

Uloga komunalnog otpada u smanjenju emisija stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj

Kirac, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2009

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:720512>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mislav Kirac

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Daniel R. Schneider

Mislav Kirac

Zagreb, 2009.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem, navedenom literaturom, uz nadzor i stručne savjete mentora doc. dr. sc. Daniela R. Schneidera i mr. sc. Andree Hublin.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Danielu R. Schneideru na stručnim savjetima, korisnim raspravama i potpori tijekom izrade ovog rada.

Najveće hvala mr. sc. Andrei Hublin na velikom strpljenju, nesebično uloženom vremenu, trudu i znanju što je rezultiralo većom kvalitetom ovog rada.

Hvala mojoj obitelji i prijateljima na potpori i razumijevanju. Oni su moje studiranje učinili najljepšim razdobljem života.

Na kraju, posebno hvala mojoj Ani na bezrezervnoj podršci i razumijevanju.

SADRŽAJ.....	V
POPIS SLIKA	VII
POPIS TABLICA.....	VIII
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	X
SAŽETAK.....	XII
SUMMARY	XIII
1. UVOD	1
2. ODRŽIVO GOSPODARENJE KOMUNALNIM OTPADOM	4
2.1. Korištenje otpada kao obnovljivog izvora energije	5
2.2. Uloga komunalnog otpada u energetske strategiji	10
3. NAJBOLJE RASPOLOŽIVE TEHNIKE.....	13
3.1. Mjere iskorištavanja materijalnih i energetskih potencijala komunalnog otpada i odlagališnog plina	13
3.1.1. Biološka obrada.....	13
3.1.2. Mehaničko biološka obrada otpada (MBO).....	14
3.1.3. Energane na odlagališni plin (ENOP).....	15
3.1.4. Energane na otpad (ENO)	18
3.2. Identifikacija ključnih čimbenika zaštite okoliša u sektoru gospodarenja komunalnim otpadom	26
3.2.1. Emisije u zrak	26
4. METODOLOGIJA	29
4.1. Model za proračun emisija stakleničkih plinova	31
4.1.1. Određivanje emisije CH ₄	31
4.1.2. Određivanje emisije CO ₂	38
5. TEMELJNI SCENARIJ.....	39
5.1. Ulazni podaci	41
5.2. Projekcije emisija (temeljni scenarij).....	44
6. SCENARIJ S MJERAMA	46
6.1. Mehaničko-biološka obrada komunalnog otpada	46
6.1.1. Smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada	47
6.1.2. Proizvodnja bioplina u bioreaktorima.....	51
6.1.3. Korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji.....	53
6.2. Spaljivanje metana na baklji i korištenje metana za proizvodnju električne energije	57
6.2.1. Spaljivanje metana na baklji	57
6.2.2. Korištenje metana za proizvodnju električne energije	61
6.3. Ukupni potencijal scenarija s mjerama	64
7. SCENARIJ S DODATNIM MJERAMA	65
7.1. Termička obrada komunalnog otpada (energana na otpad)	65
7.1.1. Ulazni podaci.....	65

7.1.2. Projekcije emisija	68
7.1.3. Potencijal smanjenja emisija CO ₂ uz mjeru termičke obrade komunalnog otpada.....	69
7.2. Korištenje goriva iz otpada u energani na otpad	71
8. ANALIZA GRANIČNIH TROŠKOVA	72
8.1. Mehaničko-biološka obrada komunalnog otpada	74
8.2. Spaljivanje metana na baklji	75
8.3. Proizvodnja električne energije iz odlagališnog plina	76
8.4. Korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji	77
8.5. Termička obrada komunalnog otpada	79
8.6. Krivulja graničnih troškova	80
9. ANALIZA OSJETLJIVOSTI.....	81
9.1. Utjecaj količine obrađenog plina na granični trošak uporabe odlagališnog plina	81
9.2. Utjecaj cijene goriva iz otpada na granični trošak korištenja goriva iz otpada u cementnoj industriji	82
9.3. Utjecaj ulazne naknade na granični trošak termičke obrade komunalnog otpada	83
10. RASPRAVA	84
11. ZAKLJUČAK.....	90
12. LITERATURA.....	91

