slučaja se ne prihvataju. Primenom RED metoda u osnovnoj formi vrednosti uobičajene uštede emisije GHG iznose najviše 67 %. Time je prva hipoteza:

H1 – Primenom RED metoda u osnovnoj formi na slučajeve energetskog iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine nije zadovoljen kriterijum održivosti od minimum 70 % uštede emisija GHG

potvrđena.

Za obračunavanje emisija i ušteda emisija GHG za sve slučajeve (pri primeni RED metoda u osnovnoj i unapređenoj formi) korišćene su najniže vrednosti emisija u fazi Ekstrakcije sirovina, tj. scenario spremanja kukuruzovine u dva prohoda u formi četvrtastih bala i transportom do 20 km. Prema tome, za druge načine spremanja kukuruzovine, vrednosti emisija GHG u ovoj fazi imaju još više vrednosti, a time vrednosti ušteda emisija GHG još nižu vrednost. Time je druga hipoteza:

H2 – Način spremanja kukuruzovine ne može da utiče na ocenu kriterijuma održivosti

potvrđena.

Unapređen RED metod, u ovom istraživanju primenjen za energetsko iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine, podrazumeva:

- zanemarivanje podsticajne mere o neuključivanju emisija pre ubiranja kukuruzovine u bilans GHG,
- primenu alokacije emisija GHG na biogas i ostatak fermentacije, u slučaju da se ostatak fermentacije ne primenjuje na isto polje sa kog je kukuruzovina ubirana.

Potvrđivanjem hipoteze H1, ustanovljeno je da energetsko iskorišćenje biogasa iz kukuruzovine nije održivo. Primenom unapređenog RED metoda, vrednosti emisija GHG dodatno rastu, čime se snižava vrednost uštede emisije GHG. Time ocena održivosti ostaje negativna. Ipak, unapređenjem metoda omogućava se razmatranje svih emisija GHG u životnom ciklusu iskorišćenja biogasa iz kukuruzovine, čime se naredna biljna kultura na polju sa kog je ubirana kukuruzovina ne opterećuje dodatnim emisijama GHG. Time je treća hipoteza:

H3 – Primenom unapređenog RED metoda ne utiče se na ocenu održivosti korišćenja energije biogasa iz kukuruzovine, već samo na vrednost uštede emisija GHG

potvrđena.

U istraživanju su, u predloženom unapređenom metodu, razmotrena dva principa: jedan kada se azot sadržan u kukuruzovini razmatra za nadoknadu i drugi kada se ne razmatra. Obračunavanjem azota za nadoknadu, vrednosti emisija GHG ostvaruju znatno višu vrednost, do 30 % u slučajevima kada nije potrebno da se primeni alokacija, odnosno do čak 90 % u slučajevima kada jeste. Ako se obračunava bonus za transformaciju azota, vrednosti emisija približne su onima kada se primeni RED metod u osnovnoj formi. Time je četvrta postavljena hipoteza:

H4 – Razmatranje materijalnog toka azota pri unapređenju RED metoda u životnom ciklusu korišćenja energije biogasa iz kukuruzovine utiče na vrednost uštede emisija GHG, ali ne i na ocenu uštede.

potvrđena.

Razmatranjem ili nerazmatranjem azota ne utiče se na rezultat ocene, tj. da li je energetska iskorisćenje biogasa iz kukuruzovine održivo ili ne. U scenarijima kada bi se razmatrala ko-digestija sa stajnjakom, niže vrednosti emisija usled nerazmatranja azota ili bonus emisije za njegovu transformaciju mogu da omoguće primenu manje količine stajnjaka, a da se kriterijum održivosti ispuni.

4. ZAKLJUČCI

Predmet istraživanja, problem i cilj

U okviru istraživanja utvrđeno je da se primenom zvaničnog metoda za obračunavanje ušteta emisija GHG, tzv. RED metod, na neadekvatan način obračunavaju emisije GHG za slučaj energetske iskorisćenja biogasa iz kukuruzovine. Prvi problem predstavlja pravilo da se ne obračunavaju emisije GHG pre ubiranja kukuruzovine. Drugi je da u metodu nije precizno opisan pristup kako da se primeni alokacija emisija na biogas i ostatak fermentacije. Cilj istraživanja bio je da se predlože unapređenja RED metoda kojim bi se prevazišli identifikovani problemi, kao i da se ispita uticaj unapređenog metoda na ocenu ušteta emisija GHG, tj. na održivost, energetske iskorisćenja biogasa iz kukuruzovine.

Rezultati

Rezultati ostvarenih ušteta emisija GHG za sve razmatrane slučajeve energetske iskorisćenja biogasa iz kukuruzovine, primenom RED metoda u osnovnoj i unapređenoj formi, imaju vrednost nižu od postavljenog kriterijuma od 70 %, tj. nisu održivi. Vrednosti ušteta emisija GHG najviše su za tehnološke opcije sa zatvorenim rezervoarom za ostatak fermentacije i uz adekvatan tretman viška gasa kada se generiše biometan. Ispitivanjem je to potvrđeno za različite načine spremanja kukuruzovine i kroz varijaciju parametara prinosa kukuruzovine i transportnog rastojanja. Jedina podsticajna mera koja bi omogućila održivo energetske iskorisćenje biogasa iz žetvenih ostataka kao što je kukuruzovina, u pogledu ušteta emisija GHG, je primena stajnjaka u ko-digestiji, jer se bilans emisija GHG umanjuje za bonus zbog sprečenih emisija adekvatnim tretmanom stajnjaka.

Predložene mere unapređenja

Unapređenje 1. Proširenje granice sistema, čime su obuhvaćeni prateći uticaji odnošenja kukuruzovine sa polja, rezultuje višim emisijama GHG u fazi ekstrakcije, a time i sniženjem vrednosti ušteta emisija GHG. Uz pretpostavku da isti uticaj može da se očekuje i za sve druge vrste žetvenih ostataka, predlaže se sledeća mera unapređenja:

- Treba da se ukine pravilo kojim se pri obračunavanju GHG emisija za žetvene ostatke u fazi ekstrakcije ne uzimaju u obzir emisije pre njihovog ubiranja.

Navedenom merom omogućeno je da se u bilans emisija GHG uključe i emisije iz distribucije ostatka fermentacije i nadoknade izgubljenih hraniva. Ukidanjem pravila ne utiče se na ocenu održivosti, a ipak vrednost ukupnih emisija GHG obuhvata sve postojeće izvore.

Unapređenje 2. U RED metodu nije precizno opisan pristup za primenu alokacije emisija, što je neophodno da se prevaziđe za slučaj korišćenja biogasa iz žetvenih ostataka ili energetske iskorisćenja bilja, te se predlaže sledeća mera unapređenja:

- Treba da se navede da je ostatak fermentacije ko-produkt proizvodnje i korišćenja biogasa, kao i da je primena alokacije emisija GHG na biogas i ostatak fermentacije obavezna u slučaju primene ostatka fermentacije na polja sa kojih nije ubiran korišćeni supstrat.

Navedenom merom omogućeno je da svaki od navedenih materijalnih tokova bude opterećen pripadajućom vrednošću emisija GHG koje se generišu u okviru životnog ciklusa.

Predložene dve mere unapređenja RED metoda su originalni naučni doprinos ove disertacije. Mere unapređenja su u ovom istraživanju ispitane za slučaj kukuruzovine kao supstrata za proizvodnju biogasa, a primenjive su na sve vrste žetvenih ostataka.

