

# Gospodarski i ekološki potencijali kružnog gospodarenja otpadom

---

**Marašek, Mihael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:192022>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-08**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering  
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mihael Marašek**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

izv. prof. dr. sc. Slaven Dobrović

Student:

Mihael Marašek

Zagreb, 2023

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Slavenu Dobroviću na uloženom vremenu, potpori i stručnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i bezuvjetnoj podršci tijekom studiranja i izrade diplomskog rada.



Mihael Marašek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602 – 04 / 23 – 6 / 1
Ur. broj:	15 - 1703 - 23 -

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MIHAEL MARAŠEK** Mat. br.: 0035209411

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Gospodarski i ekološki potencijali kružnog gospodarenja otpadom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Economic and ecological potentials of circular waste management**

Opis zadatka:

Uspostava kružnog gospodarenja otpadom važan je dio europskog zelenog plana kojim se želi postići klimatska neutralnost i poboljšati odnos prema resursima i okolišu. Međutim, osim nedvojbenih ekoloških prednosti, kružni koncept gospodarenja otpadom donosi i značajne gospodarske potencijale, primarno u vidu tržišno vrijedne sirovine i energetske uštede u proizvodnji novih proizvoda.

U okviru diplomskog rada je potrebno obuhvatiti sljedeće:

1. Obrazložiti načine postupanja otpadom s gospodarskog i ekološkog aspekta.
2. Ekološki aspekt treba uključiti pregled emisija stakleničkih plinova i ostalih zagađivala te utjecaj na resursnu učinkovitost.
3. Gospodarski aspekt uključuje pregled energetske uštede i ponora te kvantifikaciju materijskih produkata pojedinih postupaka gospodarenja otpadom.
4. Proračun gospodarskih i ekoloških potencijala za kružno gospodarenje otpadom za odabrano geografsko područje, analiza i prikaz rezultata tablično i grafički.
5. Usporedba kružnog gospodarenja otpadom visoke učinkovitosti s postupcima temeljenim na a/odlaganju, b/spaljivanju i c/mehaničko-biološkoj obradi uz proizvodnju goriva iz otpada.
6. Zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
17. studenog 2022.

Rok predaje rada:  
19. siječnja 2023.

Predviđeni datum obrane:  
23. siječnja do 27. siječnja 2023.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Slaven Dobrović

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. NAČINI POSTUPANJA S OTPADOM .....	4
2.1. Sprječavanje nastanka otpada.....	4
2.2. Ponovna upotreba .....	4
2.3. Recikliranje .....	5
2.3.1. Proizvodnja aluminijske legure iz recikliranog materijala .....	6
2.3.2. Proizvodnja stakla iz recikliranog materijala .....	7
2.3.3. Proizvodnja novinskog papira iz recikliranog materijala.....	8
2.3.4. Proizvodnja PET ambalaže iz recikliranog materijala .....	9
2.3.5. Materijske uštede uslijed recikliranja.....	11
2.3.6. Kompostiranje .....	11
2.3.7. Anaerobna digestija.....	14
2.4. Mehaničko – biološka obrada.....	17
2.5. Energetska uporaba .....	19
2.5.1. Izgaranje otpada .....	19
2.5.2. Izgaranje papira .....	20
2.5.3. Izgaranje plastike.....	21
2.6. Odlaganje.....	22
2.6.1. Metodologija proračuna emisija od odlaganja biorazgradivog otpada .....	24
2.7. Sažetak emisijskih, energetske i materijske značajki u načinima postupanja s otpadom.....	26
3. PRORAČUN GOSPODARSKIH I EKOLOŠKIH POTENCIJALA ZA KRUŽNO GOSPODARENJE OTPADOM ZA GRAD ZAGREB .....	29
3.1. Ulazni podaci za proračun .....	29
3.2. Recikliranje i kompostiranje .....	30
3.3. Spaljivanje otpada .....	32
3.4. Odlaganje.....	38
4. RASPRAVA .....	41
4.1. Početno stanje.....	41
4.2. Razvoj u smjeru kružne ekonomije .....	41
4.3. Razvoj u smjeru energetske uporabe.....	43
4.4. Usporedba dva scenarija razvoja sustava gospodarenja otpadom.....	44

---

4.4.1. Usporedba emisija stakleničkih plinova.....	44
4.4.2. Usporedba energijskih tokova.....	46
4.4.3. Financijsko vrednovanje .....	46
5. ZAKLJUČAK.....	49
LITERATURA.....	51

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Struktura emisija stakleničkih plinova u RH od 1990. do 2019. godine [5] .....	1
Slika 2.	Pregled novčane vrijednosti emisijske jedinice kroz 2021. i 2022. godinu [9].....	2
Slika 3.	Proizvodnja aluminija iz sirovog i recikliranog materijala.....	7
Slika 4.	Proizvodnja stakla iz sirovog i recikliranog materijala .....	8
Slika 5.	Proizvodnja novinskog papira iz sirovog i recikliranog materijala .....	9
Slika 6.	Proizvodnja PET ambalaže iz sirovog materijala i recikliranog materijala .....	10
Slika 7.	Materijalna bilanca procesa kompostiranja .....	12
Slika 8.	Emisijski i energetske izvori i ponori uslijed procesa kompostiranja [7] .....	13
Slika 9.	Materijalna bilanca bioplinare na području Grada Novske [35] .....	15
Slika 10.	Emisijski i energetske izvori i ponori uslijed procesa anaerobne digestije.....	16
Slika 11.	Shema procesa mehaničko – biološke obrade [7].....	17
Slika 12.	Emisijski i energetske izvori i ponori uslijed procesa MBO.....	18
Slika 13.	Spaljivanje goriva iz papira .....	21
Slika 14.	Spaljivanje goriva iz plastike.....	22
Slika 15.	Emisije stakleničkih plinova pri tri različita pristupa odlaganja MKO .....	24
Slika 16.	Potencijal biorazgradivog otpada za stvaranje metana [7] .....	25
Slika 17.	Količina odloženog MKO na odlagalište Jakuševac u 2020. godini [32] .....	30
Slika 18.	Ukupne izbjegnute emisije uslijed recikliranja pojedinig materijala .....	31
Slika 19.	Prosječan sastav plastičnog otpada Europske unije.....	33
Slika 20.	Potencijal za stvaranje emisija ugljikova dioksida uslijed spaljivanja .....	35
Slika 21.	Emisije stakleničkih plinova u različitim scenarijima razvoja sustava GO .....	45
Slika 22.	Generirana energija u različitim scenarijima razvoja sustava GO.....	46



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Izbjegnute emisije uslijed ponovne uporabe proizvoda [18].....	5
Tablica 2. Energetske uštede i izbjegnute emisije uslijed recikliranja[20] .....	10
Tablica 3. Maseni tokovi kod recikliranja [7] .....	11
Tablica 4. Potencijal za stvaranje CH <sub>4</sub> i CO <sub>2</sub> u anaerobnim uvjetima odlagališta [7].....	25
Tablica 5. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s papirom [19], [20].....	26
Tablica 6. Emisije, energija i materija u načinima postupanja sa staklom [19], [20].....	26
Tablica 7. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s tekstilom [19], [20] .....	27
Tablica 8. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s plastikom [19], [20] .....	27
Tablica 9. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s metalom [19], [20] .....	28
Tablica 10. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s biootpadom [19], [20].....	28
Tablica 11. Morfološki sastav miješanog komunalnog otpada .....	29
Tablica 12. Ukupne emisije prelaskom s odlaganja na recikliranje .....	31
Tablica 13. Energetske uštede prelaskom s odlaganja na recikliranje.....	32
Tablica 14. Ukupne uštede kod recikliranja .....	32
Tablica 15. Masa odložene plastike na odlagalištu Prudinec – Jakuševac u 2020. godini [19]	33
Tablica 16. Potencijal za stvaranje ugljikova dioksida fosilnog podrijetla [19].....	34
Tablica 17. Emisije uslijed spaljivanja ugljika fosilnog podrijetla .....	35
Tablica 18. Emisije stakleničkih plinova uslijed pripreme otpada za spaljivanje .....	36
Tablica 19. Emisijski ponor uslijed proizvodnje električne energije .....	37
Tablica 20. Emisije i energija uslijed spaljivanja goriva iz otpada (RDF) i MKO .....	37
Tablica 21. Emisije uslijed odlaganja bez prikupljanja deponijskih plinova .....	38
Tablica 22. Emisije uslijed odlaganja uz spaljivanje prikupljenih deponijskih plinova.....	38
Tablica 23. Emisije uslijed energetskog iskorištavanja deponijskih plinova .....	39
Tablica 24. Bilanca emisija i energetske uštede uslijed tri različita načina odlaganja otpada	40
Tablica 25. Energija i emisije uslijed prelaska na postupke GO visoke učinkovitosti.....	42
Tablica 26. Energija i emisije uslijed razvoja u smjeru energetske uporabe.....	44
Tablica 27. Pogled na emisije kroz sustav trgovanja emisijskim jedinicama.....	47
Tablica 28. Financijski dobitci stavljanjem cijene na generiranu energiju .....	47
Tablica 29. Ukupni financijski učinci kružnog gospodarenja otpadom .....	48
Tablica 30. Ukupni financijski učinci energetske uporabe.....	48

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
CO <sub>2</sub> eq	<i>Ekvivalent ugljikova dioksida</i>
DDOC	<i>Disimibilni razgradivi organski ugljik</i>
DOC	<i>Razgradivi organski ugljik</i>
EU ETS	<i>European Union Emissions Trading System - Europski sustav trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova</i>
GO	<i>Gospodarenje otpadom</i>
HDPE	<i>Polietilen visoke gustoće</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change – Međuvladin panel o klimatskim promjenama</i>
LDPE	<i>Polietilen niske gustoće</i>
MKO	<i>Miješani komunalni otpad</i>
MBO	<i>Mehaničko – biološka obrada</i>
PET	<i>Polietilen tereftalat</i>
PP	<i>Polipropilen</i>
PS	<i>Polistiren</i>
PU	<i>Poliuretan</i>
PVC	<i>Polivinil-klorid</i>
RDF	<i>Refuse – derived fuel – postupak Gorivo iz otpada</i>

## SAŽETAK

Uspostava kružnog gospodarenja otpadom važan je dio europskog zelenog plana kojim Europa teži postati prvi klimatski neutralan kontinent. Kružnim gospodarenjem otpadom poboljšava se odnos prema resursima i okolišu te ostvaraju značajne gospodarske prednosti u odnosu na linearan pristup gospodarenja otpadom. U ovom radu opisani su i kvantificirani gospodarski i ekološki potencijali kružnog gospodarenja otpadom. Kružno gospodarenje otpadom se temelji na postupcima recikliranja i kompostiranja čime se smanjuju emisije stakleničkih plinova, čuvaju materijalni resursi i štedi energija pri proizvodnji novih proizvoda. Uvodni dio rada pojašnjava probleme linearnog gospodarenja otpadom te objašnjava razloge važnosti prelaska na kružno gospodarenje otpadom. Nakon toga, predstavljeni su načini postupanja s otpadom te su objašnjeni ekološki i gospodarski potencijali u svakom od načina postupanja. Nadalje, napravljen je proračun gospodarskih i ekoloških potencijala transformacije postojećeg sustava gospodarenja grada Zagreba u smjeru kružnog gospodarenja otpadom. Proračunom je pokazano da se kružnim gospodarenjem nešto više od 172 tisuće tona otpada godišnje, koji se sada odlaže, može ostvariti smanjenje emisija stakleničkih plinova od 132 tisuće tona CO<sub>2eq</sub>, uz uštede energije od čak 3634 TJ energije, uglavnom iz proizvodnih procesa. Usporedbe radi, transformacija sadašnjeg sustava u smjeru energetske oporabe preko goriva iz otpada povećava se sadašnja emisija za oko 40 tisuće tona CO<sub>2eq</sub>, a ostvaruje se energetski dobitak od 255 TJ energije, odnosno 14 puta manje. To znači da se recikliranjem u odnosu na spaljivanje, osim očuvanja materije, višestruko bolje čuva i sama energija. Što se toka materije tiče, kružno gospodarstvo generira kompost i niz sekundarnih sirovina, pozitivnih ekonomskih vrijednosti, dok energetska uporaba zahtjeva s jedne strane dodatne materijale za obradu dimnih plinova (amonij, vapno, cement, aktivni ugljen), a s druge stvara plinovite (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, čestice, teški metali, razna zagađivala) te krute produkte izgaranja (pepeo, šljaka, neizgoreno, solidifikat, zasićeni aktivni ugljen) koje treba naknadno zbrinuti uz novi trošak.

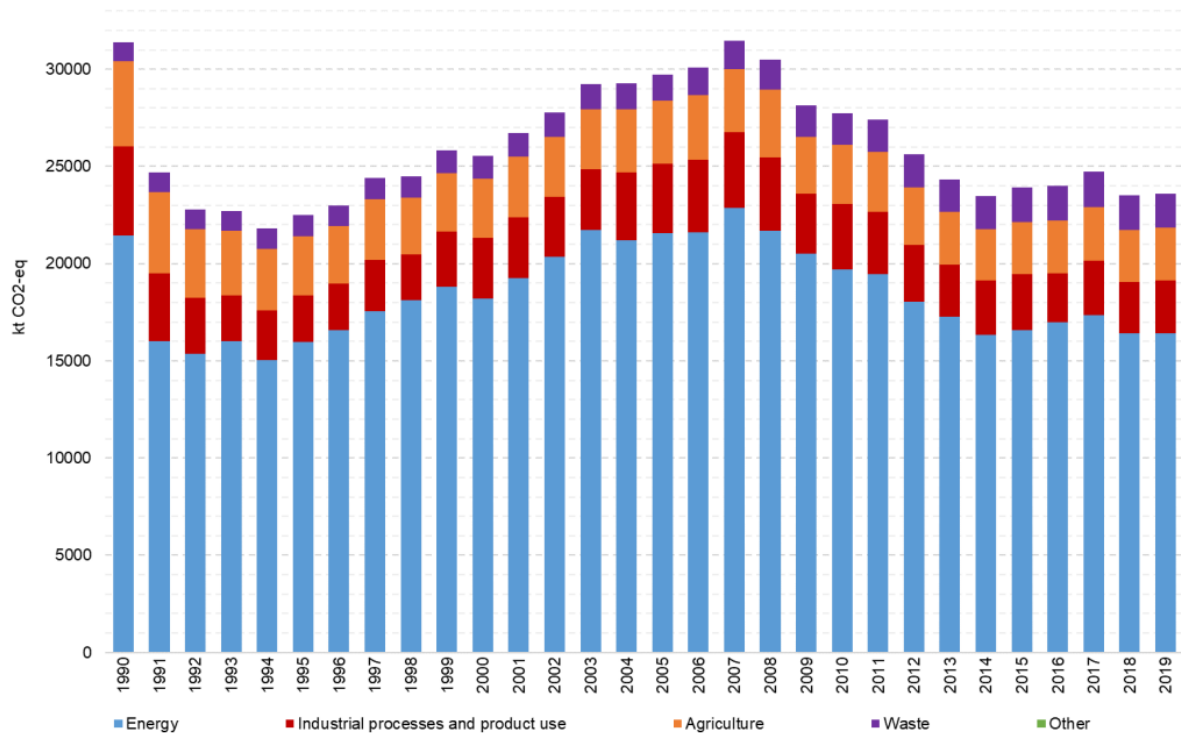
## **SUMMARY**

Circular waste management is an important part of the European green deal, which aims to make Europe the first climate-neutral continent. Implementation of circular waste management improves resource efficiency, establishes environmental benefits and achieves significant economic advantages compared to a linear approach to waste management. Within this work, the economic and ecological potentials of circular waste management are described and quantified. Circular waste management is based on recycling and composting procedures, which reduce greenhouse gas emissions, preserve material resources and save energy in the production of new products. The introductory part of the paper clarifies the problems of linear waste management and explains the reasons for the importance of switching to circular waste management. After that, different methods of dealing with waste are presented and the ecological and economic potentials of each of the methods are explained. Furthermore, the calculation of the economic and ecological potential of the transformation of the existing management system of the city of Zagreb in the direction of circular waste management was made. The calculation showed that the circular management of slightly more than 172 thousand tons of waste yearly that is now disposed of can achieve a reduction in greenhouse gas emissions of 132 thousand tons of CO<sub>2eq</sub>, with energy savings of as much as 3634 TJ of energy, mainly from production processes. For comparison, the transformation of the current system in the direction of energy recovery through RDF increases the current emission by about 40 thousand tons of CO<sub>2eq</sub>, and an energy gain of 255 TJ of energy or 14 times less is realized. This means that by recycling compared to incineration, in addition to preserving matter, the energy itself is conserved many times better. As far as the flow of materials is concerned, the circular economy generates compost and a number of secondary raw materials of positive economic value, while energy recovery requires, on the one hand, additional materials for the processing of flue gases (ammonium, lime, cement, activated carbon), and on the other hand, it creates gases (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, particles, heavy metals, various pollutants) and solid products of combustion (ash, slag, unburnt, solidification product, saturated activated carbon) for further disposal at new cost.

## 1. UVOD

U svrhu postizanja održivosti gospodarstva Europske unije, Europska komisija je 2019. godine predstavila Europski zeleni plan [1]. Europski zeleni plan predstavlja niz strategija kojima se postiže učinkovita uporaba resursa, čuva bioraznolikost, smanjuju zagađenja i usporavaju klimatske promjene [2]. Krajnji cilj Europskog zelenog plana je pretvoriti Europu u prvi klimatski neutralan kontinent [3]. Gospodarenje otpadom na ekološki prihvatljiv način predstavlja jedan od glavnih elemenata za ostvarivanje ciljeva Europskog zelenog plana [4].

Sektor gospodarenja otpadom u Hrvatskoj, uz dosadašnju praksu postupanja s otpadom, je peti najveći sektor po emisijama stakleničkih plinova s uobičajenim udjelom od 5 do 10% [5]. Slika 1 prikazuje pregled promjene strukture i intenziteta emisija stakleničkih plinova u razdoblju od 1990. do 2019. godine [5].



**Slika 1.** Struktura emisija stakleničkih plinova u RH od 1990. do 2019. godine [5]

Glavni izvor emisija stakleničkih plinova u sektoru gospodarenja otpadom predstavljaju emisije metana ( $\text{CH}_4$ ) koje nastaju razgradnjom biorazgradivog otpada pri uvjetima na odlagalištu [6]. Emisije stakleničkih plinova nastaju i pri spaljivanju tekstila i plastike, odnosno otpada koji sadrži ugljik fosilnog podrijetla [6]. Emisije prilikom spaljivanja uključuju ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) i dušikov oksidul ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [7]. Osim navedenih izvora, staklenički plinovi nastaju i potrošnjom fosilnih goriva u procesima sakupljanja, transporta i procesiranja otpada [8].

U svrhu sprječavanja nastanka emisija stakleničkih plinova, Europska unija uspostavila je sustav trgovanja emisijama stakleničkih plinova (EU ETS) [9]. Sustavom trgovanja se postavlja ograničenje na emisije stakleničkih plinova te emisije stakleničkih plinova, izražene kao ekvivalent ugljikova dioksida, postaju burzovna roba čija cijena ovisi o odnosima ponude i potražnje na tržištu [9]. Članice sustava trgovanja emisijama stakleničkih plinova koje raspolažu viškovima (zbog ulaganja u bolje tehnologije ili promjenom određenih praksi) mogu prodati višak članicama koje su premašile dodijeljene kvote [9]. Pregled novčane vrijednosti emisijske jedinice kroz 2021. i 2022. godinu prikazuje slika 2 te je vidljivo da se za jednu tonu CO<sub>2eq</sub> trgovalo po cijeni do čak 98 eura [10]. Iako emisije iz sektora gospodarenja otpadom još nisu u sustavu trgovanja emisijskim jedinicama, može ih se promatrati u tom kontekstu jer se kroz Europski zeleni plan predlaže obveza smanjenja antropogenih emisija od 55% do 2030., što je povećanje obveze u odnosu na prijašnjih 40% redukcije [7]. U vidu navedenog, smanjenje emisija stakleničkih plinova u sektoru gospodarenja otpadom može se gledati kao gospodarski i ekološki dobitak.



**Slika 2. Pregled novčane vrijednosti emisijske jedinice kroz 2021. i 2022. godinu [10]**

Važno je napomenuti da je sektor gospodarenja otpadom jedan od rijetkih komunalnih sektora kod kojeg se ispravnim pristupom može iz zone značajnih emisija prijeći u zonu ponora stakleničkih plinova. Do ponora stakleničkih plinova može se doći procesom recikliranja, uslijed čega se skraćuje proizvodni ciklus što uvijek za posljedicu ima uštedu potrošnje energije i kemikalija, a time i emisija stakleničkih plinova [7]. Do emisijskog ponora dolazi i prilikom izdvajanja ugljika iz ugljikovog kružnog ciklusa uslijed postupaka kompostiranja jer se ugljik navedenim postupkom vraća u tlo[8].

