

Ugljični otisak i energetska uporaba otpada

Toth, Sonja

Master's thesis / Diplomski rad

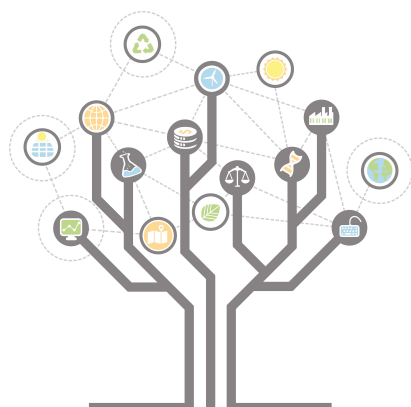
2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:742131>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

SONJA TOTH

UGLJIČNI OTISAK I ENERGETSKA OPORABA OTPADA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2022.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 19.09.2022. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 05.09.2022.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:
120. prof. dr. sc. Saša Korać

Članovi povjerenstva

- 1) Prof. dr. sc. Aleksandra Anić Vučićić
- 2) Doc. dr. sc. Ivana Grčić
- 3) Doc. dr. sc. Vitoimir Reun

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

UGLJIČNI OTISAK I ENERGETSKA OPORABA OTPADA

KANDIDAT:

SONJA TOTH

Sonja Toth

MENTOR:

Prof.dr.sc. ALEKSANDRA ANIĆ VUČINIĆ

VARAŽDIN, 2022.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

UGLJIČNI OTISAK I ENERGETSKA OPORABA OTPADA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 31.08.2022.

SONJA TOTIĆ

(Ime i prezime)

Sonja Totić

(Vlastoručni potpis)

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ
OBJAVLJENIM RADOVIMA**

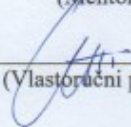
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

UGLJIČNI OTISAK I ENERGETSKA OPORABA OTPADA

pregledan anti-plagijet programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 31.08.2022.

Prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić
(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK RADA

Porast globalne populacije i gospodarski razvoj potaknuli su snažnu potrošnju energije i stvaranje otpada. Više od 2 milijarde t/god miješanog komunalnog otpada (eng. MSW - municipal solid waste) nastaje na globalnoj razini, a procjenjuje se da će se premašiti 2.200 milijuna tona godišnje do 2025.. Globalno jedna osoba u prosjeku proizvodi 0,74 kg/d otpada (Ying-Chu Chen i Hsiao-Man Liu, 2021.). Toplinska pretvorba, biološka pretvorba i odlaganje tri su najčešće korištene tehnike gospodarenja otpadom. Odlaganje se češće koristi u zemljama u razvoju. Odlaganje komunalnog otpada bez povrata energije ili sustava kontrole emisija uzrokuje probleme javnog zdravlja i opterećenja okoliša, kao što su emisije stakleničkih plinova (eng. GHG - greenhouse gas). Otpad od hrane koji se odlaže na odlagalište ima iznimno visok potencijal emisije stakleničkih plinova. Anaerobna digestija (AD) općenito se smatra najboljom opcijom za obradu hrane i drvnog otpada. Spaljivanje je jedna od najčešćih tehnika gospodarenja otpadom koja se koristi u razvijenim zemljama. Procjenjuje se da je dnevna količina stakleničkih plinova proizvedenih spaljivanjem mnogo manja od one od odlaganja otpada. Tehnologija energije iz otpada (eng. WtE – Waste to energy) također je dobro ugrađena u Agendi 2030. Ujedinjenih naroda o budućnosti za održivi razvoj u Cilju 7 kojem je namjera osigurati pristup pouzdanoj, održivoj i suvremenoj energiji po pristupačnim cijenama za sve (Nael AlQattan et al, 2018.). Shodno tome u ovom se radu potonje obrađuje tematika ugljičnog otiska u segmentu energetske uporabe otpada, kao i sama energetska uporaba otpada te se prikazuje ugljični otisak svake pojedine tehnologije za energetska uporabu otpada. Također, prezentiraju se scenariji ugljičnog otiska za neke pojedine tehnologije energetske uporabe otpada u Hrvatskoj.

KLJUČNE RIJEČI:

Ugljični otisak, energetska uporaba otpada, kružno gospodarstvo, energija iz otpada (WtE)

ABSTRACT

Global population growth and economic development have caused heavy energy consumption and excessive waste generation. More than 2 billion t/year of mixed municipal waste (MSW -municipal solid waste) are generated on a global level, and it is estimated that it will have exceeded 2,200 million tons per year by 2025. Globally, one person produces on average 0.74 kg/ d of waste (Ying-Chu Chen and Hsiao-Man Liu, 2021). Thermal conversion, biological conversion and waste disposal are three common waste management techniques. Waste disposal is more commonly used in developing countries. Disposal of municipal waste without energy recovery or emission control systems causes problems concerning public health and the environment, such as greenhouse gas (GHG) emissions. Food waste that is disposed of in a landfill has an extremely high potential for greenhouse gas emissions. Anaerobic digestion (AD) is generally considered to be the best option for food and wood waste processing. Incineration is one of the most common waste management techniques used in developed countries. It is estimated that the amount of greenhouse gases produced by incineration per day is much less than that from waste disposal. WtE technology is also well embedded in the 2030 Agenda of the United Nations on the Future of Sustainable Development in Goal 7, which aims to ensure access to reliable, sustainable, and modern energy at affordable prices for all (Nael AlQattan et al, 2018). According to this, the paper deals with the topic of carbon footprint in the segment of energy recovery of waste, as well as the energy recovery of waste itself and it shows the carbon footprint of each individual technology for energy recovery of waste. Also, the paper presents carbon footprint scenarios for some individual waste energy recovery technologies in Croatia.

KEYWORDS:

Carbon footprint, waste energy recovery, circular economy, waste to energy (WtE)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. UGLJIČNI OTISAK	3
3. ENERGETSKA OPORABA OTPADA S NAGLASKOM NA UGLJIČNI OTISAK ..	4
3.1. Direktni procesi.....	9
3.1.1. Osvrt na ugljični otisak	10
3.2. Neizravni procesi	13
3.2.1. Termokemijski procesi.....	13
3.2.1.1. Spaljivanje	13
3.2.1.1.1. Osvrt na ugljični otisak	14
3.2.1.2. Piroliza.....	14
3.2.1.2.1. Osvrt na ugljični otisak	15
3.2.1.3. Rasplinjavanje	15
3.2.1.3.1. Osvrt na ugljični otisak	16
3.2.1.4. Hidrotermalna karbonizacija	17
3.2.1.4.1. Osvrt na ugljični otisak	18
3.2.2. Biokemijska pretvorba	18
3.2.2.1. Kompostiranje	20
3.2.2.1.1. Osvrt na ugljični otisak	21
3.2.2.2. Anaerobna digestija	21
3.2.2.2.1. Osvrt na ugljični otisak	23
3.2.2.3. Odlaganje.....	23
3.2.2.3.1. Osvrt na ugljični otisak	25
3.2.2.4. Biološka uporaba otpada u bioetanol i biodizel	25
3.2.2.4.1. Osvrt na ugljični otisak	27

3.2.2.5.	Mikrobna gorivna ćelija	27
3.2.2.5.1.	Osvrt na ugljični otisak	29
4.	GOSPODARENJE OTPADOM U KONTEKSTU KRUŽNOG GOSPODARSTVA	30
4.1.	Očekivane promjene u sirovinama za pretvaranje otpada u energiju	35
4.2.	Korištenje energetske najučinkovitijih tehnika pretvaranja otpada u energiju	36
5.	UTJECAJ ENERGETSKE OPORABE OTPADA NA UGLJIČNI OTISAK U HRVATSKOJ	38
5.1.	Scenariji ugljičnog otiska.....	39
6.	ZAKLJUČAK.....	45
7.	LITERATURA	46
8.	POPIS SLIKA	52
9.	POPIS TABLICA.....	53
10.	POPIS GRAFIKONA	54

1. UVOD

Brzi rast stanovništva, u kombinaciji s povećanom industrijalizacijom, pogoršalo je pitanje gospodarenja otpadom. Loše gospodarenje miješanim komunalnim otpadom (engl. Municipal solid waste - MSW) ne samo da ima štetne posljedice na okoliš, već i dovodi u opasnost javno zdravlje te uvodi nekoliko drugih socioekonomskih problema. Mnoge zemlje u razvoju bore se s problemom sigurnog odlaganja velikih količina proizvedenog miješanog komunalnog otpada koji se ne oporabljuje i tako onečišćuje okoliš, pa bi njegovo korištenje kao potencijalnog obnovljivog izvora energije pomoglo u zadovoljavanju povećanih energetske potreba i gospodarenju otpadom. (Nidhi Kundariya et al, 2021.)

Zbog nepostojanja odgovarajućeg sustava gospodarenja miješanim komunalnim otpadom, većina otpada se nepropisno odvaja, prikuplja i transportira. Na složenost i količinu nastalog miješanog komunalnog otpada općenito utječu gospodarski rast, urbanizacija i visoki životni standard. Čimbenici koji utječu na sustav gospodarenja čvrstim otpadom uključuju (a) stav lokalnog stanovništva prema otpadu, (b) odnos između vlasti, (c) političku stabilnost i (d) nedostatak informacijske komunikacije između ljudi i odbora za gospodarenje otpadom. Gospodarenje otpadom danas je ključna briga, stoga postoji potreba za razvojem sustava koji je i održiv i ekonomičan. Ciljevi gospodarenja čvrstim otpadom su poboljšanje kvalitete okoliša urbanih područja, podizanje ekonomske evolucije, promicanje svijesti o zdravstvenim i higijenskim pitanjima uzrokovanim nepravilnim gospodarenjem otpadom. Neadekvatna segregacija i uklanjanje otpada rezultira svim vrstama onečišćenja, uključujući tlo, vodu i zrak. Kao rezultat toga, izravno odlaganje komunalnog otpada na odlagalište (bez prethodne obrade) uzrokuje nekoliko ekoloških problema, uključujući ispuštanje stakleničkih plinova (engl. Greenhouse gases - GHG) i otrovnih hlapljivih organskih spojeva (engl. volatile organic compounds -VOC), kao i onečišćenje podzemnih voda s procijedim vodama. U takvim okolnostima, tehnologija energija iz otpada (engl. Waste to energy - WtE) bi bila najbolja alternativa za pristup alternativnim gorivima. Ove tehnologije mogu generirati značajnu količinu topline i energije iz otpada, čime se smanjuju mnoga kritična ekološka pitanja povezana s komunalnim otpadom. Dobivanje energije iz komunalnog otpada može se postići termokemijskim i biokemijskim procesima. (Nidhi Kundariya et al, 2021.)

Energetska uporaba otpada igra važnu ulogu u suvremenim sustavima gospodarenja čvrstim komunalnim otpadom. Biokemijske i termokemijske tehnologije obrade otpada u energiju (WtE) mogu iskoristiti energetske sadržaj čvrstog otpada, čime se zamjenjuju fosilna goriva i smanjuje se otpad s odlagališta. Trenutno najraširenije WtE tehnologije su spaljivanje i anaerobna digestija (engl. Anaerobic digestion - AD). Spaljivanje s uporabom energije nudi put valorizacije zaostalog otpada nakon odvojenog prikupljanja ili otpada nastalog u postrojenjima za uporabu materijala (engl. Materials recovery facility - MRF). Alternativno, otpad MRF-a može se podvrgnuti dodatnim koracima sortiranja, dehidracije i usitnjavanja kako bi se proizvelo gorivo iz otpada (engl. Refuse-derived fuel - RDF) s poboljšanim svojstvima izgaranja. RDF se može spaljivati u namjenskim postrojenjima ili suspaljivati u drugim postrojenjima kao što su proizvodnja električne energije ili proizvodnja cementa. (Ioan-Robert Istrate et al, 2021.)

U prosjeku, odlaganjem i spaljivanjem 1 t miješanog komunalnog otpada proizvodi se 1807,0 kg ugljičnog dioksida CO₂-eq/t kod odlaganja odnosno 373,3 kg CO₂-eq/t emisija stakleničkih plinova kod spaljivanja. Stoga se predlaže da prioritet za obradu komunalnog otpada trebaju biti WtE postrojenja na bazi AD, WtE postrojenja i samostalni AD sustavi kako bi se osigurala maksimalna proizvodnja električne energije i ublažavanje emisija stakleničkih plinova. Emisije stakleničkih plinova su najosjetljivije na stopu recikliranja, udio suhe tvari i koeficijent električne energije. (Ying-Chu Chen i Hsiao-Man Liu, 2021.)

U nastavku rada će se pobliže objasniti tematika ugljičnog otiska kod energetske uporabe, kao i sama energetska uporaba, u kontekstu kružnog gospodarstva.

2. UGLJIČNI OTISAK

Ugljični otisak (engl. Carbon Footprint - CF) je skraćena za profesionalni izraz koji se široko koristi u javnoj domeni za suočavanje s prijetnjom koju predstavljaju klimatske promjene. (Muhammad S. Shaikh et al, 2018.) Ugljični otisak općenito se prihvaća kao pokazatelj za kvantificiranje emisija ugljičnog dioksida (CO₂) ili stakleničkih plinova (Greenhouse Gases - GHG) u smislu ekvivalenta CO₂ (CO₂-eq). Međutim, što je zapravo "ugljični otisak"? predložena znanstvena definicija "mjera isključive ukupne količine emisija ugljičnog dioksida koja je izravno i neizravno uzrokovana aktivnošću ili se nakuplja tijekom životnog vijeka proizvoda", te drugih stakleničkih plinova (posebno metana CH₄ i dušikov oksid N₂O) koji se obično naknadno dodaju mjernom rasponu istraživačke prakse.

S ciljem zadržavanja globalnog zatopljenja na znatno ispod 2 stupnja Celzijusa i "nastavljanja napora" da se ono ograniči na 1,5 stupnjeva Celzija predloženih Pariškim klimatskim sporazumom, ova aktualna tema zasigurno će biti postavljena na više razine popraćena ojačanim ciljevima smanjenja GHG.

Prevalencija CF leži u procijenjenom antropogenom GHG, koji je usko povezan s veličinom klimatske odgovornosti na pojedince ili organizacije, stoga je točno obračunavanje CF osnovni posao za unapređenje istraživanja. (Ru Chen et al, 2021.).

3. ENERGETSKA OPORABA OTPADA S NAGLASKOM NA UGLJIČNI OTISAK

Otpad se definira kao neupotrebljivi ili neželjeni materijali i smatra se kao tvar koja nije od koristi. Oni se mogu dobiti iz poljoprivrednog, kućanskog, komercijalnog i industrijskog sektora. Povećanje razine stakleničkih plinova i emisija ugljika, uključujući i emisije ugljika, može se povezati s visokom razinom stvaranja otpada na globalnoj razini. Stvaranje miješanog komunalnog otpada je u velikoj mjeri povezano s čimbenicima kao što su industrijski razvoj i gospodarski rast. To sugerira da razvijene zemlje s boljim gospodarskim razvojem proizvode veću količinu otpada. Stvaranje otpada između ostalog može biti posljedica tehnološkog razvoja, rasta stanovništva i urbane ekspanzije.