Dobijeni rezultati ovog istraživanja mogu da posluže kao smernice da se prilagodi metod za obračunavanje emisija i ušteda GHG definisan u RED direktivi, da bi primena na energetska iskorišćenje biogasa iz žetvenih ostataka bila odgovarajuća. Metodske pristupe, podatke i rezultate iz ovog istraživanja mogu da primene i stručna lica za ocenu održivosti u odnosu na uštede emisija GHG postojećih biogas postrojenja. Zatim, rezultate mogu da koriste i donosioci odluka za podsticanje najefikasnijih mera za sprečavanje emisija GHG na biogas postrojenjima koja kao supstrat koriste žetvene ostatke, koji su najveći potencijal biomase u Republici Srbiji.

Predlozi za buduća istraživanja

Predlog 1. Istraživanje je pokazalo da razmatranje materijalnog toka azota može da poveća vrednost emisija GHG u životnom ciklusu iskorišćenja biogasa generisanog iz kukuruzovine i do 90 %. U okviru disertacije nije bilo moguće da se da jednoznačan zaključak da li tok azota treba, ili ne treba da se razmatra, zbog suprotnih stavova u naučnoj literaturi o potrebi nadoknade azota. Ta nedorečenost treba da se razreši budućim istraživanjima.

U okviru disertacije sprovedeni kontinualni eksperiment je pokazao tendenciju transformacije organskog azota u neorganski u procesu anaerobne fermentacije. Ta transformacija azota verovatno može da utiče na zaključke o potrebi nadoknade azota pri anaerobnoj fermentaciji kukuruzovine. Ponavljanjem eksperimenta u dužem vremenskom periodu od sprovedenog u okviru ove disertacije obezbedio bi se bolji kvalitet dobijenih rezultata i dodatno potvrdio stav o transformaciji azota u životnom ciklusu kukuruzovine koja se koristi za proizvodnju biogasa.

Predlog 2. Potrebno je da se istraži kako povećanje prinosa biogasa usled primene predtretmana utiče na obračunavanje vrednosti emisija GHG u životnom ciklusu korišćenja biogasa iz kukuruzovine. Povećanjem prinosa biogasa povećava se energetska iskorišćenost kukuruzovine čime se utiče na definisanje materijalnog toka u okviru razmatranog sistema (potrebna je manja količina kukuruzovine za generisanje 1 MJ energije biogasa). Proces predtretmana prouzrokovao bi i dodatne emisije GHG zbog korišćenja procesne energije. Zbog povećanja stepena razgradnje kukuruzovine promenio bi se i materijalni tok ostatka fermentacije, tj. uticalo bi se na vrednost alokacije emisija GHG na biogas i ostatak fermentacije.

LITERATURA

- Adams, P.W.R., Mezzullo, W.G., McManus, M.C., 2015. Biomass sustainability criteria: Greenhouse gas accounting issues for biogas and biomethane facilities. *Energy Policy* 87, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.031>
- Adler, P.R., Rau, B.M., Roth, G.W., 2015. Sustainability of Corn Stover Harvest Strategies in Pennsylvania. *Bioenergy Res.* 8, 1310–1320. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9593-2>
- Angelidaki, I., Sanders, W., 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3, 117–129.
- Anonim, 2017. ae891ccc78952150a10b19c67ea39254436f419f @ zillnet.de [WWW Document]. URL <https://zillnet.de/en/>
- Anonim, 2014a. SRPS EN ISO 17225. Čvrsta biogoriva – Specifikacije i klase biogoriva – Deo 1: opšti zahtevi.
- Anonim, 2014b. Zakon o energetici. *Sl. glasnik RS*, br. 145/2014.
- Anonim, 2013. Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije republike Srbije. Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine.
- Anonim, 2008. SRPS ISO 14040: Upravljanje zaštitom životne sredine. Ocenjivanje životnog ciklusa - Principi i okvir.
- Anonim, 2006. Zakon o ratifikaciji ugovora o osnivanju Energetske zajednice između Evropske zajednice i Republike Albanije, Republike Bugarske, Bosne i Hercegovine, Republike Hrvatske, Bivše Jugoslovenske Republike Makedonije, Republike Crne Gore, Rumunije, Republike S, Publishing Services of the European Communities Luxembourg. *Sl. glasnik RS*, br. 62/2006.
- Avila-segura, M., Barak, P., Hedtcke, J.L., Posner, J.L., Zea, L., 2011. Nutrient and alkalinity removal by corn grain, stover and cob harvest in Upper Midwest USA. *Biomass and Bioenergy* 35, 1190–1195. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.010>
- Bachmaier, H., Ebertseder, F., Effenberger, M., Kissel, R., Rivera-Gracia, E., Gronauer, A., 2011. Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Bojić, S., Datkov, D., Brčanov, D., Georgijević, M., Martinov, M., 2013. Location allocation of solid biomass power plants: Case study of Vojvodina. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, 769–775. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.039>
- Buswell, A.M., Mueller, H.F., 1952. Mechanism of methane fermentation. *Ind. Eng. Chem.* 44, 550–552.
- Chen, G., Zheng, Z., Yang, S., Fang, C., Zou, X., Luo, Y., 2010. Experimental co-digestion of corn stalk and vermicompost to improve biogas production. *Waste Manag.* 30, 1834–1840. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.014>
- Cherubini, F., Bird, N.D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., Woess-Gallasch, S., 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour. Conserv. Recycl.* 53, 434–447. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.013>
- Cherubini, F., Ulgiati, S., 2010. Crop residues as raw materials for biorefinery systems - A LCA case study. *Appl. Energy* 87, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.024>
- CIGR, 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume V. American Society of

- Agricultural Engineers.
- Cook, D.E., Shinnars, K.J., 2011. Economics of alternative corn stover logistics systems, ASABE Paper No. 1111130. St. Joseph, Mich.
- Cooperative Union of Vojvodina, 2014. Prices of Cooperative union of Vojvodina for 2014. Cooperative Union of Vojvodina
- Coulter, J.A., Nafziger, E.D., 2008. Continuous corn response to residue management and nitrogen fertilization. *Agron. J.* 100, 1774–1780. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0170>
- Demirbaş, A., 1997. Calculation of higher heating values of biomass fuels 76, 431–434.
- Emery, I., Mosier, N., 2015. Direct emission of methane and nitrous oxide from switchgrass and corn stover: Implications for large-scale biomass storage. *GCB Bioenergy* 7, 865–876. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12196>
- European Commission, 2018. DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.
- European Commission, 2017. Proposal for a directive of the European Parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast), COM/2016/0767 final/2 - 2016/0382 (COD).
- European Commission, 2016. Annexes to the Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. <https://doi.org/http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016PC0767&from=EN>
- European Commission, 2015. Directive 2015/1513 amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Union, L 239, 15 September 2015. https://doi.org/http://eur-lex.europa.eu/pri/en/oj/dat/2003/l_285/l_28520031101en00330037.pdf
- European Commission, 2014. Commission staff working document - State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU.
- European Commission, 2010. Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling COM(2010)11.
- European Commission, 2009a. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Official Journal of the European Union, L 140, 05 June 2009.
- European Commission, 2009b. DIRECTIVE 2009/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel and gas-oil and introducing a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and amend.
- European Commission, 1998. DIRECTIVE 98/70/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 October 1998 relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Council Directive 93/12/EEC.
- Evans, R.J., Onischak, A.K., Techno, G., Technology, G., De-ac, C., 1988. Development of Biomass Gasification to produce Substitute Fuels. Pacific Northwest Laboratory, Richlans, Washington, USA.
- FNR, 2016. Priručnik o biogasu. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