Osim smanjenja emisija stakleničkih plinova, pravilan pristup postupanja s otpadom dovodi i to energetske i materijske uštede. Kao što je već spomenuto, recikliranje ima za posljedicu skraćivanja proizvodnih ciklusa čime se manje energije potroši u proizvodnji. Recikliranjem

materije se također izbjegava ekstrakcija sirovine čime se smanjuje uporaba prirodnih resursa [8].

Republika Hrvatska, kao članica Europske unije, dužna je uskladiti zakonodavni okvir u sektoru gospodarenja otpadom sa zahtjevima i standardima Europske unije. Republika Hrvatska je u siječnju 2017. donijela Plan gospodarenja otpadom za razdoblje od 2017. do 2022. godine s nizom mjera za ispunjavanje obveza sukladno direktivama Europske unije [11]. U svrhu unapređenja sustava gospodarenja komunalnim otpadom definirani su sljedeći ciljevi [12]:

- smanjiti ukupnu količinu proizvedenog komunalnog otpada za 5% u odnosu na 2015. godinu
- odvojeno prikupiti 60% mase proizvedenog komunalnog otpada
- odvojeno prikupiti 40% mase proizvedenog biootpada koji je sastavni dio komunalnog otpada
- odložiti na odlagališta manje od 25% mase proizvedenog komunalnog otpada

Količina ukupno nastalog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj u 2015. godini iznosila je 1.653.919 tona, a 2021. godine 1.766.560 tona [13]. Udio odvojeno prikupljenog komunalnog otpada u 2021. godini iznosio je 43% [13]. Ukupno je u 2021. godini nastalo 494.583 tona biootpada iz komunalnog otpada od čega je 25% odvojeno sakupljeno [13]. Udio odloženog komunalnog otpada u 2021. godini iznosio je 58% [13]. Prema navedenim podacima, Republika Hrvatska nije uspjela ispuniti ciljeve za unapređenje sustava gospodarenja komunalnim otpadom te su potrebni značajni pomaci kako bi se ispunili postavljeni ciljevi.

Cilj ovog rada je pokazati i kvantificirati ekološke i gospodarske potencijale prelaska na kružni način gospodarenja otpadom. U prvom poglavlju rada opisani su načini postupanja s otpadom te je dan pregled energetske i emisijske izvora i ponora uslijed različitih procesa postupanja. U drugom poglavlju napravljen je proračun emisija i ušteda energije koji bi se postigli različitim načinima postupanja s odloženim otpadom na odlagalištu Prudinec – Jakuševac u 2020. godini. U trećem poglavlju napravljena je usporedba različitih načina gospodarenja s otpadom.

## 2. NAČINI POSTUPANJA S OTPADOM

Direktivom Europske komisije o otpadu definiran je hijerarhijski slijed postupanja s otpadom koji pokazuje red prvenstva u načinima postupanja s otpadom [14]. Zakon o održivom gospodarenju otpadom slijedi preporuke komisije te definira načine postupanja s otpadom na sljedeći način [15]:

1. sprječavanje nastanka otpada
2. ponovna upotreba
3. recikliranje
4. energetska uporaba
5. odlaganje otpada.

U sljedećim potpoglavljima opisani su navedeni načini postupanja s otpadom s gospodarskog i ekološkog aspekta. Recikliranje, energetska uporaba i odlaganje otpada predstavljaju procese koji se odvijaju nakon nastanka otpada, stoga je u ovom radu poseban naglasak stavljen na njih.

### 2.1. Sprječavanje nastanka otpada

Europska unija prepoznaje sprječavanje nastanka otpada kao jedan od glavnih koraka za poboljšanje resursne učinkovitosti i prelazak na kružnu ekonomiju [16]. Sprječavanjem nastanka otpada smanjuje se potrošnja energije te izbjegavaju emisije stakleničkih plinova [17]. Redizajn proizvoda u svrhu smanjivanja upotrebe materijala i produženja životnog vijeka proizvoda, održavanje i popravak proizvoda, posuđivanje i iznajmljivanje proizvoda samo su neki od postupaka sprječavanja nastanka otpada [17]. Veliki potencijal za sprječavanje nastanka otpada nalazi se u sprječavanju i smanjenju otpada od hrane [18]. Cijeli proces opskrbe hranom od proizvodnje, prerade, distribucije, skladištenja i potrošnje obilježen je bacanjem hrane [18]. Sprječavanje otpada od hrane jedno je od prioritetnih područja prepoznato od Europske komisije za prelazak na kružnu ekonomiju [18]. Republika Hrvatska je u lipnju 2019. godine usvojila prvi nacionalni cjeloviti i planski dokument za sprječavanje i smanjenje nastajanja otpada od hrane [18].

### 2.2. Ponovna upotreba

*„Ponovna uporaba je svaki postupak kojim se omogućava ponovno korištenje proizvoda ili dijelova proizvoda koji svome izvornom vlasniku više nisu potrebni kako nebi postali otpad, a koriste se u istu svrhu za koju su izvorno načinjeni“* [19]. Pri ponovnoj upotrebi izbjegavaju se emisije stakleničkih plinova i energija povezane uz proces proizvodnje. Ponovna uporaba može se provoditi individualno, ali i kroz centre za ponovnu uporabu koji otvaraju mogućnost



otvaranja novih radnih mjesta. Odjeća, obuća, papir, elektronički uređaji, namještaj ili staklene boce sve su proizvodi koji su pogodni za ponovnu uporabu. Tablica 1 prikazuje učinke ponovne uporabe na emisije CO<sub>2</sub> uslijed ponovne uporabe pojedinih proizvoda [19].

**Tablica 1. Izbjegnute emisije uslijed ponovne uporabe proizvoda [19]**

Opis aktivnosti	Učinak na emisije CO <sub>2</sub> [kg CO <sub>2eq</sub> ]
Ponovna uporaba perilice za rublje	-500
Ponovna uporaba televizora	-8000
Ponovna uporaba kauča	-1450
Ponovna uporaba uredskih stolaca	-3000

### 2.3. Recikliranje

Prema zakonu o gospodarenju otpadom recikliranje je „je svaki postupak uporabe, uključujući ponovnu preradu organskog materijala, kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu osim uporabe otpada u energetske svrhe, odnosno prerade u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za nasipavanje“ [12].

Proces recikliranja se u pravilu odvija na sljedeći načina [8]:

- prikupljanje odvojenih materijala te transport do sortirnica
- priprema za recikliranje
- proizvodnja istog ili srodnog proizvoda.

Recikliranjem se pojedine otpadne tvari vraćaju u sustav proizvodnje kao sekundarna sirovina te se pri tome smanjuje specifični utrošak energije, smanjuju emisije stakleničkih plinova i čuvaju neobnovljivi resursi [2]. Uštede energije i smanjenje emisija uslijed recikliranja ovisi o vrsti i kvaliteti recikliranog materijala [8]. Miješanjem nekompatibilnih materijala dolazi do degradacije materijskih svojstava, stoga je pravilno odvajanje otpada ključan korak kako bi se postigao uspješan proces recikliranja [7].

Emisije stakleničkih plinova uslijed procesa recikliranja nastaju u procesu sakupljanja i prijevoza te pri potrošnji energije u sortirnicama [8]. Navedena dva koraka u procesu recikliranja smatraju se emisijskim izvorima. Proizvodnjom proizvoda iz recikliranog materijala izbjegavaju se emisije uslijed ekstrakcije i prijevoza sirovine, stoga se emisije stakleničkih plinova uslijed ovih procesa smatraju emisijskim ponorom. Emisijski izvori u procesu recikliranja nastaju pri prijevozu recikliranog materijala te pri korištenju energije u

postrojenjima za materijalnu obnovu [8]. U pravilu se uzima da se za tonu obrađenog materijala u sortirnicama potroši 25 kWh energije [8]. Osim što se izbjegavaju štetne emisije stakleničkih plinova, recikliranjem se izbjegava korištenje sirove materije te time postiže resursna učinkovitost.

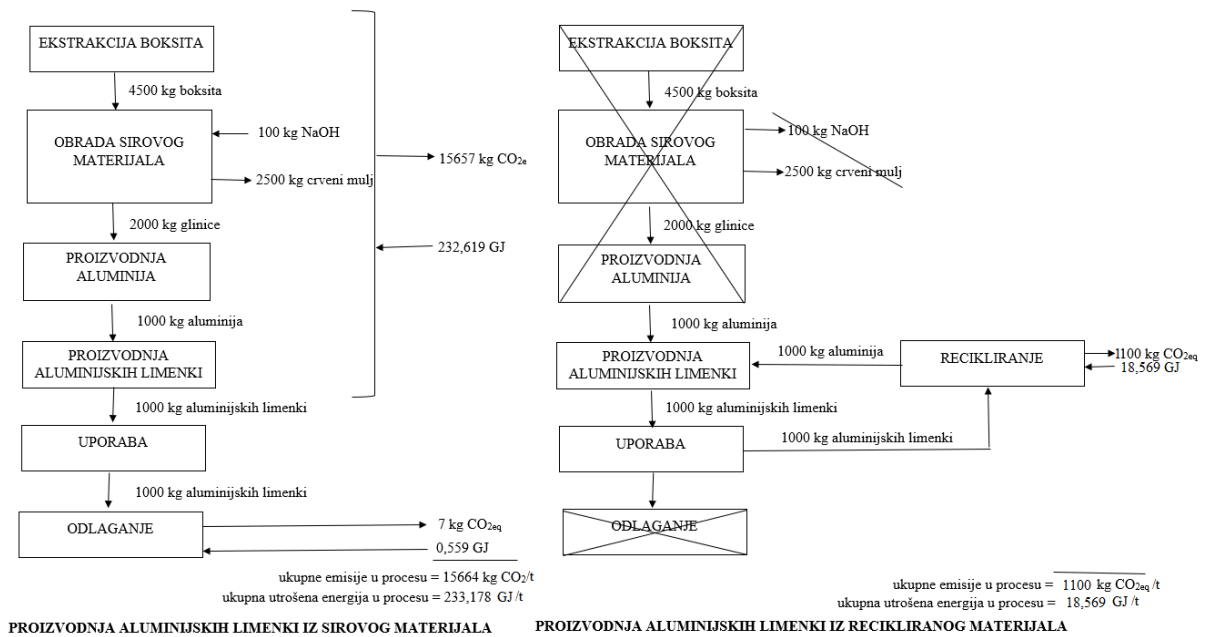
Pored nespornih pozitivnih učinaka na okoliš, recikliranjem otpada iskorištava se potencijalna energija otpada. U procesu recikliranja izbjegava se proces ekstrakcije, prerade i prijevoza sirovine, stoga se pri proračunu može uzeti da je navedena energija uštedena odnosno staviti joj negativan predznak [20]. U pravilu se najveće uštede ostvaraju recikliranjem metala [20].

Energetske uštede i smanjenje emisija koje se ostvare procesom recikliranja razlikuju se ovisno o dostupnosti sirovine, procesu proizvodnje, načinu prikupljanja recikliranog materijala i svojstvima materijala. Iz navedenih razloga, različiti izvori navode različite iznose ušteda. Ipak, nepobitna je činjenica da svako recikliranje otklanja potrebu za sirovinom što uvijek za posljedicu ima uštedu potrošnje energije i kemikalija te posljedično smanjenje emisija [8]. U svrhu smanjenja varijacija pri analizama podataka, glavni izvor podataka pri izradi modela ušteda energije i smanjenja emisija su izvješće Europskoj komisiji „Waste Management Options and Climate Change“ i izvješće Agencije za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Država „Solid Waste Management and Greenhouse Gases“ [8], [20].

U sljedećih nekoliko potpoglavlja bit će analizirane energetske, emisijske i materijske uštede koje se postižu recikliranjem pojedinih vrsta materijala.

### **2.3.1. Proizvodnja aluminija iz recikliranog materijala**

Slika 3 prikazuje usporedbu proizvodnje aluminija iz sirovog materijala i iz recikliranog materijala. Iznosi materije u procesu uzeti su iz [7]. Iznosi emisija i energija uslijed procesa recikliranja i procesa izrade aluminija iz sirovog materijala uzeti su iz [20]. Emisije uslijed transporta na odlagalište uzete su iz [8].

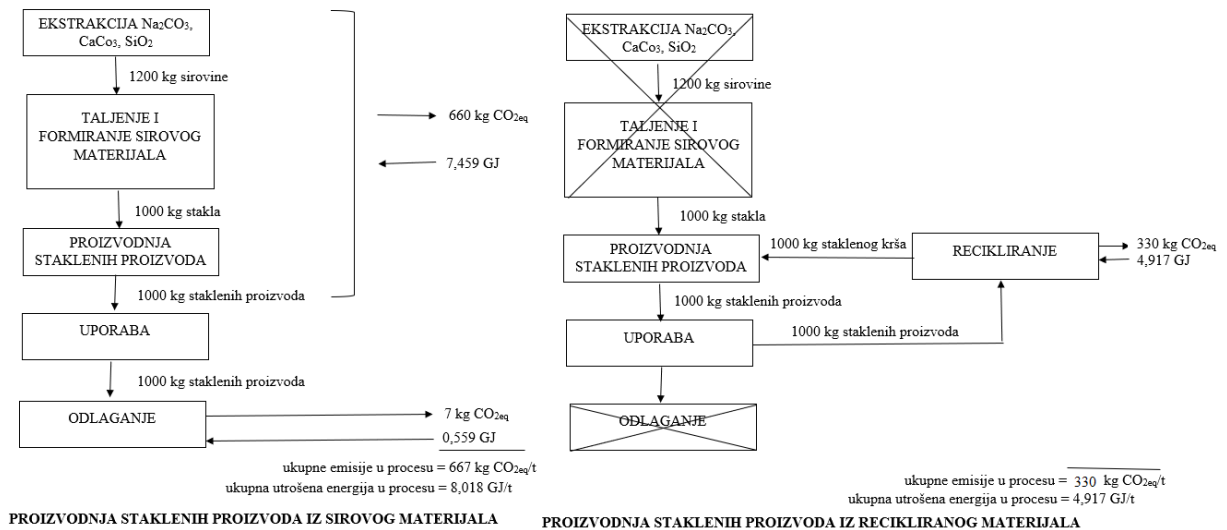


**Slika 3. Proizvodnja aluminija iz sirovog i recikliranog materijala**

Proizvodnjom aluminija iz recikliranog materijala ostvaraju se znatne emisijske i energetske uštede. Pri proračunu emisija i energije uslijed recikliranja, izbjegavanje ekstrakcije, prerade i transporta sirovine smatra se emisijskim ponorom i energetske izvori. Potrošena energija i ispuštene emisije uslijed recikliranja smatraju se emisijskim izvorom. Stoga, ukupne emisije pri recikliranju aluminija iznose -14564 kg CO<sub>2</sub>eq po toni otpada, a dolazi do ukupnih energetske ušteda u iznosu od 214,6 GJ. Osim štetnih utjecaja na okoliš uslijed stvaranja stakleničkih plinova, proizvodnjom aluminija iz sirovog materijala stvara se velika količina crvenog mulja. Odlaganje velikih količina crvenog mulja donosi opasnost od onečišćenja tla i onečišćenja podzemnih voda [21]. Trošak zbrinjavanja crvenog mulja je visok, a zbrinjavanjem se zauzima veliki prostor [21]. U procesu proizvodnje sirovog aluminija nastaje između dvije do dvije i pol tone crvenog mulja [7].

### 2.3.2. Proizvodnja stakla iz recikliranog materijala

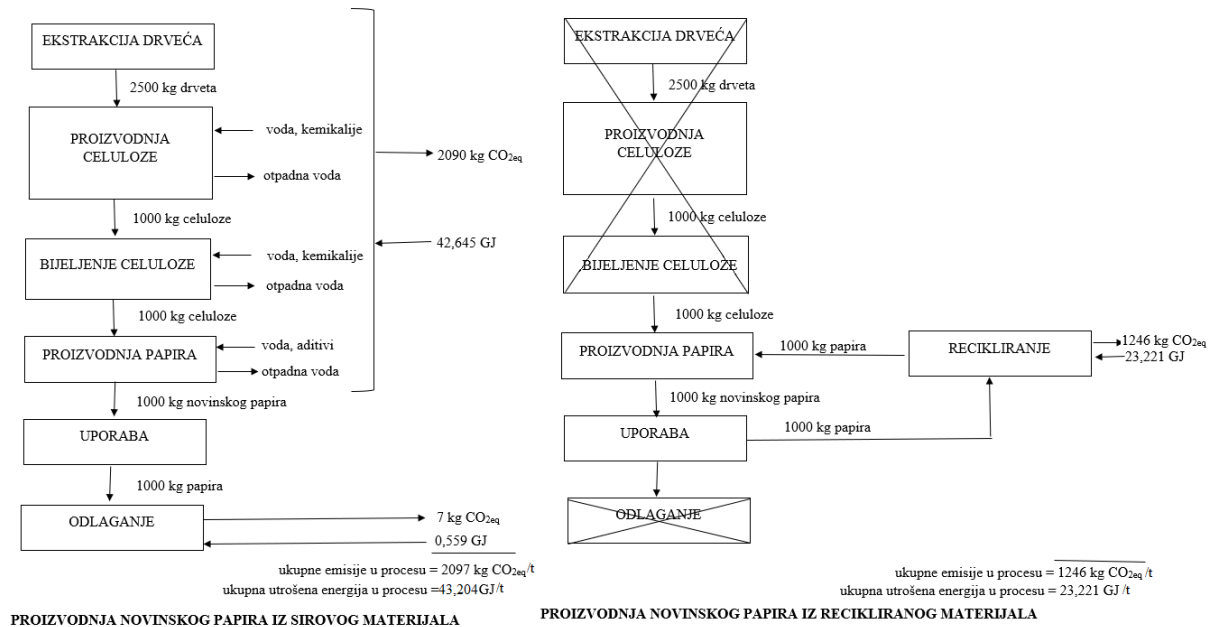
Slika 4 prikazuje usporedbu proizvodnje staklenih proizvoda iz sirovog i iz recikliranog materijala. Podaci za izradu dijagrama uzeti su iz [7], [20]. Recikliranjem stakla dolazi do emisijskog ponora u iznosu od -330 kg CO<sub>2</sub>eq po toni stakla, te ušteda energije u iznosu od 31,1 GJ. Staklo je jedan od najpogodnijih materijala za recikliranje jer se može nebrojeno puta pretaliti i ponovno upotrijebiti, a da pritom ne gubi na kvaliteti [22]. Osim energetske i emisijske koristi, recikliranjem stakla se smanjuje količina odloženog komunalnog otpada te smanjuje potrošnja primarnih sirovina [22].



**Slika 4. Proizvodnja stakla iz sirovog i recikliranog materijala**

### 2.3.3. Proizvodnja novinskog papira iz recikliranog materijala

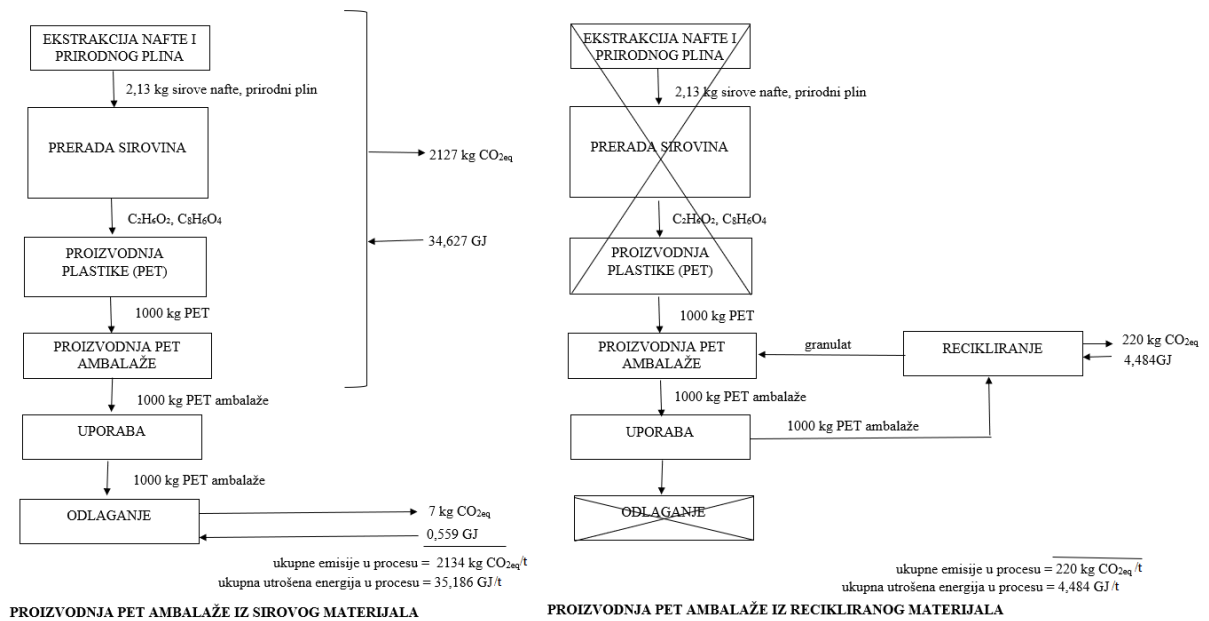
Slika 5 prikazuje usporedbu proizvodnje novinskog papira iz sirovog materijala i iz recikliranog materijala. Uštede pri recikliranju papira razlikuju se ovisno o postupku proizvodnje papira i svojstvima papira kojeg se želi proizvesti. Proces proizvodnje papira iz sirovog materijala prilagođen je iz [23]. Količine potrebne sirovine za proizvodnju uzete su iz [24]. Pri proizvodnji papira iz recikliranog materijala izbjegnu se emisije u iznosu od 851 kg  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  po toni proizvedenog papira i uštedi se energija u iznosu od 19,083 GJ po toni proizvedenog papira [20]. Industrija celuloze i papira smatra se jednim od najvećih korisnika prirodnih resursa i energije te godišnje u okoliš ispušta oko 100 milijuna tona različitih toksičnih spojeva [23]. Veliki ekološki problem kod proizvodnje papira predstavlja potrošnja sirove vode koja ovisno o tehnologiji iznosi od 30 do 70  $\text{m}^3$  po toni papira proizvedenog iz drveta te 8 do 10  $\text{m}^3$  po toni papira proizvedenog iz recikliranog materijala [23]. Količina otpadne vode pri proizvodnji iz sirovog materijala iznosi od 20 do 40  $\text{m}^3$  po toni proizvedenog papira [23]. Osim štetnih utjecaja otpadnih voda i potrošnje velikih količina energije, proizvodnjom papira iz sirovog materijala dolazi do krčenja šuma uslijed čega dolazi do gubitka bioraznolikosti i pojačavanja efekta staklenika [20].