Rastuća nepouzdana proizvodnja energije i otpada dovodi do nekoliko ekoloških problema, uključujući emisije stakleničkih plinova, emisije ugljika, onečišćenje zraka i zemljišta. U 2011. godini na svijetu je nastalo dvije milijarde tona otpada, a procjenjuje se da će do 2050. doći oko 9 milijardi tona. Obnovljivi izvori energije su izvori bez emisija ugljika i stoga se deklariraju kao čista energija, čiji se udio globalne proizvodnje električne energije povećava svake godine. U posljednje vrijeme pretvorba biomase i prerada otpadnih voda u energiju sve više raste zbog smanjenog utjecaja na okoliš, povećanja sigurnosne opskrbe, niske cijene energije i klimatskih promjena. Tablica 1 uspoređuje tehnologije energije iz otpada, primarne proizvode, primjenu, prednosti i nedostatke. Slijedeći različite prednosti i nedostatke WtE tehnologije dane u Tablici 1, stanična mikrobna elektrolizu (engl. Microbial electrolysis cell - MEC) i mikrobne gorive ćelije (engl. Microbial fuel cell - MFC) pokazale su se kao ekološki najprikladnije WtE tehnologije. Međutim, zahtijevaju mnogo modifikacija uz optimizaciju radnih parametara, dizajna bioreaktora i sirovine kako bi se postigla visoka energetska učinkovitost. (E.K. Tetteh et al, 2021.)

Energetska i okolišna svojstva tehnologija WtE za obradu komunalnog otpada uspoređuju se u tablici 2 podaci su prikupljeni i analizirani zajedno i razmatrani su u nekoliko scenarija koristeći podatke iz više izvora. Oznake H M i L znače H -high odnosno visoko, M – medium odnosno srednje i L – low odnosno nisko (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

Tablica 1 Usporedba WtE tehnologija (E.K. Tetteh et al, 2021.)

WtE Tehnologije	Primarna produkcija	Primjena	Pozitivna strana	Negativna strana
Stanična mikrobna elektroliza (MEC)	Mravlja kiselina, vodikov peroksid, acetat, plin CH ₄ , H ₂	Trenutni tretman otpadnih voda i proizvodnja električne energije	Primjenjivost na brojne organske supstrate Niski energetske zahtjevi Visoka učinkovitost translacije vodika MFC, tamna fermentacija, visoka iskorištenost proizvoda (H ₂)	Visoki kapitalni troškovi, gusta arhitektura, visoka unutarnja otpornost, učinak prinosa prema sastavu otpada
Mikrobna gorivna ćelija (MFC)	H ₂ plin	Pročišćavanje otpadnih voda, proizvodnja biovodika, bioelektrična energija	Nulti doprinos emisijama stakleničkih plinova Učinkovita metoda proizvodnje električne energije i uklanjanja mirisa iz otpada.	Ne funkcionira na niskim temperaturama jer su mikrobne reakcije spore na niskim temperaturama
Tamna fermentacija	H ₂ plin	bioelektrična energija	Izvediviji za procese neovisne o svjetlosti i masovnu proizvodnju H ₂ Korištenje širokog spektra biorazgradivih supstrata	
Fotobiološki proces	H ₂ plin CO ₂ , organske kiseline	bioelektrična energija	Fotosintetske bakterije mogu koristiti široki spektar energije	Učinkovitost pretvorbe svjetlosti je niska. Enzimi nitrogenaze se inhibiraju u prisutnosti O ₂

Fermentacija etanola	Bioetanol	Poljoprivredna biorafinerija, gorivo	Ne pridonosi emisiji ugljika	Ograničeno je samo na bogati MSW/celulozu/škrob
Anaerobna digestija (AD)	Bioplin i digestat	Biorafinerija hrane, poljoprivredna gnojiva bogata dušikom, električna energija	Veći sastav metana i niži sastav ugljičnog dioksida od odlagališta Poželjno za biomasu s većim sadržajem vode	Lignin može postojati vrlo dugo da se razgradi Neprikladan za otpad koji sadrži manje organske tvari
Odlaganje	Odlagališni plinovi	Električna energija	Prirodni resursi se recikliraju Niska cijena	Onečišćenje podzemnih voda i tla
Rasplinjavanje	Plin za proizvodnju sintetičkog plina	Proizvodnja kemikalija i električne energije	Proizvodnja loživog ulja ili plina koji se može koristiti u različite svrhe	Visok rizik od neuspjeha U fleksibilnim, nezrelim, manje konkurentnim tehnologijama
Piroliza	Sintetički plin, bio-ulje, ugljen	Proizvodnja otapala i kemikalija, električna energija	Smanjenje volumena komunalnog otpada do 50% do 90% Smanjuje obradu dimnih plinova Proizvodi visokokvalitetno gorivo	Visoki kapitalni, operativni i troškovi održavanja Visoka viskoznost pirolize
Spaljivanje	Toplina	Proizvodnja pare ili topline i električne energije	Smanjenje mase i volumena do 70% odnosno 80% Prikladno za visoku kalorijsku vrijednost	Visoki troškovi rada, održavanja i kapitala

Tablica 2 Usporedba energetske i okolišne karakteristike za WtE proces iz komunalnog otpada (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

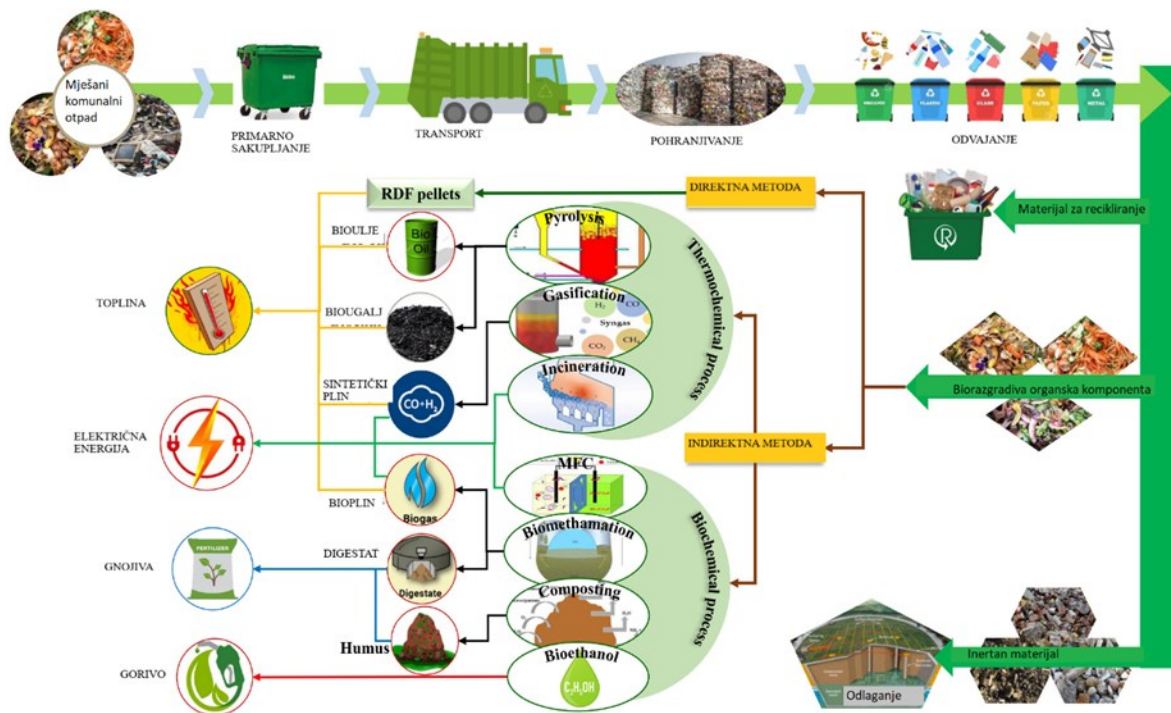
Kriteriji temeljeni na energiji i okolišu	Spaljivanje	Odlaganje otpada	Anaerobna digestija	Kompostiranje	Rasplinjavanje	Piroliza	Hidrotermalna karbonizacija
Životni vijek postrojenja, [god]	30	30	15-30	15-30	20-30	20	20
Sposobnost rukovanja mokrim otpadom	H	L	L	L	L	L	M
Sposobnost rukovanja opasnim otpadom	M	L	L	L	M	M	M
Proizvodnja energije (kgoe/t MSW)	36-45	4,5-9	9-13,5	-2.7–3.2	36-80	45-50	.
Mogućnost smanjenja količine komunalnog otpada [%]	75	60	60	50	82-90	84	90
Sposobnost uporabe proizvoda s dodanom vrijednošću	L	L	L	L	M-H	M	H
Udio komponente ostatka	M	M	H	H	L-M	M	L

Čvrste čestice [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$]	20	.	.	.	12,5-14,1	5,7	.
Otisak stakleničkih plinova, t CO ₂ eq/t MSW	1,67	1,97	1,19	1,61	1,3-1,5	0,7-1,2	.
NO _x [mg/m^3]	<400	.	.	.	<200	<50	.
SO _x [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$]	40	.	.	.	19	35	.

Pristupi WtE, poput spaljivanja, pirolize, rasplinjavanja, anaerobne digestije, biometanacije i uporabe odlagališnog plina, služe kao učinkoviti tretmani uporabe komunalnog otpada, a istovremeno dovode do energetske valorizacije. Ove metode imaju za cilj postizanje tri glavna cilja (Anh Tuan Hoang et al, 2022.):

- (i) Smanjiti ukupni volumen komunalnog otpada koji se odlaže na odlagališta bez obzira na to potječe li iz stambenog i poslovnog sektora.
- (ii) Minimizirati udio biorazgradivih tvari u krutom komunalnom otpadu, sprječavajući sekundarno onečišćenje okoliša s CH₄ koji nastaje razgradnjom biorazgradivih tvari.
- (iii) Valorizirati energetska sadržaj krutog otpada koji se ne može reciklirati u obliku električne energije i/ili topline.

S obzirom na tehnologiju, povrat energije putem WtE može se postići izravnim ili neizravnim putem. Izravne tehnologije provode izravno izgaranje goriva dobivenog iz otpada i drugog otpada, dok neizravni putovi obrade uključuju korake prethodne obrade prije proizvodnje energije. Nekoliko vrsta termokemijskih (npr. piroliza, spaljivanje, rasplinjavanje, itd.) i bioloških procesa (kompostiranje, fermentacija itd.) uključeno je u potonji proces. Ova se klasifikacija koristi u sadašnjem pregledu, a ilustrirana je na slici 1. Neki od proizvoda, poput bioulja i biougljena, mogu se tehnički koristiti za proizvodnju energije. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)



Slika 1. Suvremene tehnologije za proizvodnju energije iz otpada (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

3.1. Direktni procesi

Izravni ili direktni procesi WtE uglavnom uključuju masovno spaljivanje, kombiniranu proizvodnju topline i električne energije iz otpada, kao i proizvodnju i korištenje goriva iz otpada (RDF) u postrojenjima za spaljivanje. Ključni parametri tehnologija sažeti su u tablici 3. Masovno spaljivanje, koje uključuje spaljivanje nerazvrstanog komunalnog otpada, jedan je od popularnih pristupa gospodarenju komunalnim otpadom u svijetu. U tom kontekstu, više od 80% postrojenja za spaljivanje može se kategorizirati kao postrojenja za oporabu energije u 2015. godini, dok su ostali funkcionirali samo kao jedinice za konačno odlaganje. Očekuje se da će se ta brojka povećati kao rezultat izgradnje novih WtE postrojenja ili naknadnog opremanja postojećih postrojenja za spaljivanje. Neka postrojenja, osobito u Europi, mogla bi funkcionirati kao kombinirana toplinska postrojenja i elektrane, koja bi mogla postići prosječnu učinkovitost od 68% (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

RDF postrojenja dizajnirana su tako da pružaju opsežniju strategiju korištenja komunalnog otpada. Nadalje, uspješan rad ovakvih elektrana pridonio je ispunjenju cilja zadovoljavanja najmanje jedne desetine potreba za električnom energijom u regiji putem obnovljivih izvora energije. Potencijalne koristi od MSW-a za preradu RDF-a su značajne, jer se na taj način može izbjeći prekomjerno odlaganje otpada. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

U Ujedinjenom Kraljevstvu, pozornost na razvoj obnovljive energije dobivene iz RDF-a raste. Tijekom desetljeća koje je prethodilo obrada RDF-a iz WtE postrojenja smanjila je odloženi komunalni otpad na odlagalištima za približno 50%. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

3.1.1. Osvrt na ugljični otisak

Proizvodnja RDF-a iz MSW-a također postaje sve popularnija na Bliskom istoku. Iako je drugi proizvođač nafte u svijetu, Saudijska Arabija je značajno uložila u istraživanje WtE, a posebno u RDF. Ovaj napor dodatno je motiviran rastućom potražnjom za energijom u zemlji, za koju se predviđa da će dostići 100 GW do 2032. U usporedbi s Ujedinjenim Arapskim Emiratima, proizvodnja RDF-a u Saudijskoj Arabiji još uvijek zaostaje za susjednom zemljom, pri čemu je izgradnja njezinog prvog postrojenja RDF-a započela tek u listopadu 2020. Takav je projekt pokrenut u okviru javno-privatne inicijative, koji ima za cilj pretvoriti do 80% komunalnog otpada u RDF. S obzirom na njegovu visoku gustoću energije, RDF proizveden iz komunalnog otpada prikladan je za zamjenu ugljena kao alternativnog izvora energije u industriji cementa uz smanjenje potencijalnog CO₂ za najmanje 40%. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

U Južnoj Africi više od dvije trećine svoje potrošnje energije oslanja se na ugljen, koji uzrokuje značajne emisije stakleničkih plinova u regiji. Ovi čimbenici dalje propagiraju napredak proizvodnje RDF-a iz MSW-a ne samo u Južnoj Africi nego i u Indoneziji, Indiji i Tajlandu. Konkretno, Indonezija, s predviđenom proizvodnjom komunalnog otpada od 150.000 t/d, predstavlja ogroman potencijal za primjenu takve tehnologije. Pokrenuti su značajni naponi u pronalaženju učinkovitih rješenja za gospodarenje komunalnim otpadom, a proizvodnja RDF-a iz njega igra ključnu ulogu u takvim inicijativama. Drugi veliki naponi

uključuju programe koje su preuzele vlade Indije i Tajlanda, koje su podržale politiku omogućavanja podrške razvoju tehnologija i ključnih infrastruktura za proizvodnju RDF-a iz komunalnog otpada, s ciljem zamjene energije ugljena. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

Upotreba RDF peleta također je uobičajena u nekoliko industrija kao što su papirna, drvna, cementna. Druge vrste otpada, uključujući aktivni mulj, agrootpad i rabljene gume, također se mogu koristiti kao sirovine za izravne WtE procese. Ovi izvori imaju nekoliko velikih nedostataka vezanih uz emisije gorivnih plinova i teških metala, posebice u slučaju aktivnog mulja. Unatoč tome, njihove primjene u WtE još uvijek prevladavaju u usporedbi s otvorenim masovnim spaljivanjem ili odlaganjem otpada s ponuđenim mogućnostima proizvodnje energije. Reprezentativno, autori su došli do rezultata jednog postrojenja da ono generira od 8.000 kJ/kg do 14.000 kJ/kg energije izgaranjem RDF peleta dobivenih iz MSW-a. Uzimajući u obzir ovaj visoki energetske prinos, proizvodnja RDF peleta iz MSW-a nudi isplativo rješenje za poboljšanje trenutne prakse gospodarenja otpadom uz istovremeno pružanje održivog izvora obnovljive energije. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

Unatoč atraktivnosti za proizvodnju energije, jedan od glavnih nedostataka masovnog spaljivanja komunalnog otpada je emisija CO₂ i drugih stakleničkih plinova. Prema izvješćima IPCC-a, glavni doprinos emisijama CO₂ iz spaljivanja otpada dolazi od izgaranja komponenti čvrstog otpada fosilnog podrijetla. Oslobođanje CO₂ iz ugljika pohranjenog u biomasi (npr. proizvodi od papira, drvo, hrana i otpad iz dvorišta) smatra se bliskim neutralnim u odnosu na proces globalnog zagrijavanja. Od ključne je važnosti promicati sortiranje i odvajanje izvora, kao i recikliranje kako bi se smanjio otisak stakleničkih plinova u tokovima spaljivanja komunalnog otpada. Decentralizirani sustavi grijanja kao što su peći na biomasu i kotlovi na ugljen / prirodni plin tradicionalno se koriste u stambenim i poslovnim zgradama. U usporedbi s tim, opskrba kućanstvima toplinom iz centraliziranih postrojenja za proizvodnju topline i električne energije putem daljinskog grijanja mogla bi značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova i drugih onečišćujućih tvari u zrak.