- Giuntoli, J., Agostini, A., Edwards, R., Marelli, L., 2015. Solid and gaseous bioenergy pathways : input values and GHG emissions. <https://doi.org/10.2790/299090>
- Golub, M., Bojic, S., Djatkov, D., Mickovic, G., Martinov, M., 2012. Corn stover harvesting for renewable energy and residual soil effects. *AMA, Agric. Mech. Asia, Africa Lat. Am.* 43, 72–79. <https://doi.org/https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20133039913>
- Hoskinson, R.L., Karlen, D.L., Birrell, S.J., Radtke, C.W., Wilhelm, W.W., 2008. Engineering , nutrient removal , and feedstock conversion evaluations of four corn stover harvest scenarios 31, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.07.006>
- IPCC, 2006a. Chapter 10 Emissions From Livestock and Manure Management, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://doi.org/http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC, 2006b. Chapter 11 N2O Emissions From Managed Soils , and CO2 Emissions From Lime and Urea Application, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://doi.org/http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- ISS, 2013a. SRPS EN 15934: Mulj, tretirani biootpad, zemljište i otpad. Izračunavanje udela suve materije posle određivanja suvog ostatka ili sadržaja vode.
- ISS, 2013b. SRPS EN 15935: Mulj, tretirani biootpad, zemljište i otpad. Određivanje gubitka žarenjem.
- Jin, W., Xu, X., Gao, Y., Yang, F., Wang, G., 2014. Bioresource Technology Anaerobic fermentation of biogas liquid pretreated maize straw by rumen microorganisms in vitro. *Bioresour. Technol.* 153, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.003>
- Johnson, J., Acosta-Martinez, V., Cambardella, C., Barbour, N., 2013. Crop and Soil Responses to Using Corn Stover as a Bioenergy Feedstock: Observations from the Northern US Corn Belt. *Agriculture* 3, 72–89. <https://doi.org/10.3390/agriculture3010072>
- Johnson, J.M.F., Wilhelm, W.W., Karlen, D.L., Archer, D.W., Wienhold, B., Lightle, D.T., Laird, D., Baker, J., Ochsner, T.E., Novak, J.M., Halvorson, A.D., Arriaga, F., Barbour, N., 2010. Nutrient Removal as a Function of Corn Stover Cutting Height and Cob Harvest. *Bioenergy Res.* 3, 342–352. <https://doi.org/10.1007/s12155-010-9093-3>
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hermann, H., 2016. *Energie aus Biomasse*. Springer Vieweg.
- Karlen, D.L., Birrell, S.J., Johnson, J.M.F., Osborne, S.L., Schumacher, T.E., Varvel, G.E., Ferguson, R.B., Novak, J.M., Fredrick, J.R., Baker, J.M., Lamb, J.A., Adler, P.R., Roth, G.W., Nafziger, E.D., 2014. Multilocation Corn Stover Harvest Effects on Crop Yields and Nutrient Removal. *Bioenergy Res.* 7, 528–539. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9419-7>
- Khanal, S., Anex, R.P., Gelder, B.K., Wolter, C., 2014. Nitrogen balance in Iowa and the implications of corn-stover harvesting. *Agric. Ecosyst. Environ.* 183, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.013>
- Kiš, F., 2011. *Ekonomsko vrednovanje ekoloških efekata primene biodizela – Poljoprivredni Fakultet Novi Sad*.
- Kral, I., Piringer, G., Saylor, M.K., Gronauer, A., Bauer, A., 2016. Environmental Effects of Steam Explosion Pretreatment on Biogas from Maize-Case Study of a 500-kW Austrian Biogas Facility. *Bioenergy Res.* 9, 198–207. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9676-0>
- Li, Y., Zhang, R., Chen, C., Liu, G., He, Y., Liu, X., 2013. Bioresource Technology Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet , hemi-solid , and solid state conditions. *Bioresour. Technol.* 149, 406–412.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.091>
- Liebetrau, J., Clemens, J., Weiland, P., Daniel-gromke, J., 2010. Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector. *Eng. Life Sci.* 2010, 10 595–599. <https://doi.org/10.1002/elsc.201000070>
- Liebetrau, J., Reinelt, T., Agostini, A., Linke, B., 2017. Methane emissions from biogas plants. IEA Bioenergy.
- Lizasoain, J., Trulea, A., Gittinger, J., Kral, I., Piringer, G., Schedl, A., Nilsen, P.J., Potthast, A., Gronauer, A., Bauer, A., 2017. Corn stover for biogas production: Effect of steam explosion pretreatment on the gas yields and on the biodegradation kinetics of the primary structural compounds. *Bioresour. Technol.* 244, 949–956. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.042>
- Luo, L., van der Voet, E., Huppel, G., 2009. An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock-Corn stover. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2003–2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.016>
- Manandhar, A., Shah, A., 2017. Life cycle assessment of feedstock supply systems for cellulosic bioenergies using corn stover transported in conventional bale and densified pellet formats. *J. Clean. Prod.* 166, 601–614. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.083>
- Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S., 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass 27, 339–352. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>
- Martinov, M., Đatkov, Đ., Krstić, J., Vujić, G., Tešić, M., Dragutinović, G., Golub, M., Bojić, S., Brkić, M., Ogrizović, B., 2011. Studija o proceni ukupnih potencijala i mogućnostima proizvodnje i korišćenja biogasa na teritoriji AP Vojvodine. Novi Sad.
- Martinov, M., Golub, M., Viskovic, M., Djatkov, D., Krstic, J., 2016. Study of harvest, storage and processing of corn stover for its use as a fuel and feedstock for biofuels in Autonomous Province Vojvodina. Faculty of Technical Sciences, Novi Sad.
- Murphy, C.W., Kendall, A., 2013. Life cycle inventory development for corn and stover production systems under different allocation methods. *Biomass and Bioenergy* 58, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.008>
- Pourbafrani, M., Mckechnie, J., Shen, T., Saville, B.A., Maclean, H.L., 2014. Impacts of pre-treatment technologies and co-products on greenhouse gas emissions and energy use of lignocellulosic ethanol production. *J. Clean. Prod.* 78, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.050>
- Rana, R., Ingrao, C., Lombardi, M., Tricase, C., 2016. Greenhouse gas emissions of an agro-biogas energy system: Estimation under the Renewable Energy Directive. *Sci. Total Environ.* 550, 1182–1195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.164>
- Republički zavod za statistiku, 2016. Očekivana proizvodnja pšenice, malina i višanja i zasejane površine kukuruza, šećerne repe, suncokreta i soje u R. Srbiji, 2016.
- Rosato, M.A., 2017. Managing biogas plants. A practical guide. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Sawyer, J.E., Mallarino, A.P., 2012. Nutrient considerations with corn silage and stover harvest, in: 24th Annual Integrated Crop Management Conference. Iowa State University Extension and Outreach, Ames, Iowa, pp. 131–136.
- Schon, B.N., Darr, D.M.J., Webster, K.E., Jennett, N., 2013. Analysis of Storage Methods and Tarping Practices for Corn Stover Bales, in: 2013 ASABE Annual International Meeting. Iowa State University, Kansas City, MO. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.13031/aim.20131620215>