**Slika 5. Proizvodnja novinskog papira iz sirovog i recikliranog materijala**

### 2.3.4. Proizvodnja PET ambalaže iz recikliranog materijala

Slika 6 prikazuje usporedbu proizvodnje PET ambalaže iz sirovog materijala i iz recikliranog materijala. Proces proizvodnje PET ambalaže prilagođen je iz [25], iznos sirovine nafte potrebne za proizvodnju PET ambalaže uzet je iz [26], a energetske i emisijske uštede uzete su iz [20]. Proizvodnja plastike iz godine u godinu je u porastu te je u 2021. godini proizveden 390 milijuna tona plastike [27]. Odbačena plastika u prirodi ne ulazi u ugljikov ciklus već se fragmentira u sitne čestice iste plastike [7]. Trenutačni način postupanja s plastikom negativno utječe na ekosustave, bioraznolikost, a potencijalno i na ljudsko zdravlje [28]. Europska komisija u svom planu za prelazak na kružnu ekonomiju ističe recikliranje, uz ponovnu uporabu i sprječavanje nastanka, kao jedno od rješenja za globalan problem plastike [29]. Pravilnim odvajanjem i recikliranjem PET ambalaže, zahvaljujući znatno kraćem proizvodnom procesu, mogu se ostvariti energetske uštede od 40,7 GJ po toni novoproducenog PET-a i izbjeći emisije od 1914 kg CO<sub>2eq</sub> po toni otpada [20]. Recikliranjem plastike se također izbjegava ekstrakcija prirodnog plina i nafte te izbjegavaju štetni utjecaji odlaganja plastike.



**Slika 6. Proizvodnja PET ambalaže iz sirovog materijala i recikliranog materijala**

Iznosi energetske uštede i smanjenja emisija uslijed recikliranja otpada u odnosu na odlaganje prikazuje tablica 2 [20]. Negativan predznak označava da se iznos energije izbjegao, dok pozitivan predznak označava da je potrebno uložiti energiju za navedeni način postupanja.

**Tablica 2. Energetske uštede i izbjegnute emisije uslijed recikliranja[20]**

Vrsta materijala	Energetske uštede [GJ/t]	Izbjegnute emisije [kg CO <sub>2eq</sub> /t]
Aluminij	-214,6	-14564
Tekstil	-111,393	-71867
Bakar	-87,696	-4950
LDPE	-59,094	-1687
HDPE	-53,702	-1393
Staklo	-31,1	-330
Papir	-21	-851
Karton	-16,269	-3117

### 2.3.5. Materijske uštede uslijed recikliranja

Osim značajnih učinaka po pitanju utroška energije i emisije stakleničkih plinova, važno je ukazati na činjenicu da se recikliranjem izbjegava potreba za sirovinom pri proizvodnji novog proizvoda, odnosno da odvojeno prikupljeni i pripremljeni otpad materijski završava u recikliranom proizvodu. Iznosi ušteta u tonama sirovine po toni otpadnog materijala prikazuje tablica 3 [7]. Primjerice, za proizvodnju tone stakla potrebno je oko 1200 kg kalcita, vapnenca i kvarcnog pijeska [7]. Recikliranjem 1000 kg staklenog otpada dobiva se 1000 kg staklenih proizvoda [7]. Iz toga razloga može se zaključiti da recikliranjem jedne tone staklenog otpada dolazi do ušteta od 1,2 tone sirovine po toni otpadnog materijala [7].

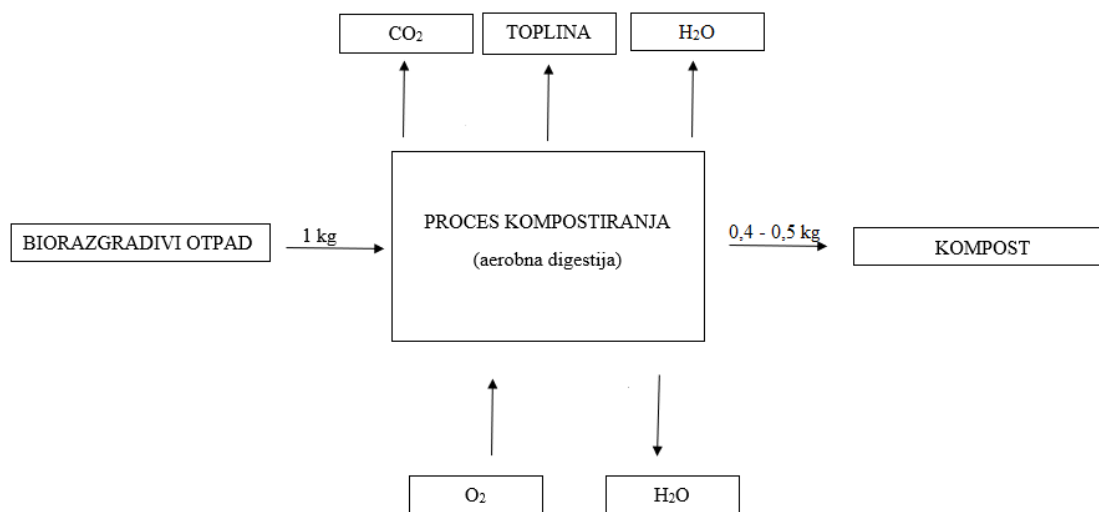
**Tablica 3. Maseni tokovi kod recikliranja [7]**

Vrsta materijala	Uštede sirovine u tonama po toni otpadnog materijala	Tona novog proizvoda iz tone recikliranog materijala
Staklo	1,2	1
Aluminij	4,2-5	1
Željezo	1,4-1,7	1
Papir/karton	1,8-2,5	0,95-0,98
Plastika	-	0,98-1

### 2.3.6. Kompostiranje

Kompostiranje je prirodni proces recikliranja pri kojem se biorazgradive tvari pri aerobnim uvjetima pretvaraju u razmjerno stabilnu organsku tvar kompost[8]. Kompostirati se mogu kuhinjski otpad, otpadna hrana, vrtni otpad, zeleni otpad od uređenja parkova i zelenih površina i komunalni mulj [8]. Kompostiranjem se izbjegavaju emisije metana koji bi nastao u uvjetima odlagališta, dobiva produkt koji poboljšava strukturu tla te smanjuje upotreba mineralnih gnojiva [30]. Kompostiranje je moguće organizirati u gradskom pogonu uz upotrebu mehanizacije ili statički u vrtovima kod korisnika [8]. Preduvjet uspješnog postupka kompostiranja je pravilno odvajanje biorazgradivog otpada [8].

Slika 6 prikazuje materijalnu bilancu postupka recikliranja. Količine produkata razlikuju se ovisno o parametrima procesa. Prema literaturi [31], u procesu kompostiranja organska masa smanjuje se za 50%.



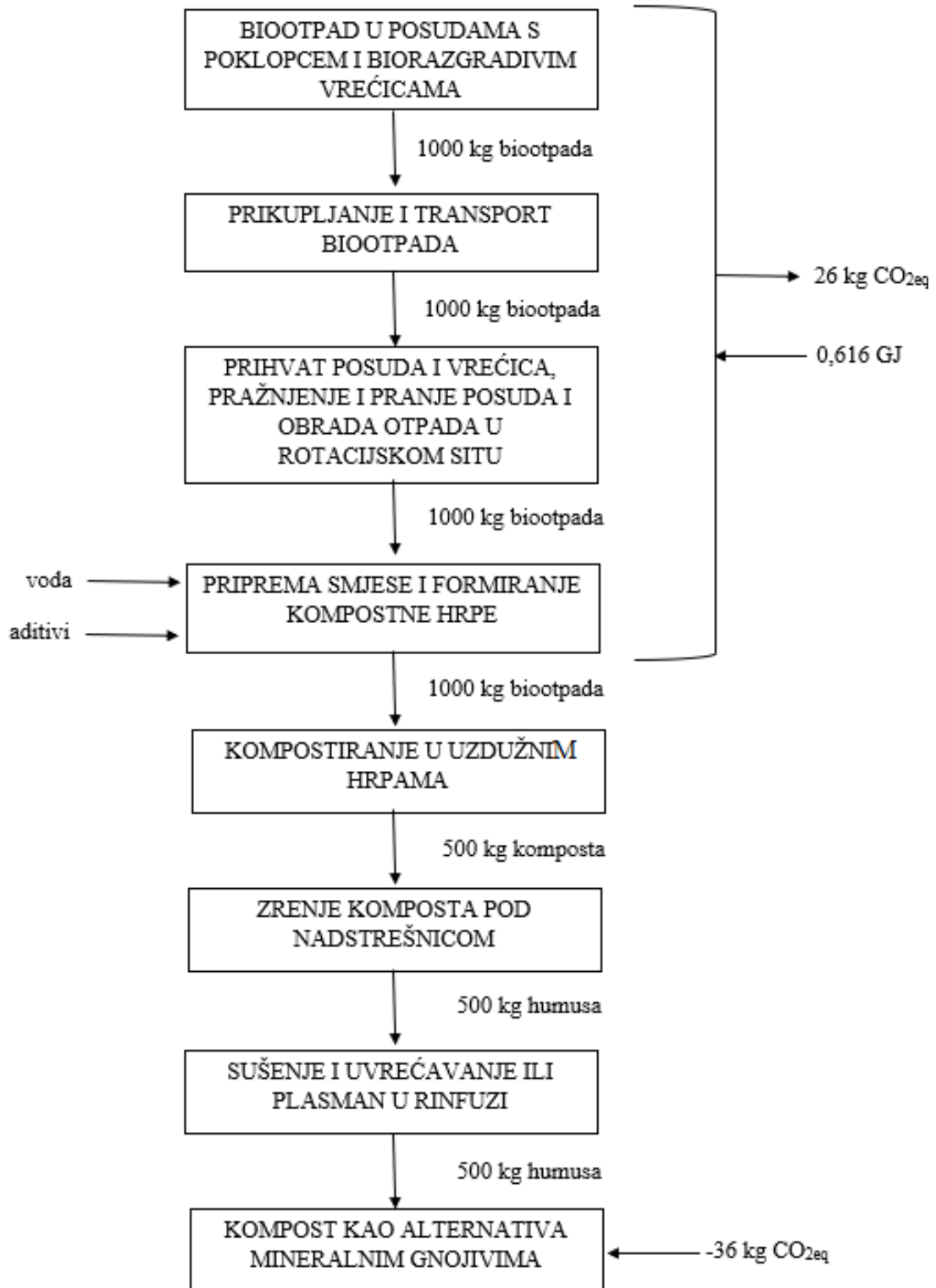
**Slika 7. Materijalna bilanca procesa kompostiranja**

Slika 8 prikazuje shemu procesa kompostiranja uz pripadajuće emisije stakleničkih plinova i energetske potrošnje. Shema procesa kompostiranja prilagođena prema literaturi [7], iznosi emisija stakleničkih plinova i pripadajuća energija uzeti su iz literature [8]. Shema se odnosi na proces koji se odvija u gradskom pogonu. Ukoliko bi se kompostiranje odvijalo u vrtovima kod korisnika, emisije stakleničkih plinova i energija potrebna za obradu otpada izostaju.

Emisijski izvor u procesu predstavlja prikupljanje i transport biootpada. Prema podacima iz literature [8], u procesu transporta dolazi do emisija u iznosu od 8 kg CO<sub>2eq</sub>. Energija koja se potroši pri transportu iznosi 383 MJ po toni obrađenog otpada [20]. Drugi izvor emisija uslijed kompostiranja su radnje vezane za obradu biootpada [8]. Za pravilan proces kompostiranja nužna je kontrola i sortiranje ulaznog materijala, usitnjavanje ulaznog materijala, prevrtanje kompostne smjese ili upuhivanje zraka radi prozračivanja, kontroliranje parametara procesa i dodavanje pripadajućih aditiva [7]. Za navedene radnje potrebno je uložiti 233 MJ energije te nastaje emisijski izvor u iznosu od 18 kg CO<sub>2eq</sub> [8], [20]. U procesu kompostiranja se oslobađa ugljikov dioksid, no on je emisijski neutralan jer bi nastao i razgradnjom biootpada u prirodi [20]. Kompost nastao u procesu može zamijeniti umjetna gnojiva koja predstavljaju proizvode visoke utjelovljene energije [8]. [8] navodi da korištenjem komposta kao zamjene za umjetna gnojiva postižu uštede od 36 kg CO<sub>2eq</sub>. Energetski izvori nisu uzeti u obzir u sklopu ovog rada zbog neistraženosti energetskih koristi zamjene mineralnih gnojiva i treseta kompostom. Osim navedenih emisijskih i energetskih izvora i ponora, korist kompostiranja proizlazi i iz izdvajanja ugljika iz ugljikovog kružnog ciklusa odnosno sekvestracije ugljika [8]. Zbog jednostavnosti analize emisijskih i energetskih ušteda prilikom sekvestracije ugljika, iste nisu uzete u obzir. Važno je napomenuti da se kompostiranjem u kućanstvima postižu još veće koristi jer ne dolazi



do potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova pri prijevozu i obradi biorazgradivog otpada.



Slika 8. Emisijski i energetske izvori i ponori uslijed procesa kompostiranja [7]

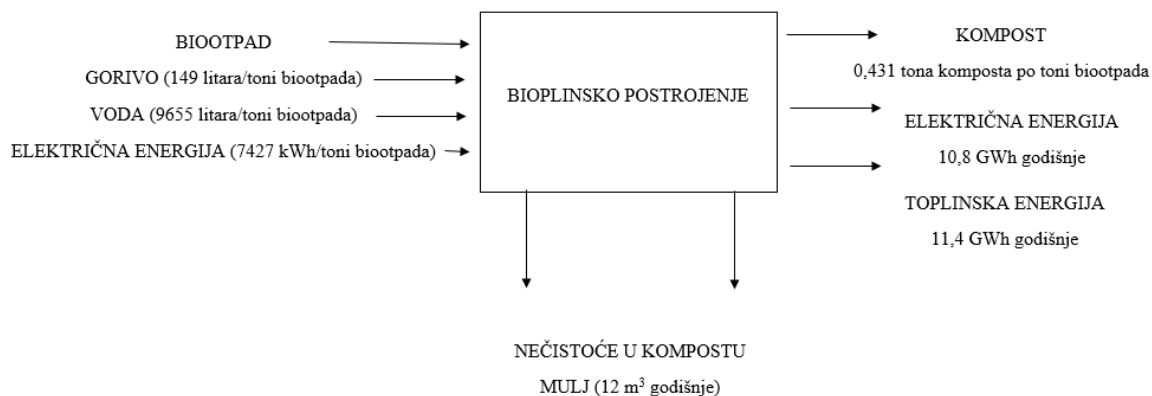
Procjenjuje se da je u 2020. godini na odlagalištima završilo 326.668 tona biootpada iz komunalnog otpada [32]. Biorazgradivi otpad u komunalnom otpadu predstavlja veliki ekološki problem jer se uslijed njegove razgradnje u uvjetima odlagališta stvaraju deponijski plinovi [8]. Zakonom o gospodarenju otpadom iz 2017. navedeno je da najveća dopuštena količina biorazgradivog komunalnog otpada koje ide odlaganje iznosi 264.661 tona [12]. U Republici Hrvatskoj je, u 2020. godini, na biološku obradu (anaerobna digestija ili kompostiranje) poslano 93.422 tone proizvedenog komunalnog otpada što iznosi 6% od ukupno nastalog komunalnog otpada [32]. Prema navedenim podacima, još se uvijek odlaže više biorazgradivog otpada nego što je to dopušteno. Kompostiranje se postavlja kao jedno od rješenja za smanjenje udjela biorazgradivog otpada u komunalnom otpadu.

Od ulaznih 1000 kg biorazgradivog otpada nastaje 400-450 kg komposta koji sadrži gotovo sve hranjive tvari (dušik, fosfor, kalij, željezo, kalcij...) ulaznih materijala [8]. Gubitak mase odnosi se na disimibilnu organsku tvar koja je razgradnjom oslobođena kao CO<sub>2</sub> i voda [8].

### **2.3.7. Anaerobna digestija**

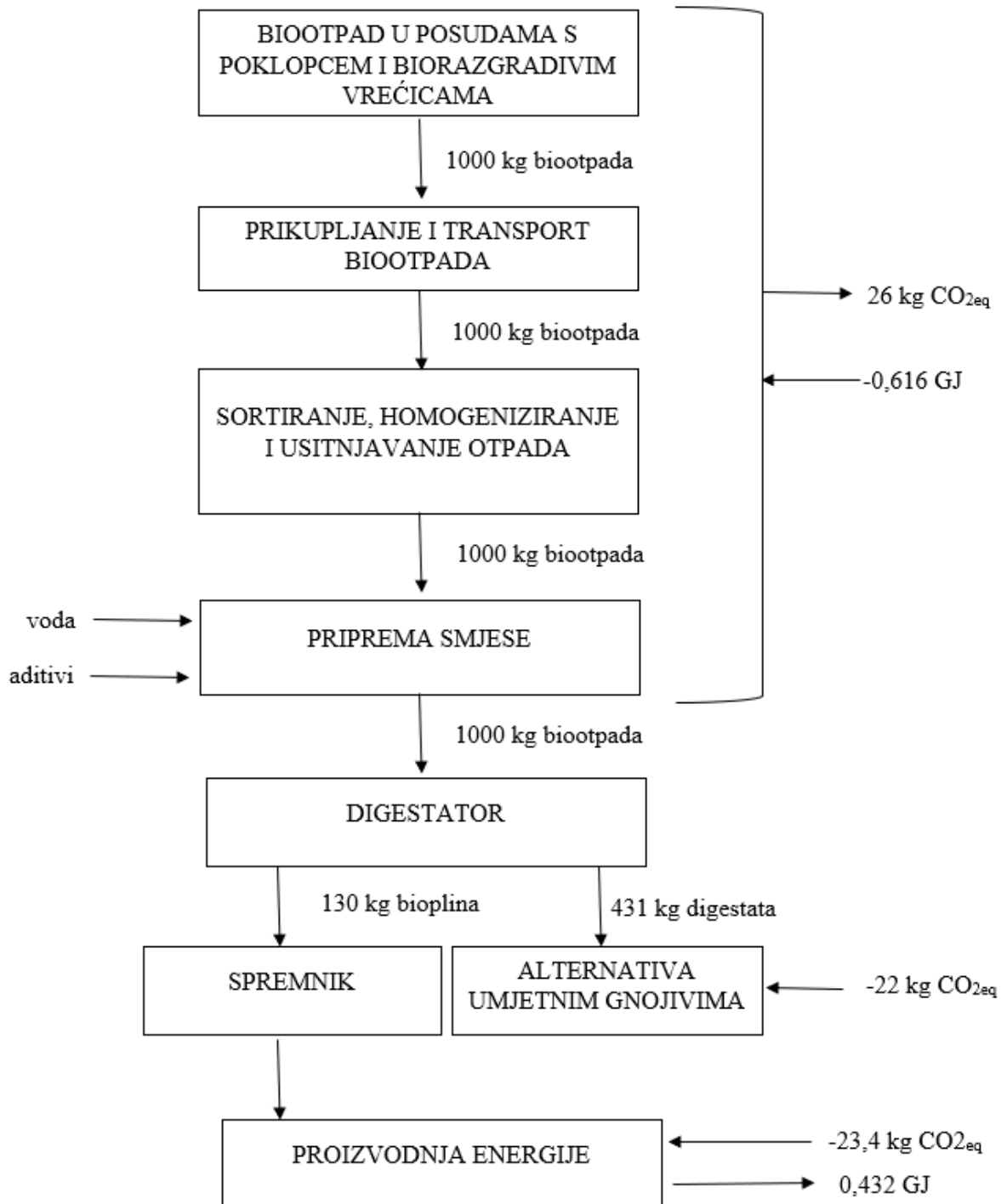
Prema pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada, anaerobna digestija definirana je kao „*tehnološki proces gospodarenja otpadom kojim se, pomoću mikroorganizama, u anaerobnim uvjetima, u bioplinskom reaktoru, obrađuje i stabilizira biološki razgradivi otpad uz stvaranje bioplina*“ [33]. Stvoreni bioplin se koristi za dobivanje toplinske i električne energije [8]. Proces anaerobne digestije pogodan je za obradu biorazgradivog otpada te je ustaljen pri zbrinjavanju mulja prilikom pročišćivanja otpadnih voda [34].