U situacijama kada korištenje daljinskog grijanja nije izvedivo, predloženo je uvođenje WtE za proizvodnju električne energije, koja se potom distribuira kućanstvima za izravno električno grijanje. Štoviše, sustavi izravnog električnog grijanja mogu iskoristiti električnu

energiju proizvedenu iz procesa WtE, što bi moglo smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima i istovremeno smanjiti količinu čvrstog otpada koji se šalje na odlagališta. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

Tablica 3 Ključni parametri izravnih WtE procesa (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

Parametar	Sažetak
Udio uporabe energije	Velika većina spalionica u EU uključuje uporabu i korištenje energije – prelazi 80%
Energetska učinkovitost	68% od 2015
Proizvodnja RDF-a	Veliki potencijal za smanjenje količine otpada na odlagalištima – preko 50%
Smanjenje stakleničkih plinova	Do 50% smanjenje emisija stakleničkih plinova iz stvarnog WtE postrojenja
Problemi s emisijama	Čestice (PM)

Uz kontinuirani napredak u istraživanju, napredne WtE tehnologije opremljene su da ispuštaju manje količine onečišćujućih tvari u zrak. Autori su izvijestili o rezultatima demonstracije WtE postrojenja koje koristi preostali otpad i gorivo dobiveno od otpada (RDF). Rezultati pokazuju da bi integracija sustava izravnog električnog grijanja s procesima WtE smanjila potencijalne stakleničke plinove za čak 63% u odnosu na izgaranje ugljena i za 3% u odnosu na izgaranje biomase. Spajanjem s mehaničkom ili biološkom obradom, WtE procesi mogu pretvoriti kruti otpad, koji se ne može uporabiti izravno u korisne oblike energije, u sirovinu poznatu kao gorivo iz otpada (RDF). Takav proces pretvorbe pokriva nekoliko primarnih koraka, u rasponu od preliminarnog sortiranja, probira po veličini, usitnjavanja, magnetskog odvajanja i konačno, peletiranja za praktično skladištenje i transport. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

3.2. Neizravni procesi

3.2.1. Termokemijski procesi

Termokemijska pretvorba WtE obično uključuje toplinski proces za proizvodnju goriva ili topline iz komunalnog otpada. Budući da mnogi izvori informacija, uključujući i neke od izvora literature korištenih u ovom pregledu, koriste jedinicu “kgoe”, ona je također pristuna i u ovom radu. Ova jedinica definirana je kao približna količina energije koja se može dobiti iz 1 kg sirove nafte, kojoj je dodijeljena niža ogrjevna vrijednost od 41.868 kJ/kg. (Eurostat, 2022)

3.2.1.1. Spaljivanje

Spaljivanje je popularna i jeftina metoda za stvaranje topline izgaranjem materijala. Na temperaturi iznad 800 °C, zapaljiva sirovina izgara u prisutnosti kisika, što rezultira toplinskom energijom, dimnim plinovima i pepelom. Takav je proces često opremljen reguliranim modulom izgaranja u kombinaciji s hvatanjem topline za proizvodnju pare, koja se koristi u pogonu turbinskih generatora (Materazzi i Foscolo, 2019.). U slučaju komunalnog otpada, u procesu spaljivanja može se potaknuti smanjenje volumena 70-80%. Osim energije, spaljivanjem otpada nastaje i znatna količina anorganske troske koja sadrži tragove teških metala. Studija spaljivanja komunalnog otpada čak je zabilježila energetske učinkovitost od 20-25%, što je rezultiralo otprilike 36-45 kgoe/t MSW-a (Kathirvale et al., 2004.). Početna kapitalna ulaganja i troškovi usklađenosti su na srednjoj i visokoj razini, uglavnom zbog visokih troškova i teških strojeva (npr. peći) i kvalificirane radne snage. U smislu prinosa energije čimbenici poput gustoće, sastava, postotka vlage i inertnih spojeva u otpadnoj sirovini važni su parametri. Optimizacija tih parametara u kontroliranom okruženju izgaranja ključ je za maksimalno uklanjanje otpada i dobivanje topline. U usporedbi s drugim dostupnim alternativama, spaljivanje je ekonomski privlačnije, ali je potrebno integrirati protumjere za kogeneraciju pepela, dimnih plinova, dioksina i kiselih plinova (NO_x, SO_x i HCl). Praćenje i obrada takvih ispušnih plinova može uzrokovati značajne troškove ako se njima ne rukuje pravilno (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

Drugi razmatrani problemi također uključuju identifikaciju zagađivača i čimbenika utjecaja iz postrojenja za spaljivanje, zdravstvene rizike, kao i analizu životnog ciklusa o energetske učinkovitosti, potencijalu globalnog zagrijavanja, PM, ekotoksičnosti, potencijal iscrpljivanja resursa (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

3.2.1.1.1. Osvrt na ugljični otisak

Iz perspektive stakleničkih plinova, većina LCA studija smatra da je spaljivanje poželjnije u odnosu na odlaganje na odlagalištima zbog visokog povrata energije. U nekim studijama, međutim, odlaganje otpada rezultira manjim emisijama stakleničkih plinova nego kod spaljivanja. Znanstvenici su pomoću LCA modela došli do zaključka da samo odlagališta s visokom učinkovitošću prikupljanja odlagališnog plina (najmanje 81%) i povrata metana za energiju rezultiraju s manjim emisijama stakleničkih plinova u usporedbi s upravljanjem istim tokom otpada prilikom spaljivanja; potrebna učinkovitost povećana je na 93% bez povrata energije odlagališnog plina. Prag učinkovitosti prikupljanja odlagališnog plina iznosi 81–93% kako bi odlagalište rezultiralo manjim emisijama stakleničkih plinova od spaljivanja (Malak Anshassi et al, 2022.).

3.2.1.2. Piroliza

Pirolitičke temperature su u rasponu između 300 °C i 850 °C, pri čemu se toplina dovodi izvana kako bi se pokrenuo proces. Ovisno o uvjetima pirolize, proces također može dati piroulja, vosak i katran. Slično drugim termokemijskim procesima, pirolizom se može dobiti velika količina energije iz komunalnog otpada, ali s nižim emisijama NO_x i SO_x zbog odsutnosti kisika. S druge strane, nekoliko vrsta zapaljivih plinova i drugih spojeva obično se nalazi u sintetičkom plinu, uključujući vodik (H₂), ugljični monoksid (CO), metan (CH₄) i nekoliko različitih vrsta HOS-ova – povezanih s učincima CO₂ (Lee et al., 2020.) i potrebu za čišćenjem sintetičkog plina. Povremeno se javlja i stvaranje čvrstog ugljena, pri čemu je njegov sastav prilično složen, često karakteriziran ugljikom i nezapaljivim anorganskim

komponentama. Neto ogrjevna vrijednost sintetičkog plina proizvedenog procesom pirolize obično se mjeri između 10 i 20 MJ/Nm³ (Schmitt i sur., 2012.).

3.2.1.2.1. Osvrt na ugljični otisak

Općenito, piroliza i nadogradnja piroliznog ulja pokazuju značajno manje izravne emisije u usporedbi s procesima koji se temelje na rasplinjavanju. Međutim, kako se proizvodi pirolize koriste za zamjenu fosilnih sirovina u konvencionalnim procesima, emisije povezane s konvencionalnim procesima će stoga i dalje pridonositi ukupnim emisijama duž puteva koji se temelje na pirolizi. Stoga, za razliku od scenarija temeljenih na rasplinjavanju, scenariji temeljeni na pirolizi pokazuju znatno niže smanjenje ukupnih GHG. Dodatni čimbenici koji doprinose su emisije povezane sa spaljivanjem ostataka pirolize, kao i dodatna potražnja za proizvodnjom vodika za nadogradnju piroliznog ulja na ekvivalent nafte (Florian Keller et al, 2022.).

3.2.1.3. Rasplinjavanje

Rasplinjavanje je popularna metoda obrade komunalnog otpada. Nudi proizvodnju topline i zapaljivog sintetičkog plina koji se može koristiti za proizvodnju električne energije. Obično sintetički plin sadrži (Chan i sur., 2019.) vodik (H₂) i ugljični monoksid (CO), povremeno s tragovima metana (CH₄). Njegova proizvodnja iz komunalnog otpada obično se odnosi na organske dijelove i dijelove biomase, koji su osjetljivi na visokotemperaturnu razgradnju. Sadržaj energije mjeren iz sintetičkog plina obično je između 4 i 50 MJ/Nm³, što je otprilike jedna trećina udjela u konvencionalnom prirodnom plinu (Chan et al., 2019.). Proizvodnja sintetičkog plina iz komunalnog otpada obećava jer se lako može iskoristiti postojeća infrastruktura prirodnog plina za skladištenje, transport i distribuciju bez potrebe za naknadnom ugradnjom. Osim toga, moguć je povrat topline iz struje sintetičkog plina, budući da se rasplinjavanje obično provodi na visokim temperaturama. Daljnja uporaba energije može se potaknuti spaljivanjem sintetičkog plina u plinskim turbinama i motorima s

unutarnjim izgaranjem za proizvodnju energije. Troska koja nastaje procesom rasplinjavanja je uglavnom anorganski sadržaj, koji se može primijeniti u cestogradnji. U usporedbi s prethodnom metodom spaljivanja, rasplinjavanje je prikladnije za preradu komunalnog otpada sa znatnim anorganskim udjelom (Yong i sur., 2019.). Intenziviranje rasplinjavanja, na primjer, rasplinjavanje integrirano u plazmu, obećavajuća je obrada otpada. U tom procesu, zrake plazme na ekstremno visokim temperaturama od 2 000 – 14 000 °C usmjeravaju se na komunalni otpad, što dovodi do sljedeća četiri uzastopna procesa na MSW: sušenje radi uklanjanja vlage, pirolize u anoksičnim uvjetima za otpuštanje hlapljivih tvari, izgaranje ugljenog ostatka s kisikom za proizvodnju energije i konačno proces redukcije za proizvodnju sintetičkog plina (Indrawan i sur., 2019.).

Primjena rasplinjavanja za obradu komunalnog otpada ima nekoliko važnih prednosti. Primjetno je da je kontrolirano dovođenje kisika u reaktor važno za smanjenje stvaranja dioksina u ispušnim plinovima (npr. dušikovi oksidi (NO_x) i oksidi sumpora (SO_x)). U usporedbi s metodama spaljivanja i pirolize, rasplinjavanje stvara višu prosječnu neto energiju od 36-63 kgoe/t MSW-a, dok bi je intenziviranje plazmom moglo dodatno povećati na 63-81 kgoe/t MSW-a. Uz proces rasplinjavanja, učinkovito smanjenje volumena čvrstog otpada, do 80-90%, moglo bi se postići i u pretpostavci o proizvodnji sintetičkog plina. Takav sintetski plin koristan je za proizvodnju električne energije kroz integraciju plinske turbine ili modula gorivnih ćelija. Međutim, postoje negativni aspekti povezani s proizvodnjom katrana, pepela, čestica i teških metala tijekom procesa rasplinjavanja. Ove tvari imaju tendenciju nakupljanja u rasplinjaču i smatraju se štetnim za okoliš. Posebnu pozornost treba posvetiti reakcijama koje djeluju na >1, 100 °C jer to može olakšati stvaranje katrana, što dovodi do začepjenja reaktora. Periodično čišćenje plina moglo bi biti korisna strategija za sprječavanje gore navedenog problema začepjenja uklanjanjem ne samo katrana, već i PM, teških metala, HCl i H₂S koji su se nakupili u reaktoru (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

3.2.1.3.1. Osvrt na ugljični otisak

Trenutno, rasplinjavanje komunalnog otpada tek treba postići dovoljnu društvenu, komercijalnu i tehnološku spremnost za širu primjenu, prvenstveno zbog emisija štetnih

onečišćivača zraka kao što su SO_x, CO i NO_x, zajedno s drugim hlapljivim organskim spojevima (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

Trebalo bi poduzeti učinkovite mjere, kao što je ugradnja postrojenja za hvatanje i obradu emisija plinova, kako bi se smanjilo onečišćenje. Osim toga, postprocesni tretmani pepela i drugih toksičnih ostataka također imaju ključnu ulogu u minimiziranju utjecaja na okoliš . (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