- Schroyen, M., Vervaeren, H., Hulle, S.W.H. Van, Raes, K., 2014. Bioresource Technology Impact of enzymatic pretreatment on corn stover degradation and biogas production. *Bioresour. Technol.* 173, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.030>
- Shah, A., Darr, M.J., 2014. Corn stover storage losses. PM 3051E.
- Shah, A., Darr, M.J., Webster, K., Hoffman, C., 2011. Outdoor storage characteristics of single-pass large square corn stover bales in Iowa. *Energies* 4, 1687–1695. <https://doi.org/10.3390/en4101687>
- Sheehan, J., Aden, A., Paustian, K., Brenner, J., Walsh, M., Nelson, R., 2004. Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol. *J. Ind. Ecol.* 7, 117–146. <https://doi.org/10.1162/108819803323059433>
- Shinners, K.J., Bennett, R.G., Hoffman, D.S., 2012. Single- and two-pass corn grain and stover harvesting. *Trans. ASABE* 55, 341–350.
- Shinners, K.J., Binversie, B.N., Muck, R.E., Weimer, P.J., 2007. Comparison of wet and dry corn stover harvest and storage. *Biomass and Bioenergy* 31, 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.04.007>
- Shinners, K.J., Wepner, A.D., Muck, R.E., Weimer, P.J., 2011. Aerobic and anaerobic storage of single-pass, chopped corn stover. *Bioenergy Res.* 4, 61–75. <https://doi.org/10.1007/s12155-010-9101-7>
- Spatari, S., Zhang, Y., Maclean, H.L., 2005. Life Cycle Assessment of Switchgrass- and Corn Automobiles. *Environ. Sci. Technol.* 39, 9750–9758. <https://doi.org/10.1021/es048293>
- Straeter, A.J.E., 2011. Cornrower System of Stover Harvest Written for presentation at the 2011 ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE, ASABE Paper No. 1110596. St. Joseph, Mich.
- Theuretzbacher, F., Lizasoain, J., Lefever, C., Saylor, M.K., Enguidanos, R., Weran, N., Gronauer, A., Bauer, A., 2015. Steam explosion pretreatment of wheat straw to improve methane yields: Investigation of the degradation kinetics of structural compounds during anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 179, 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.008>
- Vadas, P.A., Digman, M.F., 2013. Production costs of potential corn stover harvest and storage systems. *Biomass and Bioenergy* 54, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.028>
- VDI, 2006. Verein Deutscher Ingenieure VDI 4630 Fermentation of organic materials. Duesseldorf. Verein Deutscher Ingenieure.
- Wendland, M., Lichti, F., 2012. Biogasgärreste Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Whitman, T., Yanni, S., Whalen, J., 2011. Life cycle assessment of corn stover production for cellulosic ethanol in Quebec. *Can. J. Soil Sci.* 91, 997–1012. <https://doi.org/10.4141/cjss2011-011>
- Whittaker, C., Borrion, A.L., Newnes, L., McManus, M., 2014. The renewable energy directive and cereal residues. *Appl. Energy* 122, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.091>
- Wulf, S., Maeting, M., Clemens, J., 2002. Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: I. Ammonia volatilization. *J. Environ. Qual.* 31, 1789–1794.

- Xu, F., Li, Y., 2012. Bioresource Technology Solid-state co-digestion of expired dog food and corn stover for methane production. *Bioresour. Technol.* 118, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.102>
- Xu, F., Shi, J., Lv, W., Yu, Z., Li, Y., 2013. Comparison of different liquid anaerobic digestion effluents as inocula and nitrogen sources for solid-state batch anaerobic digestion of corn stover. *Waste Manag.* 33, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.006>
- Zhong, W., Zhang, Z., Luo, Y., Qiao, W., Xiao, M., Zhang, M., 2012. Bioresource Technology Biogas productivity by co-digesting Taihu blue algae with corn straw as an external carbon source. *Bioresour. Technol.* 114, 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.111>
- Zhong, W., Zhang, Z., Luo, Y., Sun, S., Qiao, W., Xiao, M., 2011. Bioresource Technology Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresour. Technol.* 102, 11177–11182. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.077>
- Zhou, S., Zhang, Y., Dong, Y., 2012. Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of mixed corn stover and cow dung. *Energy* 46, 644–648. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.017>

PRILOZI

Prilog 1.

Uštede emisija GHG za biogas iz RED direktive

Biogas za električnu energiju				
Sistem proizvodnje biogasa		Tehnološka opcija	Tipična ušteda emisija GHG, %	Uobičajena ušteda emisija GHG, %
Tečni stajnjak	Slučaj 1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	146	94
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	246	240
	Slučaj 2	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	136	85
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	227	219
	Slučaj 3	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	142	86
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	243	235
Kukuruz cela biljka	Slučaj 1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	36	21
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	59	53
	Slučaj 2	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	34	18
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	55	47
	Slučaj 3	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	28	10
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	52	43
Biorazgradivi otpad	Slučaj 1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	47	26
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	84	78
	Slučaj 2	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	43	21
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	77	68
	Slučaj 3	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	38	14
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	76	66

Slučajevi 1, 2 i 3 odnose se, respektivno, na: potrošnja električne energije iz sopstvenih izvora, potrošnja električne energije iz mreže, potrošnja električne energije iz mreže i gasni boiler za generisanje toplote

Biogas za električnu energiju - mešavina stajnjaka i kukuruza				
Sistem proizvodnje biogasa		Tehnološka opcija	Tipična ušteda emisija GHG, %	Uobičajena ušteda emisija GHG, %
Stajnjak-kukuruz 80% - 20%	Slučaj 1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	72	45
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	120	114
	Slučaj 2	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	67	40
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	111	103
	Slučaj 3	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	65	35
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	114	106
Stajnjak-kukuruz 70% - 30%	Slučaj 1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	60	37
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	100	94
	Slučaj 2	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	57	32
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	93	85
	Slučaj 3	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	53	27
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	94	85
Stajnjak-kukuruz 60%	Slučaj 1	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	53	32
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	88	82

Prilozi

- 40%	Slučaj 2	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	50	28
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	82	73
	Slučaj 3	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije	46	22
		Zatvoren rezervoar za ostatak fermentacije	81	72

Biometan za transport			
Sistem proizvodnje biometana	Tehnološka opcija	Tipična ušteda emisija GHG, %	Uobičajena ušteda emisija GHG, %
Tečni stajnjak	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	117	72
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	133	94
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	190	179
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	206	202
Kukuruz cela biljka	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	35	17
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	51	39
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	52	41
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	68	63
Biorazgradivi otpad	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	43	20
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	59	42
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	70	58
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	86	80

Biometan - mešavina stajnjaka i kukuruza			
Sistem proizvodnje biometana	Tehnološka opcija	Tipična ušteda emisija GHG, %	Uobičajena ušteda emisija GHG, %
Stajnjak - kukuruz 80% - 20%	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	62	35
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	78	57
	Otvoren rezervoar za	97	86

	ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa		
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	113	108
Stajnjak - kukuruz 70% - 30%	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	53	29
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	69	51
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	83	71
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	99	94
Stajnjak - kukuruz 60% - 40%	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	48	25
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	64	48
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, bez sagorevanja viška gasa	74	62
	Otvoren rezervoar za ostatak fermentacije, sagorevanje viška gasa	90	84

Prilog 2.