U bioplinskom postrojenju proces anaerobne digestije odvija se na sljedeći način. U postrojenje se dovozi smjesa biorazgradivog organskog materijala te se prazni na za to predviđenom dijelu postrojenja [35]. Nakon toga otpad se sortira, homogenizira i usitnjava pri čemu se odvajaju tvari koje nisu potrebne u procesu [35]. Za vrijeme procesa prati se parametri smjese kao što su udio vlage ili omjer ugljika i dušika [8]. Smjesa u reaktoru podliježe razgradnji te nastaje bioplin koji se odvodi u spremnike te konačno u kogeneracijsko postrojenje radi proizvodnje električne i toplinske energije [35]. Materijalnu bilancu bioplinskog postrojenja na području Grada Novske prikazuje slika 9 [35].



**Slika 9. Materijalna bilanca bioplinare na području Grada Novske [35]**

Pri procesu anaerobne digestije energija se troši prilikom prijevoza i obrade biorazgradivog otpada [8]. Iznosi energija i stakleničkih plinova uslijed transporta i obrade otpada isti su kao u slučaju kompostiranja. Produkti procesa su digestat (kompost) i bioplin. Digestat dobiven u procesu može se koristiti kao alternativa mineralnim gnojivima te zbog toga dolazi do emisijskog ponora u iznosu od 22 kg CO<sub>2eq</sub> [8]. Kao što je to bio slučaj pri postupku kompostiranja, energetske uštede uporabom digestata teško je kvantificirati [20]. Iskorištavanjem bioplina u procesu se dobiva električna i toplinska energija [8]. Količina nastalog bioplina i pripadajuća proizvedena električna energija uzeti su iz [8]. Pri izračunu dobivene energije pretpostavlja se stupanj iskoristivosti postrojenja za proizvodnju od 20% te emisijski koeficijent od 0,195 kg CO<sub>2eq</sub> / kWh. Kao u slučaju kompostiranja, uporabom digestata dolazi do sekvestracije ugljika uslijed čega dolazi do izbjegavanja emisija. Slika 10 prikazuje energiju koja se potroši i proizvede u procesu anaerobne digestije te pripadajuće emisije.



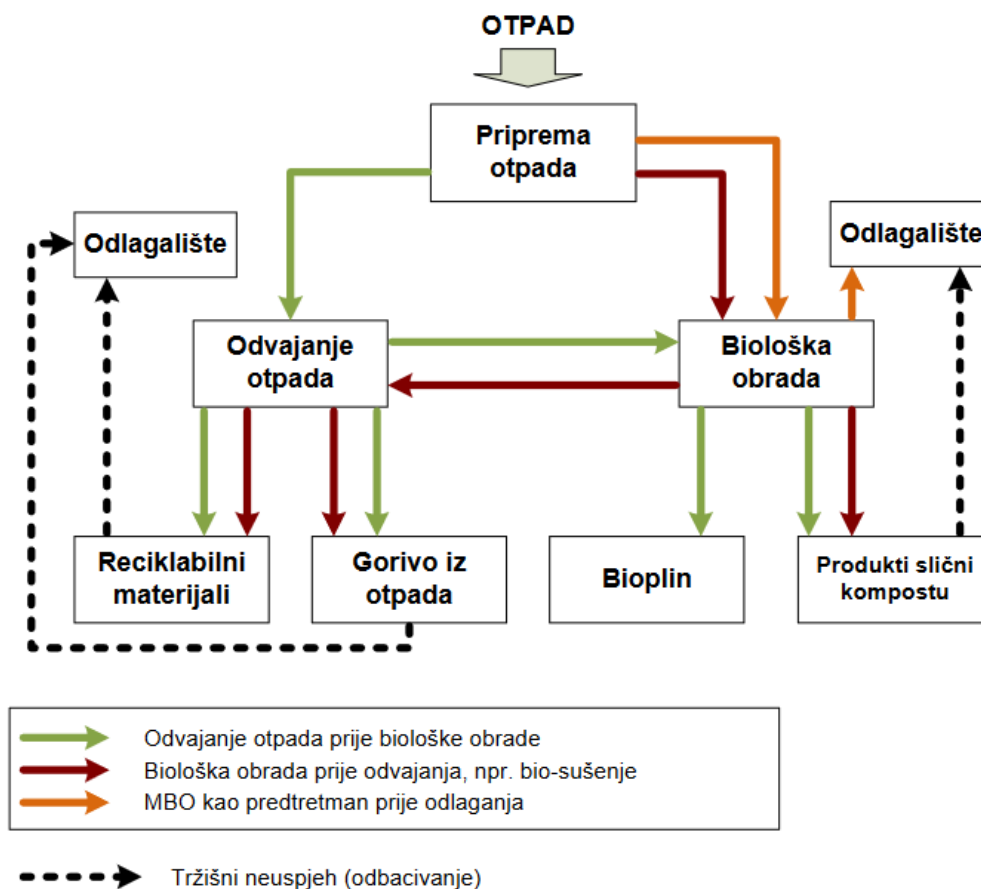
**Slika 10. Emisijski i energetske izvori i ponori uslijed procesa anaerobne digestije**

Od ulaznih 1000 kg biorazgradivog otpada nastaje oko 70 do 90 kg metana, zatim ugljični dioksida, a kruti ostatak je digestata koji obično iznosi 40-50% ulazne količine [7].

## 2.4. Mehaničko – biološka obrada

Mehaničko – biološka obrada predstavlja niz postupaka kojima se miješani otpad priprema za odlaganje [36]. Mehaničko – biološkom obradom se mehaničkim postupcima izdvajaju reciklabilne tvari, energetske vrijedne tvari te inertne tvari [8]. Biološkom obradom, biorazgradivi otpad podvrgava se procesu kompostiranja ili anaerobne pri čemu se dobiva kompost ili bioplin za proizvodnju energije [37]. Mehaničko – biološkom obradom dolazi do inertiziranja i smanjenja volumena otpada čime se izbjegavaju emisije metana na odlagalištu [8].

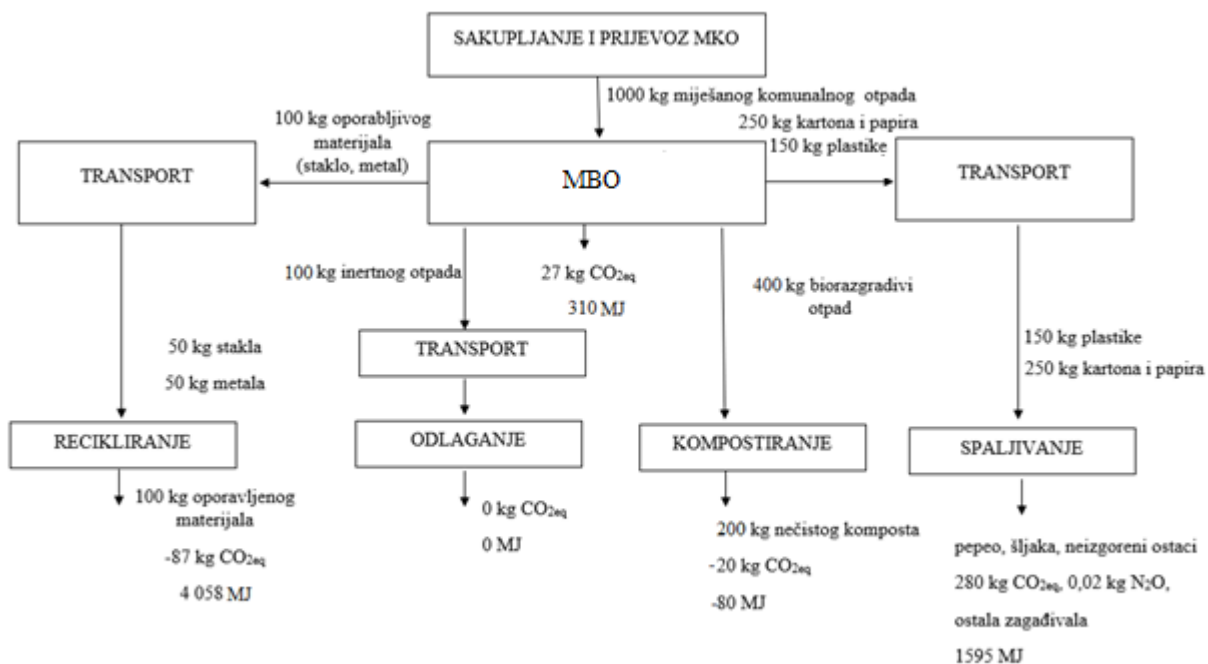
Slika 11 prikazuje uobičajen proces mehaničko – biološke obrade otpada [7]. Nakon dovoda otpada u postrojenje za mehaničko – biološku obradu, otpad je potrebno pripremiti izuzimanjem glomaznih predmeta, uklanjanjem vrećica ili usitnjavanjem otpada u komade prigodne za daljnju mehaničku ili biološku obradu [38]. Nakon prvotne pripreme, otpad se podvrgava procesima mehaničke ili biološke obrade [38]. Produkti procesa mehaničko biološke obrade su reciklabilni materijali (staklo, plastika, metali, papir), bioplin, produkti slični kompostu, gorivo iz otpada ili inertni materijali koji se odlažu na odlagalište [38].



Slika 11. Shema procesa mehaničko – biološke obrade [7]

Mehaničko – biološka obrada u pravilu se primjenjuje za iskorištavanje preostalih vrijednih svojstava te inertizaciju biorazgradive tvari u miješanom komunalnom otpadu [8]. Međutim, zbog uvjeta prikupljanja i miješanja otpada, iskoristivost za recikliranje papira, kartona i plastike uglavnom je trajno izgubljena [8].

Slika 12 prikazuje emisije stakleničkih plinova i energiju povezanu uz proces mehaničko biološke obrade. Pri procesu pripreme i sortiranja otpada utroši se 310 MJ energije te se emitiraju staklenički plinovi u iznosu od 27 kg CO<sub>2eq</sub> po toni obrađenog otpada [8]. Sastav metala i stakla u miješanom komunalnom otpadu iznosi u prosjeku 10% te se smatra da sav reciklabilan [32]. Pri recikliranju 50 kg metala i 50 kg stakla dolazi do energetske uštede u iznosu od 4058 MJ te se izbjegnu emisije u iznosu od 87 kg CO<sub>2eq</sub>. Podaci za energetske uštede proračunate su iz [20], a emisijske uštede uzete su iz [8]. Plastika i papir u miješanom komunalnom otpadu gube potencijal recikliranja te odlaze na spaljivanje pri čemu dolazi do emisija stakleničkih plinova od 280 kg CO<sub>2eq</sub> i 0,02 kg N<sub>2</sub>O[8]. Pri spaljivanju 400 kg papira i plastike, uzimajući stupanj iskoristivosti postrojenja od 20% te ogrjevnosti vrijednosti papira od 11,5 GJ/t i plastike od 31,5 GJ/t, proizvodi se 1595 MJ energije. Biorazgradivi otpad, čiji je udio oko 40%, se kompostira pri čemu se dobiva 250 kg komposta, potroši 80 MJ energije te izbjegnu emisije u iznosu od 20 kg CO<sub>2eq</sub> [8]. Ostatak otpada se odlaže. Pri odlaganju ne nastaju emisije stakleničkih plinova jer je odloženi otpad inertan. Energija se ne troši na odlaganje jer se smatra da je postrojenje za mehaničko – biološku obradu na odlagalištu otpada.



Slika 12. Emisijski i energetske izvori i ponori uslijed procesa MBO

## 2.5. Energetska uporaba

Energetska uporaba odnosi se na niz postupaka pri kojima se iz otpada dobiva energija [37]. Navedeni postupci se mogu podijeliti u tri glavne grupe konverzija otpada u energiju [37]:

- fizikalno-kemijska konverzija
- bio-kemijska konverzija
- termo-kemijska konverzija.

Pod fizikalno-kemijsku konverziju spadaju različite tehnologije pri kojima se poboljšavaju fizikalna i kemijska svojstva miješanog komunalnog otpada te se iz istog dobiva visoko kalorična goriva tvar koja se može iskoristi za proizvodnju energije [37]. Primjer takvog postupka je postupak gorivo iz otpada (RDF postupak) [37].

Pri bio-kemijskoj energetskej uporabi organski otpad se razrađuje u kontroliranim uvjetima te se iz njega dobiva energija [37]. Takvi postupci su anaerobna digestija i alkoholna fermentacija [37].

Termo-kemijskom konverzijom se smatraju postupci kojima se termičkom obradom iskorištava energija pohranjena u otpadu [37]. Prema direktivi Europske komisije o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora iz 2009. godine, energija dobivena termičkom obradom otpada ne smatra se obnovljivim izvorom energije [29]. Izgaranje, piroliza i rasplinjavanje spadaju u postupke termo-kemijske konverzije [37]. Piroliza i rasplinjavanje predstavljaju naprednije tehnologije termičke obrade otpada kod kojih iz otpada nastaje gorivi plin koji je kasnije moguće upotrijebiti kao gorivo ili kao sirovinu za proizvodnju kemikalija [37]. U ovom radu detaljnije će biti opisan postupak izgaranja odnosno spaljivanja.

### 2.5.1. Izgaranje otpada

*„Izgaranje je proces potpune termičke degradacije tvari s dovoljnom količinom kisika u svrhu potpune oksidacije goriva“* [37]. Izgaranje još uvijek predstavlja najčešću tehnologiju za termičku obradu otpada [37]. Izgaranje predstavlja nepoželjniju opciju od recikliranja iz sljedećih razloga [8], [39]:

- visoki kapitalni troškovi i operativni troškovi
- nemogućnost obrade svih materijala
- potrebna dodatna upotreba energije kako bi se neke vrste otpada obradile
- stvaranje emisija stakleničkih plinova uslijed spaljivanja otpada fosilnog podrijetla
- neovisno o vrsti otpada koji se spaljuje, dolazi do emisija brojnih zagađivala poput teških metala i dioksina

- produkti spaljivanja uključuju pepeo i negorive ostatke koji su potencijalno opasni i zahtijevaju pažljivo rukovanje i zbrinjavanje
- postojanje spalionica usporava uspostavu reciklažnih sustava.

Izgarati se može miješani komunalni otpad koji prethodno neobrađen i otpad koji je odvojen nekim od postupaka obrade. Postupcima izgaranja neobrađenog otpada dobiva se manja količina energije, a jedan od razloga je udio vlage u otpadu. Kako bi došlo do izgaranja otpada, vlaga sadržana u otpadu mora ispariti [40]. Drugi važni čimbenici koji utječu na kvalitetu i mogućnost spaljivanja su udio vlage u otpadu, ogrjevna vrijednost otpada, radioaktivnost otpada te udio klorida, sulfida i anorganskih soli u otpadu [39].

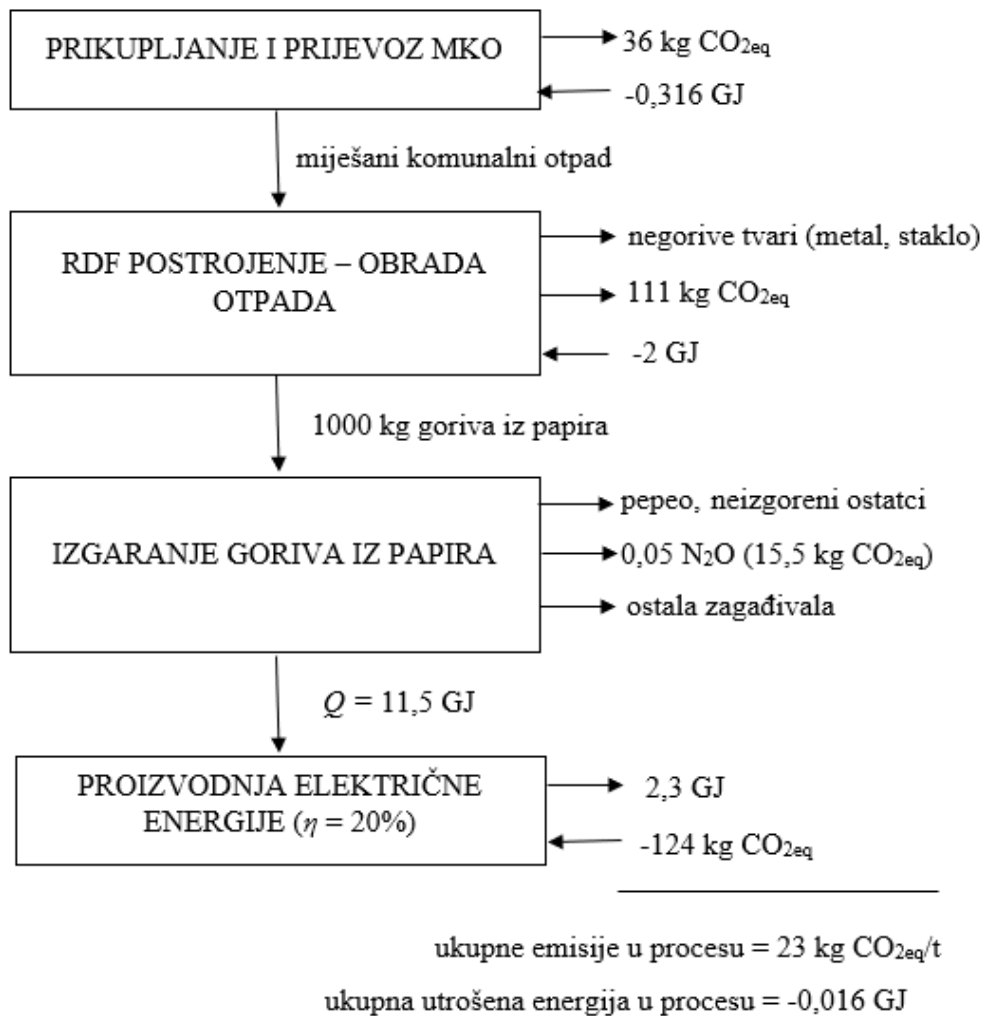
Jedan od postupaka kojim se miješani otpad priprema na spaljivanje je Gorivo iz otpada (RDF) [40]. Kod postupka gorivo iz otpada goriva frakcija otpada konvertira se u gorive pelete koji se mogu koristiti u postrojenjima za proizvodnju energije [37].

U nastavku rada će u nekoliko primjera biti dan iznos emisija, energije i materije koji nastaju spaljivanjem gorivih peleta. Gorive pelete su u pravilu mješavina različitih gorivih materijala, ali u svrhu raščlambe energije dobivene u procesu izgaranja pretpostavlja se da su peleti u potpunosti izrađeni od pojedinih komponenti otpada (papir, plastika, biorazgradivi otpad).