3.2.1.4. Hidrotermalna karbonizacija

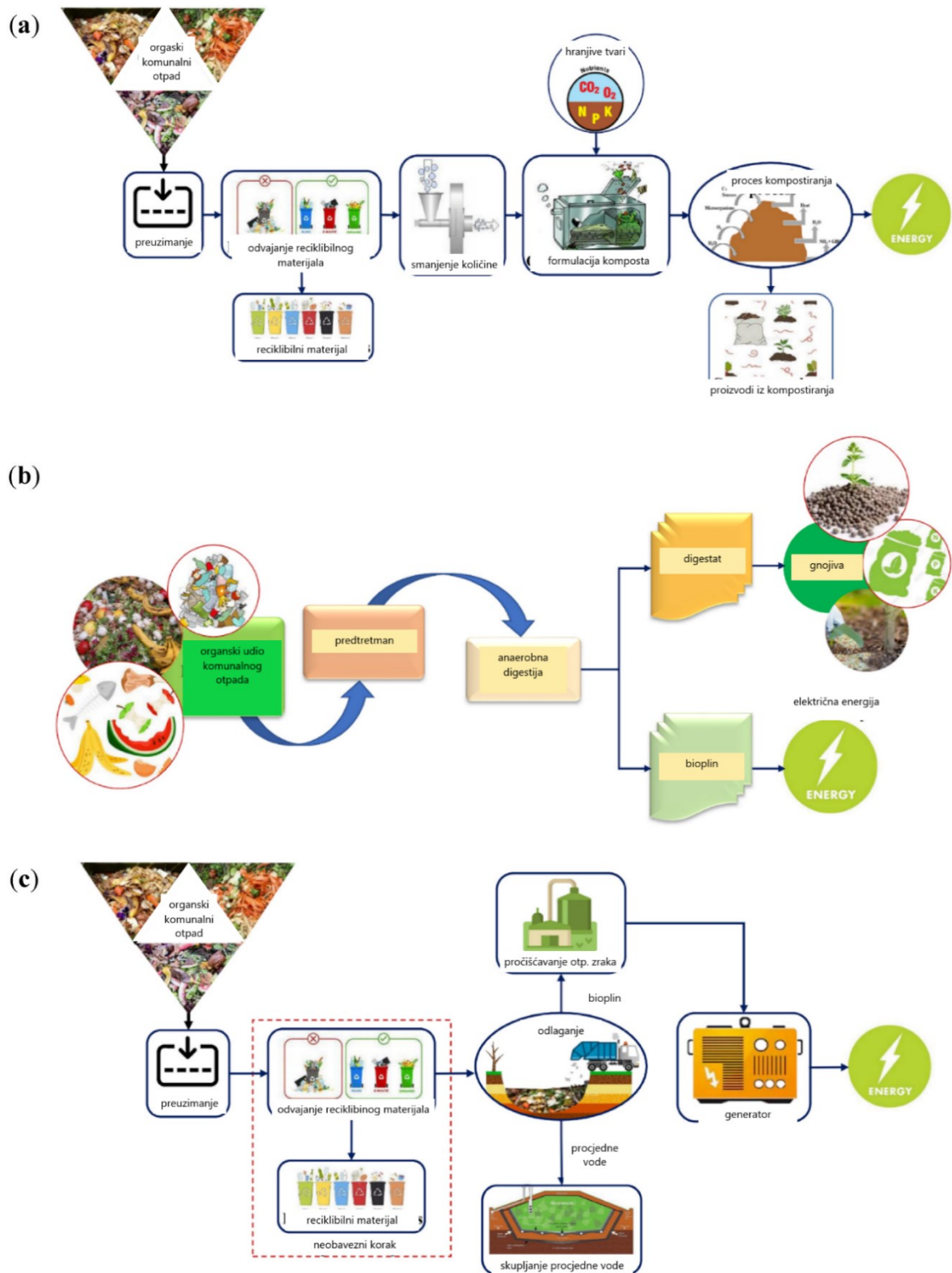
Hidrotermalna karbonizacija (eng. HTC - Hydrothermal carbonization) je kemijski proces koji pretvara organske tvari u strukturirani ugljik pomoću vode pod tlakom zagrijane na visoku temperaturu. Može se poslužiti kao predproces za biomasu ili modificiranu biomasu s visokim udjelom vlage prije početka glavnog procesa. Modifikacije, poput uklanjanja anorganskog segmenta, usitnjavanja supstrata, te dodatnih i miješanja promotivnih aditiva, mogu poboljšati performanse HTC-a. Često krutina na bazi ugljika, široko poznata kao hidrougljen, nastaje iz HTC procesa koji zagrijava biomasu pod uvjetima od 180–250 °C i 1,2–2,5 MPa. S druge strane, trajanje tretmana može biti između 2 i 16 sati u vodenoj fazi. Postoji nekoliko čimbenika, uključujući tlak kisika, brzinu miješanja, temperaturu i trajanje reakcije, koji mogu utjecati na učinkovitost i ishode procesa mokre oksidacije. Među važnim prednostima HTC-a, mokra biomasa može se prerađivati bez potrebe za dodatnom dehidracijom ili korakom sušenja, što se pokazalo skupim. HTC također može uspostaviti 90-95% smanjenja volumena za komunalni otpad, što se smatra troškovno učinkovitim i manje dugotrajnom alternativom anaerobnoj digestiji i odlaganju za obradu krutog otpada. S ekonomske perspektive, HTC je također favoriziran zbog svoje održive značajke, sudeći po njegovom potencijalu u ostvarivanju profitabilnih rezultata. Takva tehnologija trenutno ima nisku stopu usvajanja, vjerojatno zbog niske društvene i tehnološke spremnosti. Dodatne sigurnosne mjere moraju biti uključene i za HTC jer često uključuje rad pod tlakom pri srednje visokim temperaturama (Munir i sur., 2021.).

3.2.1.4.1. Osvrt na ugljični otisak

Hidrotermalna karbonizacija je dostatna s obzirom na energiju i vodu, ima nizak utjecaj na okoliš, jer može povratiti do 99% inicijalnog ugljika i izbjeđava njegovo širenje u okoliš u obliku CO₂ ili metana. Nadalje, nema izgaranja i ne ispušta se sitna prašina u atmosferu. Jedina emisija je kod sušenja bio-ugljena i uglavnom se sastoji od vodene pare. Izračunato je da se za svaku tonu organskog otpada obrađenog hidrotermalnom karbonizacijom, umjesto postrojenjem za kompostiranje s digestorom, izbjeđava ulazak 1,3 tone ugljičnog dioksida u atmosferu. (Anonymous)

3.2.2. Biokemijska pretvorba

Biokemijska pretvorba je enzimski proces koji može razgraditi različite vrste biomase uz pomoć bakterija ili drugih mikroorganizama. Zbog niske produktivnosti, obično su potrebna veća kapitalna ulaganja (npr. reaktori veće veličine) kako bi se postigla poželjna propusnost. U nekim slučajevima se ugrađuju dodatni bakterijski enzimi i mikroorganizmi kako bi se povećao prinos procesa. U tom smislu, naslijedio je tipičnu osjetljivost drugih bioprocasa, pri čemu temperatura, pH, izloženost suncu itd. utječu na njegove rezultate. Često su potrebni strogi enzimski uvjeti sa strogom kontrolom kako bi se osigurala funkcionalnost enzima i uspjeh procesa. Neke metode proizvodnje energije iz komunalnog otpada temeljene na procesu biokemijske pretvorbe su prikazane na slici 2. (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).



Slika 2 Proizvodnja energije kompostiranjem (a), anaerobnom digestijom (b) i odlaganjem (c) (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)

3.2.2.1. Kompostiranje

Čvrsti otpad općenito sadrži razgradive, nerazgradive i djelomično razgradive materijale. U zemljama u razvoju, razgradivi otpad čini veći dio krutog otpada koji se općenito odlikuje visokim udjelom vlage i zahtijeva pravilno upravljanje. Stoga se kompostiranje koristi kao biološki tretman za gospodarenje krutim otpadom. Kompostiranje je definirano kao mikrobn biokemijski proces u kontroliranim uvjetima koji povećavaju stopu razgradnje organske tvari. Kompostiranje može pretvoriti čvrsti otpad u sanitarne, stabilne i onečišćujuće materijale. Kompostiranje uključuje serijsku mikrobnu zajednicu koja provodi razgradnju čvrste organske frakcije u vodu, ugljik, minerale i stabilizirani kompost bogat hranjivim tvarima. Glavni koraci kompostiranja su (a) početna mezofilna faza, u kojoj mezofilne bakterije i gljive brzo podižu temperaturu i provode mineralizaciju jednostavnih spojeva kao što su aminokiseline i šećeri (ugljikohidrati) proizvodeći toplinu, CO₂ i vodu. To dovodi do djelomično stabiliziranog organskog otpada, (b) Druga je termofilna faza, u kojoj termofilne bakterije i gljive provode razgradnju složenih organskih materijala poput celuloze, hemiceluloze, lignina i masti. Mikrobna reakcija povećava temperaturu kompostne hrpe. Toplina povećava brzinu razgradnje i inaktivira patogene mikroorganizme. Općenito, bakterije iz roda *Thermus* obično se primjećuju na maksimalnim temperaturama komposta. Fazu hlađenja kompostiranja ponovno koloniziraju mezofilni mikroorganizmi koji razgrađuju preostale ugljikohidrate, hemicelulozu, celulozu i druge humusne tvari. Zatim slijedi smanjenje razgradnje organskog materijala i porast brzine humifikacije i polimerizacije. Na zrelost komposta i brzinu biorazgradnje utječe prisutnost određenih mikroorganizama. Kompostiranje smanjuje opterećenje na odlagalištima i djeluje kao kondicioner. Troškovi transporta glavni su nedostatak kompostiranja (Nidhi Kundariya et al, 2021.).

Tijekom procesa stvara značajna toplina komposta, koja se također može iskoristiti kao obnovljiva energija. Prema jednoj studiji potvrđena je proizvodnja topline od 3–18 MJ iz svakog kilograma kompostiranog organskog otpada. Reprezentativan je za ukupnu energiju oslobođenu od potpunog izgaranja i oksidacije svake jedinice organskog otpada. U zasebnoj

studiji autori su uspješno povratili 38% topline proizvedene u procesu kompostiranja (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

3.2.2.1.1. Osvrt na ugljični otisak

Kompostiranje je aerobni biološki proces koji razgrađuje organski otpad u vrijedno gnojivo i stajski gnoj. Njegova primjena na organski komunalni otpad može smanjiti emisije stakleničkih plinova, dok je dobiveno gnojivo često bogato biljnim hranjivim tvarima. Uz gnojivo se također može dobiti voda (H_2O), ugljični dioksid (CO_2), nitrat (NO_3), sulfat (SO_4), amonijak (NH_3), organske kiseline (Anh Tuan Hoang et al, 2022.). Emisije metana, koji je staklenički plin sa snažnim učincima, su velike ukoliko se biorazgradivi otpad odlaže na odlagališta, kompostiranjem biorazgradivog otpada smanjuju se emisije metana (Ivan Mihaljević, 2016.).

3.2.2.2. Anaerobna digestija

Anaerobna digestija (AD) koristi se za oporabu energije iz biorazgradivog i vlažnog otpada kao što je otpad od hrane i mulj od stoke. Anaerobna digestija smatra se vjerodostojnim procesom zbog svoje ekonomske i tehničke održivosti u usporedbi s drugim dostupnim tehnikama poput pirolize, spaljivanja, rasplinjavanja i kompostiranja. Također, anaerobna digestija ima manji utjecaj na kvalitetu zraka i pridonosi minimiziranju emisija ugljičnog dioksida proizvodnjom energije u zamjenu fosilnih goriva. AD koristi mikroorganizme za pretvaranje biomase u bioplin koji je sadržan od metana i ugljičnog dioksida. Anaerobna digestija se provodi procesima/koracima hidrolize, acidogeneze, acetogeneze i metanogeneze. Ove korake izvode hidrogenotrofne bakterije, acidogene bakterije, zajedno s acetogenim i metanogenim bakterijama. AD proces počinje hidrolizom. To je znatno sporiji korak koji može ograničiti ukupnu brzinu digestije. AD proces koristi različite supstrate koji su klasificirani kao industrijski, poljoprivredni i komunalni otpad. Poljoprivredni otpad je najčešće korišteni supstrat za AD. U Indiji je iskustvo u tretiranju krutog organskog otpada

anaerobnom digestijom ograničeno, osim stajnjaka i kanalizacijskog mulja. Čvrsti komunalni otpad u Indiji bogat je vlagom i organskom tvari, dobro je prilagođen za anaerobnu digestiju. Anaerobna digestija može se podijeliti na suhu ili mokru, ovisno o količini vode. Hranjive tvari prisutne u tekućem digestatu mogu se povratiti kroz različite tehnologije bio-rafinerije. Kruti digestat se također može koristiti kao kompost i ima iste prednosti kao organski regenerator u tlu (Nidhi Kundariya et al, 2021.).

Konvencionalni AD procesi (bez predobrade) koji se oslanjaju na obradu mulja pokazali su nisku energetska učinkovitost zbog produljenog trajanja potrebnog za potpunu probavu, a prethodna obrada supstrata često rezultira značajnim energetskim dobitcima. Predloženo je nekoliko tehnika prethodne obrade u obliku mehaničkih, kemijskih, bioloških i fizikalno-kemijskih sredstava za prevladavanje ovog problema kako bi se povećala proizvodnja bioplina/metana i ukupni veći energetski izlaz. Unatoč tome, tipični AD ima nižu razinu energetskog intenziteta u usporedbi s drugim metodama obrade otpada. Energetska učinkovitost i učinak AD procesa ovise o sastavu organske sirovine i nekoliko kritičnih radnih uvjeta, kao što su brzina organskog punjenja, sadržaj hranjivih tvari u smislu omjera ugljik-dušik, pH razina, temperatura, sadržaj vlage, i vrijeme zadržavanja. Uz optimalne radne postavke, mogla bi se postići proizvodnja energije od 9–13,5 kgoe/t MSW organskog unosa. Općenito, većina anaerobnih digestora mogla bi proizvesti neto pozitivnu proizvodnju energije. AD proces se naširoko smatra izvorom energije u raznim industrijama, posebno industriji palminog ulja. Općenito, serija AD daje najveću neto izlaznu energiju sa svojim manjim razmjerom koji olakšava precizno upravljanje. Postoji nekoliko prednosti povezanih s AD, uključujući izlaz bioplina i digestata, pri čemu bi se bivši proizvod mogao poslužiti kao obnovljivi izvor energije za proizvodnju električne energije. Osim toga, AD proces zahtijeva minimalnu automatizaciju i tehničke preduvjete, čime je niska cijena za svoj rad dok je pristupačnija za većinu industrija. Njegova visoka razina društvene, komercijalne i tehnološke spremnosti dodatno je zagovarala njegovo usvajanje u praksi. S druge strane, još uvijek postoji nekoliko izazova u provedbi anaerobne digestije komunalnog otpada. Iako su operativni troškovi atraktivni, početna kapitalna ulaganja za velike digestore su visoka. Također, nekoliko toksičnih komponenti, kao što su teški metali, ne smiju biti u procesu, a sekundarna obrada i odlaganje su još uvijek potrebni nakon AD. Sve u svemu, AD je još

uvijek privlačan zbog svojih općenito niskih tehničkih i operativnih troškova, kao i zbog ekološki održivog svojstva koje pretvara otpad u energiju. Odgovarajući napredak u tom području značajno je poboljšao AD proces, što je dovelo do njegove povećane implementacije u različitim industrijama na globalnoj razini. Međutim, troškovi povezani sa skladištenjem i rukovanjem digestatom trenutno su važna pitanja koja treba riješiti. Eventualna primjena pred-aeracije može povećati prinos metana, ali i snositi visoku cijenu za korištenje energije (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).

3.2.2.2.1. Osvrt na ugljični otisak

Procjena otiska emisija ugljika unutar pet različitih AD postrojenja uzimajući u obzir potrošnju i proizvodnju energije kroz LCA pristup pokazuje smanjenje ugljičnog otiska od $-0,208$ do $-1,07$ kg CO₂eq kWh⁻¹, čemu pridonosi supstitucija proizvodnje energije iz fosilnih goriva. (Yee Van Fan et al, 2018).

Proizvodnja energije putem AD otpada značajno može pridonijeti sustavima proizvodnje energije s niskim udjelom ugljika i kružnoj bioekonomiji. AD proces tretiranja otpada pokazao je obećavajuće rezultate za valorizaciju otpada za čišćenje energije-biometana kako u ekološkom tako i u ekonomskom aspektu. Točnije, obradi li se 1 t komunalnog miješanog otpada anaerobnom digestijom može se postići smanjenje stakleničkih plinova od -54 do -272 kg CO₂ eq. Rezultati LCA pokazali su da bi takav bioenergetski sustav također doveo do uštede na resursima i do unapređenja kvalitete ekosustava (Na Duan et al, 2020.).

3.2.2.3. Odlaganje

Odlaganje otpada jedna je od najdugovječnijih i najpopularnijih metoda obrade komunalnog otpada. Slično anaerobnoj digestiji, bioplin (također poznat kao plin odlagališta u ovom slučaju) također se može prikupiti s odlagališta komunalnog otpada putem prirodne pojave digestije. U otvorenom okolišu, prilično složen proces različitih biokemijskih reakcija mogao

bi se potaknuti na razgradnju komunalnog otpada, što bi potom dovelo do stvaranja odlagališnog plina. Takav degradacijski proces može se pokrenuti od početne prilagodbe, nakon čega slijedi prijelazna faza, kisela faza, faza metanske fermentacije i na kraju faza sazrijevanja. Umjesto da se slobodno ispušta u atmosferu, deponijski plin bi se trebao uhvatiti i koristiti u energetske svrhe. Međutim, odlagališni plin obično je nižeg kvaliteta zbog niskog sadržaja metana, dodatno pogoršanog njegovom korozivnom prirodom s koegzistirajućim H₂S. Korištenje odlagališnog plina je relativno mukotrpnije, što se može organizirati u sljedećim operativnim fazama: degradacija komunalnog otpada, prikupljanje deponijskog plina kroz mrežu ekstrakcijskih bunara i cijevi, primarna obrada, dodatna prerada za poboljšanje kvalitete i konačna upotreba kao obnovljivi izvor energije (Malav et al, 2020.).