Ukupni prinos, uberivi prinos i prinosi različitih frakcija kukuruzovine po hektaru

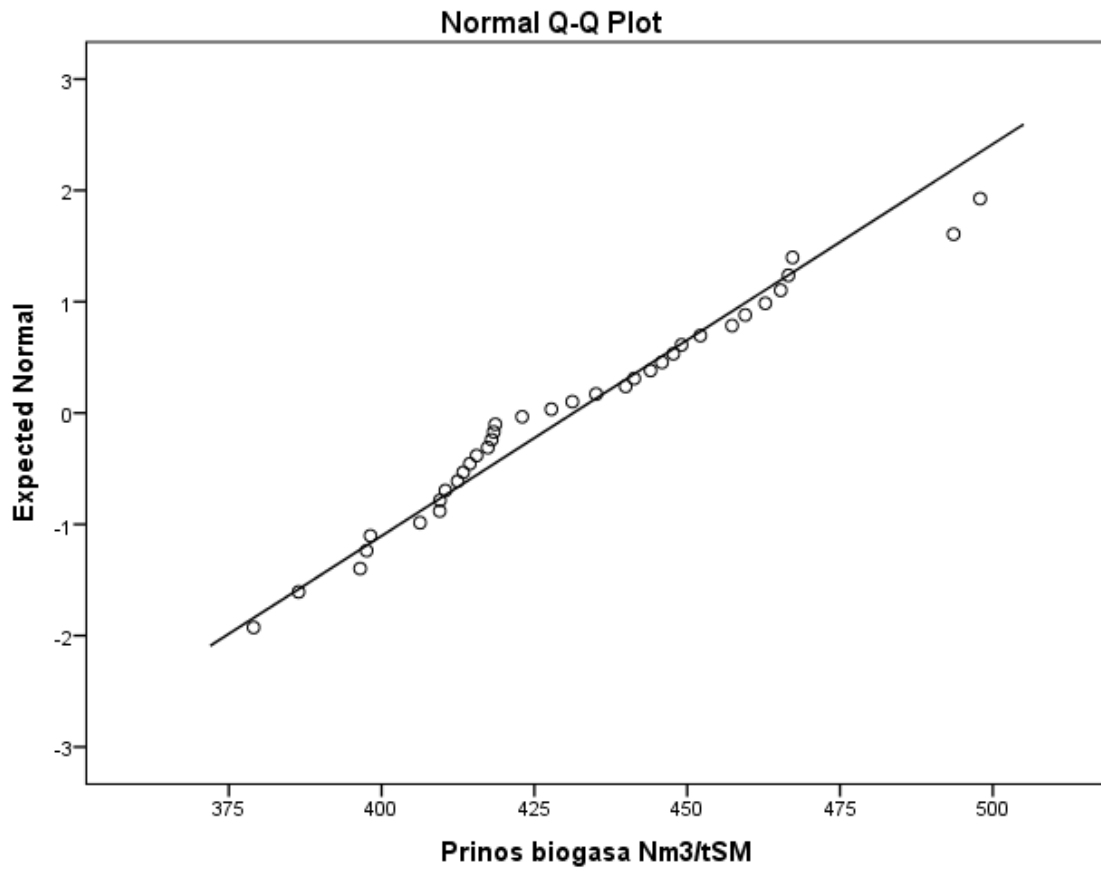
Godina	Hibrid	Ukupan prinos, tSM	Upotrebljivi prinos, tSM	Prvih 20 cm, tSM	Prvih 70 cm, tSM	20-70 cm, tSM	Stabljika + lišće, tSM	Oklasak, tSM	Komušina, tSM
2011.	PR 36 R 10	10,4	9,3	1,1			6,1	2,4	0,8
	PAKO	7,1	6,5	0,6			4,4	1,4	0,7
	LUCE	11,3	10,0	1,3			6,5	2,3	1,2
	SYCORA	11,0	9,0	2,0			6,1	1,9	0,9
	DKC 6120	9,4	8,6	0,9			6,3	1,4	0,8
	NS 7070	11,7	10,7	1,0			7,5	1,9	1,3
	GRECALE	13,0	11,6	1,5			8,3	2,1	1,1
	VITORINO	8,9	8,0	0,9			5,1	1,9	1,0
2012.	NS 444	7,7	6,7	1,0			4,3	1,4	1,0
	DKC 5276	5,6	4,8	0,8			4,1	0,3	0,4
	ZP 505	7,2	6,5	0,7			4,5	1,2	0,7
	LUCE	7,4	6,6	0,8			4,3	1,5	0,7
	KORIMBOS	7,8	7,0	0,8			5,2	1,3	0,5
	GRECALE	7,4	6,4	1,0			4,9	1,1	0,5
2013.	NS 4023	7,1	4,7		2,4		3,0	1,0	0,7
	PAKO	10,2	7,2		3,0		4,2	1,7	1,3
	DKC	8,0	5,3		2,7		3,5	1,0	0,8
	LUCE	9,5	6,5		3,0		4,3	1,2	1,0
	NS 6010	7,5	5,0		2,5		3,6	0,9	0,5
	KORIMBOS	7,1	4,5		2,5		3,1	0,8	0,6
	AS 72	8,4	5,6		2,9		3,8	1,1	0,7
	GRECALE	7,5	4,8		2,7		3,2	1,1	0,6
2014.	NS 4023	11,5	10,3	1,2		2,0	3,0	1,0	0,7
	DKC	11,1	10,2	0,9		1,8	4,2	1,7	1,3
	Kitty	11,9	10,9	1,0		1,7	3,5	1,0	0,8