### **2.5.2. Izgaranje papira**

Slika 13 prikazuje shemu procesa spaljivanja papira iz miješanog komunalnog otpada koji je prethodno podvrgnut RDF postupku obrade. Prilikom prijevoza miješanog komunalnog otpada do RDF postrojenja te prilikom zbrinjavanja pepela i neizgorenih ostataka dolazi do potrošnje energije u iznosu od 0,316 GJ i pripadajućih emisija stakleničkih plinova u iznosu od 36 kg CO<sub>2eq</sub> [20]. Obradom otpada odvajaju se reciklabilne tvari uslijed čega dolazi do energetske ušteda koje nisu uzete u obzir pri izradi sheme na slici 11. Procijenjeno je da obradom otpada dolazi do utroška energije od 2 GJ i pripadajućih emisija u iznosu od 111 kg CO<sub>2eq</sub> po toni obrađenog otpada [8]. Uslijed izgaranja goriva iz papira nastaje pepeo, voda, ugljikov dioksid biogenog podrijetla, dušikov oksidul i zagađivala. Zbog biogenog podrijetla nastalog ugljikovog dioksida njegov potencijal globalnog zatopljenja jednak je 0 [8]. Procijenjeno je da gorivo iz papira ima ogrjevnju vrijednost u iznosu od 11,5 GJ/t [8]. Proizvodnjom električne energije iz dobivene topline, pri stupnju iskoristivosti od 20% i emisijskom koeficijentu primarne energije 0,195 kg CO<sub>2eq</sub>/kWh, dobiva se 2,3 GJ električne energije čime se izbjegavaju emisije u iznosu od 124 kg CO<sub>2eq</sub>. Stoga se može zaključiti da spaljivanjem tone papira iz otpada dolazi do emisija ugljikova dioksida u iznosu od 23 kg CO<sub>2eq</sub> i ušteda energije u iznosu od 0,016 GJ.

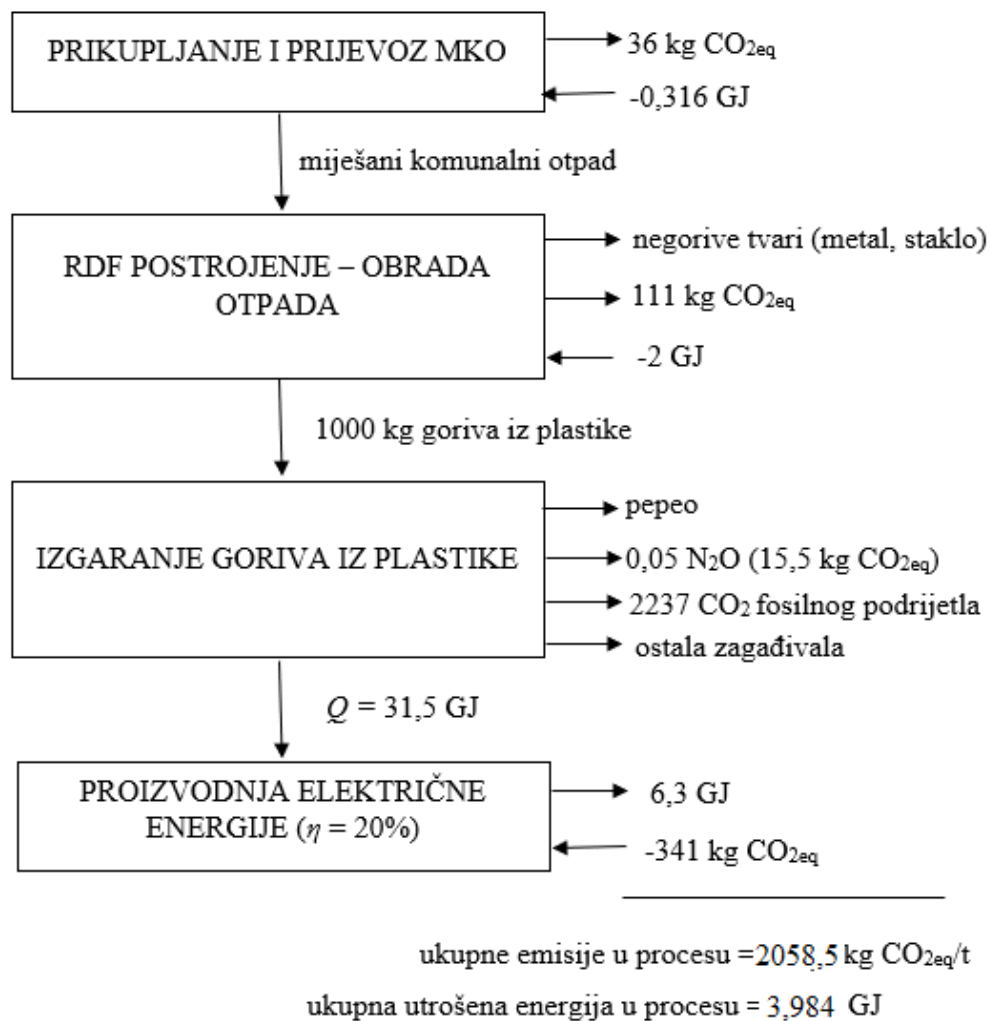




Slika 13. Spaljivanje goriva iz papira

### 2.5.3. Izgaranje plastike

Slika 14 prikazuje shemu procesa spaljivanja plastike iz miješanog komunalnog otpada koji je prethodno podvrgnut RDF postupku obrade. Utrošena energija i emisije stakleničkih plinova pri obradi otpada i prijevozu iste su kao u slučaju papira. Međutim, spaljivanje plastike nastaje ugljikov dioksid fosilnog podrijetla koji se smatra stakleničkim plinom [8]. Izgaranjem tone plastike nastaje 2237 CO<sub>2</sub> fosilnog podrijetla i 0,05 kg N<sub>2</sub>O [8]. Plastika posjeduje veću ogrjevnu vrijednost u odnosu na papir, stoga se u procesu oslobađa više energije [8]. Uz stupanj iskoristivosti postrojenja za proizvodnju električne energije od 20% i emisijski koeficijent primarne energije 0,195 kg CO<sub>2eq</sub>/kWh, u procesu spaljivanja dobiva se 6,3 GJ energije i izbjegavaju emisije stakleničkih plinova u iznosu od 341 kg CO<sub>2eq</sub>. Iz navedenih brojki može se zaključiti da se spaljivanjem tone plastike oslobode emisije stakleničkih plinova u iznosu od 2058,5 kg CO<sub>2eq</sub> i uštedi energija u iznosu od 3,984 GJ.



Slika 14. Spaljivanje goriva iz plastike

## 2.6. Odlaganje

Odlaganje predstavlja nadzirano zbrinjavanje pri kojem se miješani komunalni otpad odlaže na sanitarna odlagališta. Sanitarna odlagališta podrazumijevaju postrojenja za odlaganje u kojima su osigurane tehničke mjere zaštite [7]. Mjere zaštite se u pravilu sastoje od postavljanja temeljnog brtvenog sloja i pokrovnog brtvenog sloja, ugradnji drenažnih sustava za prikupljanje procjednih voda i plina te izgradnji sustava za zbrinjavanje deponijskog plina i procjednih voda [7].

Prilikom razgradnje biorazgradivog otpada u tijelu odlagališta dolazi do stvaranja metana i ugljikova dioksida [20]. Ugljikov dioksid nastao bi razgradnjom biorazgradivih tvari u prirodi, stoga nastali ugljikov dioksid ne predstavlja izvor emisije [20]. Metan, čiji je potencijal globalnog zagrijavanja mnogo veći od ugljikova dioksida, nastaje u anaerobnim uvjetima odlagališta te pridonosi globalnom zatopljenju [20]. Osim metana i ugljikova dioksida, koji čine

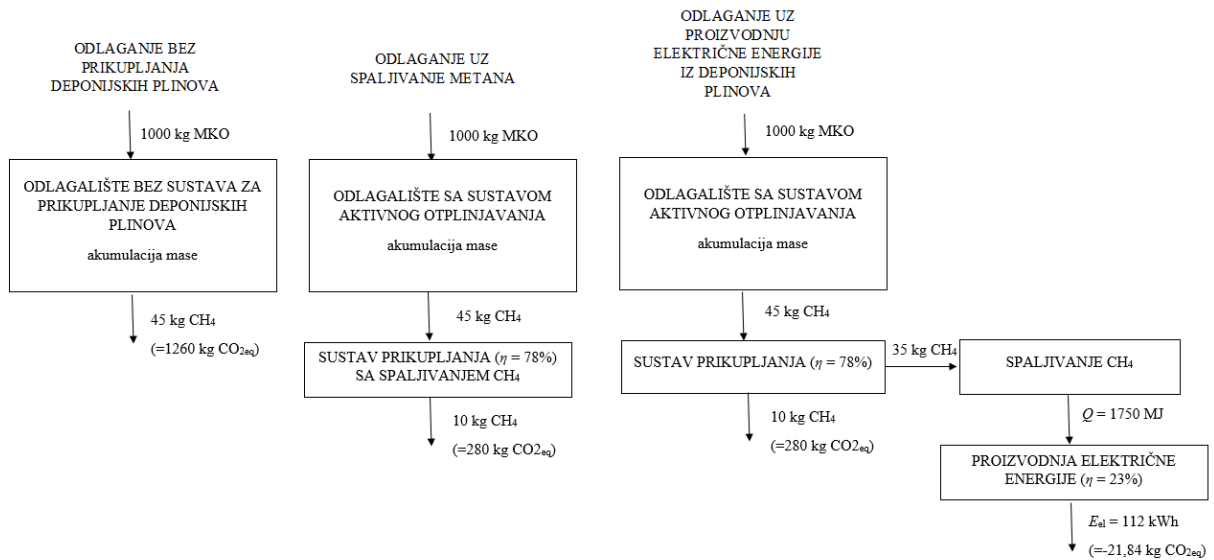
preko 95% sastava deponijskog plina, deponijski plinovi u manjim udjelima sadrže amonijak, sulfide i hlapive organske spojeve koji pridonose onečišćenju atmosfere te su opasni za ljudsko zdravlje [41]. Ovisno o uvjetima u tijelu odlagališta, dio ugljika ostaje nerazgrađen te ostaje zarobljen u tijelu odlagališta. Neke metodologije za izračun emisija stakleničkih plinova s odlagališta uzimaju dio ugljika zarobljenog u tijelu odlagališta kao emisijski ponor jer sprječavaju emisije ugljikova dioksida u atmosferu [8]. U okviru ovog rada sekvistirani ugljik ne uzima se u obzir pri izračunu emisija. Odlaganje otpada može dovesti i do zagađenja vode i tla procjednim vodama [41]. Iako moderna odlagališta imaju sustave za prikupljanje i obradu procjednih voda, [42] objašnjava da sustavi nisu idealni te da 5% procjednih voda zagađuje vodu i tlo. Osim navedenih problema, odlaganje otpada zauzima prostor, donosi rizik od požara te stvaranja neugodnih mirisa i buke [8].

Kako bi smanjili emisiju stakleničkih plinova i mirisa te omogućili uporabu energije iz metana pojedina odlagališta imaju sustave za prikupljanje i obradu deponijskih plinova [43]. Moderni sustavi za prikupljanje mogu postići stupanj prikupljanja od 70% do 90% [8]. U ovom radu uzet je sustav prikupljanja od 78%. Prikupljeni deponijski plinovi se nakon prikupljanja spaljuju pri čemu se metan i hlapivi organski spojevi pretvaraju u ugljikov dioksid i sumporov dioksid [43]. Energija dobivena spaljivanjem deponijskog plina može se koristiti za dobivanje toplinske i električne energije [43]. Ako se deponijski plin koristi za dobivanje energije, stvorena električna energija može se gledati kao emisijski ponor. Proizvodnjom energije iz fosilnih goriva nastale bi emisije koje su u ovom slučaju izbjegnute zbog iskorištavanja energije iz deponijskih plinova. Prosječni specifični faktor emisije CO<sub>2</sub> po ukupno proizvedenoj električnoj energiji za razdoblje od 2015. do 2020. godine u Hrvatskoj iznosio je 0,195 kg/kWh te je isti korišten za proračun izbjegnutih emisija u ovom radu [44]. Ukupna energetska učinkovitost sustava za konverziju kemijske energije bioplina u električnu energiju varira između 18% i 33% [45]. U svrhu ovog rada uzet je sustav iskorištenja od 23%.

Pri procesu odlaganja otpada dolazi do emisija uslijed odvoza i tretiranja otpada na odlagalištu otpada. Emisije pri prikupljanju razlikuju se ovisno o načinu prikupljanja, ali se procjenjuje da emisije od transporta otpada i njegove obrade iznose 8,2 kg CO<sub>2</sub> po toni odloženog miješanog komunalnog otpada [8]. S obzirom na to da su navedene emisije od transporta male u odnosu na emisije od razgradnje biorazgradivog otpada te da se razlikuju ovisno o načinu prikupljanja, u sklopu ovog rada one nisu uzete u obzir.

Pregled emisija stakleničkih plinova pri tri različita pristupa odlaganja miješanog komunalnog otpada prikazuje slika 15. Podaci o emisijama dobiveni su vlastitim proračunom sljedeći IPCC-ovu metodologiju za izračun emisija na odlagalištu pri čemu se ne uzimaju u obzir emisije zbog

transporta i obrade miješanog komunalnog otpada te posljedice uslijed sekvestracija ugljika u tijelu odlagališta [8], [46].



**Slika 15. Emisije stakleničkih plinova pri tri različita pristupa odlaganja MKO**

Osim štetnih utjecaja na okoliš, odlaganje otpada može se smatrati gospodarskim gubitkom. Nerazgradivi otpad poput stakla, metala ili plastike ostaje na odlagalištu te se ne iskorištava njegov energetski potencijal. Odloženi otpad može služiti kao sirovina pri proizvodnji ili se iz njega može dobiti energija pri energetskej uporabi.

Iako se količine odloženog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj iz godine u godinu smanjuju, odlaganje otpada još uvijek predstavlja najzastupljeniji način postupanja s komunalnim otpadom [32]. Tako je u 2020. godini udio komunalnog otpada upućenog na odlaganje iznosio je 56%, pri čemu je udio biorazgradivog otpada u odloženom otpadu iznosio 63% [32]. Člankom 55. Zakona o gospodarenju otpadom propisano je da do 2035. godine količina komunalnog otpada odloženog na odlagališta može biti najviše 10% [12]. Iz navedenih brojki može se zaključiti da je potrebno naći alternativne postupke kojima bi se zbrinjivao nastali komunalni otpad.

### 2.6.1. Metodologija proračuna emisija od odlaganja biorazgradivog otpada

Prilikom odlaganja, biorazgradivi otpad na odlagalištu se razlaže kroz dug vremenski period [8]. Ova metoda pretpostavlja da se sve potencijalne emisije CH<sub>4</sub> otpuštaju u atmosferu u istoj godini kada je otpad odložen [8]. To je razumna aproksimacija u slučajevima gdje su količine i sastav otpada relativno slični tijekom vremena.[8]. Glavni parametri pri proračunu emisija stakleničkih plinova su sljedeći [8]:

razgradivi organski ugljik (*DOC*) – udio otpada sačinjenog od biorazgradivog ugljika

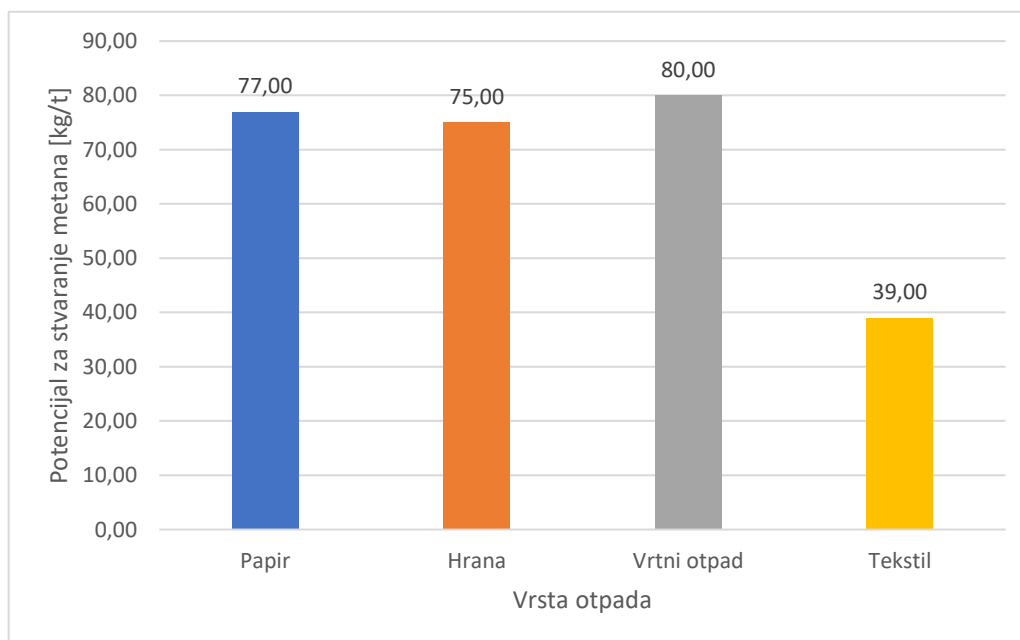
disimibilni razgradivi organski ugljik (*DDOC*) – udio DOC-a koji disimilirira u CO<sub>2</sub> i/ili CH<sub>4</sub> udio metana u deponijskim plinovima – prema metodologiji IPCC-a uzima se da se deponijski plin sastoji od 50% ugljikova dioksida i 50% metana.

Tablica 4 prikazuje pretpostavljene iznose DOC-a, DDOC-a te potencijal stvaranja metana i ugljikova dioksida iz pojedine komponente biorazgradivog otpada po IPCC metodologiji, a iste slijedi proračun u sklopu ovog rada.

**Tablica 4. Potencijal za stvaranje CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub> u anaerobnim uvjetima odlagališta [8]**

Vrsta materijala	DOC	DDOC	CH <sub>4</sub> [kg/t]	CO <sub>2</sub> [kg/t]
Papir	33%	11,55%	77	211,75
Hrana	15%	11,25%	75	206,25
Vrtni otpad	24%	12%	80	220
Tekstil	19,5%	5,83%	39	107,25

Grafički prikaz potencijala biorazgradivog otpada za stvaranje metana prikazuje slika 16 [7].



**Slika 16. Potencijal biorazgradivog otpada za stvaranje metana [7]**

## 2.7. Sažetak emisijskih, energetskih i materijskih značajki u načinima postupanja s otpadom

U ovom potpoglavlju iznesene su usporedne tablice koje prikazuju emisije nastale procesom pojedinog načina postupanja, energiju dobivenu ili utrošenu načinom postupanja te materiju dobivenu u procesu. Iznosi emisija preuzeti su iz literature [8], a iznosi energija u procesu preuzeti su iz literature [20]. Uslijed malih razlika u metodologiji određivanja emisija i energija, iznosi energija i emisija navedeni u tablicama u maloj mjeri odstupaju od iznesenih emisija i energija u prethodnom dijelu ovog rada. Emisije u procesu izražene su kao kilogram po toni nastalog otpada. Negativan predznak označava emisijske uštede, a pozitivan predznak izvore emisija. Energija je izražena u GJ po toni nastalog otpada. Negativan predznak označava energetske uštede, a pozitivan predznak količinu energije koju je potrebno uložiti za određeni način postupanja.