POPIS SLIKA

Slika 1. Proizvodnja i metode zbrinjavanja komunalnog otpada u EU	9
Slika 2. Termička obrada komunalnog otpada u EU-15 (1995.-2005.)	9
Slika 3. Mehaničko-biološka obrada otpada	15
Slika 4. Postupak proizvodnje električne energije iz odlagališnog plina	16
Slika 5. Sustav izgaranja na rešetki.....	20
Slika 6. Sustav s rotacijskim ložištem	22
Slika 7. Potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova za određeno vremensko razdoblje	29
Slika 8. Hijerarhijski koncept gospodarenja otpadom	30
Slika 9. Blok dijagram izbora modela proračuna emisije CH ₄ s odlagališta krutog komunalnog otpada	36
Slika 10. Emisije CH ₄ za temeljni scenarij	45
Slika 11. Emisije CH ₄ uz mjeru smanjenja količine odloženog biorazgradivog otpada	51
Slika 12. Emisije CH ₄ uz mjeru spaljivanja metana na baklji	61
Slika 13. Emisije CH ₄ uz mjeru termičke obrade komunalnog otpada.....	69
Slika 14. Krivulja graničnih troškova mjera M1, M2 i M3 (2010. godina)	80
Slika 15. Krivulja graničnih troškova mjera M4 i M5 (2015. godina)	80
Slika 16. Ovisnost graničnog troška uporabe odlagališnog plina o udjelu oporabljenog odlagališnog plina.....	81
Slika 17. Ovisnost graničnog troška korištenja RDF-a u cementnoj industriji o cijeni RDF-a	82
Slika 18. Ovisnost graničnog troška termičke obrade komunalnog otpada o visini ulazne naknade	83
Slika 19. Emisije CH ₄ temeljnog scenarija, scenarija s mjerama i mjerom termičke obrade komunalnog otpada	87

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ciljevi za pojedine obnovljive izvore energije	10
Tablica 2. Instalirani kapaciteti za proizvodnju električne i toplinske energije iz obnovljivih izvora energije (2007.)	11
Tablica 3. Visine tarifne stavke (C) za isporučenu električnu energiju iz postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije snage veće od 1 MW	12
Tablica 4. Prosječni kapacitet postrojenja za spaljivanje krutog komunalnog otpada u EU	21
Tablica 5. Glavne emisije pri obradi otpada.....	27
Tablica 6. Klasifikacija odlagališta krutog komunalnog otpada i <i>default</i> vrijednosti za korekcijski faktor metana (MCF)	36
Tablica 7. Sastav odvojeno skupljenog komunalnog otpada 2005. godine	42
Tablica 8. Ulazni podaci (temeljni scenarij).....	43
Tablica 9. Temeljni scenarij	44
Tablica 10. Količina otpada za MBO u svrhu ostvarivanja ciljeva Direktive.....	48
Tablica 11. Ulazni podaci (smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada)	49
Tablica 12. Projekcije emisija (smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada).....	50
Tablica 13. Karakteristike bioplina iz biorektorskog postrojenja	52
Tablica 14. Potencijal proizvodnje električne energije i bonitet emisija korištenjem bioplina	52
Tablica 15. Količina goriva iz otpada za cementnu industriju	55
Tablica 16. Potencijal smanjenja emisija CO ₂ u cementnoj industriji	57
Tablica 17. Potencijal proizvodnje i korištenja goriva iz otpada [t]	57
Tablica 18. Ulazni podaci (spaljivanje metana na baklji).....	59
Tablica 19. Projekcije emisija (spaljivanje metana na baklji)	60
Tablica 20. Energetska vrijednost odlagališnog plina i proizvedena električna energija	62
Tablica 21. Potencijal smanjenja emisija CO ₂ pri proizvodnji električne energije iz odlagališnog plina	63
Tablica 22. Ukupni potencijal smanjenja emisija CH ₄ i CO ₂ scenarija s mjerama [tCO ₂ eq]	64
Tablica 23. Ulazni podaci (termička obrada komunalnog otpada)	67
Tablica 24. Projekcije emisija (termička obrada komunalnog otpada).....	68