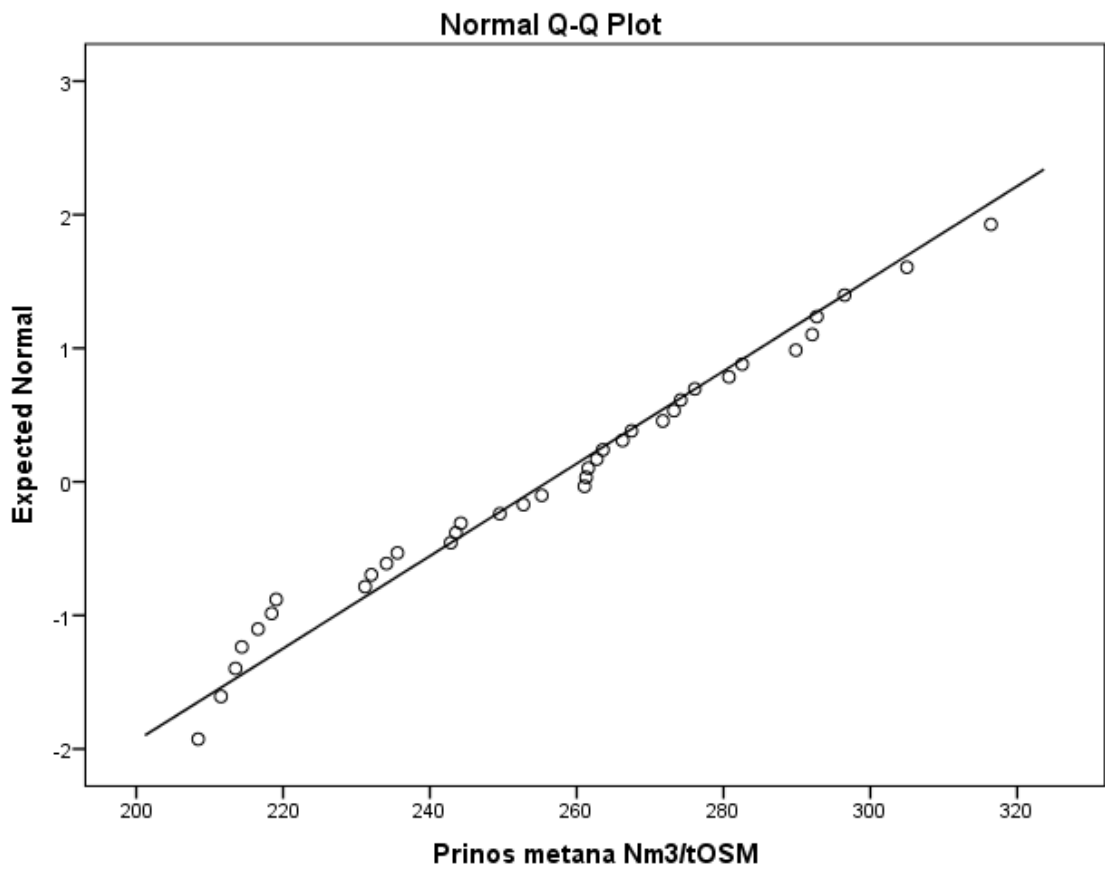
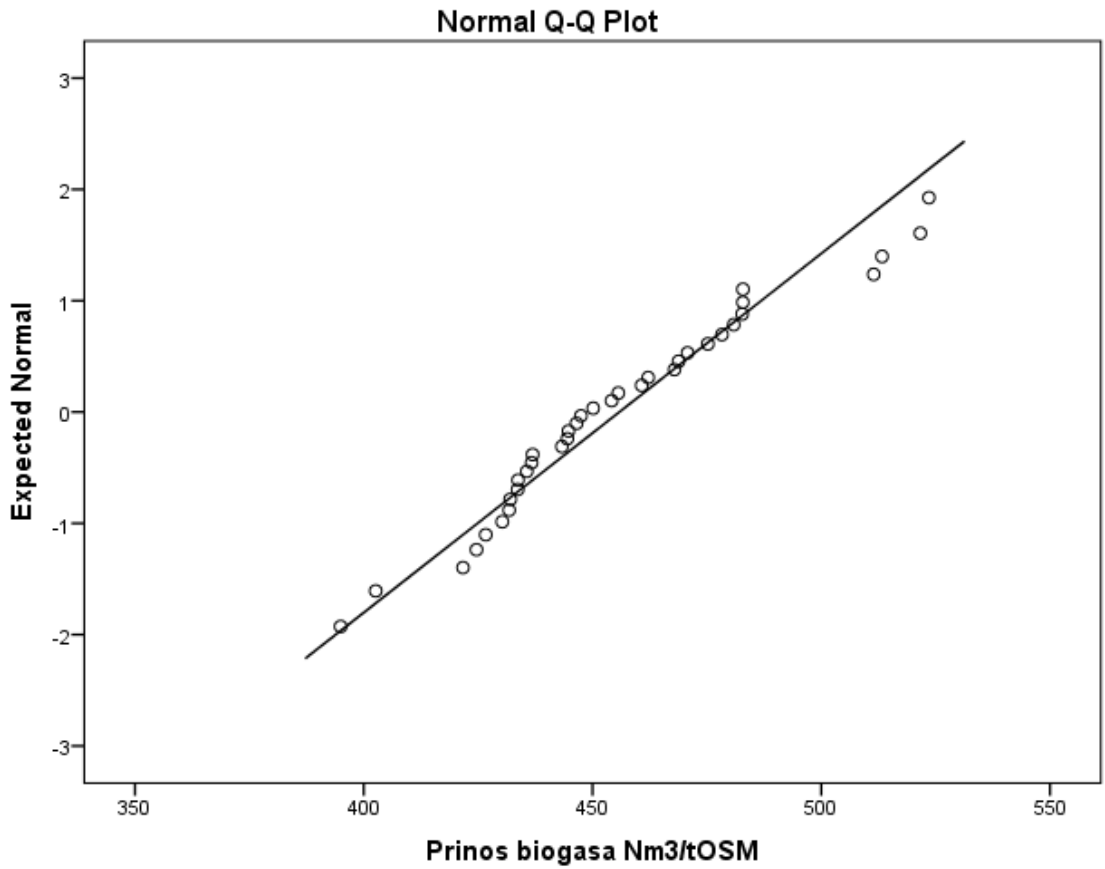
Prilozi

	NS 6010	15,6	14,3	1,3		2,2	4,3	1,2	1,0
	KORIMBOS	11,4	10,7	0,7		1,8	3,6	0,9	0,5
	AS 72	14,4	13,1	1,2		2,0	3,1	0,8	0,6
2015.	NS 4023	8,7	7,7	1,2	3,2	2,0	3,7	1,4	0,7
	DKC	9,8	8,7	0,9	3,2	2,2	3,7	1,8	1,0
	Kitty	11,3	10,3	1,0	3,3	2,3	5,0	1,9	1,1
	NS 6010	11,6	10,5	1,3	4,0	2,7	5,0	1,7	1,2
	KORIMBOS	8,1	7,3	0,7	2,7	2,0	3,7	1,0	0,5
	AS 72	8,2	7,5	1,2	3,0	1,8	3,5	1,3	0,9

Prilog 3.

Normalni Q-Q plot dijagrami za prinos biogasa i metana izraženih po tSM i tOSM.





Prilog 4.

Rezultati merenja prinosa i sastava biogasa mikrokrystalne celuloze i inokuluma

Parametar	Celuloza 1	St. dev.	Celuloza 2	St. dev.
SM, %	95,0	0,1	95,2	0,1
OSM, %	95,0	0,1	95,2	0,1
OSM, % SM	100,0	0,0	100,0	0,0
Prinos biogasa, Nm ³ /tSvM	622,2	5,5	614,3	5,3
Prinos biogasa, Nm ³ /tSM	654,2	5,8	644,7	6,2
Prinos biogasa, Nm ³ /tOSM	654,2	5,8	644,7	6,3
Prinos metana, Nm ³ /tSvM	324,8	2,1	313,9	2,0
Prinos metana, Nm ³ /tSM	341,6	2,2	329,4	1,9
Prinos metana, Nm ³ /tOSM	341,6	2,2	329,4	2,3
Zapreminski udeo metana, %	52,2	0,1	51,1	0,3

SM – suva materija, OSM – organska suva materija

Parametar	Inokulum 1	St. dev.	Inokulum 2	St. dev.
SM, %	7,2	0,1	6,3	0,1
OSM, %	5,4	0,1	4,2	0,1
OSM, % SM	74,6	0,6	66,9	0,4
Prinos biogasa, Nm ³ /tSvM	5,9	0,4	4,0	0,5
Prinos biogasa, Nm ³ /tSM	81,8	6,2	63,7	5,8
Prinos biogasa, Nm ³ /tOSM	109,6	8,3	95,19	7,9
Prinos metana, Nm ³ /tSvM	3,2	0,2	2,2	0,4
Prinos metana, Nm ³ /tSM	45,0	3,3	33,4	3,1
Prinos metana, Nm ³ /tOSM	60,3	4,4	52,38	5,1
Zapreminski udeo metana, %	55,0	0,2	52,4	0,4

SM – suva materija, OSM – organska suva materija

Prilog 5.