**Tablica 5. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s papirom [8], [20]**

Papir	Emisije u procesu [kg CO <sub>2eq</sub> /t]	Energija u procesu [GJ/t]	Materija iz procesa [t/t]
Recikliranje	-600,00	-17,40	Papir 0,95-0,98
Spaljivanje	1,92	-2,67	CO <sub>2</sub> 1,1-1,5 N <sub>2</sub> O 0,05·10 <sup>-3</sup> zagađivala pepeo
Odlaganje uz iskorištavanje energije deponijskih plinova	436,91	0,56	materija zarobljena u odlagalištu

**Tablica 6. Emisije, energija i materija u načinima postupanja sa staklom [8], [20]**

Staklo	Emisije u procesu [kg CO <sub>2eq</sub> /t]	Energija u procesu [GJ/t]	Materija iz procesa [t/t]
Recikliranje	-253,00	-17,18	Staklo 1
Spaljivanje	111,00	0,40	Staklo kao dio neizgorelih ostataka
Odlaganje uz iskorištavanje energije deponijskih plinova	8,00	0,56	materija zarobljena u odlagalištu

**Tablica 7. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s tekstilom [8], [20]**

Tekstil	Emisije u procesu [kg CO <sub>2eq</sub> /t]	Energija u procesu [GJ/t]	Materija iz procesa [t/t]
Recikliranje	-3.169,00	-98,08	Tekstil 1
Spaljivanje	667,83	-4,73	CO <sub>2</sub> 1,2-1,7 N <sub>2</sub> O 0,05·10 <sup>-3</sup> zagađivala pepeo
Odlaganje uz iskorištavanje energije deponijskih plinova	8,00	0,56	materija zarobljena u odlagalištu

**Tablica 8. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s plastikom [8], [20]**

Plastika	Emisije u procesu [kg CO <sub>2eq</sub> /t]	Energija u procesu [GJ/t]	Materija iz procesa [t/t]
Recikliranje	-929,33	-56,19	Granulat za novi plastični proizvod 0,98-1
Spaljivanje	2.519,75	-5,58	CO <sub>2</sub> 2,1-3,2 N <sub>2</sub> O 0,05·10 <sup>-3</sup> zagađivala pepeo
Odlaganje uz iskorištavanje energije deponijskih plinova	8,00	0,56	materija zarobljena u odlagalištu

**Tablica 9. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s metalom [8], [20]**

Metali	Emisije u procesu[kg CO <sub>2eq</sub> /t]	Energija u procesu [GJ/t]	Materija iz procesa [t/t]
Recikliranje	Fe: -1.800 Cu: -4.910 Al: -13.570	Fe: -29,9 Cu: -116,5 Al: -219,5	Metal 1
Spaljivanje	111,00	0,56	Djelomično oksidirani metali kao dio neizgorelih ostataka
Odlaganje uz iskorištavanje energije deponijskih plinova	8,00	0,56	materija zarobljena u odlagalištu

**Tablica 10. Emisije, energija i materija u načinima postupanja s biootpadom [8], [20]**

Biootpad	Emisije u procesu[kg CO <sub>2eq</sub> ]	Energija u procesu [GJ/t]	Materija iz procesa [t/t]
Kompostiranje	-36,00	0,61	Kompost 0,4 - 0,5
Spaljivanje	67,88	-0,58	CO <sub>2</sub> 1,1-1,5 N <sub>2</sub> O 0,05·10 <sup>-3</sup> zagađivala pepeo
Odlaganje uz iskorištavanje energije deponijskih plinova	425,56	0,56	CO <sub>2</sub> 1,1-1,5 CH <sub>4</sub> 0,077 Ostatak anaerobne digestije



### 3. PRORAČUN GOSPODARSKIH I EKOLOŠKIH POTENCIJALA ZA KRUŽNO GOSPODARENJE OTPADOM ZA GRAD ZAGREB

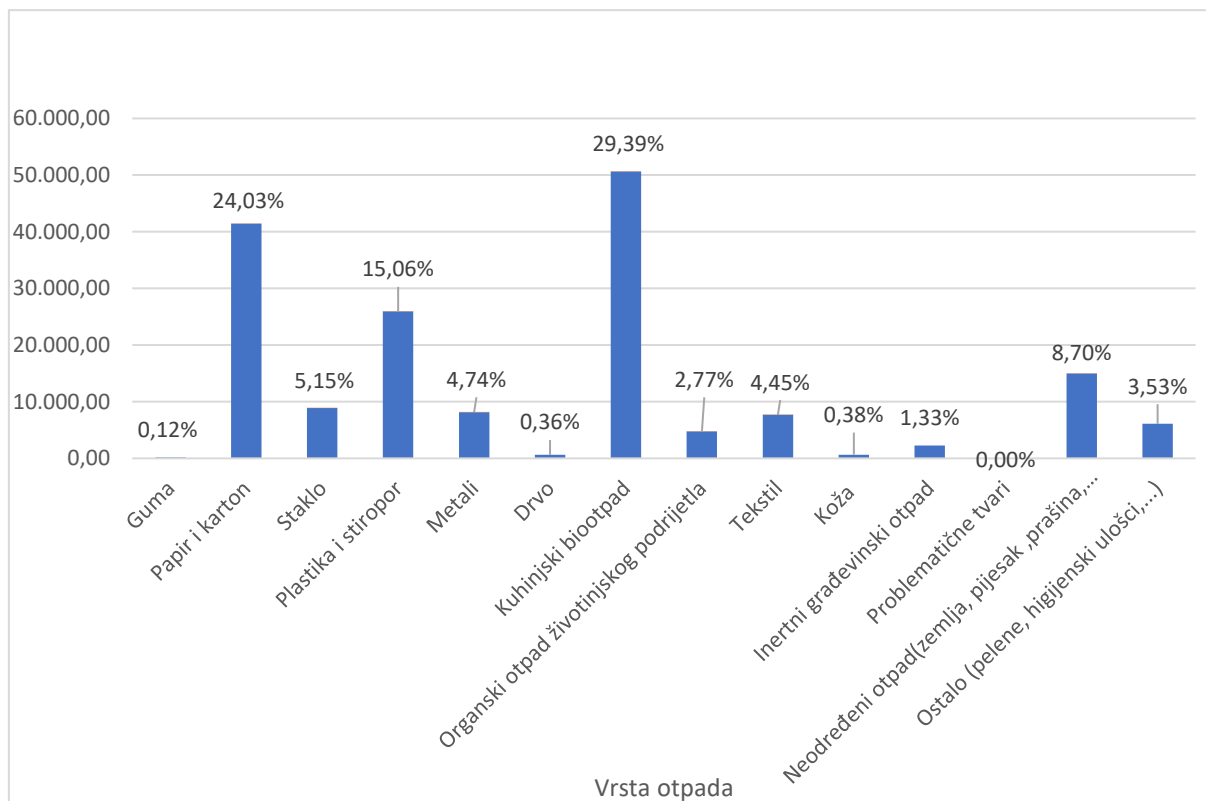
#### 3.1. Ulazni podaci za proračun

Kao ulazni podatak za proračun uzet je odloženi miješani komunalni otpad na odlagalište Prudinec – Jakuševac u 2020. godini [32]. Količina odloženog miješanog komunalnog otpada u 2020. godini iznosila je 172.384 tona [32]. U svrhu određivanja sastava miješanog komunalnog otpada uzeti su podaci iz studije „Određivanje morfološkog sastava otpada na odlagalištu otpada Jakuševac“ provedene 2018. godine te su udjeli pojedine komponente pomnoženi s količinom odloženog miješanog komunalnog otpada u 2020. godini [47]. Morfološki sastav miješanog komunalnog otpada odloženog 2020. godine na odlagalištu Jakuševac prikazuje tablica 11.

**Tablica 11. Morfološki sastav miješanog komunalnog otpada**

Vrsta otpada	masa [t]	udio [%]
Guma	208,15	0,12%
Papir i karton	41.421,89	24,03%
Staklo	8.871,78	5,15%
Plastika i stiropor	25.953,38	15,06%
Metali	8.163,28	4,74%
Drvo	621,88	0,36%
Kuhinjski biootpad	50.656,10	29,39%
Organski otpad životinjskog podrijetla	4.768,16	2,77%
Tekstil	7.671,98	4,45%
Koža	658,94	0,38%
Inertni građevinski otpad	2.297,46	1,33%
Problematične tvari	0,00	0,00%
Neodređeni otpad(zemlja, pijesak ,prašina, pepeo)	15.001,35	8,70%
Ostalo (pelene, higijenski ulošci,...)	6.090,35	3,53%

Grafički prikaz odloženog otpada prikazuje slika 17 [32].



**Slika 17. Količina odloženog MKO na odlagalište Jakuševac u 2020. godini [32]**

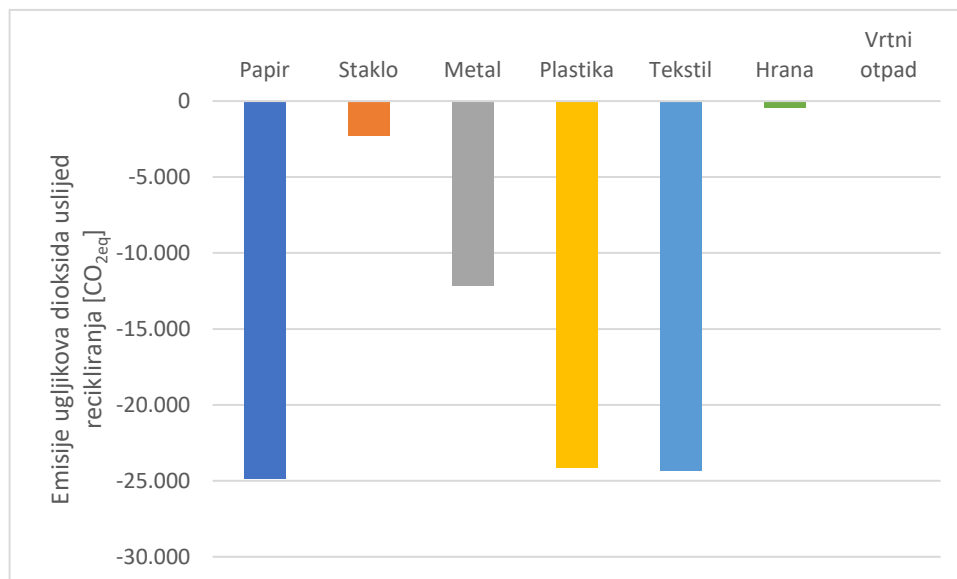
### 3.2. Recikliranje i kompostiranje

U ovom potpoglavlju napravljen je proračun emisija uslijed kompostiranja biootpada te recikliranja papira, metala, plastike, tekstila i stakla iz otpada odloženog na odlagalište Prudinec – Jakuševac u 2020. godini. Uslijed recikliranja, emisije nastaju prilikom korištenja energija za obradu recikliranog materijala i pri prijevozu recikliranog materijala. Emisijski ponor pri recikliranju predstavlja izbjegnuti transport za dovoz sirovine i smanjenja potrošnja energiji pri proizvodnji iz recikliranog materijala u odnosu na proizvodnju iz sirovog materijala. Iznosi emisija pri svakom koraku uzeti su iz literature [8]. Tablica 14 prikazuje ukupne emisije uslijed recikliranja odloženog miješanog komunalnog otpada na odlagalište Prudinec – Jakuševac u 2020. godini.

**Tablica 12. Ukupne emisije prelaskom s odlaganja na recikliranje**

Vrsta materijala	Emisije uslijed procesa recikliranja [t CO <sub>2eq</sub> ]	Izbjegnete emisije uslijed recikliranja [t CO <sub>2eq</sub> ]	Emisije uslijed transporta [t CO <sub>2eq</sub> ]	Ukupne emisije [t CO <sub>2eq</sub> ]
Papir	994	-26.261	414	-24.853
Staklo	213	-2.546	89	-2.245
Metal	196	-12.416	82	-12.139
Plastika	623	-25.002	260	-24.119
Tekstil	184	-24.573	77	-24.313
Hrana	1.009	-2.019	561	-449
Vrtni otpad	11	-22	6	-5
suma	3.231	-92.841	1.488	-88.122

Grafički prikaz ukupnih emisija prikazuje slika 18 [8].

**Slika 18. Ukupne izbjegnute emisije uslijed recikliranja pojedinig materijala**

Energetske uštede proizlaze iz izbjegavanja ekstrakcije, prijevoza i prerade sirovog materijala u procesu proizvodnje. Potencijal energetske uštede uzet je iz literature[20]. Tablica 13 prikazuje uštede energije pri recikliranju odloženog miješanog komunalnog otpada na odlagalište Prudinec – Jakuševac u 2020. godini.

**Tablica 13. Energetske uštede prelaskom s odlaganja na recikliranje**

Vrsta materijala	Potencijal za energetske uštede [GJ/t]	Ušteda energija [GJ]	Materija [t]
Guma	-56,19	-11.695	208
Papir i karton	-17,40	-720.653	33.137
Staklo	-2,24	-19.844	7.984
Plastika i stiropor	-56,19	-1.458.197	7.755
Metali	-78,92	-644.231	25.953
Tekstil	-98,08	-752.452	7.671
Ukupno		-3.607.072	

Zaključno, podatke o materijalnim, energetske i emisijskim uštedama prikazuje tablica 14. Recikliranjem odloženog otpada na odlagalište Prudinec – Jakuševac u 2020. godini izbjegle bi se emisije u iznosu od 88.122 t CO<sub>2eq</sub> i uštedjelo bi se 3.607.072 GJ energije.

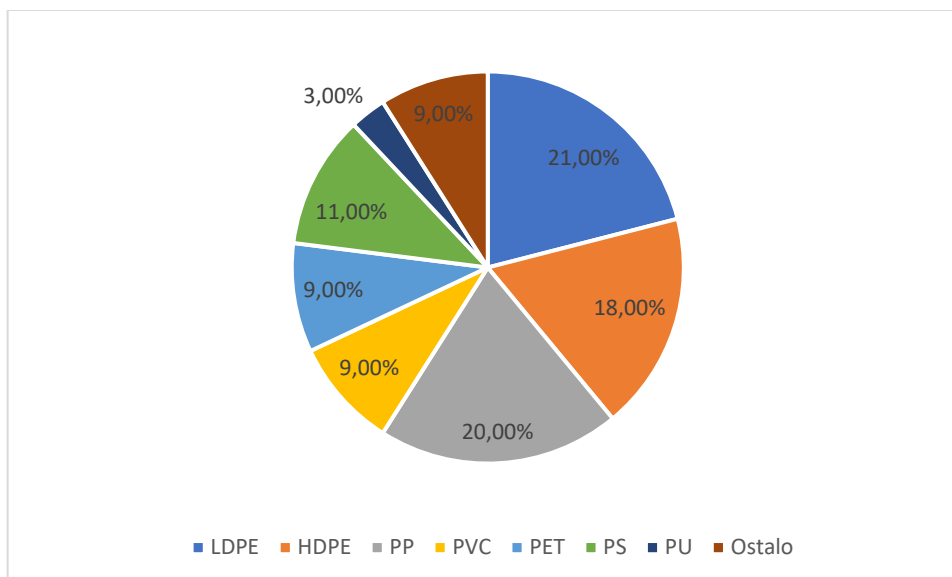
**Tablica 14. Ukupne uštede kod recikliranja**

Vrsta materijala	Smanjenje emisija stakleničkih plinova [t CO <sub>2eq</sub> ]	Ušteda energija [GJ]
Ukupno	-88.122	-3.607.072

### 3.3. Spaljivanje otpada

U okviru ovog rada razmatrana su dva slučaja spaljivanja otpada, RDF postupak spaljivanja te spaljivanje bez prethodne obrade otpada (spaljivanje miješanog komunalnog otpada). Emisije od spaljivanja ugljika fosilnog podrijetla ista su u oba slučaja.

Različite vrste plastike sadržavaju različit udio ugljika te samim time i potencijal za nastajanje ugljikova dioksida. Kako bi odredili sastav plastike odložene na odlagalište Prudinec – Jakuševac u 2020. godini uzet je prosječan sastav plastičnog otpada u Europskoj uniji, prikazan slikom 19, te je pomnožen s masom odložene plastike [8]. Tablica 15 prikazuje procjenu mase odložene plastike na odlagalištu Prudinec – Jakuševac u 2020. godini.



Slika 19. Prosječan sastav plastičnog otpada Europske unije

Tablica 15. Masa odložene plastike na odlagalištu Prudinec – Jakuševac u 2020. godini [8]

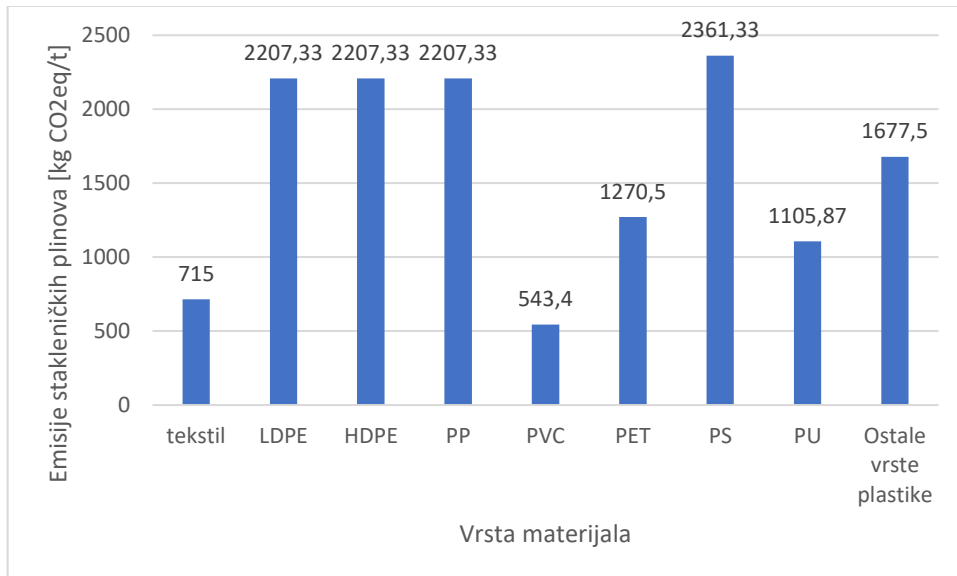
Vrsta plastike	Prosječan sastav plastičnog otpada Europske unije	Masa odložene plastike [t]
LDPE	21,00%	5.450
HDPE	18,00%	4.671
PP	20,00%	5.190
PVC	9,00%	2.335
PET	9,00%	2.335
PS	11,00%	2.854
PU	3,00%	778
Ostalo	9,00%	2.335

U svrhu određivanja potencijala za nastajanje ugljikova dioksida pri izgaranju potrebni su udjeli ugljika u pojedinoj vrsti otpada. Tablica 16 prikazuje udio ugljika, udio ugljika fosilnog podrijetla te potencijal za stvaranje ugljikova dioksida fosilnog podrijetla u pojedinoj vrsti otpada. Podaci za tablicu preuzeti su iz literature [8].

**Tablica 16. Potencijal za stvaranje ugljikova dioksida fosilnog podrijetla [8]**

Vrsta materijala	Udio ugljika	Udio ugljika fosilnog podrijetla	Potencijal za stvaranje CO <sub>2</sub> fosilnog podrijetla[kg CO <sub>2</sub> /t]
papir	33,00%	0,00%	0,00
hrana	15,00%	0,00%	0,00
vrtni otpad	24,00%	0,00%	0,00
tekstil	39,00%	50,00%	715,00
LDPE	86,00%	100,00%	3.153,33
HDPE	86,00%	100,00%	3.153,33
PP	86,00%	100,00%	3.153,33
PVC	38,00%	100,00%	1.393,33
PET	63,00%	100,00%	2.310,00
PS	92,00%	100,00%	3.373,33
PU	58,00%	100,00%	2.126,67
Ostale vrste plastike	75,00%	100,00%	2.750,00
guma	92,00%	100,00%	3.373,33
staklo	0,00%	0,00%	0,00
metali	0,00%	0,00%	0,00

Potencijal za stvaranje ugljikova dioksida fosilnog podrijetla zatim je pomnožen s masom odloženog otpada na odlagalištu Prudinec – Jakuševac. Emisije ugljikova dioksida proizlaze samo iz spaljivanja plastike, gume i tekstila jer se sastoje od ugljika fosilnog podrijetla. Prilikom spaljivanja dolazi i do emisija dušikova oksidula u procijenjenom iznosu od 0,05 kilograma po toni otpada [8]. Potencijal globalnog zatopljenja dušikovog oksida iznosi 310 [8]. Tablica 9. prikazuje ukupne emisije pri spaljivanju otpada odloženog na odlagalištu Prudinec – Jakuševac u 2020. godini.



**Slika 20. Potencijal za stvaranje emisija ugljikova dioksida uslijed spaljivanja**

**Tablica 17. Emisije uslijed spaljivanja ugljika fosilnog podrijetla**

Vrsta materijala	Emisije uslijed spaljivanja ugljika fosilnog podrijetla [t CO <sub>2</sub> eq]	Emisije uslijed stvaranja N <sub>2</sub> O [t CO <sub>2</sub> eq]
Papir	0	642
Hrana	0	859
Vrtni otpad	0	10
Tekstil	5.485	119
LDPE	17.186	84
HDPE	14.731	72
PP	16.368	80
PVC	3.255	36
PET	5.396	36
PS	9.630	44
PU	1.656	12
Ostale vrste plastike	6.423	36
guma	702	3
staklo	0	0
metali	0	0
<b>Ukupno</b>	<b>80.833</b>	<b>2.035</b>

Pri postupku RDF uporabe emisijski izvor proizlazi i iz pripreme otpada za obradu. Prema literaturi [8], pripremom otpada za RDF postupak dolazi do emisijskog izvora od 111 kilograma CO<sub>2eq</sub> po toni miješanog komunalnog otpada. Tablica 18 prikazuje emisije uslijed pripreme otpada za spaljivanje.

**Tablica 18. Emisije stakleničkih plinova uslijed pripreme otpada za spaljivanje**

Vrsta materijala	Emisije CO <sub>2eq</sub> [t]	Vrsta materijala	Emisije CO <sub>2eq</sub> [t]
Papir	4.598	PET	259
Hrana	6.225	PS	317
Vrtni otpad	69	PU	86
Tekstil	852	ostale vrste plastike	259
LDPE	605	guma	23
HDPE	519	staklo	985
PP	576	metali	906
PVC	259	Ukupno	16.539

Emisijski ponor uslijed proizvodnje električne energije proračunat je koristeći ogrjevne vrijednosti iz literature [8], stupanj iskorištenja postrojenja za proizvodnju električne energije je uzet 20% za spaljivanje MKO te 30% za gorivo iz otpada. Za faktor emisije za proizvedenu električnu energiju korištena je srednja vrijednost za razdoblje između 2015. i 2020. godine za Hrvatsku [44]. Tablica 19 prikazuje ogrjevne vrijednosti i pripadajuće izbjegnute emisije za proizvedenu energiju u postupku spaljivanja goriva iz otpada i postupku spaljivanja miješanog komunalnog otpada.