Tablica 25. Potencijal smanjenja emisija CO ₂ uz mjeru termičke obrade komunalnog otpada	70
Tablica 26. Potencijal mjere termičke obrade goriva iz otpada u energanama na otpad.....	71
Tablica 27. Granični trošak obrade otpada anaerobnom digestijom	75
Tablica 28. Granični trošak spaljivanja metana na baklji	76
Tablica 29. Granični trošak korištenja metana za proizvodnju električne energije.....	77
Tablica 30. Granični trošak korištenja goriva iz otpada u cementnoj industriji.....	78
Tablica 31. Granični trošak termičke obrade komunalnog otpada.....	79
Tablica 32. Ukupni potencijal smanjenja emisija CH ₄ i CO ₂	88

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

ΔEAC	razlika ekvivalentnih godišnjih troškova dva scenarija [€/god]
B_F	udio biorazgradivog otpada u komunalnom otpadu
C_C	specifični trošak po jedinici energije [€/GJ]
CCW_i	udio ugljika u otpadu
C_{FG}	trošak goriva za proizvodnju klinkera [€/god]
C_{KO}	tarifna stavka za energiju iz komunalnog otpada [kn/MWh]
C_t	troškovi kapitala - investicije [€/god]
DOC	razgradivi organski ugljik [GgC/MSW _T]
DOC_F	udio disimiliranog razgradivog organskog ugljika
EAC	ekvivalentni godišnji troškovi [€/god]
EAC_m	ekvivalentni godišnji troškovi scenarija smanjenja emisije [€/god]
EAC_n	ekvivalentni godišnji troškovi referentnog scenarija [€/god]
E_C	ukupna potrebna energija za proizvodnju klinkera [GJ/god]
E_f	godišnji ulaz energije u sustav iz goriva koje se koristi za proizvodnju pare [GJ/god]
EF	emisijski faktor [tCO ₂ /TJ]
EF_F	ukupni prosječni emisijski faktor (fosilna goriva) [tCO ₂ /t]
EF_i	efikasnost izgaranja otpada
EF_i	prosječni emisijski faktor goriva u cementari [tCO ₂ /t]
EF_j	emisijski faktor pojedinog fosilnog goriva [tCO ₂ /t]
EF_{RDF}	emisijski faktor goriva iz otpada [tCO ₂ /t]
E_i	godišnje uvezena energija [GJ/god]
E_m	emisija rješenja kojim se smanjuje emisija [t/god]
E_n	emisija referentnog rješenja [t/god]
E_p	godišnje proizvedena energija u ENO [GJ/god]
E_{UK}	ukupna proizvedena energija [GJ/god]
E_w	godišnja energetska vrijednost obrađenog otpada [GJ/god]
F	udio CH ₄ u odlagališnom plinu
FCF_i	udio fosilnog ugljika u otpadu

FG	količina fosilnih goriva [t]
H_d	donja ogrjevna vrijednost [MJ/kg]
$H_{d_{UK}}$	ukupna prosječna ogrjevna vrijednost goriva [MJ/kg]
IW_i	količina spaljenog otpada vrste (Gg/god)
k	konstanta generiranja CH_4
L_0	potencijal generiranog metana [Gg CH_4 /Gg otpada]
MCF	korekcijski faktor metana
MSW_F	udio krutog komunalnog otpada odloženog na odlagalište
MSW_T	ukupna stvorena količina krutog komunalnog otpada [Gg/god]
O_t	troškovi održavanja pogona [€/god]
OX	oksidacijski faktor
P_C	potencijal smanjenja emisije CO_2 [t]
R	regenerirani, spaljeni metan [Gg/god]
r	diskontna stopa [%]
RDF	količina goriva iz otpada [t]
R_t	prihod od prodaje proizvoda i energije [€/god]
t	vrijeme [god]
T_{KO}	godišnja količina komunalnog otpada [t]
y_j	udio pojedinog fosilnog goriva u ukupnom gorivu
y_j	udio pojedinog fosilnog goriva u ukupnom gorivu
η	stupanj iskoristivosti
λ	koeficijent pretička zraka
H_{d_i}	prosječna ogrjevna vrijednost goriva pojedine cementare [MJ/kg]
H_{d_j}	ogrjevna vrijednost pojedinog fosilnog goriva [MJ/kg]