Slika 2 c prikazuje primarni proces koji je uključen u obradu komunalnog otpada na odlagalištima. Tradicionalni proces odlaganja otpada opisan je kao skupljanje i odlaganje komunalnog otpada budući da se ovaj otpad odlaže na razna odlagališta, a minimizira potencijalnu kontaminaciju tla i vode. Odlagališta se mogu kategorizirati prema vrsti otpada koji se odlaže, kao što su komunalni otpad, industrijski otpad i opasan otpad (tj. sigurna odlagališta). Naime, integrirani proces ekstrakcije koji se može reciklirati nije dostupan na svim lokacijama odlagališta. S obzirom na sličan volumen ulaznog organskog otpada, odlaganje može proizvesti samo oko polovicu količine bioplina (tj. između 4,5 i 9 kgoe/t MSW-a), što ga čini inferiornim u odnosu na anaerobnu digestiju. Međutim, s obzirom na njihovu široku dostupnost, odlagališta se potencijalno mogu nalaziti na rubnom zemljištu. U usporedbi s drugim metodama obrade komunalnog otpada, odlaganje je iznimno jednostavno i ne zahtijeva kvalificiranu radnu snagu za rad. Unatoč niskoj kvaliteti, bioplin zahvaćen s odlagališta još uvijek se može koristiti za proizvodnju energije nakon odgovarajuće obrade. Ostale prednosti odlagališta uključuju dugi vijek trajanja (tj. između 30 i 50 godina), niske operativne troškove, kao i njegovu srednju do visoku razinu društvene, komercijalne i tehnološke spremnosti. S druge strane, veliki prostor je neophodan, a komunalni otpad se mora prikupljati i slati na određena odlagališta. Što je još važnije, njegov rad je kritiziran zbog niske održivosti, što ujedno nailazi na ogroman društveni pritisak na povećanu svijest javnosti o zelenim procesima (Weiland, 2010).

3.2.2.3.1. Osvrt na ugljični otisak

Znanstvenici su pomoću LCA modela došli do zaključka da samo odlagališta s visokom učinkovitošću prikupljanja odlagališnog plina (najmanje 81%) i povrata metana za energiju rezultiraju s manjim emisijama stakleničkih plinova u usporedbi s upravljanjem istim tokom otpada prilikom spaljivanja; potrebna učinkovitost povećana je na 93% bez povrata energije odlagališnog plina. Očekivana teoretska učinkovitost skupljanja odlagališnog plina modelirana je u rasponu od 30-80%, pri čemu su niže stope povezane s odlagalištima koja imaju manju ulaznu masu, visoke stope raspadanja i niske koncentracije nemetanskih organskih spojeva. Modeliranje je pokazalo da samo pod ograničenom kombinacijom uvjeta (npr. visok CNMOC, visoka stopa unosa otpada, niska stopa raspadanja) odlagalište može očekivati da će postići učinkovitost prikupljanja odlagališnog plina čak 80%, te da ta vrijednost pada malo ispod praga učinkovitosti prikupljanja od 81–93% koji je potreban da bi odlagalište rezultiralo manjim emisijama stakleničkih plinova od spaljivanja (Malak Anshassi et al, 2022.).

3.2.2.4. Biološka uporaba otpada u bioetanol i biodizel

Biološka pretvorba u bioetanol i biodizel. Komunalni biootpad ili organska frakcija MSW-a (OFMSW) čini značajan dio komunalnog otpada, posebno u otpadu iz dvorišta, ostacima hrane i organskom otpadu iz tvornica za preradu hrane. Počevši od čistog otpada od hrane i nejestivih ulja, sastav masnih kiselina igra značajnu ulogu u kvaliteti biodizelskog proizvoda. OFMSW se uglavnom sastoji od ugljikohidrata (30-40%), proteina (5-15%) i lipida (10-15%). To ga čini prikladnom sirovinom za proizvodnju biogoriva kao što su bioetanol, biodizel ili kemikalije s dodanom vrijednošću (Hoang et al, 2020). U 2017. globalna proizvodnja bioetanola dosegla je nevjerojatnih 85×10^9 L. Štoviše, bioetanol druge generacije također je evoluirao u obećavajuće polje istraživanja u prošlim desetljećima, pri čemu su uloženi brojni znanstveni naponi kako bi se takav potencijal dodatno proširio. Kako bi se bolje objasnili sažeti nalazi u dostupnoj literaturi, ponuđena je metoda korak po korak za hvatanje procesa proizvodnje bioetanola iz OFMSW. Proizvodnja bioetanola iz OFMSW-

a na sveobuhvatan način zahtijeva proces prethodne obrade, nakon čega slijedi enzimska hidroliza, fermentacija, obnavljanje bioetanola i na kraju, obrada ostatka (Barampouti et al, 2019.). Među gore navedenim procesima, fermentacija je ključni proces za proizvodnju bioetanola. U proizvodnji bioetanola iz OFMSW-a, radni okviri su slični onima kod konvencionalnog procesa, u kojem su hidroliza (enzimskim operacijama), fermentacija (upotrebom mikroorganizama) i pročišćavanje proizvoda (destilacija) neophodni. Kroz ove procese procijenjeno je da se 329,75 m³ bioetanola može proizvesti iz 11 558 t komunalnog otpada koji sadrži 50,89% organskog i biorazgradivog otpada na dnevnoj bazi. Plin vodik također je još jedan potencijalno vrijedan nusproizvod takve proizvodnje bioetanola, koji može dodatno povećati prinos energije iz takvog procesa WtE (Battista et al, 2016.). Međutim, značajan dio komunalnog otpada prilično je složen u smislu sastava i može rezultirati raznim problemima, kao što je koprodukcija otrovnih kemikalija i onečišćivača ili deaktivacija enzimskih procesa. Kao takva, biološka pretvorba komunalnog otpada u bioetanol i druge nusproizvode i dalje se suočava sa značajnim preprekama (Rezania et al, 2019.).

Osim bioetanola, biodizel bi se mogao proizvoditi i bio-pretvorbom komunalnog otpada. Značajno je da je koncentracija metil estera masnih kiselina u proizvedenom biodizelu različita, ovisno o karakteristikama sirovine. Zbog visoke dostupnosti srednjih i dugih masnih kiselina te odsutnosti višestruko nezasićenih masnih kiselina, OFMSW je dobar kandidat za proizvodnju biodizela. Značajno je da je katalitička transesterifikacija ključni proces za proizvodnju biodizela iz komunalnog otpada, dok bi prethodno razvrstavanje otpada moglo biti korisno za povećanje prinosa biodizela (Rodionova et al, 2017.). Postoji nekoliko izazova u trenutnoj proizvodnji bioetanola i biodizela, uključujući visoke cijene i visoke zahtjeve za energijom, kao i utjecaje na okoliš zbog upotrebe korozivnih katalizatora (kiselih i bazičnih). Neučinkovitost rezultira potencijalnim zahtjevom za subvencijom i niskim potencijalom izbjegavanja stakleničkih plinova. To implicira potrebu za poboljšanjem energetske i troškovne učinkovitosti procesa. Zanimljivo je da su Barampouti i sur. (2019.) predložili proces obrade komunalnog otpada koji integrira proizvodnju bioetanola i biodizela u jedan sustav biorafinerije. Autori vjeruju da bi takav proces mogao poboljšati isplativost

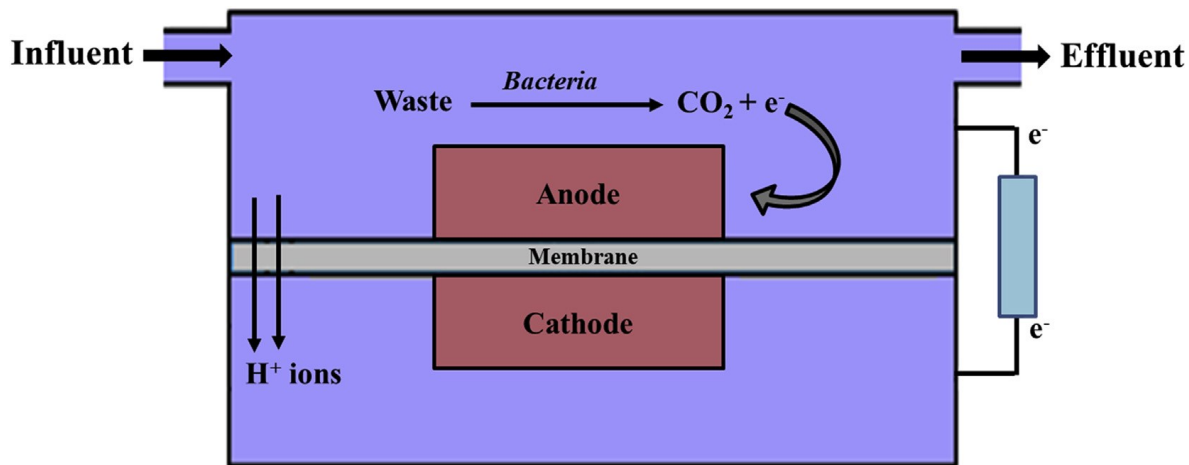
procesa uz poboljšanje kvalitete konačnog proizvoda. Opet, dobro sortiran OFMSW je neophodan za isporuku optimalnih izlaza. (Barampouti et al, 2019.)

3.2.2.4.1. Osvrt na ugljični otisak

Bioetanol je odgovoran za smanjenje od oko 500 milijuna tona ekvivalenta CO₂ (od 2008. do 2018.), biodizel još uvijek ima negativan ukupni učinak (oko 71 milijun tona ekvivalenta CO₂). Međutim, doprinos biodizela obično je pozitivan kada veći dio njegove proizvodnje dolazi iz nejestivih izvora (kao što je otpad od nafte), što je slučaj u EU. Ovi rezultati moraju se uzeti u obzir s velikom pažnjom, a budućnost biogoriva ovisit će i o istraživačkim odnosno tehnološkim poboljšanjima i o državnim propisima (Luiz Alberto Junior Letti et al, 2022.)

3.2.2.5. Mikrobna gorivna ćelija

Mikrobna gorivna ćelija (MFC) odnosi se na bio-elektrokemijski alat koji je sposoban proizvesti električnu energiju iz komunalnog otpada. Kemijska energija u MFC-u nastaje oksidacijom organskih/anorganskih spojeva u adenozin trifosfat (ATP) uzastopnim reakcijama koje izvode mikroorganizmi, a elektroni se premještaju do terminala akceptora elektrona kako bi proizveli električnu energiju. Obični MFC sadrži kationsku membranu odvojenu anodnim i katodnim odjeljcima. Mikrobi su pričvršćeni za anodni odjeljak, gdje su sposobni metabolizirati organske spojeve, poput glukoze, koji funkcioniraju kao donor elektrona. Ovi organski spojevi putem metabolizma proizvode elektrone i protone. Zatim se elektroni prenose na površinu anode; zatim će se kroz električni krug kretati od anode do katode, dok se protoni kreću kroz elektrolit; nakon toga prolaze kroz kationsku membranu. Smanjenjem topivog akceptora elektrona, elektroni i protoni se troše na katodi, a električna energija se stvara stavljanjem opterećenja između elektroda. Shematski dizajn MFC-a prikazan je na slici 3 (Lal Chand Malav et al. 2020.).



Slika 3 Model koji predstavlja dizajn i rad mikrobnog gorivnog ćelije (Lal Chand Malav et al, 2020.)

Nedavna implementacija MFC sustava u čvrstoj fazi (SMFC) zajedno sa sustavom kompostiranja različite biomase, kao što su soja, rižina ljuska, lisna plijesan i korišteni talog kave, bila je uspješna u dobivanju različitih organskih mješavina s različitim omjerima C/N. Pod uvjetom da je ukupni OMSW u SAD-u i Kanadi iznosio 280 Mt, procjenjuje se da će proizvesti $3,25 \times 10^{18}$ J, ili ekvivalent od 531 MBOE (Mbbbl ekvivalenta nafte), vrijednosti energije iz ovog otpada putem SMFC tehnologije. Uz rezerviranu pretpostavku od 8.700 MJ/t ili 2.425 kW h/t proizvodnje energije iz MFC-a, gotovo 190 TWh električne energije može se proizvesti iz ovih 280 Mt otpada. To je pokazalo izvedivost spojenog SMFC-kompostiranja sustava za povrat energije. Druga moguća primjena MFC-a je u tretiranju procjedne vode odlagališta koja sadrži visok postotak organske tvari. U tu svrhu prikladnije su nizvodne MFC komponente. Buduća uloga MFC-a u gospodarenju čvrstim otpadom oslanja se na povećanje proizvodnje biovodika i biometana, kao i na ekstrakciju energije iz biomase, organskog otpada i procjednih voda odlagališta (Anh Tuan Hoang et al, 2022.). Pozitivan razvoj ovih procesa istodobno će olakšati izvedivost obrade MFC-a na krutom otpadu. Osim toga, pitanja vezana uz povećanje laboratorijskog istraživanja na praktičnu veličinu, kao što je sinteza elektrode industrijske veličine, masovna proizvodnja elektrodnih materijala, nabavka stabilnih sirovina, radni uvjeti i tako dalje, također zahtijevaju odgovarajuće rješenje. Dok se ne riješe sva ova pitanja, još je prerano zaključiti o praktičnosti MFC tehnologije za preradu komunalnog otpada i proizvodnju energije. Posebice, među

istraživačima postoji snažan konsenzus da je proizvodnja energije iz komunalnog otpada daleko izazovnije u usporedbi s drugim vrstama agrobiomase, stoga ju je potrebno dodatno poboljšati radi bolje praktičnosti (Hoang i sur., 2022.).

3.2.2.5.1. Osvrt na ugljični otisak

S obzirom da je MFC relativno nova tehnologija, trenutno nema podataka o ugljičnom otisku ove tehnologije za obradu komunalnog otpada i proizvodnju energije.

4. GOSPODARENJE OTPADOM U KONTEKSTU KRUŽNOG GOSPODARSTVA

Povećana gospodarska aktivnost i odgovarajuća potrošnja sirovina tijekom prošlog stoljeća doveli su do ovisnosti o uvozu (materijala i energije) i naglašenih problema gospodarenja otpadom (WM) u EU. Danas EU stvara preko 1,8 t otpada po stanovniku godišnje (bez mineralnog otpada), od čega 27% otpada na miješani komunalni otpad (MSW). Ovi problemi su posebno naglašeni u urbanim sredinama s velikom gustoćom naseljenosti. S oko 75% svog stanovništva i djelatnosti koje stvaraju BDP smještene u urbanim područjima, Europa se može nazvati "unijom gradova i mjesta" gdje se utjecaji urbanizacije i povezani problemi protežu izvan granica gradova, na EU kao cjelinu. Istodobno, gradovi troše oko 60-80% energije i emitiraju približno istu količinu CO₂ na globalnoj razini.