**Tablica 19. Emisijski ponor uslijed proizvodnje električne energije**

Vrsta materijala	Ogrjevna vrijednost otpada komponente goriva iz otpada [GJ/t] [8]	RDF postupak [t CO <sub>2eq</sub> ]	Ogrjevna vrijednost komponente otpada pri spaljivanju MKO [GJ/t] [8]	Spaljivanje MKO [t CO <sub>2eq</sub> ]
Papir	11,50	3.253	3,30	1.481
Hrana	3,98	-2.448	1,30	790
Vrtni otpad	0,00	44		0
Tekstil	14,60	989	0,30	25
LDPE	31,50	2.199	2,60	154
HDPE	31,50	1.885	2,60	132
PP	31,50	2.095	2,60	146
PVC	31,50	943	2,60	66
PET	31,50	943	2,60	66
PS	31,50	1.152	2,60	80
PU	31,50	314	2,60	22
ostale vrste plastike	31,50	943	2,60	66
guma	31,50	84	2,60	6
staklo	0,00	0	0,00	0
metali	0,00	0	0,00	0
Ukupno		12.395		3.032

Tablica 20. prikazuje ukupne emisije za spaljivanje svog odloženog miješanog komunalnog otpada na odlagalištu Prudinec – Jakuševac u 2020. godini.

**Tablica 20. Emisije i energija uslijed spaljivanja goriva iz otpada (RDF) i MKO**

	RDF	Mass Burn
Emisije stakleničkih plinova [t CO <sub>2eq</sub> ]	84.274,39	79.407,78
Proizvedena električna energija [GJ]	228.829,84	55.984,39

### 3.4. Odlaganje

U okviru ovog rada razmatrana su tri slučaja odlaganja otpada. Odlaganje otpada bez prikupljanja deponijskih plinova, odlaganje otpada s prikupljanjem i obradom deponijskih plinova te odlaganje otpada s prikupljanjem i iskorištavanjem deponijskih plinova za dobivanje električne energije.

Za slučaj odlaganja bez prikupljanja deponijskih plinova, sav nastali CH<sub>4</sub> odlazi u atmosferu. Masa odloženog otpada na odlagalištu Prudinec – Jakuševac u 2020. godini pomnožena je potencijalom za stvaranje metana, a zatim je proizvedeni metan pomnožen s faktorom 28 kako bi se emisije izrazile kao ekvivalent ugljikova dioksida [48]. Emisije prilikom odlaganja bez prikupljanja deponijskih plinova prikazuje tablica 21.

**Tablica 21. Emisije uslijed odlaganja bez prikupljanja deponijskih plinova**

Vrsta materijala	Ukupne emisije [t CO <sub>2eq</sub> ]
Papir	89.306
Hrana	117.775
Vrtni otpad	1.393
Tekstil	8.378
Ukupno	216.851

U slučaju odlaganja uz prikupljanje i spaljivanje nastalog metana, emisije nastaju od metana koji je ispušten u atmosferu. Stupanj prikupljanja u pravilu iznosi između 70% i 90% [8]. U ovom radu uzet je stupanj prikupljanja od 78%. Emisije u slučaju odlaganja uz prikupljanje deponijskih plinova prikazuje tablica 22.

**Tablica 22. Emisije uslijed odlaganja uz spaljivanje prikupljenih deponijskih plinova**

Vrsta materijala	Ukupne emisije [t CO <sub>2eq</sub> ]
Papir	19.646
Hrana	25.910
Vrtni otpad	306
Tekstil	1.843
Ukupno	47.707

U slučaju kada se iskorištava energija deponijskih plinova za dobivanje električne energije, proizvedena električna energija smatra se emisijskim ponorom te se oduzima od ukupne sume emisija. Pri proračunu proizvedene električne energije uzet je stupanj iskorištenja sustava za proizvodnju električne energije od 23%, ogrjevna vrijednost metana od 50 MJ/kg [8], [49]. U svrhu određivanja izbjegnutih emisija za proizvodnju električne energije, proizvedena električna energija množena je s prosječnim emisijskim koeficijentom stakleničkih plinova električne energije u mreži koji iznosi 0,195 kg/kWh [44]. Tablica 23 prikazuje emisije u slučaju iskorištavanja energije iz deponijskih plinova.

**Tablica 23. Emisije uslijed energetskog iskorištavanja deponijskih plinova**

Vrsta materijala	Ukupne emisije [kg CO <sub>2eq</sub> ]
Papir	18.098
Hrana	23.867
Vrtni otpad	282
Tekstil	1.698
Ukupno	43.944

U slučaju odlaganja miješanog komunalnog otpada u Zagrebu 2020. godine bez prikupljanja i spaljivanja deponijskih plinova, emisije su najveće i iznose 216.851.124 kg CO<sub>2eq</sub>. U slučaju spaljivanja deponijskih plinova emisije se smanjuju na 47.707.247 kg CO<sub>2eq</sub>. Najbolji slučaj odlaganja je spaljivanje deponijskih plinova uz iskorištavanje energije, pri čemu emisije iznose 43.944.299 kg CO<sub>2eq</sub>.

Tablica 24 prikazuje energetska i emisijska bilancu uslijed tri načina odlaganja miješanog komunalnog otpada na odlagalište Prudinec – Jakuševac u 2020. godini. Pri odlaganju energija se troši pri sagorijevanju fosilnih goriva potrebnih za prikupljanje i odvoz otpada na odlagalište otpada. Iznos energije potrebne za prikupljanje i odvoz otpada uzet je iz [20] i iznosi 559 MJ po toni otpada. Uslijed iskorištavanja energije deponijskih plinova za dobivanje električne energije dolazi do energetskog ponora jer se izbjegava uporaba fosilnih goriva za proizvodnju električne energije. Korištenjem ogrjevne vrijednosti metana od 50 MJ/kg, pri stupanju prikupljanja deponijskih plinova od 78%, pri stupanju iskoristivosti sustava za proizvodnju električne energije od 23% te koristeći emisije s odlagališta proračunate u tablici 4., proizvedena električna energija iznosila bi 237 MJ po toni miješanog komunalnog otpada. [20] procjenjuje da energijski ponor uslijed proizvodnje električne energije iz deponijskih plinova

iznosi 264 MJ po toni miješanog komunalnog otpada. U ovom radu uzeta je vrijednost od 237 MJ proizvedene energije po toni miješanog komunalnog otpada.

**Tablica 24. Bilanca emisija i energetske uštede uslijed tri različita načina odlaganja otpada**

	Odlaganje bez prikupljanja deponijskih plinova	Odlaganje uz prikupljanje i spaljivanje deponijskih plinova	Odlaganje uz prikupljanje i spaljivanje deponijskih plinova uz proizvodnju električne energije
Emisije stakleničkih plinova [t CO <sub>2eq</sub> ]	216.851	47.707	43.944
Energija utrošena na odlaganje MKO [GJ]	96.363	96.363	27.066

## 4. RASPRAVA

U javnosti su prisutne dvije vizije razvoja sustava gospodarenja otpadom, od kojih je jedna u smjeru recikliranja odnosno kružne ekonomije gdje se nastoji sustav razvijati prema maksimalnim praktičnim učincima korištenja otpadnih tvari.

Druga vizija se vodi energetsom oporabom u kojoj se nastoji iskoristiti energetska vrijednost otpada, ali ne kao utjelovljena energija, već kao sadržana ogrjevna vrijednost, koju je moguće osloboditi izgaranjem.

U nastavku će se usporediti ova dva scenarija razvoja sustava u pogledu ostvarenih korisnih oblika energije, rezultatnih emisija stakleničkih plinova i na koncu po pitanju materijalnih tokova.

### 4.1. Početno stanje

Grad Zagreb je u 2020. godini odložio 172.385 tona komunalnog miješanog otpada, čiji sastav prikazuje tablica 11 te se analiza u nastavku odnosi samo na te količine otpada. Sadašnja praksa odlaganja uključuje prikupljanje odlagališnog plina i njegovo energijsko iskorištenje na motorima za proizvodnju električne energije. Iako se stvaranje i iskorištenje odlagališnog plina uslijed odlaganja biorazgradivog otpada odvija kroz dugi niz godina i ovisi o mnogim parametrima, u ovoj analizi će se računati s unesenim energetsom potencijalom kroz jednu godinu. Proračunom emisija uslijed razgradnje u jednoj godini odloženog biorazgradivog otpada procijenjen je doprinos odloženog otpada emisiji stakleničkih plinova u iznosu od 43.944 tona CO<sub>2eq</sub>. Prikupljanjem i spaljivanjem 78% deponijskih plinova, uz stupanj iskorištenja postrojenja toplinske u električnu energiju od 23%, odloženom količinom biorazgradivog otpada generiralo bi se 69.469 GJ električne energije. Potrošnja energije, uz koeficijent utroška energije za odlaganje otpada preuzet iz literature [20], za prikupljanje i prijevoz 172.385 tona otpada iznosi 96.363 GJ. Dakle, pri odlaganju 172.385 tona otpada postoji neto utrošak energije u iznosu od 27.066 GJ energije.

### 4.2. Razvoj u smjeru kružne ekonomije

Razvoj u smjeru kružne ekonomije uključuje i postupke sprječavanja nastanka otpada i ponovnoj uporabi, međutim, njihov doprinos u ovoj analizi nije posebno razmatran. Proračun u ovoj analizi se odnosi na otpad koji je već nastao, a kao opcije postupanja razmatra kompostiranje biorazgradivog otpada i recikliranje reciklabilnih materijala.

Na temelju detaljne morfologije, tj. ispitivanjem utvrđenog sastava otpada koji se odlaže (tablica 11) krenulo se u proračun energetske uštede koje se postižu recikliranjem, a za odabrane otpadne materijale detaljno su elaborirane u poglavlju 2.3. Emisije stakleničkih

plinova, s kojima su povezane energetske uštede, su također pojedinačno razmatrane i proračunate. Postupcima kompostiranja i recikliranja ukupno 172.385 tona otpadnog materijala postiže se smanjenje korištenja energije u proizvodnji, odnosno energetske uštede u iznosu od 3.607.072 GJ.

Isto tako, kružno gospodarenje otpadom uzrokuje smanjenje emisija stakleničkih plinova u iznosu od 88.122 tona CO<sub>2eq</sub> godišnje.

Navedene vrijednosti pokazuju kako bi se prelaskom s postupka odlaganja otpada na postupke recikliranja i kompostiranja prešlo iz područja utroška energije i generiranja emisija stakleničkih plinova u područje znatnih energetske uštede i ponora emisije stakleničkih plinova. Tablica 25 sumarno prikazuje navedene vrijednosti.

**Tablica 25. Energija i emisije uslijed prelaska na postupke GO visoke učinkovitosti**

	Utrošena <sup>a</sup> /Generirana <sup>b</sup> energija [GJ]	Emisije stakleničkih plinova* [t CO <sub>2eq</sub> ]
Sustava odlaganja uz iskorištenje energije	27.066 <sup>a</sup>	43.944
Recikliranje i kompostiranje	3.607.072 <sup>b</sup>	-88.122
<b>RAZLIKA</b>	<b>-3.634.137<sup>b</sup></b>	<b>-132.066</b>

\* negativna vrijednost označava ponor emisija, dok je pozitivna izvor emisija stakleničkih plinova

Osim koristi u pogledu uštede energije i ulaska u područje ponora emisije stakleničkih plinova, transformacijom u smjeru kružnog sustava gospodarenja otpadom visokog učinka se bitno mijenja materijski tok sustava. Umjesto akumulacije miješanog komunalnog otpada koji se godinama razgrađuje u anaerobnim uvjetima, stvoren je sustav s intenzivnim izlaznim tokom materije koja nalazi mjesto i potrebu u gospodarskom sustavu. Procjena količina i sastava za dani ulaz je kako slijedi:

- kompost – 24.000 tona godišnje
- granulat za novi plastični proizvod – 25.434 tona godišnje
- reciklirani metali - 8.163 tona godišnje
- reciklirano staklo - 8.871 tona godišnje
- reciklirani tekstil - 7.672 tona godišnje
- reciklirani papir – 39.351 tona godišnje

Za sve ove materije postoji interes u gospodarskom sustavu društva, odnosno, njihovim vraćanjem u sustav se ostvaruju smanjene potrebe za industrijskim sirovinama i ostvaruju

energetske uštede. Svi materijski izlazi imaju veću ili manju pozitivnu tržišnu vrijednost, odnosno, mogu se prodati na tržištu.

### 4.3. Razvoj u smjeru energetske uporabe

Razvojem u smjeru uporabe, iz nastalog otpada bi se iskorištavala ogrjevna vrijednost otpada u svrhu dobivanja toplinske i električne energije. U poglavlju 3 napravljen je proračun emisija i proizvedene energije za dvije varijante spaljivanja. Jedna varijanta uključuje proces mehaničko biološke obrade kojom se postiže bolja kvaliteta gorivih tvari, ali uz uloženu energiju za obradu miješanog komunalnog otpada. U tom procesu nastaje gorivo iz otpada za što se koristi kratica RDF. Druga varijanta se odnosi na spaljivanje miješanog komunalnog otpada pri čemu se zbog udjela biorazgradivih tvari bogatih vlagom, kao i negorivih tvari postižu slabiji energijski učinci. Proračun je uključio detaljnu razradu gorivih otpadnih materijala, praktične ogrjevne vrijednosti, sastav fosilnog ugljika i druge parametre. S obzirom na to da se grad Zagreb nalazi u situaciji da bi vrlo teško osigurao cjelogodišnji konzum toplinske energije, račun se odnosi na proizvodnju i korištenje samo jednog oblika energije – električne energije. Rezultati za ove dvije varijante prikazuje tablica 26.

Spaljivanjem 172.385 tona miješanog komunalnog otpada došlo bi do proizvodnje 55.984 GJ, dok bi se u slučaju prethodne prerade u gorivo iz otpada proizvelo 228.830 GJ električne energije.

Što se tiče emisije stakleničkih plinova, zbog visokog sadržaja fosilnog ugljika, spaljivanje je u pravilu emiter stakleničkih plinova, unatoč proizvedenoj korisnoj energiji. Prema proračunu, razmatrani postupci spaljivanja generiraju slične vrijednosti godišnjih emisija stakleničkih plinova te one iznose 79.408 tona za MKO i 84.274 tona ekvivalentnog CO<sub>2</sub> za RDF. Iz navedenih podataka može se zaključiti da bi prelaskom s odlaganja na spaljivanje komunalnog otpada došlo do energetskih ušteda u iznosu 255.895 GJ pri spaljivanju goriva iz otpada i ušteda od 83.050 GJ uslijed prelaska na spaljivanje miješanog komunalnog otpada. Međutim, uslijed prelaska s odlaganja na postupak spaljivanja goriva iz otpada došlo bi do dodatnog povećanja emisija stakleničkih plinova u iznosu od 40.330 tona CO<sub>2eq</sub> godišnje, a prelaskom s odlaganja na postupak spaljivanja miješanog komunalnog otpada došlo bi do povećanja emisija u iznosu od 35.463 tona CO<sub>2eq</sub> godišnje. Razlog većih emisija u postupku spaljivanja goriva iz otpada proizlazi iz potrebe za proizvodnjom goriva iz otpada uslijed čega dolazi do emisije stakleničkih plinova.

**Tablica 26. Energija i emisije uslijed razvoja u smjeru energetske oporabe**

	Utrošena <sup>a</sup> /Generirana <sup>b</sup> energija [GJ]	Emisije stakleničkih plinova * [t CO <sub>2eq</sub> ]
Sustava odlaganja uz iskorištenje energije	27.066 <sup>a</sup>	43.944
Spaljivanje RDF	228.830 <sup>b</sup>	84.274
Spaljivanje MKO	55.984 <sup>b</sup>	79.408
<b>RAZLIKA RDF</b>	<b>255.895<sup>b</sup></b>	<b>40.330</b>
<b>RAZLIKA MKO</b>	<b>83.050<sup>b</sup></b>	<b>35.463</b>

\* negativna vrijednost označava ponor emisija, dok je pozitivna izvor emisija stakleničkih plinova

Za postupke spaljivanja otpada potrebni su dodatni ulazni materijali zbog potrebe za obradom dimnih plinova. Za spaljivanje ovih količina otpada godišnje postoji značajna potreba za dodatnim materijalima [7]:

- amonij 500-1500 t
- vapno >1000 t
- aktivni ugljen >100 t
- cement >1500 t

Potrošnja ovih materijala je redovita tijekom rada spalionice pa se ovi materijski tokovi moraju uzeti u obzir kod bilanciranja rada postrojenja.

Za razliku od recikliranja kod kojeg se na izlazu dobije materija korisna u gospodarskom sustavu, izlazna materija u postupku spaljivanja u pravilu ima negativna svojstva te se za njihovo zbrinjavanje povezuju određeni troškovi. Izlazne materije u postupcima spaljivanja uključuju [7]:

- emisije u zrak CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, čestice, teški metali i druga zagađivala
- kruti ostaci od izgaranja: pepeo, neizgoreni otpad, šljaka
- ostaci od obrade dimnih plinova, leteći pepeo, solidifikat

#### **4.4. Usporedba dva scenarija razvoja sustava gospodarenja otpadom**

##### **4.4.1. Usporedba emisija stakleničkih plinova**

Slika 21. prikazuje promjenu emisija stakleničkih plinova za tri varijante razvoja sustava:

- kružno gospodarenje otpadom visokog učinka
- spaljivanja goriva iz otpada (RDF)

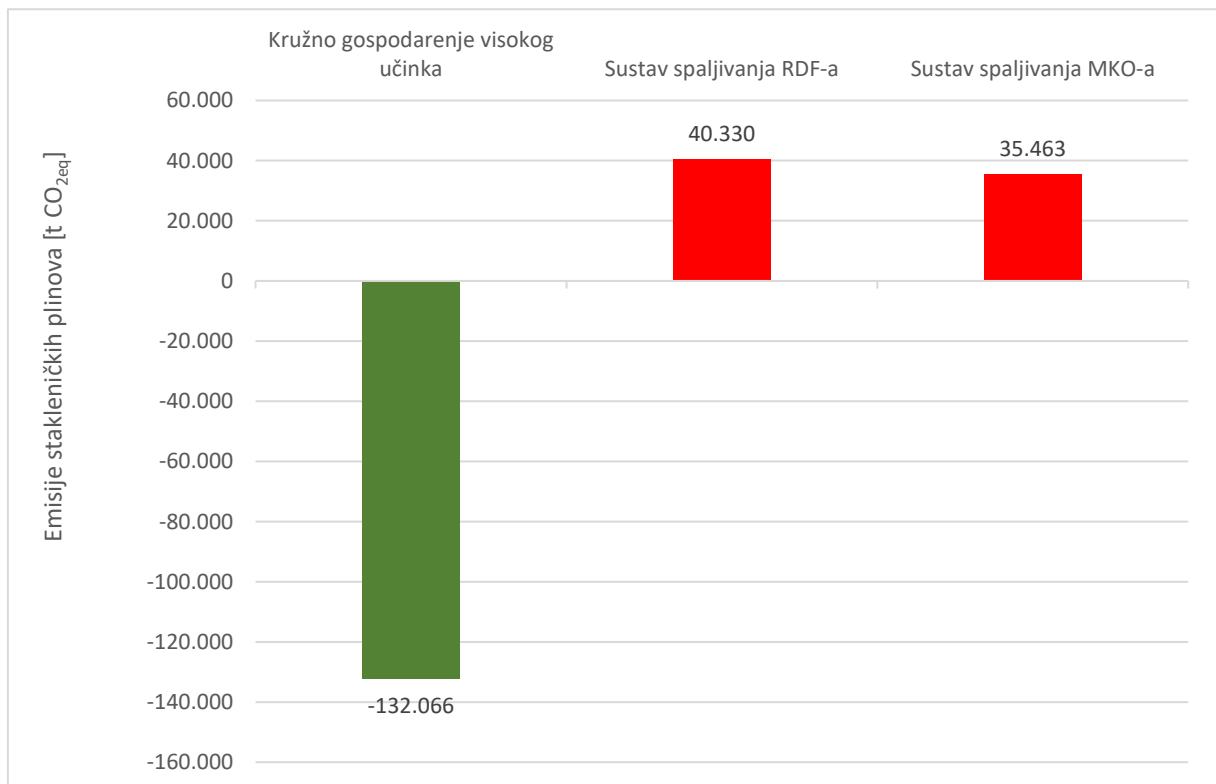


- spaljivanja miješanog komunalnog otpada (MKO).