U okviru ovog rada analiziran je potencijal mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova iz gospodarenja komunalnim otpadom. Dan je pregled najboljih raspoloživih tehnika i objašnjena metodologija korištena za izračun emisija. Definirani su scenariji smanjenja emisija stakleničkih plinova u gospodarenju komunalnim otpadom, a emisije su procijenjene korištenjem kinetičkog modela. U svrhu analize mogućnosti smanjenja emisija stakleničkih plinova u gospodarenju komunalnim otpadom izrađena su tri scenarija: temeljni scenarij, scenarij s mjerama i scenarij s dodatnim mjerama. Potencijali mjera uključenih u scenarije smanjenja emisija stakleničkih plinova prikazani su u odnosu na temeljni scenarij.

Analizirani su granični troškovi mjera, a u svrhu određivanje prioriteta mjera sa stajališta njihove ekonomičnosti izrađena je krivulja graničnih troškova. Analizom osjetljivosti razmatrana je ekonomičnost mjera u ovisnosti o promjeni pojedinih parametara.

Pitanje smanjenja emisija stakleničkih plinova vezano je uz sve gospodarske djelatnosti u Hrvatskoj, a implementacija najboljih raspoloživih tehnika u gospodarenju otpadom omogućena je međusektorskim utjecajem i učinkom pojedinih mjera. Korištenjem komunalnog otpada kao goriva u industriji i energetici te proizvodnjom energije iz odlagališnog plina mogu se ostvariti značajne energetske, ekološke i ekonomske koristi, što je i naglašeno ovim radom.

Ključne riječi:

komunalni otpad, emisije stakleničkih plinova, potencijali smanjenja emisija, granični troškovi

Main focus of this thesis is the analysis of potentials of greenhouse gas emission reduction measures from the waste management. Overview of best available techniques in waste management is provided and the methodology used for calculations is also explained. Scenarios of greenhouse gas emission reduction in waste management were defined so that emissions were calculated using kinetic model. Three scenarios were developed with the purpose to analyze greenhouse gas emissions reduction in waste management: basic scenario, with measures scenario and with additional measures scenario. The potentials of emission reduction measures included in these scenarios were analyzed in regard to the basic scenario. In order to determine the priority between the measures concerned, respecting cost-effectiveness, marginal costs were calculated and also marginal cost curve was drawn. Sensitivity analysis considers cost-effectiveness of measures dependent on variation of considerable parameters.

Greenhouse gas emission reduction is correlated with all economy activity in Croatia. Implementation of the best available techniques in waste management is enabled by cross-sectoral impact and effect of respective measures. Energy, environmental and economic benefits can be accomplished by utilizing municipal solid waste as fuel in industry and energy and moreover by utilizing energy generation from landfill gas, which this thesis emphasizes.

Keywords:

municipal waste, waste greenhouse gas emissions, emission reduction potentials, marginal costs

1. UVOD

Povećana proizvodnja komunalnog otpada traži sustavno planiranje i provedbu gospodarenja otpadom kako bi se umanjili štetni ekološki i socijalni učinci. Odlagališta otpada ne predstavljaju održivo rješenje i u hijerarhiji gospodarenja otpadom nalaze se na posljednjem mjestu. Na prvom mjestu svakako je smanjenje nastajanja otpada. Ipak, nastajanje otpada nije moguće posve izbjeći radi čega je potrebno provesti mjere koje će smanjiti odlaganje otpada na odlagališta.

Obveza smanjenja emisija stakleničkih plinova, koju je Hrvatska preuzela ratifikacijom Protokola iz Kyota, predstavlja bitan čimbenik pri planiranju gospodarenja otpadom. Pojedine mjere zbrinjavanja otpada imaju različit potencijal smanjenja emisija, naročito ako se u obzir uzmu i ekonomska ograničenja što će biti prikazano u ovom radu.

Odabir optimalnih mjera zbrinjavanja otpada proces je u kojem je potrebno analizirati mnoge čimbenike. Ovako opsežan interdisciplinarni zadatak nije moguće jednoznačno riješiti, već je potrebno optimirati rješenje prema unaprijed zadanim kriterijima.