EU je prepoznala probleme opskrbe energijom i klimatske promjene kao jedan od ključnih izazova. Kako bi se pozabavila tim pitanjima, Europska komisija je usvojila klimatski i energetske paket za 2020. (Direktive 2009/29/EZ, 2009/28/EZ, 2009/31/EZ i Odluka br. 406/2009/EZ) i klimatski i energetske okvir za 2030. koji se nadovezuje na klimatski i energetske paket za 2020. i u skladu je s dugoročnom perspektivom utvrđenom Mapom puta za prelazak na nisku konkurentnost -uglična ekonomija u 2050., Energetske putokaz 2050. i Bijela knjiga o transportu. Ovaj put uključuje smanjenje emisija stakleničkih plinova za 80% (ispod razine iz 1990.) do 2050. godine, u čemu svi sektori trebaju pridonijeti. Za postizanje ovih ciljeva, energetske sektor bi trebao postati gotovo ugljično neutralan, a grijanje bi se trebalo temeljiti na obnovljivoj električnoj energiji (uključujući biootpad) ili drugim izvorima s niskim emisijama. Emisije iz prometa trebale bi se smanjiti za više od 60% do 2050. korištenjem biogoriva (npr. Waste-to-Biomethane koncept) i elektrifikacije, dok je planirano da se fosilna goriva zamijene električnom energijom i obnovljivim izvorima za grijanje i hlađenje u građevinskom sektoru. Uz ovaj put, Heat Roadmap Europe naglašava važnost daljinskog grijanja u ispunjavanju ciljeva EU, identificira pozitivne utjecaje lokalnih izvora energije na energetske sustave EU i klasificira otpad kao primarni izvor topline za daljinsko grijanje. Kako preobraziti gospodarstvo EU-a u održivo do 2050. navode Inicijativa za sirovine i Vodeća inicijativa za Europu učinkovitu resursima. Ovaj put uključuje povećanje

produktivnosti resursa i odvajanje potrošnje resursa (uključujući energiju) i utjecaja na okoliš od gospodarskog rasta. Na temelju toga, "transformacija unutar jedne generacije - u energetici, industriji, poljoprivredi, ribarstvu i transportnim sustavima te u ponašanju proizvođača i potrošača" predložena je Putokazom za Europu učinkovitu resursima gdje je kružno gospodarstvo identificirano kao najbolji koncept kojim bi se transformacija u svim područjima trebala voditi.

Dok se korištenje otpada za pokrivanje lokalnih energetske potrebe čini idealnom sinergijom, otpad također može ublažiti problem nestašice materijala. Okvirna direktiva o otpadu definirala je prvi korak za uporabu materijala povećan postavljanjem hijerarhije otpada koja definira recikliranje kao poželjnu opciju za uporabu otpada, dok je energetska uporaba njoj podređena. Paket o kružnom gospodarstvu (engl. Circular Economy Package) napravio je sljedeći korak povećavajući prvenstveno ciljeve odvajanja komunalnog otpada. Također je uveo koncept "zatvaranja petlje" životnog ciklusa materijala/proizvoda i mjere koje pokrivaju cijeli životni ciklus materijala od proizvodnje i upotrebe preko zbrinjavanja i WM-a (engl. Waste Management – gospodarenje otpadom) do tržišta za obnovljene resurse i uporabu. „Zatvaranje petlje“ između kraja životnog vijeka proizvoda i njegove proizvodnje omogućuje promet resursa, materijala i proizvoda te zadržava njegovu energetske, materijalnu i ekonomsku vrijednost što je dulje moguće u gospodarstvu. Jedan od rezultata implementacije ovih propisa u nacionalno zakonodavstvo je promjena raspoloživih količina otpada za korištenje u sustavima Waste-to-Energy/Waste-to-Biomethan.

Energija proizvedena iz otpada dio je urbanih energetske sustava – toplinska energija, električna energija, prirodni plin, ali i transportnog sustava. Ona zamjenjuje primarnu proizvodnju energije što dovodi do smanjene potrošnje goriva. Zbog njihove međuovisnosti, planiranje WM-a potrebno je provoditi u suradnji s energetske sustavom i urbanističkim planiranjem. Proizvedeni energetske prijenosnici mogu se koristiti za napajanje WM sustava na lokalnoj (gradska ljestvica) ili široj (razmjer sustava) razini što čini korak dalje u konceptu "zatvaranja petlje" uveden Paketom kružnog gospodarstva. Zbog toga su prethodno analizirani razvoj energetske sustava, upravljanje resursima, te spajanje urbanog otpada i energetske sustava. Također, potencijali energije iz otpada (WtE) i moguće smanjenje

emisije stakleničkih plinova anaerobnom digestijom (AD), spaljivanjem i pirolizom-rasplinjavanjem procjenjuju se u i široj analizi životnog ciklusa (LCA) zasnovanoj na procjeni životnog ciklusa različitih WM sustava. Mnogi radovi pokrivaju potencijalnu proizvodnju energije iz komunalnog otpada, posebno u urbanim sredinama, ali uglavnom stavljaju fokus na proizvodnju električne energije. Iako se nijedan kriterij ne može zanemariti, Europska komisija je naglasila LCA kao „najbolji okvir za procjenu potencijalnih utjecaja proizvoda na okoliš”. LCA metodologija za procjenu utjecaja na okoliš uvedena je prije četiri desetljeća. Energetski pristup se koristi u mnogim objavljenim radovima. Analiza energetskog ciklusa provedi se analizom potrošnje energije WM-a i lanca recikliranja te pripadajućeg energetskog ekvivalenta proizvedenih materijala. Na temelju metode kumulativne eksergijske potražnje, izvještava se o energetskom omjeru potrošnje/proizvodnje energije i zaključuje da “recikliranje otpada može proizvesti energiju” i da bi to “moglo opravdati trošenje energije i trošak za recikliranje komunalnog otpada”. Postavljaju se pitanja “mogu li se reciklirani materijali smatrati izvorom energije” i “mogu li se reciklirani materijali koristiti u svrhe proizvodnje energije”. Također, postavilo se pitanje gdje je npr. reciklirana plastična boca, šalje se natrag kako bi ispunila svoju ulogu (temelji se na recikliranju otvorenog/zatvorenog kruga). (Tihomir Tomić, Daniel Rolph Schneider, 2018.)

Hijerarhija otpada je kamen temeljac politike i zakonodavstva EU-a o otpadu i ključ za prijelaz na kružno gospodarstvo. Njegova je primarna svrha uspostaviti redosljed prioriteta koji minimizira štetne učinke na okoliš i optimizira učinkovitost resursa u sprječavanju i gospodarenju otpadom (European Commission 2017.).

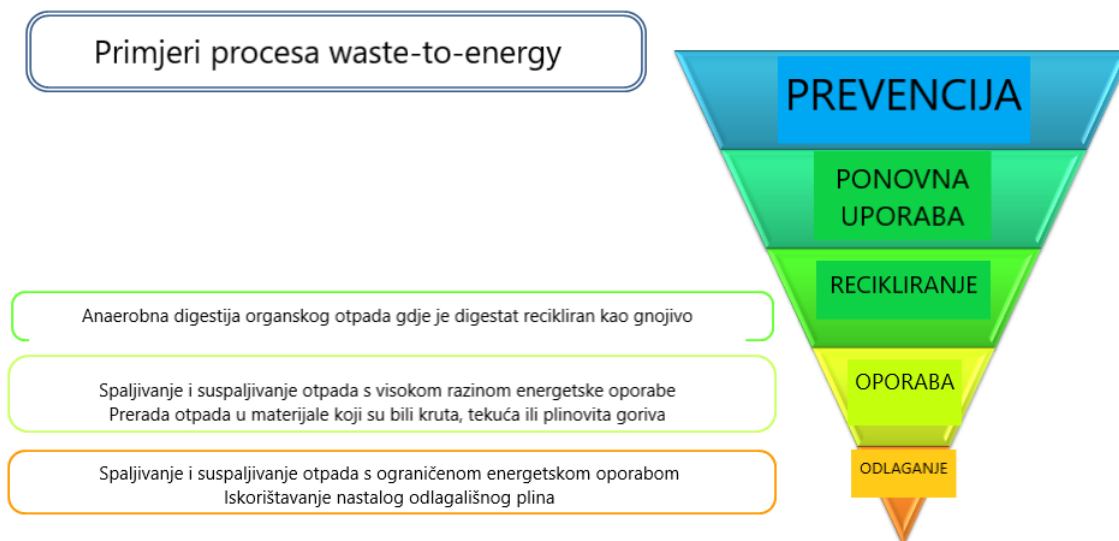
Glavni procesi pretvaranja otpada u energiju (European Commission 2017.):

- suspaljivanje otpada u postrojenjima za izgaranje (npr. elektrane) te u proizvodnji cementa i vapna;
- spaljivanje otpada u namjenskim objektima;

- anaerobna digestija biorazgradivog otpada;
- proizvodnja čvrstih, tekućih ili plinovitih goriva dobivenih iz otpada; i
- drugi procesi uključujući neizravno spaljivanje nakon koraka pirolize ili rasplinjavanja.

Ovi procesi imaju različite utjecaje na okoliš i različito su rangirani u hijerarhiji otpada. Zapravo, procesi pretvaranja otpada u energiju obuhvaćaju vrlo različite operacije obrade otpada, u rasponu od 'odlaganja' i 'oporabe' do 'recikliranja'. Na primjer, procesi poput anaerobne digestije koji rezultiraju proizvodnjom bioplina i digestata smatraju se u zakonodavstvu EU-a o otpadu operacijom recikliranja. S druge strane, spaljivanje otpada s ograničenom energetsom oporabom smatra se zbrinjavanjem. Slika u nastavku ilustrira pozicioniranje različitih procesa pretvaranja otpada u energiju duž hijerarhije otpada u EU.

Važno je naglasiti da hijerarhija otpada također u velikoj mjeri odražava preferiranu opciju zaštite okoliša iz klimatske perspektive: odlaganje, na odlagalištima ili spaljivanjem s malo ili nimalo oporavka energije, obično je najnepovoljnija opcija za smanjenje emisija stakleničkih plinova (GHG); nasuprot tome, sprječavanje otpada, ponovna uporaba i recikliranje imaju najveći potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova (European Commission 2017.).



Slika 4 Hijerarhija otpada i procesi pretvaranja otpada u energiju (European Commission 2017.)

Prema studiji Komisije, 2014. godine približno 1,5 % ukupne konačne potrošnje energije EU-a podmireno je povratom energije iz otpada spaljivanjem, suspaljivanjem u cementnim pećima i anaerobnom digestijom (tj. oko 676 PJ/godišnje). Budući da se ovaj postotak ne bi trebao značajno povećati u budućnosti jer se više otpada usmjerava na recikliranje, poboljšanje energetske učinkovitosti procesa pretvaranja otpada u energiju i promicanje onih procesa koji kombiniraju oporabu materijala i energije mogu pridonijeti dekarbonizaciji ključnih sektora kao što su grijanje i hlađenje ili transport i smanjenje emisija stakleničkih plinova iz sektora otpada. Na primjer, preusmjeravanje jedne tone biorazgradivog otpada s odlagališta prema anaerobnoj digestiji za proizvodnju bioplina i gnojiva može spriječiti do 2 tone ekvivalentne emisije CO₂ (European Commission 2017.).

4.1. Očekivane promjene u sirovinama za pretvaranje otpada u energiju

Mješoviti otpad još uvijek čini značajan udio otpada koji se koristi u procesima pretvaranja otpada u energiju, uglavnom spaljivanja (52 %). Postojeći zakonski zahtjevi i prijedlozi o otpadu kružnog gospodarstva zasigurno će promijeniti ovu situaciju. Očekuje se da će pravila o odvojenom prikupljanju i ambicioznijim stopama recikliranja koje pokrivaju drvo, papir, plastiku i biorazgradivi otpad smanjiti količinu otpada koja je potencijalno dostupna za procese pretvaranja otpada u energiju kao što su spaljivanje i suspaljivanje (European Commission 2017.).

Za biorazgradivi otpad, provedba zahtjeva utvrđenih Direktivom o odlagalištima otpada, u kombinaciji s predloženim novim pravilima za osiguranje odvojenog prikupljanja biootpada, trebala bi rezultirati većom proizvodnjom bioplina dobivenog iz otpada za upotrebu u kogeneraciji, ubrizgavanju u plinsku mrežu, te korištenje u transportnim gorivima i gnojivima putem anaerobne digestije. Predložene izmjene Uredbe o gnojivima, o kojima se trenutno raspravlja u Parlamentu i Vijeću, trebale bi podržati ovaj trend otvaranjem jedinstvenog tržišta za gnojiva dobivena iz otpada. Potencijal biorazgradivog otpada u kombinaciji s anaerobnom digestivnom obradom u bioplinskom postrojenju vidi se u Milanu. Od 2014. grad je dosegao gotovo 100% prikupljanje hrane i organskog otpada, osiguravajući prosječno 120 000 tona biorazgradivog otpada godišnje. U punom kapacitetu (12,8 MW), gradska bioplinska elektrana trebala bi proizvoditi oko 35 880 MWh električne energije godišnje, dovoljno za opskrbu 24 000 ljudi, te proizvesti 14 400 tona gnojiva.

U slučaju otpadnih jestivih ulja i masti, postoji prostor za poboljšanje učinkovitosti sustava prikupljanja i obrade za proizvodnju proizvoda kao što su biodizel i hidrogenirana biljna ulja (HVO). Dobiveno biogorivo dobiveno iz otpada može se koristiti izravno u transportu, uključujući korištenje HVO-a u zrakoplovstvu (European Commission 2017.).

Što se tiče plastičnog otpada, industrijski podaci pokazuju da zbrinjavanje i energetska uporaba ostaju najčešće opcije obrade i da, iako se odlaganje na odlagalištima smanjilo u posljednjih deset godina, spaljivanje raste s velikim razlikama između država članica povezanih s različitim državama provedbe postojećeg zakonodavstva EU-a. . To potvrđuje

potrebu za hitnim i konkretnim koracima za poboljšanje recikliranja i ponovne upotrebe plastike te za poticanje inovacija u ovom području. Nadolazeća strategija EU-a o plastici u kružnom gospodarstvu upravo će imati za cilj poboljšati ekonomičnost, kvalitetu i prihvaćanje recikliranja i ponovne upotrebe plastike promatrajući cijeli lanac vrijednosti. Razmotrit će neka nova dostignuća u obradi plastičnog otpada, kao što su ponovno rafiniranje i inovacije u dizajnu, kako bi se u budućnosti veći udio plastičnog otpada mogao spriječiti ili preusmjeriti s energetske uporabe na recikliranje, čime se smanjuju ukupni utjecaji stakleničkih plinova (European Commission 2017.).

Studija Komisije pokazala je da se drveni otpad obično koristi kao sirovina za spaljivanje. Kao što je istaknuto u akcijskom planu kružnog gospodarstva, kaskadno korištenje obnovljivih izvora kao što je drvo, uz nekoliko ciklusa ponovne upotrebe i recikliranja, treba poticati gdje je to prikladno, u skladu s hijerarhijom otpada. U tom kontekstu treba podsjetiti da je Komisija u svom zakonodavnom paketu o otpadu, između ostalog, predložila viši obvezni cilj na razini EU-a za recikliranje drvnog ambalažnog otpada. Tamo gdje ponovna uporaba ili recikliranje nije moguće, energetska upotreba drvnog otpada je poželjna za zamjenu fosilnih goriva i izbjegavanje odlaganja drva (European Commission 2017.).