Inventar životnog ciklusa za razmatrane slučajeve

	LCI	kg CO ₂ -Equiv.				
	CML2001 - Apr. 2015, Global Warming Potential (GWP 100 years), excl biogenic carbon RED adjusted	Emissions to air	Carbon dioxide	Nitrous oxide (laughing gas)	Methane	Methane bio.
Eec normalan prinos		0,32770514	0,1513313	0,1707616	0,0054026	3,98E-05
	Uklanjanje hraniva sa vracnim digestatom	0,04482601	0	0,044826	0	0
	Baliranje valjkastih	0,00228331	0,0022554	2,58E-05	2,15E-06	0
	Dizel grablje	0,00024532	0,0002228	1,26E-06	2,09E-05	4,78E-08
	Dizel izuzimanje silaže	0,00023815	0,0002163	1,22E-06	2,03E-05	4,64E-08
	Dizel silažni kombajn	0,00101521	0,0009221	5,22E-06	8,65E-05	1,98E-07
	Dizel siliranje	4,79E-07	4,35E-07	2,46E-09	4,08E-08	9,34E-11
	Dizel traktor na polju	0,00023105	0,0002099	1,19E-06	1,97E-05	4,50E-08
	Dizel transport silaže	0,001056	0,0009591	5,43E-06	8,99E-05	2,06E-07
	Dizel transport valjkastih	0,00078283	0,000711	4,02E-06	6,67E-05	1,53E-07
	Dizel transport valjkastih primarno	0,00015619	0,0001419	8,03E-07	1,33E-05	3,05E-08
	Dizel utovar valjkastih	0,00044911	0,0004079	2,31E-06	3,82E-05	8,76E-08
	Dizel utovar četvrtastih	0,00030047	0,0002729	1,54E-06	2,56E-05	5,86E-08
	Dizel baliranje	0,00036783	0,0003341	1,89E-06	3,13E-05	7,17E-08
	Dizel baliranje valjkastih	0,00036783	0,0003341	1,89E-06	3,13E-05	7,17E-08
	Dizel primena digestata	0,00057123	0,0005188	2,94E-06	4,86E-05	1,11E-07
	Dizel za rad cornrowera	0,00014713	0,0001336	7,56E-07	1,25E-05	2,87E-08
	Dizel za transport četvrtastih	0,00051269	0,0004657	2,64E-06	4,37E-05	1,00E-07
	Dizel za transport do primarnog četvrtastih	0,00011321	0,0001028	5,82E-07	9,64E-06	2,21E-08
	Folija za četvrtaste skladište	0,0006965	0,0005642	1,32E-11	1,32E-04	0
	Folija za skladištenje valjkastih	0,00067669	0,0005482	1,28E-11	1,29E-04	0
	Folija za valjkaste	0,0016607	0,0013752	6,92E-08	2,84E-04	1,91E-06
	Siliranje	2,85E-06	2,85E-06	0	0	0
	Folija za četvrtaste	0,0028471	0,0023576	1,19E-07	4,86E-04	3,28E-06
	Kamion transport valjkastih	0,00467627	0,0046628	1,34E-05	1,57E-07	0
	Kamion transport četvrtastih	0,00306222	0,0030537	8,42E-06	1,03E-07	0
	Nadoknada K ₂ O bez digestata	0,01258482	0,0115233	1,72E-04	8,41E-04	2,54E-06
	Nadoknada P ₂ O ₅ bez digestata	0,00638163	0,0060822	5,39E-05	2,09E-04	5,53E-06
	Folija za pokrivanje silaže	5,66E-05	4,59E-05	1,07E-12	1,08E-05	0
	Rad silažnog kombajna	0,0072904	0,0072094	7,47E-05	6,24E-06	0
	Distribucija digestata	0,00354248	0,0034992	4,00E-05	3,34E-06	0
	Formiranje zboja	0,00152443	0,0015058	1,72E-05	1,43E-06	0
Kombajn - cornrower	0,00090872	0,0008975	1,03E-05	8,62E-07	0	
Baliranje četvrtastih	0,00228331	0,0022554	2,58E-05	2,15E-06	0	
Transport četvrtastih bala sa traktorom	0,00070501	0,0006964	7,93E-06	6,63E-07	0	
Transport silaže	0,00657652	0,0064964	7,39E-05	6,19E-06	0	
Uklanjanje hraniva	0,07521123	0	0,0752112	0	0	

Prilozi

	Emisije pri primeni digestata	0,04945812	0	0,0494581	0	0
	Utovar četvrtastih bala	0,00187147	0,0018486	2,11E-05	1,76E-06	0
	Izuzimanje silaže	0,00141893	0,0014189	0	0	0
	Traktor na polju sa silažnim	0,00151225	0,0014938	1,70E-05	1,42E-06	0
	Transport valjkastih primarno	0,00097272	0,0009609	1,09E-05	9,15E-07	0
	Urea bez digestata	0,05346038	0,0512913	3,94E-04	1,71E-03	1,58E-05
	Urea sa vraćanjem digestata	0,03186246	0,0305697	2,35E-04	1,02E-03	9,44E-06
	Utovar valjkastih	0,00279727	0,0027631	3,15E-05	2,64E-06	0
Eec nizak prinos	Ukupno	0,33151958	0,155057	0,1708014	0,0054508	3,99E-05
	Uklanjanje hraniva sa vracnim digestatom	0,04482601	0	0,044826	0	0,00E+00
	Baliranje valjkastih	0,00335487	0,0033139	3,78E-05	3,16E-06	0,00E+00
	Dizel grablje	0,00036045	0,0003274	1,85E-06	3,07E-05	7,03E-08
	Dizel izuzimanje silaže	0,00023815	0,0002163	1,22E-06	2,03E-05	4,64E-08
	Dizel silažni kombajn	0,00101521	0,0009221	5,22E-06	8,65E-05	1,98E-07
	Dizel siliranje	4,79E-07	4,35E-07	2,46E-09	4,08E-08	9,34E-11
	Dizel traktor na polju	0,00023105	0,0002099	1,19E-06	1,97E-05	4,50E-08
	Dizel transport silaže	0,001056	0,0009591	5,43E-06	8,99E-05	2,06E-07
	Dizel transport valjkastih	0,00078283	0,000711	4,02E-06	6,67E-05	1,53E-07
	Dizel transport valjkastih primarno	0,00015619	0,0001419	8,03E-07	1,33E-05	3,05E-08
	Dizel utovar valjkastih	0,00044911	0,0004079	2,31E-06	3,82E-05	8,76E-08
	Dizel utovar četvrtastih	0,00030047	0,0002729	1,54E-06	2,56E-05	5,86E-08
	Dizel baliranje	0,00054045	0,0004909	2,78E-06	4,60E-05	1,05E-07
	Dizel baliranje valjkastih	0,00054045	0,0004909	2,78E-06	4,60E-05	1,05E-07
	Dizel primena digestata	0,00057123	0,0005188	2,94E-06	4,86E-05	1,11E-07
	Dizel za rad cornrowera	0,00021618	0,0001963	1,11E-06	1,84E-05	4,21E-08
	Dizel za transport četvrtastih	0,00051269	0,0004657	2,64E-06	4,37E-05	1,00E-07
	Dizel za transport do primarnog četvrtastih	0,00011321	0,0001028	5,82E-07	9,64E-06	2,21E-08
	Folija za četvrtaste skladište	0,0006965	0,0005642	1,32E-11	0,0001323	0
	Folija za skladištenje valjkastih	0,00067669	0,0005482	1,28E-11	0,0001285	0
	Folija za valjkaste	0,0016607	0,0013752	6,92E-08	0,0002835	1,91E-06
	Siliranje	2,85E-06	2,85E-06	0	0	0
	Folija za četvrtaste	0,0028471	0,0023576	1,19E-07	0,0004861	3,28E-06
	Kamion transport valjkastih	0,00467627	0,0046628	1,34E-05	1,57E-07	0
	Kamion transport četvrtastih	0,00306222	0,0030537	8,42E-06	1,03E-07	0
	Nadoknada K2O bez digestata	0,01258482	0,0115233	0,0001719	0,0008414	2,54E-06
	Nadoknada P2O5 bez digestata	0,00638163	0,0060822	5,39E-05	0,0002088	5,53E-06
	Folija za pokrivanje silaže	5,66E-05	4,59E-05	1,07E-12	1,08E-05	0
	Rad silažnog kombajna	0,0072904	0,0072094	7,47E-05	6,24E-06	0
	Distribucija digestata	0,00354248	0,0034992	4,00E-05	3,34E-06	0
	Formiranje zboja	0,00223985	0,0022125	2,53E-05	2,11E-06	0
	Kombajn - cornrower	0,00133519	0,0013188	1,52E-05	1,27E-06	0
	Baliranje četvrtastih	0,00335487	0,0033139	3,78E-05	3,16E-06	0
Transport četvrtastih bala sa traktorom	0,00070501	0,0006964	7,93E-06	6,63E-07	0	
Transport silaže	0,00657652	0,0064964	7,39E-05	6,19E-06	0	
Uklanjanje hraniva	0,07521123	0	0,0752112	0	0	