Zakonom o otpadu [1], Strategijom gospodarenja otpadom Republike Hrvatske [2] (u daljnjem tekstu: Strategija) te Planom gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj [3] (u daljnjem tekstu: Plan) stvoreni su preduvjeti za uspostavu cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom. Strategijom i Planom uređuje se gospodarenje različitim vrstama otpada, među kojima je i komunalni otpad. Strategija je utemeljena u skladu s postavljenim

ciljevima hijerarhijskog koncepta gospodarenja otpadom. Tri faze hijerarhijskog koncepta, izbjegavanje – vrednovanje – odlaganje, poredane su po važnosti, a u sebi sadrže najvažnije mjere gospodarenja krutim komunalnim otpadom. Izbjegavanje nastanka otpada (prevencija) ima najviši prioritet, a rezultira smanjenjem količine i štetnosti proizvedenog otpada koji ulazi u iduću fazu sustava. Vrednovanje (iskorištavanje) proizvedenog otpada ima zadaću iskoristiti materijalna i energetska svojstva otpada u granicama tehničkih, ekoloških i ekonomskih mogućnosti ponovnog korištenja, recikliranja i uporabe, a najvažniji elementi su odvojeno skupljanje i recikliranje otpada, te mehanička, biološka, termička i ostale vrste obrade otpada. Odlaganje ostatnog otpada na uređena kontrolirana (sanirana postojeća ili nova) odlagališta otpada najniže je rangirano u hijerarhiji gospodarenja krutim komunalnim otpadom.

Odlaganje krutog komunalnog otpada je za sada jedina metoda gospodarenja tom vrstom otpada u Hrvatskoj. Ostvarivanje i održavanje cjelovitog sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom, od nastanka do konačnog odlaganja, potrebno je uskladiti prema suvremenim europskim standardima i zahtjevima, sa svrhom da se maksimalno izbjegne ili smanji nastajanje otpada, kao i njegov utjecaj na ljudsko zdravlje, okoliš i klimu, odnosno, da se cjelokupno gospodarenje krutim komunalnim otpadom uskladi s načelima održivog razvoja.

Politika klimatskih promjena treba biti jedan od ključnih čimbenika u ostvarivanju održivog razvoja u Hrvatskoj, a gospodarski razvoj oslonac u ublažavanju klimatskih promjena. Preuzimanjem pravne stečevine Europske unije iz područja klimatskih promjena prenose se 'prokušani' i učinkoviti instrumenti provedbe politike ublažavanja klimatskih promjena, a ključni zadatak u tom procesu je integracija politike klimatskih promjena u sektorsku strategiju gospodarenja otpadom. Mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova u sektoru gospodarenja otpadom trebaju postati integralni dio strategije sektora, a ujedno predstavljaju i mjere za postizanje nacionalnih ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova, što je od posebne važnosti iz perspektive hrvatskih obveza o odnosu na Protokol iz Kyota. Ratifikacijom Protokola iz Kyota [4] Hrvatska se obvezala na smanjenje emisija stakleničkih plinova za 5 % u odnosu na baznu 1990. godinu, tijekom razdoblja obveze od 2008. do 2012. godine. Taj cilj može se postići primjenom troškovno učinkovitih mjera koje trebaju postati

integralni dio sektorskih gospodarskih programa i strategija. Prema tome, ispunjenje obveza prema Protokolu iz Kyota i provedba mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova imat će značajan utjecaj na održivi razvoj u Hrvatskoj.

U razdoblju nakon 2012. godine slijede još veće obveze, s mogućim snažnijim gospodarskim implikacijama, pa razumijevanje koristi i troškova politike klimatskih promjena postaje sve značajnije. Europska unija postavila je za cilj da do 2020. godine smanji emisije stakleničkih plinova za 20 % u odnosu na 1990. godinu (odnosno 30 % ako sporazum prihvate još neke države), uz istovremeno korištenje 20 % obnovljivih izvora energije.