4.2. Korištenje energetske najučinkovitijih tehnika pretvaranja otpada u energiju

Prilikom odlučivanja za procese pretvaranja otpada u energiju, potrebno je osigurati korištenje najučinkovitijih tehnika: to maksimalno povećava njihov doprinos klimatskim i energetske ciljevima EU-a. Studija Komisije procjenjuje da bi se, ako se provjerene tehnike i mjere potpore pravilno provode, količina energije dobivene iz otpada mogla povećati za 29 % na 872 PJ/godišnje, koristeći točno istu količinu otpada kao sirovina. To pokazuje potencijal za poboljšanje energetske učinkovitosti. Studija Komisije pokazala je da su najbolje dokazane tehnike za povećanje energetske učinkovitosti za četiri procesa pretvaranja otpada u energiju u nastavku sljedeće (European Commission 2017.):

- suspaljivanje u postrojenjima za izgaranje: rasplinjavanje krutog obnovljenog goriva (SRF) i suspaljivanje dobivenog sintetičkog plina u postrojenju za izgaranje radi zamjene fosilnih goriva u proizvodnji električne i toplinske energije;
- suspaljivanje u proizvodnji cementa i vapna: pretvorba otpadne topline u struju u cementnim pećima;
- spaljivanje otpada u namjenskim postrojenjima:
 - o korištenje super grijača;
 - o iskorištavanje energije sadržane u dimnom plinu;
 - o korištenje toplinskih pumpi;
 - o opskrba rashlađenom vodom za mreže daljinskog hlađenja; i
 - o distribucija topline iz otpada kroz niskotemperaturne mreže daljinskog grijanja.
- anaerobna digestija: nadogradnja bioplina u bio-metan za daljnju distribuciju i korištenje (npr. ubrizgavanje u plinsku mrežu i transportno gorivo) (European Commission 2017.).

Unaprijedi li Hrvatska gospodarenje otpadom time bi umanjila posljedice po zdravlje i okoliš, uštedjela prostor, smanjila emisije stakleničkih plinova te povećala učinkovitost u potrošnji energije i materijala. Koristi bi se osjetile na više razina: na regionalnoj, gdje bi se u sektoru gospodarenja otpadom ostvarila bolja ekonomija, i na lokalnoj, gdje bi se poboljšali okolišni uvjeti, npr. smanjenim onečišćavanjem okoliša smećem i narušavanjem krajolika uslijed odlaganja otpada, kao i manjim onečišćenjem vode i zraka.

Hrvatska bi na taj način postigla održivo gospodarenje otpadom, ubrzala recikliranje, ograničila uporabu odlagališta i stvorila poticaje za promjene u ponašanju potrošača. Ciljevi koji se trebaju postići do 2035. godine su da se najmanje 65% mase komunalnog otpada mora oporabiti recikliranjem i pripremom za ponovnu uporabu, a količina komunalnog otpada odložena na odlagališta otpada može biti najviše 10% mase ukupno proizvedenog komunalnog otpada (The World Bank Group, 2021.).

5. UTJECAJ ENERGETSKE OPORABE OTPADA NA UGLJIČNI OTISAK U HRVATSKOJ

U Hrvatskoj je 2020. godine ukupno nastalo 1.692.966 t komunalnog otpada. Ukupna stopa odvojenog sakupljanja komunalnog otpada iznosila je 41 %. Na oporabu je upućeno 583.372 t komunalnog otpada, odnosno 34 % komunalnog otpada. Na odlaganje je upućeno 941.285 t odnosno 56 % komunalnog otpada što je prikazano u tablici 4. Biorazgradivog komunalnog otpada je nastalo 1.058.703 t od čega je 596.013 t odloženo na odlagališta otpada (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022.)

Tablica 4 Gospodarenje komunalnim otpadom sakupljenim i ukupno proizvedenim komunalnim otpadom u 2020. godini (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022.)

	Nastalo	Odvojeno sakupljeno	Reciklirano	Kompostiranje /anaerobna digestija	Spaljivanje R1	Spaljivanje D10	Odlaganje	Ostalo
Ukupno RH (t):	1692966	694160	580552	93422	2819	5,3	941285	168310
Ukupno RH (%):	100	41	34	6	0,17	0,0003	56	10

Kategorija „Ostalo“ u oba slučaja se odnosi uglavnom na količine upućene na MBO postrojenja, dok se manji dio odnosi na količine zbrinute nekim od ostalih postupaka predobrade, privremeno uskladištene količine i procijenjene količine za neobuhvaćeni dio stanovništva. U 2020 godini ukupno je na obradu u MBO postrojenja upućeno 136.895 t komunalnog otpada.

5.1. Scenariji ugljičnog otiska

Za izračun ugljičnog otiska je korišten programski paket WARM (engl. Waste Reduction Model). Dostupan je na stranicama Sjedinjenih Američkih Država Agencije za zaštitu okoliša (engl. Environmental Protection Agency - EPA) i na ovom linku je dostupna dokumentacija i metodologija programa <https://www.epa.gov/warm/documentation-waste-reduction-model-warm>.

Za prvi scenarij su korišteni podatci koji su relevantni za trenutnu situaciju gospodarenja otpada u Hrvatskoj. Odnosno odabrala sam podatke koliko je otpada odloženo na odlagalištima, spaljeno postupcima R1 i koliko je poslano na kompostiranje / anaerobnu digestiju. Odabrala sam ove postupke jer je pomoću njih moguća energetska uporaba, a odlaganje kao referentnu tehnologiju i iz razloga ako se ne obradi s nijednom drugom tehnologijom otpad će biti odložen. Odloženo je 596.013 t biorazgradivog otpada što znači da je ostalog miješanog komunalnog otpada odloženo 345272 t. Spaljeno je 2819 t i kompostiranjem / anaerobnom digestijom je oporabljeno 93422 t. Prvi scenarij je prikazan u tablici 6.

Kod drugog scenarija (tablica 7) predviđeno da se sav biorazgradivi komunalni otpad operabi anaerobno digestijom. Te da se spaljivanjem obradi 40% ostalog komunalnog otpada koji nije biorazgradiv odnosno 138109 t uz dosadašnjih 2819 t što je ukupno 140928 t. Što znači da je odloženo 207168 t otpada.

Prema trećem scenariju (tablica 8) 75% biorazgradivog otpada, koji se inače odlaže, bi se energetske oporabilo anaerobnom digestijom, odnosno 447010 t, a spaljivanjem 20% ostalog komunalnog otpada koji nije biorazgradiv odnosno 69054 t. U ovom scenariju odloženo je 521467 t otpada.

U tablici 5 su prikazani iznosi emisija GHG-a po toni otpada.

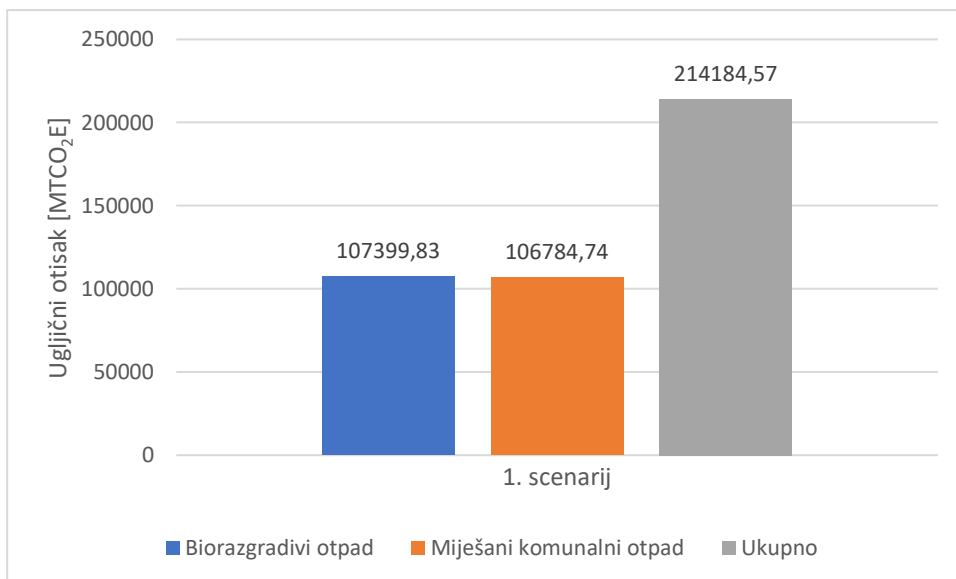
Tablica 5 Prikaz emisija po toni otpada i tehnologiji obrade

Materijal	Emisije GHG po toni odloženog otpada (MTCO ₂ E)	Emisije GHG po toni spaljenog opada (MTCO ₂ E)	Emisije GHG po toni otpada obrađenog anaerobnom digestijom (MTCO ₂ E)
Biorazgradivi komunalni otpad	0,18	-0,15	0
Miješani komunalni otpad	0,31	0,01	-

Prema prvom scenariju (tablica 6) ugljični otisak iznosi 214.184,57 MTCO₂E (engl. Metric tons of carbon dioxide equivalent – metrička tona ekvivalenta ugljičnog dioksida) (grafikon 1).

Tablica 6 Ukupne emisije za prvi scenarij odnosno za situaciju u Hrvatskoj 2020.

Materijal	Odlaganje (t)	Spaljivanje (t)	Anaerobna digestija (t)	MTCO ₂ E
Biorazgradivi otpad	596013,00	0,00	93422,00	107399,83
Miješani komunalni otpad	345272,00	2824,00	-	106784,74
Ukupno				214184,57

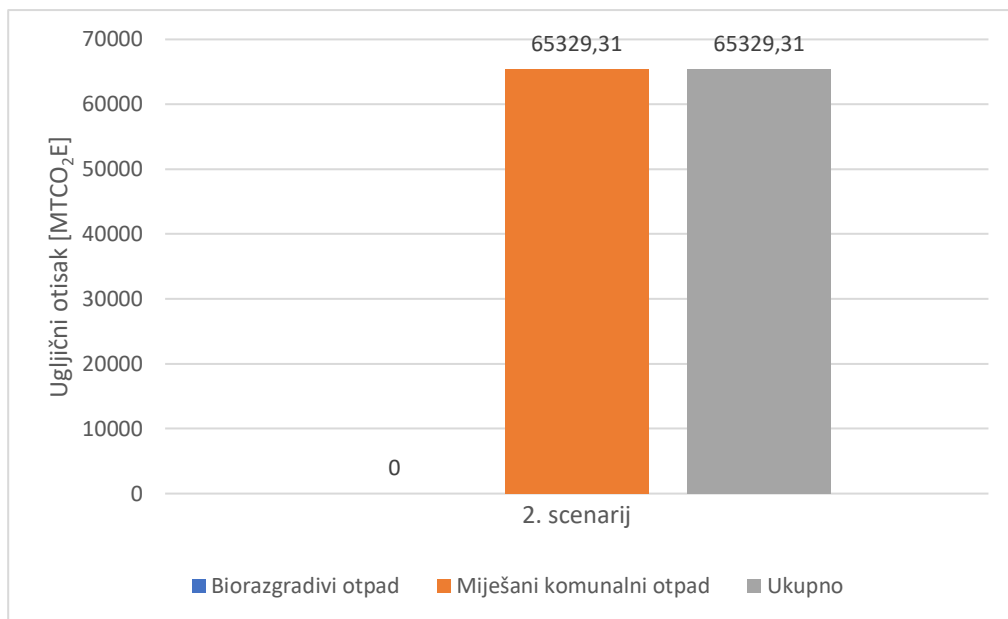


Grafikon 1 1. scenarij ugljičnog otiska

Prema drugom scenariju (tablica 7) ugljični otisak je za 148.855,26 MTCO₂E manji nego u prvom scenariju što znači da iznosi 65.329,31 MTCO₂E (grafikon 2).

Tablica 7 GHG emisije za drugi scenarij

Materijal	Odlaganje (t)	Spaljivanje (t)	Anaerobna digestija (t)	MTCO ₂ E	Razlika GHG u odnosu na 1.scenarij MTCO ₂ E
Biorazgradivi otpad	0,00	0,00	689435,00	0,00	-107399,83
Miješani komunalni otpad	207168,00	140928,00	-	65329,31	-41455,43
Ukupno				65329,31	-148855,26

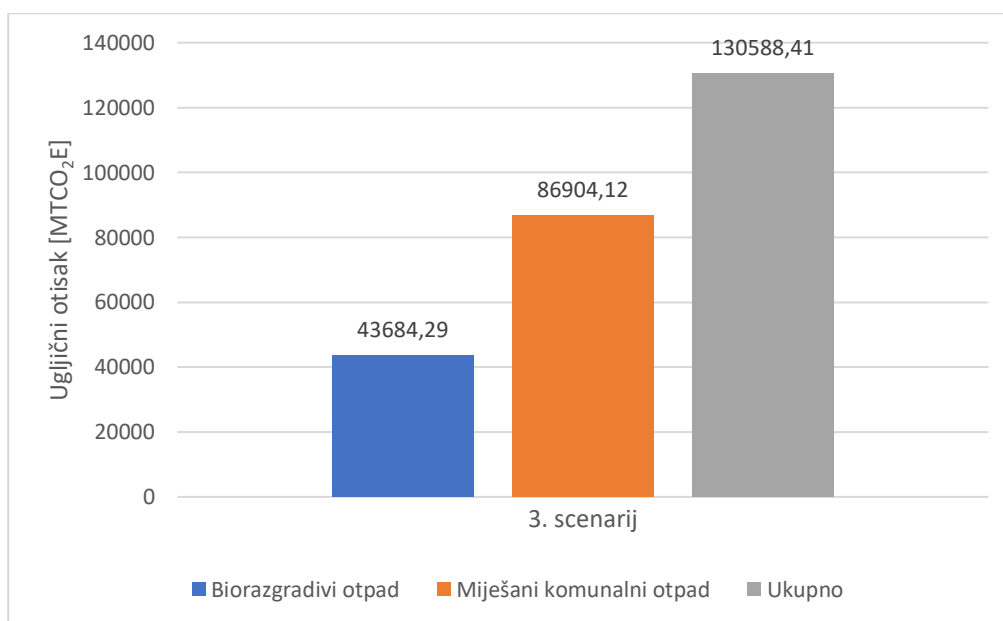


Grafikon 2 2. scenarij ugljičnog otiska

Prema trećem scenariju ugljični otisak je za 83.596,16 MTCO₂E manji nego u prvom scenariju odnosno on iznosi 1.305.88,41 MTCO₂E (grafikon 3).

Tablica 8 GHG emisije za treći scenarij

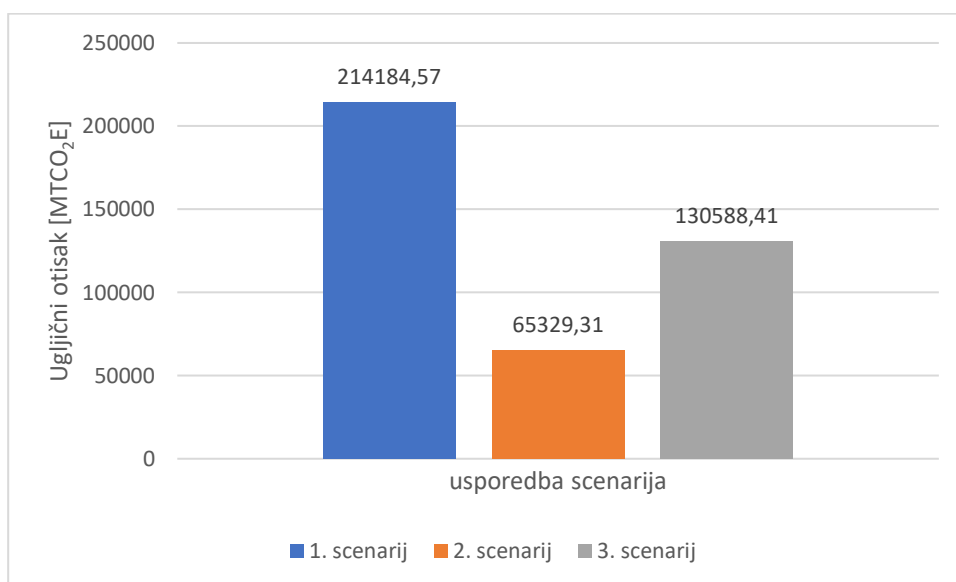
Materijal	Odlaganje (t)	Spaljivanje (t)	Anaerobna digestija (t)	MTCO ₂ E	Razlika GHG u odnosu na 1.scenarij MTCO ₂ E
Biorazgradivi otpad	242425,00	0,00	447010,00	43684,29	-63715,54
Miješani komunalni otpad	279042,00	69054,00	-	86904,12	-19880,62
Ukupno				130588,41	-83596,16



Grafikon 3 3. scenarij ugljičnog otiska

Kod drugog scenarija su svakako prisutne najmanje emisije (grafikon 4). Ukoliko Hrvatska želi postići ciljeve koje je zadala do 2035. godine (najmanje 65% mase komunalnog otpada mora se oporabiti recikliranjem i pripremom za ponovnu uporabu, a količina komunalnog

otpada odložena može biti najviše 10% mase ukupno proizvedenog komunalnog otpada) mora unaprijediti gospodarenje otpadom. Dobro rješenje može biti anaerobna digestija s obzirom da se proizvodi velik udio biorazgradivog otpada, a samom anaerobnom digestijom se dobiva bioplina koji se dalje može koristiti kao energent i time se automatski smanjuje ugljični otisak koji bi inače proizašao iz odlaganja tog otpada i korištenja nekog drugog fosilnog energenta. Stoga možemo zaključiti da su dobroti energetske uporabe otpada višestruke. I cijelim ovim procesom se osigurava kružno gospodarenje otpadom, odnosno kružno gospodarenje općenito.