Prilozi

	Emisije pri primeni digestata	0,04945812	0	0,0494581	0	0
	Utovar četvrtastih bala	0,00187147	0,0018486	2,11E-05	1,76E-06	0
	Izuzimanje silaže	0,00141893	0,0014189	0	0	0
	Traktor na polju sa silažnim	0,00151225	0,0014938	1,70E-05	1,42E-06	0
	Transport valjkastih primarno	0,00097272	0,0009609	1,09E-05	9,15E-07	0
	Urea bez digestata	0,05346038	0,0512913	0,0003939	0,0017062	1,58E-05
	Urea sa vraćanjem digestata	0,03186246	0,0305697	0,0002348	0,0010169	9,44E-06
	Utovar valjkastih	0,00279727	0,0027631	3,15E-05	2,64E-06	0
Eec visok prinos	Ukupno	0,32616084	0,1498229	0,1707455	0,0053831	3,98E-05
	Uklanjanje hraniva sa vracenim digestatom	0,04482601	0	0,044826	0	0
	Baliranje valjkastih	0,00184948	0,0018269	2,09E-05	1,74E-06	0
	Dizel grablje	0,00019871	0,0001805	1,02E-06	1,69E-05	3,87E-08
	Dizel izuzimanje silaže	0,00023815	0,0002163	1,22E-06	2,03E-05	4,64E-08
	Dizel silažni kombajn	0,00101521	0,0009221	5,22E-06	8,65E-05	1,98E-07
	Dizel siliranje	4,79E-07	4,35E-07	2,46E-09	4,08E-08	9,34E-11
	Dizel traktor na polju	0,00023105	0,0002099	1,19E-06	1,97E-05	4,50E-08
	Dizel transport silaže	0,001056	0,0009591	5,43E-06	8,99E-05	2,06E-07
	Dizel transport valjkastih	0,00078283	0,000711	4,02E-06	6,67E-05	1,53E-07
	Dizel transport valjkastih primarno	0,00015619	0,0001419	8,03E-07	1,33E-05	3,05E-08
	Dizel utovar valjkastih	0,00044911	0,0004079	2,31E-06	3,82E-05	8,76E-08
	Dizel utovar četvrtastih	0,00030047	0,0002729	1,54E-06	2,56E-05	5,86E-08
	Dizel baliranje	0,00029794	0,0002706	1,53E-06	2,54E-05	5,81E-08
	Dizel baliranje valjkastih	0,00029794	0,0002706	1,53E-06	2,54E-05	5,81E-08
	Dizel primena digestata	0,00057123	0,0005188	2,94E-06	4,86E-05	1,11E-07
	Dizel za rad cornrowera	0,00011918	0,0001082	6,13E-07	1,01E-05	2,32E-08
	Dizel za transport četvrtastih	0,00051269	0,0004657	2,64E-06	4,37E-05	1,00E-07
	Dizel za transport do primarnog četvrtastih	0,00011321	0,0001028	5,82E-07	9,64E-06	2,21E-08
	Folija za četvrtaste skladište	0,0006965	0,0005642	1,32E-11	0,0001323	0
	Folija za skladištenje valjkastih	0,00067669	0,0005482	1,28E-11	0,0001285	0
	Folija za valjkaste	0,0016607	0,0013752	6,92E-08	0,0002835	1,91E-06
	Siliranje	2,85E-06	2,85E-06	0	0	0
	Folija za četvrtaste	0,0028471	0,0023576	1,19E-07	0,0004861	3,28E-06
	Kamion transport valjkastih	0,00467627	0,0046628	1,34E-05	1,57E-07	0
	Kamion transport četvrtastih	0,00306222	0,0030537	8,42E-06	1,03E-07	0
	Nadoknada K2O bez digestata	0,01258482	0,0115233	0,0001719	0,0008414	2,54E-06
	Nadoknada P2O5 bez digestata	0,00638163	0,0060822	5,39E-05	0,0002088	5,53E-06
	Folija za pokrivanje silaže	5,66E-05	4,59E-05	1,07E-12	1,08E-05	0
	Rad silažnog kombajna	0,0072904	0,0072094	7,47E-05	6,24E-06	0
	Distribucija digestata	0,00354248	0,0034992	4,00E-05	3,34E-06	0
	Formiranje zboja	0,00123479	0,0012197	1,39E-05	1,16E-06	0
	Kombajn - cornrower	0,00073606	0,000727	8,36E-06	6,98E-07	0
Baliranje četvrtastih	0,00184948	0,0018269	2,09E-05	1,74E-06	0	
Transport četvrtastih bala sa traktorom	0,00070501	0,0006964	7,93E-06	6,63E-07	0	
Transport silaže	0,00657652	0,0064964	7,39E-05	6,19E-06	0	
Uklanjanje hraniva	0,07521123	0	0,0752112	0	0	

Prilozi

	Emisije pri primeni digestata	0,04945812	0	0,0494581	0	0
	Utovar četrtastih bala	0,00187147	0,0018486	2,11E-05	1,76E-06	0
	Izuzimanje silaže	0,00141893	0,0014189	0	0	0
	Traktor na polju sa silažnim	0,00151225	0,0014938	1,70E-05	1,42E-06	0
	Transport valjkastih primarno	0,00097272	0,0009609	1,09E-05	9,15E-07	0
	Urea bez digestata	0,05346038	0,0512913	0,0003939	0,0017062	1,58E-05
	Urea sa vraćanjem digestata	0,03186246	0,0305697	0,0002348	0,0010169	9,44E-06
	Utovar valjkastih	0,00279727	0,0027631	3,15E-05	2,64E-06	0
UČ	Ukupno	0,01729269	0,007597	0,001238	0,0084545	3,03E-06
	Električna energija	0,00767807	0,007597	1,25E-05	6,53E-05	3,03E-06
	Skladištenje digestata	0,00961462	0	0,0012254	8,39E-03	0
	Prirodni gas	0,07936094	0,0741432	0,0002561	0,0049568	4,77E-06