Neovisno o ishodu pregovora koje Hrvatska vodi sa međunarodnom zajednicom oko povećanja emisije u baznoj godini [5], smanjivanje emisija stakleničkih plinova uz istovremeni planirani gospodarski rast predstavljat će veliki tehnološki i ekonomski izazov. Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC) i Protokol iz Kyota ostavljaju strankama da same ili zajedno s drugim strankama definiraju strategiju, politiku, programe i mjere čijom će provedbom ostvariti konačni cilj. Hrvatska se, kao stranka Priloga I Konvencije, obvezala da će smanjivati emisije stakleničkih plinova. Smanjenje emisija stakleničkih plinova potrebno je ostvariti primjenom tehničkih mjera provedbom postojeće politike te korištenjem tržišnih opcija, koje uključuju europsku shemu trgovanja emisijama CO₂ i fleksibilne mehanizme Kyoto protokola. U razdoblju nakon 2020. godine gospodarstvo je potrebno usmjeriti na tehnologije koje nisu temeljene na ugljiku, uz primjenu novih tehnologijskih rješenja.

U ovom je radu dat prikaz mjera iskorištavanja materijalnih i energetske potencijala komunalnog otpada i odlagališnog plina, koje ujedno predstavljaju i mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Pri tome je naglašeno iskorištavanje komunalnog otpada kao obnovljivog izvora energije. Strategijom i Planom utvrđena je dinamika implementacije mjera koje su ugrađene u temeljni scenarij, scenarij s mjerama i scenarij s dodatnim mjerama. Projekcija unutar scenarija prikazane su do 2020. godine, s osvrtom na 2030. godinu.

2. ODRŽIVO GOSPODARENJE KOMUNALNIM OTPADOM

Održivo gospodarenje komunalnim otpadom podrazumijeva provedbu niza mjera koje će omogućiti ublažavanje ljudskog utjecaja na okoliš i životni prostor. Očuvanje primarnih izvora energije primjenom otpada kao obnovljivog izvora energije, ekološke koristi koje se očituju smanjenjem emisija stakleničkih plinova i ostalih onečišćujućih tvari te pozitivni socijalno-gospodarski učinci naglašavaju važnost i doprinos održivog gospodarenja komunalnim otpadom [6]. Europskim direktivama definiran je hijerarhijski koncept gospodarenja otpadom. Najveći naglasak stavljen je na sprječavanje nastanka otpada, a odlaganje ostatnog otpada na odlagališta predstavlja posljednju mjeru u postupku održivog gospodarenja otpadom. Osnovna načela hijerarhijskog koncepta poredana su po važnosti:

1. Prevencija nastajanja otpada
2. Ponovna uporaba
3. Materijalna uporaba
4. Energetska uporaba ili druge vrste obrade
5. Odlaganje ostatnog otpada

Strategija gospodarenja otpadom EU [7] koja se temelji na Okvirnoj direktivi o otpadu [8], Direktivi o odlaganju otpada [9] i ostalim propisima, u hijerarhijskom konceptu gospodarenja otpadom postavlja materijalnu i energetska uporabu ispred odlaganja otpada. Okvirna direktiva o otpadu nalaže povećanje udjela oporabljene i recikliranog komunalnog otpada

na minimalno 50 % do 2020. godine. Zakonom o otpadu, Strategijom i Planom kao strateški cilj istaknuta je uspostava učinkovitog sustava gospodarenja otpadom usklađenog s načelima održivog razvoja.

Planom je definirano da će se sustav gospodarenja otpadom organizirati kao integralna cjelina svih subjekata na nacionalnoj, regionalnoj i lokalnoj razini. Strategijom je dugoročno predviđeno osnivanje regionalnih i županijskih centara za gospodarenje otpadom (CGO-a), koji će biti centralna mjesta za obradu i odlaganje otpada. U sklopu CGO-a koristit će se tehnološki postupci za oporabu komunalnog otpada i odlagališnog plina.

Direktivom o odlaganju otpada (u daljnjem tekstu: Direktiva) nalaže se smanjenje udjela biorazgradivog otpada odloženog na odlagališta. Prema Direktivi odloženi biorazgradivi komunalni otpad mora se smanjiti na 75 % (težinski) od ukupno proizvedenog biorazgradivog komunalnog otpada u 1997. godini do 2012., 50 % do 2015. godine te 35 % do 2020. godine. Direktiva ima za cilj prevenciju i smanjenje negativnih utjecaja odlagališta komunalnog otpada na okoliš ostvarivanjem hijerarhijskog koncepta gospodarenja otpadom, kroz izbjegavanje i smanjivanje količine otpada te povećanje količine ponovno uporabljenog i recikliranog otpada i odlagališnog plina [10].