Grafikon 4 Usporedba tri scenarija

6. ZAKLJUČAK

Učinkovit plan gospodarenja miješanim komunalnim otpadom mora uključivati svijest, ekološku prihvatljivost, isplativost i zadovoljstvo zajednice. Obilno odlaganje otpada koji se ne može reciklirati uzrokuje kontaminaciju tla, vode i zraka. Prednosti pravilnog gospodarenja otpadom uključuju manje emisije stakleničkih plinova, eliminaciju otpada, zaradu od prodaje energije i ponovnu upotrebu otpada.

Ugljični otisak nastaje od početka životnog vijeka proizvoda što znači da samo poštivanje hijerarhije otpada i pretvaranje otpada u energiju može maksimalno povećati doprinos kružnog gospodarstva u dekarbonizaciji, u skladu sa Strategijom energetske unije i Pariškim sporazumom. Prevencija otpada i recikliranje daju najveći doprinos u smislu uštede energije i smanjenja emisija stakleničkih plinova. Kada je otpad već nastao tada su višestruke koristi od energetske uporabe otpada, jer se samim tim eliminira otpad, smanjuje ugljični otisak i nastaje energija za koju bi inače vjerojatno koristili neki od fosilnih energenata što znači da se i na taj način izbjegava dodatni ugljični otisak.

Unutar scenarija energetske uporabe u Hrvatskoj prema prvom scenariju (realna situacija iz 2020.) ugljični otisak iznosi 214.184,57 MTCO₂E. Prema drugom iznosi 65.329,31 MTCO₂E. Prema trećem iznosi 130.588,41 MTCO₂E. Drugi scenarij ima najmanji ugljični otisak gdje je sav biorazgradivi otpad obrađen anaerobnom digestijom, možemo zaključiti da je veliki potencijal energetske uporabe i smanjenja ugljičnog otiska upravo u anaerobnoj digestiji, što ne isključuje i druge tehnologije uporabe koje nisu bile razmatrane u ovim scenarijima.

U budućnosti bi se trebalo više pažnje posvetiti onim procesima, kao što je anaerobna digestija biorazgradivog otpada, gdje se recikliranje materijala kombinira s energetskom uporabom. S druge strane, spaljivanje otpada – trenutno prevladavajuće opcije pretvaranja otpada u energiju – potrebno je redefinirati kako bi se osiguralo povećanje recikliranja i neometane ponovne uporabe i izbjegavanje prevelikih količina ostatka otpada za obradu. Te se mora naglasiti da nijedna tehnologija nije jednoznačna, to jest ako negdje savršeno funkcionira ne znači da će tako biti na svakoj lokaciji, mora se razmatrati šira slika.

7. LITERATURA

Anh Tuan Hoang, Petar Sabev Varbanov, Sandro Nižetić, Ranjna Sirohi, Ashok Pandey, Rafael Luque, Kim Hoong Ng, Van Viet Pham (2022.): Perspective review on Municipal Solid Waste-to-energy route: Characteristics, management strategy, and role in circular economy, *Journal of Cleaner Production* 359, 131897

Anonymous: Hidrotermalna karbonizacija: zbrinjavanje organskog otpada, hr.bio-green.net 2022. <https://hr.bio-green.net/6577502-hydrothermal-carbonization-environmentally-friendly-disposal-of-organic-waste> (pristupljeno: 28.06.2022.)

Barampouti, E.M., Mai, S., Malamis, D., Moustakas, K., Loizidou, M., (2019.): Liquid biofuels from the organic fraction of municipal solid waste: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110, 298–314.

Battista, F., Mancini, G., Ruggeri, B., Fino, D. (2016.): Selection of the best pretreatment for hydrogen and bioethanol production from olive oil waste products, *Renewable Energy* 88, 401–407.

Chan, W.P., Veksha, A., Lei, J., Oh, W.D., Dou, X., Giannis, A., Lisak, G., Lim, T.T., (2019.): A hot syngas purification system integrated with downdraft gasification of municipal solid waste, *Applied Energy* 237, 227–240

E.K. Tetteh, M.O. Amankwa, C. Yeboah, M.O. Amankwa (2021.): Emerging carbon abatement technologies to mitigate energy-carbon footprint- a review, *Cleaner Materials* 2, 100020

European Commission (2017.): Communication From the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions, The role of waste-to-energy in the circular economy, European Commission, Brussels

Eurostat, 2022. Glossary: Kilograms of Oil Equivalent (Kgoe). <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics->

[explained/index.php?title=Glossary:Kilograms_of_oil_equivalent_\(kgoe\)](https://www.sciencedirect.com/glossary/Kilograms_of_oil_equivalent_(kgoe)) (pristupljeno 28.05.2022.)

Fan, Y. V., Klemeš, J. J., Lee, C. T., & Perry, S. (2018): Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint, *Journal of Environmental Management* 223, 888–897

Florian Keller, Raoul Lukas Voss, Roh Pin Lee, Bernd Meyera (2022.): Life cycle assessment of global warming potential of feedstock recycling technologies: Case study of waste gasification and pyrolysis in an integrated inventory model for waste treatment and chemical production in Germany, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 179, 106106

Hoang, A.T., Nižetić, S., Ng, K.H., Papadopoulos, A.M., Le, A.T., Kumar, S., Hadiyanto, H., Pham, V.V. (2022.): Microbial fuel cells for bioelectricity production from waste as sustainable prospect of future energy sector, *Chemosphere* 287, 132285

Hoang, A.T., Nižetić, S., Ölçer, A.I., Ong, H.C. (2020.): Synthesis pathway and fundamental combustion mechanism of a sustainable biofuel 2,5-Dimethylfuran: progress and prospective, *Fuel* 286, 119337

Indrawan, N., Mohammad, S., Kumar, A., Huhnke, R.L., (2019.): Modeling low temperature plasma gasification of municipal solid waste. *Environ. Technol. Innovat*, 15, 100412

Ioan-Robert Istrate, Enrique Medina-Martos, Jose-Luis Galvez-Martos, Javier Dufour (2021.): Assessment of the energy recovery potential of municipal solid waste under future scenarios, *Applied Energy* 293, 116915

Ivan Mihaljević (2016.): Kompostiranje kao mjera ublažavanja klimatskih promjena, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet, Završni rad

Lal Chand Malav, Krishna Kumar Yadav, Neha Gupta, Sandeep Kumar, Gulshan Kumar Sharma, Santhana Krishnan, Shahabaldin Rezanian, Hesam Kamyab, Quoc Bao Pham, Shalini Yadav, Suparna Bhattacharyya, Virendra Kumar Yadav, Quang-Vu Bach (2020.): A review

on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities, *Journal of Cleaner Production* 277, 123227

Lee, S.Y., Sankaran, R., Chew, K.W., Tan, C.H., Krishnamoorthy, R., Chu, D.T., Show, P. L., (2019.): Waste to bioenergy: a review on the recent conversion technologies, *BMC Energy* 1, 4

Luiz Alberto Junior Letti, Eduardo Bittencourt Sydney, Júlio César de Carvalho, Luciana Porto de Souza Vandenberghe, Susan Grace Karp, Adenise Lorenci Woiciechowski, Vanete Thomaz Soccol, Alessandra Cristine Novak, Antônio Irineudo Magalhães Junior, Walter José Martinez Burgos, Dão Pedrade Carvalho Neto, Carlos Ricardo Soccol (2022.): Chapter 16 - Roles and impacts of bioethanol and biodiesel on climate change mitigation, *Biomass, Biofuels, Biochemicals; Climate Change Mitigation: Sequestration of Green House Gases*, 373-400

Malak Anshassi, Thomas Smallwood, Timothy G. Townsend (2022.): Life cycle GHG emissions of MSW landfilling versus Incineration: Expected outcomes based on US landfill gas collection regulations, *Waste Management*, Volume 142, 44-54

Malav, L.C., Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, S., Sharma, G.K., Krishnan, S., Rezanian, S., Kamyab, H., Pham, Q.B., Yadav, S., Bhattacharyya, S., Yadav, V.K., Bach, Q.V. (2020.): A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: current practices, challenges, and future opportunities, *Journal of Cleaner Production*, 277, 123227

Materazzi, M., Foscolo, P.U., (2019.): The role of waste and renewable gas to decarbonize the energy sector, *Substitute Natural Gas from Waste*, Elsevier, London, United Kingdom, pp. 1–19

Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja (2022.): Izvješće o komunalnom otpadu za 2020. godinu, <https://mingor.gov.hr/> (pristupljeno 21.06.2022.)

Muhammad S.Shaikh, Pervez H.Shaikh, Khadija Qureshi, Inamullah Bhatti (2018.): Green House Effect and Carbon Foot Print, Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials Volume 2, Pages 120-125

Munir, M.T., Mohaddespour, A., Nasr, A.T., Carter, S. (2021.): Municipal solid waste to energy processing for a circular economy in New Zealand, Renewable and Sustainable Energy Reviews 145, 111080

Na Duana, Duoqiao Zhang, Benyamin Khoshnevisan, Panagiotis G. Kougias, Laura Treu, Zhidan Liu, Cong Lin, Hongbin Liu, Yuanhui Zhang, Irini Angelidaki (2020.): Human waste anaerobic digestion as a promising low-carbon strategy: Operating performance, microbial dynamics and environmental footprint, Journal of Cleaner Production, Volume 256, 120414

Nael AlQattan, Michael Acheampong, Foday M. Jaward, Funda Cansu Ertem, Nisha Vijayakumar, Tolulope Bello (2018.): Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven, Renewable Energy Focus, Volume 27, Number 00

Nidhi Kundariya, Swayansu Sabyasachi Mohanty, Sunita Varjani, Huu Hao Ngo, Jonathan W. C. Wong, Mohammad J. Taherzadeh, Jo-Shu Chang, How Yong Ng, Sang-Hyoun Kim, Xuan-Thanh Bui (2021.): A review on integrated approaches for municipal solid waste for environmental and economical relevance: Monitoring tools, technologies, and strategic innovations, Bioresource Technology 342, 125982

Nidhi Kundariya, Swayansu Sabyasachi Mohanty, Sunita Varjani, Huu Hao Ngo, Jonathan W. C. Wong, Mohammad J. Taherzadeh, Jo-Shu Chang, How Yong Ng, Sang-Hyoun Kim, Xuan-Thanh Bui (2021.): A review on integrated approaches for municipal solid waste for environmental and economical relevance: Monitoring tools, technologies, and strategic innovations, Bioresource Technology 342, 125982

Rezania, S., Oryani, B., Park, J., Hashemi, B., Yadav, K.K., Kwon, E.E., Hur, J., Cho, J., (2019.): Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a

focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications, *Energy Conversion and Management* 201, 112155

Rodionova, M.V., Poudyal, R.S., Tiwari, I., Voloshin, S.K., Zharmukhamedov, H.G., Nam, B.K., Zayadan, R.A., Bruce, B.D., Hou, H.J.M., Allakhverdiev, S.I., (2017.): Biofuel production: challenges and opportunities, *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 8450–8461

Ru Chen, Ruoyan Zhang, Hongyun Han (2021.): Where has carbon footprint research gone?, *Ecological Indicators* 120, 106882

Schmitt, E., Bura, R., Gustafson, R., Cooper, J., Vajzovic, A., (2012.): Converting lignocellulosic solid waste into ethanol for the State of Washington: an investigation of treatment technologies and environmental impacts, *Bioresource Technology* 104, 400–409

The World Bank Group (2021.): Primjena koncepta kružnoga gospodarstva u gospodarenju otpadom u Hrvatskoj, <https://www.worldbank.org/hr/country/croatia/brief/croatia-circular-economy-approaches-in-solid-waste-management> (pristupljeno: 21.07.2022.)

Tihomir Tomić, Daniel Rolph Schneider (2018.): The role of energy from waste in circular economy and closing the loop concept – Energy analysis approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98, 268–287

United States, Environmental Protection Agency – EPA: Waste Reduction Model (WARM) <https://www.epa.gov/warm> (pristupljeno 02.07.2022.)

Weiland, P. (2010.): Biogas production: current state and perspectives, *Applied Microbiology and Biotechnology* volume 85, 849–860

Ying-Chu Chen, Hsiao-Man Liu (2021.): Evaluation of greenhouse gas emissions and the feed-in tariff system of waste-to-energy facilities using a system dynamics model, *Science of the Total Environment* 792, 148445

Yong, Z.J., Bashir, M.J.K., Ng, C.A., Sethupathi, S., Lim, J.W., Show, P.L., (2019.): Sustainable waste-to-energy development in Malaysia: appraisal of environmental, financial, and public issues related with energy recovery from municipal solid waste, *Processes* 7 (10), 676

8. POPIS SLIKA

Slika 1 Suvremene tehnologije za proizvodnju energije iz otpada (Anh Tuan Hoang et al, 2022.).....	9
Slika 2 Proizvodnja energije kompostiranjem (a), anaerobnom digestijom (b) i odlaganjem (c) (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)	19
Slika 3 Model koji predstavlja dizajn i rad mikrobne gorivne ćelije (Lal Chand Malav et al, 2020.).....	28
Slika 4 Hijerarhija otpada i procesi pretvaranja otpada u energiju (Anonymous 2017.)	34

9. POPIS TABLICA

Tablica 1 Usporedba WtE tehnologija (E.K. Tetteh et al, 2021.)	5
Tablica 2 Usporedba energetske i okolišne karakteristike za WtE proces iz komunalnog otpada (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)	7
Tablica 3 Ključni parametri izravnih WtE procesa (Anh Tuan Hoang et al, 2022.)	12
Tablica 4 Gospodarenje komunalnim otpadom sakupljenim i ukupno proizvedenim komunalnim otpadom u 2020. godini (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2022.)	38
Tablica 5 Prikaz emisija po toni otpada i tehnologiji obrade	40
Tablica 6 Ukupne emisije za prvi scenarij odnosno za situaciju u Hrvatskoj 2020.	40
Tablica 7 GHG emisije za drugi scenarij	41
Tablica 8 GHG emisije za treći scenarij	43

10. POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1 1. scenarij ugljičnog otiska	41
Grafikon 2 2. scenarij ugljičnog otiska	42
Grafikon 3 3. scenarij ugljičnog otiska	43
Grafikon 4 Usporedba tri scenarija	44