Prelaskom na kružno gospodarstvo otpadom postiže se pozitivan učinak te umjesto neto emitera sustav gospodarenja otpadom postaje ponor emisija stakleničkih plinova. Uz izbjegavanje nastajanja odlagališnog plina, glavni razlog su izbjegavanja emisija stakleničkih plinova povezanih uz ekstrakciju, prijevoz i preradu sirovine potrebne za proizvodnju novog proizvoda. Ukupni emisijski doprinos ove varijante je 132 tisuće tona ekvivalentnog CO<sub>2</sub>, što značajan pomak u smjeru dekarbonizacije zagrebačkog sustava.

Prelaskom sa sustava odlaganja na sustav energetske uporabe otpadom dolazi do povećanja emisija stakleničkih plinova u odnosu na sadašnju praksu odlaganja uz iskorištenja dijela energije odlagališnih plinova. To je posljedica visokog udjela fosilnog ugljika otpada koji se spaljuje.

Neto doprinosi emisija stakleničkih plinova iznose preko 40 tisuća tona za RDF te preko 35 tisuća tona ekvivalentnog CO<sub>2</sub> za MKO. Ove tendencije suprotne su potrebnima, želi li se postići tranzicija klimatski neutralan smjer.



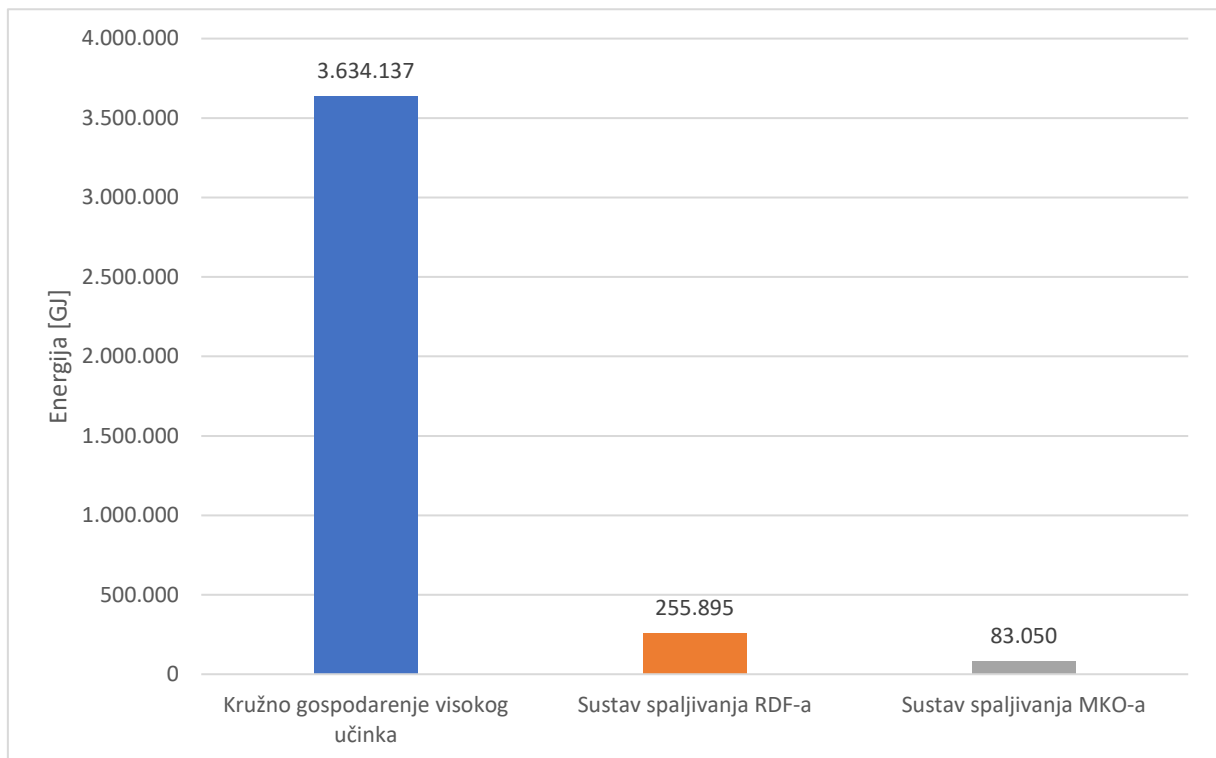
Slika 21. Emisije stakleničkih plinova u različitim scenarijima razvoja sustava GO

#### 4.4.2. Usporedba energijskih tokova

Slika 22. prikazuje usporedbu generirane energije za tri varijante razvoja sustava:

- kružno gospodarenje otpadom visokog učinka
- spaljivanja goriva iz otpada (RDF)
- spaljivanja miješanog komunalnog otpada (MKO).

U usporedbi sa sustavom spaljivanja goriva iz otpada, recikliranjem se u sustav vraća 14 puta više energije, a u usporedbi sa spaljivanjem miješanog komunalnog otpada čak 44 puta više energije. Ovako velika razlika postiže se za sustav gospodarenja otpadom visokog učinka, što znači praktični maksimumi stupnja reciklaže za sve reciklabilne tvari. Realno stanje koje bi bilo moguće postići u neko kraće vrijeme ovisi o kvaliteti transformacije sektora, no u svakom slučaju razvoj sustava u ovom smjeru postiže obrazložene učinke. Navedene brojke predstavljaju potencijal sustava kružnog gospodarenja otpadom u pogledu emisija i energije. Isto vrijedi i za aspekt emisija stakleničkih plinova.



Slika 22. Generirana energija u različitim scenarijima razvoja sustava GO

#### 4.4.3. Financijsko vrednovanje

Kao što je u uvodu rečeno, emisije stakleničkih plinova su u Europskoj uniji doživjele svojevrsnu monetizaciju. Radi se o sustavu kvota i trgovanja emisijskim jedinicama EU ETS [9]. U ovaj sustav trgovanja emisijskim jedinicama za sada nije uključen sektor gospodarenja

otpadom, no u kontekstu ambicije EU politike da se do 2050. postigne klimatska neutralnost, vrijedi razmotriti fiskalnu analizu emisija ovim alatom. Tablica 27 prikazuje potencijalne financijske uštede ili teret ulaskom sektora gospodarenja otpadom u sustav trgovanja emisijama. Za potrebe ove analize, izabrana je cijena po toni ekvivalenta ugljikova dioksida od 40 eura. Izračunom financijske vrijednosti emisija stakleničkih plinova može se razmatrati i ova aspekt mogućeg razvoja sustava gospodarenja otpadom.

Prelazak na kružno gospodarenje otpadom postižu se znatne financijske uštede, a prelaskom u smjeru energetske uporabe stvara se dodatni financijski trošak.

**Tablica 27. Pogled na emisije kroz sustav trgovanja emisijskim jedinicama**

	Potencijalne financijski teret <sup>a</sup> /uštede <sup>b</sup> uslijed trgovanja emisijskim jedinicama
Kružno gospodarenje visokog učinka	-5.282.651 <sup>b</sup> EUR
Sustav spaljivanja RDF-a	1.613.204 <sup>a</sup> EUR
Sustav spaljivanja MKO-a	1.418.539 <sup>a</sup> EUR

Pored financijske analize emisija, moguće je uključiti i novčano vrednovanje ostvarene ili utrošene energije, što je posebno interesantno danas, u doba velikog porasta cijena energenata. Važno je napomenuti da uštede energije kod recikliranja nisu samo u vidu električne energije, već i u vidu drugih oblika energija, stoga im je složenije odrediti cijenu. U navedenoj analizi odabrane su slijedeće vrijednosti energije:

- 100 EUR/MWh za električnu energiju
- 50 EUR/MWh za energetske uštede u recikliranju

Tablica 28 prikazuje financijske dobitke uslijed generirane električne energije spaljivanjem i energetskih ušteda recikliranjem.

**Tablica 28. Financijski dobitci stavljanjem cijene na generiranu energiju**

Vrijednost energije	Financijske koristi za generiranu energiju
Kružno gospodarenje visokog učinka	50.474.129 EUR
Sustav spaljivanja RDF-a	7.108.207 EUR
Sustav spaljivanja MKO-a	2.306.945 EUR

Ukupni financijski učinci od izvora i ponora stakleničkih plinova, kao i oni od vrijednosti generirane i uštedene energije dvaju koncepta razvoja sustava gospodarenja otpadom su prikazani u nastavku.

**Tablica 29. Ukupni financijski učinci kružnog GO**

	Kružno gospodarenje visokog učinka
Emisije	5.282.651 EUR
Energija	50.474.129 EUR
<b>UKUPNO</b>	<b>55.756.780 EUR</b>

**Tablica 30. Ukupni financijski učinci energetske uporabe**

	RDF	MKO
Emisije	-1.613.204 EUR	-1.418.539 EUR
Energija	7.108.207 EUR	2.306.945 EUR
<b>UKUPNO</b>	<b>5.495.003 EUR</b>	<b>888.406 EUR</b>

## 5. ZAKLJUČAK

Prelazak na kružno gospodarenje otpadom jedan je ključnih elemenata europskog zelenog plana [1]. Sektor gospodarenja otpadom u Hrvatskoj pridonosi 5 do 10% ukupnih emisija stakleničkih plinova [5]. Do emisija stakleničkih plinova u sektoru gospodarenja otpadom dolazi uslijed odlaganja biorazgradivog otpada, utroška fosilnih goriva uslijed skupljanja i transporta otpada te spaljivanjem otpada fosilnog podrijetla. Ispravnim pristupom pri gospodarenju otpadom može se iz zone značajnih emisija prijeći u zonu ponora stakleničkih plinova. Smanjenje stakleničkih plinova bitno je u pogledu borbe protiv klimatskih promjena, ali pruža i potencijal za ostvarenje gospodarskih koristi u kontekstu europske ambicije za klimatsku neutralnost do 2050. [3].

Osim ekoloških prednosti, kružni koncept gospodarenja otpadom donosi i značajne gospodarske potencijale uslijed postupaka recikliranja i kompostiranja. Intenzivnija primjena postupaka recikliranja i kompostiranja glavni je put za prelazak na kružno gospodarenje otpadom. Uspostavom kružnog gospodarenja otpadom dolazi do znatnog smanjenja emisija, ušteda energije i očuvanja prirodnih resursa. Navedene prednosti recikliranja i kompostiranja proizlaze iz otklanjanja potrebe za sirovinom i skraćivanja proizvodnog procesa i svega što proces uključuje.

Proračunom emisija i energije pokazano je da recikliranje i kompostiranje predstavljaju najpoželjniji način postupanja s već nastalim otpadom na području grada Zagreba.

Razvojem postojećeg sustava gospodarenja otpadom u kojem se preko 172 tisuće tona miješanog komunalnog otpada odlaže uz prikupljanje i energetska iskorištenje deponijskih plinova u smjeru kružnog gospodarstva postižu se sljedeći učinci. Smanjenje emisije stakleničkih plinova iznosi 132 tisuće tona CO<sub>2eq</sub> uz energetska doprinos od čak 3634 TJ. Razvoj sustava u smjeru energetske uporabe preko goriva iz otpada bi mogao generirati dobitak od 255 TJ energije u odnosu na odlaganje, ali uz povećanje emisija stakleničkih plinova od 40 tisuće tona CO<sub>2eq</sub>.

U pogledu tokova materije ova dva razvojna puta, kružno gospodarstvo generira kompost i niz sekundarnih sirovina, pozitivnih ekonomskih vrijednosti. Energetska uporaba s jedne strane zahtjeva dodatne materijale za obradu dimnih plinova (amonij, vapno, cement, aktivni ugljen), a s druge stvara plinovite (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, čestice, teški metali, razna zagađivala) te krute produkte izgaranja (pepeo, šljaka, neizgoreno, solidifikat, zasićeni aktivni ugljen) koje tek treba naknadno zbrinuti.

Zaključno, prelazak na kružno gospodarenje otpadom donosi značajne ekološke i gospodarske koristi. Kružno gospodarenje otpadom dovodi do smanjenja emisija te ušteda energije i prirodnih resursa. Na taj način se na otpad umjesto kao problem gleda kao resurs, a ujedno doprinosi održivom razvoju društva.

## LITERATURA

- [1] „A European Green Deal | European Commission“. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (pristupljeno 15. srpanj 2022.).
- [2] „The EU Green Deal – a roadmap to sustainable economies“. <https://www.switchtogreen.eu/the-eu-green-deal-promoting-a-green-notable-circular-economy/> (pristupljeno 16. siječanj 2023.).
- [3] „A European Green Deal“. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (pristupljeno 16. siječanj 2023.).
- [4] „Otpad i recikliranje“. [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling\\_hr](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling_hr) (pristupljeno 16. siječanj 2023.).
- [5] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, *Croatian greenhouse gas inventory for the period 1990 – 2019 (National Inventory Report 2021)*. Zagreb, 2021. [Na internetu]. Dostupno na: <https://unfccc.int/documents/271575>
- [6] M. A. Ahmed i ostali, „Waste Management Referees 2006“, *Waste Manag.*, sv. 27, izd. 1, str. 151–157, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.10.005.
- [7] S. Dobrović, „Kolegij gospodarenje otpadom - nastavni materijali“, 2022.
- [8] Europska komisija, „Waste management options“, 2001.
- [9] „EU Emissions Trading System (EU ETS)“. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en) (pristupljeno 16. siječanj 2023.).
- [10] „EU Carbon Price Tracker | Ember“. <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/> (pristupljeno 18. siječanj 2023.).
- [11] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, „Odluka o donošenju Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. - 2022. godine“, 2022. Pristupljeno: 12. siječanj 2023. [Na internetu]. Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017\\_01\\_3\\_120.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_01_3_120.html)
- [12] „Zakon o gospodarenju otpadom“. [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_07\\_84\\_1554.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_07_84_1554.html) (pristupljeno 02. siječanj 2023.).
- [13] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, *Izješće o komunalnom otpadu za 2021. godinu*. Zagreb, Croatia, 2022.
- [14] O. F. T. H. E. Council, „Directive 2008/122/EC of the European Parliament and of the Council“, *Fundam. Texts Eur. Priv. Law*, str. 3–30, 2020, doi: 10.5040/9781782258674.0028.
- [15] „Gospodarenje otpadom | Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost“. <https://www.fzoe.hr/hr/gospodarenje-otpadom/1345> (pristupljeno 02. siječanj 2023.).
- [16] „Waste prevention and management - Environment - European Commission“. [https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index_en.htm) (pristupljeno 12. siječanj 2023.).
- [17] United States Environmental Protection Agency, „Waste Prevention What Is Waste Prevention? How Does Waste Prevention Fit into the WasteWise Program?“, 1994.
- [18] „Odluka o donošenju Plana sprječavanja i smanjenja nastajanja otpada od hrane Republike Hrvatske 2019. – 2022.“ [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_06\\_61\\_1169.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_06_61_1169.html) (pristupljeno 12. siječanj 2023.).

- [19] Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost, *Smjernice za ponovnu uporabu u Republici Hrvatskoj*. 2016, str. 1–51. [Na internetu]. Dostupno na: [http://www.mzoip.hr/doc/smjernice\\_za\\_ponovnu\\_uporabu\\_u\\_republici\\_hrvatskoj.pdf](http://www.mzoip.hr/doc/smjernice_za_ponovnu_uporabu_u_republici_hrvatskoj.pdf)
- [20] United States Environmental Protection Agency, „Solid waste management and greenhouse gases: A life-cycle assessment of emissions and sinks“, *Resour. Recycl.*, str. 170, 2006.
- [21] H. Sutar, S. C. Mishra, S. K. Sahoo, A. P. Chakraverty, i H. S. Maharana, „Progress of Red Mud Utilization: An Overview“, 2014.
- [22] „Proizvođač staklene ambalaže | Vetropack Straža“. <https://www.vetropack.hr/hr/> (pristupljeno 14. siječanj 2023.).
- [23] S. Zrnčević, „Obrada industrijske otpadne vode iz proizvodnje celuloze i papira“, *Hrvat. vode*, sv. 27, izd. 110, str. 317–342, 2019.
- [24] „Recycled Paper - Recycled Papers“. <https://recycled-papers.co.uk/green-matters/recycled-paper-manufacture> (pristupljeno 14. siječanj 2023.).
- [25] C. Moretti i ostali, „Cradle-to-grave life cycle assessment of single-use cups made from PLA, PP and PET“, *Resour. Conserv. Recycl.*, sv. 169, izd. February, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105508.
- [26] B. GERVET, „THE USE OF CRUDE OIL IN PLASTIC MAKING CONTRIBUTES TO GLOBAL WARMING 1. Net Heat Generation from the Use of Crude Oil in Plastic Making“, *Insa*, izd. January 2015, 2007, [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/266469821>
- [27] „Plastic production worldwide 2021 | Statista“. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/> (pristupljeno 14. siječanj 2023.).
- [28] L. Fogh Mortensen i ostali, *Plastics, the circular economy and Europe's environment - A priority for action*, izd. 18/2020. 2021. doi: 10.2800/5847.
- [29] Europska komisija, „Europska strategija za plastiku u kružnom gospodarstvu“, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=EN> (pristupljeno 14. siječanj 2023.).
- [30] U. C. Council, „Greenhouse Gases and the Role of Composting : A Primer for Compost“, *J. Environ. Qual.*, str. 5–7, 2008.
- [31] R. Z. Alqaralleh, „Effect of Alkaline Pretreatment on Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste . Effect of Alkaline Pretreatment on Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste Dr . Robert Delatolla In partial fulfillment of the r“, izd. April, 2016.
- [32] Ministarstvo gospodarstva i održiv, *Izješće o komunalnom otpadu za 2020. godinu*. 2021, str. 1–154.
- [33] „Pravilnik o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada“. [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014\\_10\\_117\\_2217.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_10_117_2217.html) (pristupljeno 04. siječanj 2023.).
- [34] Y. Chen, J. J. Cheng, i K. S. Creamer, „Inhibition of anaerobic digestion process: A review“, *Bioresour. Technol.*, sv. 99, izd. 10, str. 4044–4064, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.057.
- [35] Zagrebački centar za gospodarenje otpadom, „Elaborat zaštite okoliša na području Grada Novske“, 2020.
- [36] B. Bilitewski, C. Oros, i T. H. Christensen, „Mechanical Biological Treatment“, *Solid Waste Technol. Manag.*, sv. 2, str. 628–638, 2010, doi: 10.1002/9780470666883.ch40.
- [37] D. R. Schneider, „Kolegij gospodarenje otpadom - nastavni materijali“, 2022.
- [38] TNA, „Indonesia Technology Needs Assessment for Climate Change Mitigation“, *UNEP behalf Glob. Environ. Facil.*, 2012.



- [39] C. R. Brunner, „Waste-to-energy combustion: Incineration Technologies“, u *Handbook of Solid Waste Management*, Second Edi., McGraw-Hill, 2002, str. 834.
- [40] M. J. Rogoff i F. Screve, *Waste-to-Energy: Technologies and Project Implementation*, Third Edit. William Andrew Applied Science Publishers, 2019. Pristupljeno: 16. siječanj 2023. [Na internetu]. Dostupno na:  
[https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=wmOMDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=waste+to+energy+technologies&ots=rTieqGRS4Y&sig=z8CjPd4wpAGi1V9r3ddrr9uZhjM&redir\\_esc=y#v=onepage&q=waste+to+energy+technologies&f=false](https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=wmOMDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=waste+to+energy+technologies&ots=rTieqGRS4Y&sig=z8CjPd4wpAGi1V9r3ddrr9uZhjM&redir_esc=y#v=onepage&q=waste+to+energy+technologies&f=false)
- [41] S. Van Passel i Y. Tielemans, „Impactsof landfills-LinnaeusECO-TECHSweden2012“, str. 40–52, 2012.
- [42] A. S. Ouedraogo, R. S. Frazier, i A. Kumar, „Comparative life cycle assessment of gasification and landfilling for disposal of municipal solid wastes“, *Energies*, sv. 14, izd. 21, 2021, doi: 10.3390/en14217032.
- [43] P. R. O’leary i G. Tchobanoglous, *Landfilling*, sv. 4, izd. 1. 2002.
- [44] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, „Energy in Croatia 2020“, 2021. [Na internetu]. Dostupno na: [https://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2022/01/Velika\\_EIHP\\_Energija\\_2020.pdf](https://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2022/01/Velika_EIHP_Energija_2020.pdf)
- [45] R. Bove i P. Lunghi, „Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies“, *Energy Convers. Manag.*, sv. 47, izd. 11–12, str. 1391–1401, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2005.08.017.
- [46] H. Zhao, N. J. Themelis, A. Bourtsalas, i W. R. McGillis, „Methane Emissions from Landfills“, *Glob. Waste-to-Energy Res. Technol. Counc.*, izd. May, str. 1–98, 2019.
- [47] ECOINA, „Određivanje morfološkog sastava otpada na odlagalištu otpada Jakuševac - 2017 godina“, 2018.
- [48] C. Staff, W. Document, i I. A. Report, „European commission“, 2021.
- [49] E. Muzenda, „Bio-methane generation from organic waste: A review“, *Lect. Notes Eng. Comput. Sci.*, sv. 2, str. 647–652, 2014.