2.1. Korištenje otpada kao obnovljivog izvora energije

Korištenje otpada kao obnovljivog izvora energije predstavlja jedan od načina održivog gospodarenja otpadom. Iako energetska korist nije zanemariva, primarni cilj energetske uporabe otpada je održivo gospodarenje otpadom. Ostvarivanje i održavanje cjelovitog sustava gospodarenja komunalnim otpadom, od nastanka do konačnog odlaganja, potrebno je uskladiti prema suvremenim europskim standardima i zahtjevima, sa svrhom da se maksimalno izbjegne ili smanji nastajanje otpada, kao i njegov utjecaj na ljudsko zdravlje, okoliš i klimu, odnosno, da se cjelokupno gospodarenje komunalnim otpadom uskladi s načelima održivog razvoja.

Osim izravne energetske koristi korištenjem otpada kao obnovljivog izvora energije mogu se ostvariti i drugi korisni učinci:

- smanjenje mase i volumena otpada
- smanjenje organskog udjela u odloženom otpadu
- uništavanje organskih štetnih tvari
- smanjenje emisija stakleničkih plinova
- smanjenje potrošnje primarnih izvora energije

Procijenjena količina ukupno proizvedenog komunalnog otpada na području Republike Hrvatske za 2007. godinu iznosi oko 1.700.000 t. Količina otpada odloženog na odlagališta procjenjuje se na oko 1.600.000 t. Godišnji energetske potencijal komunalnog otpada u Hrvatskoj procjenjuje se na 12 PJ (uz prosječnu ogrjevnu moć od 7,5 MJ/kg) [11] što predstavlja 2,8 % ukupne godišnje potrošnje energije.

Ovisno o tehnološkom postupku kojim se otpad obrađuje moguće je proizvoditi električnu i toplinsku energiju. Energija se može isporučivati u mrežu ili se može koristiti za potrebe obližnjih industrijskih postrojenja.

Najraširenije mjere za obradu komunalnog otpada koje ujedno predstavljaju i mjere materijalne uporabe otpada su mehaničko-biološka obrada i izgaranje otpada. Odlaganje komunalnog otpada je najniže rangirana mjera u hijerarhijskom konceptu gospodarenja komunalnim otpadom.

Postupcima mehaničko-biološke obrade (MBO) iz otpada se izdvajaju metali i lako gorivi dio otpada. Metali se upućuju u odgovarajuću industriju kao sekundarne sirovine, a lako gorivi dio koji sadrži visoko ogrjevne frakcije otpada (papir, karton, plastiku, tekstil i sl.) prikladan je za upotrebu u industriji i energetici. Organski ostatak se dalje obrađuje biološkim procesima u stabilni produkt. Neizravno smanjenje emisije ostvaruje se smanjenjem količine otpada biološkog podrijetla koji se odlaže na odlagališta, što rezultira smanjenom emisijom metana (CH₄) do koje bi došlo tijekom anaerobnih procesa razgradnje otpada na odlagalištima.

Korištenje goriva iz komunalnog otpada u industriji s intenzivnom potrošnjom energije i u energetici vrlo je atraktivna mjera s gledišta očuvanja primarnih izvora energije, smanjenja emisija stakleničkih plinova, te smanjenja količine otpada koji se odlaže na odlagalište. Gorivo iz otpada (eng. *refuse derived fuel, RDF*) dobiva se sortiranjem i preradom krutog komunalnog i industrijskog otpada. Ima visoku ogrjevnu vrijednost (oko 15 MJ/kg), a njegovim suizgaranjem u industriji (cementare) i energetici (termoelektrane) postiže se dobro iskorištenje raspoložive energije.

Izgaranje je najrašireniji postupak zbrinjavanja otpada nakon odlaganja u kojem se otpad spaljuje s malo ili bez prethodne obrade. Suvremena postrojenja imaju obvezu energetske oporabiti otpad (energane na otpad, ENO) bilo za proizvodnju električne ili toplinske energije. Kako bi se izbjegla eventualna zloupotreba sustava potpora za energetske oporabu otpada propisan je stupanj energetske iskoristivosti koji postrojenje treba zadovoljiti kako bi se proces izgaranja otpada u tom postrojenju smatrao oporabom [8]:

- 0,6 – za postrojenja puštena u pogon prije 1. siječnja 2009. godine
- 0,65 – za postrojenja puštena u pogon nakon 31. prosinca 2008. godine

Stupanj energetske iskoristivosti računa se prema formuli:

$$\eta = (E_p - (E_f + E_i)) / (0,97 \cdot (E_w + E_f))$$

gdje je:

E_p – godišnje proizvedena energija (električna ili toplinska), izračunava se pomoću električne energije pomnožene s 2,6 i s toplinske energije pomnožene s 1,1 [GJ/god]

E_f – godišnji ulaz energije u sustav iz goriva koje se koristi za proizvodnju pare [GJ/god]

E_w – godišnja energetska vrijednost obrađenog otpada izračunata s neto ogrjevnom vrijednosti otpada [GJ/god]

E_i – godišnje uvezena energija, ne uključujući E_w i E_f [GJ/god]

0,97 – faktor koji predstavlja gubitke energije u ostatnom pepelu i radijaciji.

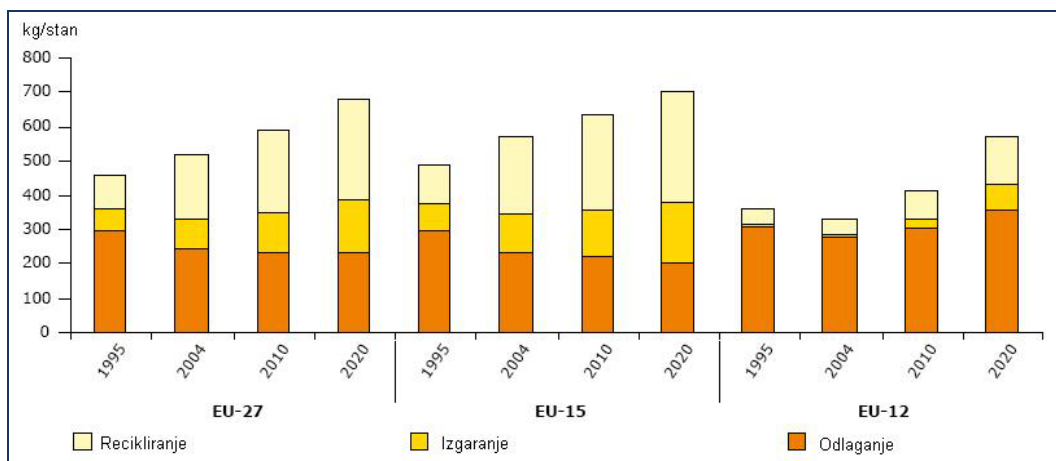
Ostatak izgaranja najviše se odnosi na neorganski pepeo koji se potom odlaže na odlagalište. Termičkom obradom komunalnog otpada smanjuje se volumen otpada (do 90 %) te se izdvajaju ili uništavaju potencijalno opasne tvari iz otpada.

Odlaganje komunalnog otpada na odlagalište podrazumijeva odlaganje otpada s malo ili bez prethodne obrade. Prema Okvirnoj direktivi o otpadu neće biti moguće odložiti otpad bez prethodne obrade. Odlaganje organskog otpada rezultira stvaranjem odlagališnog plina koji najviše doprinosi emisiji stakleničkih plinova iz otpada. Odlaganje, kao posljednja mjera u hijerarhijskom konceptu gospodarenja komunalnim otpadom, preporuča se samo za odlaganje stabilnog ostatka iz kojeg je iscrpljena sva energetska i biološka vrijednost. Nastali odlagališni plin može se sakupiti i spaliti na baklji ili koristiti kao gorivo [12].

Nastajanje odlagališnog plina na odlagalištu otpada traje desetljećima, a raspoložive količine plina za ekonomičnu proizvodnju energije traju dvadesetak godina. Odlagališni plin je smjesa CH_4 i CO_2 te u manjoj mjeri ostalih plinova (O_2 , N_2 , H_2 i dr.). Sastav otpada je glavni faktor koji utječe na količinu nastalog CH_4 u odlagalištu.

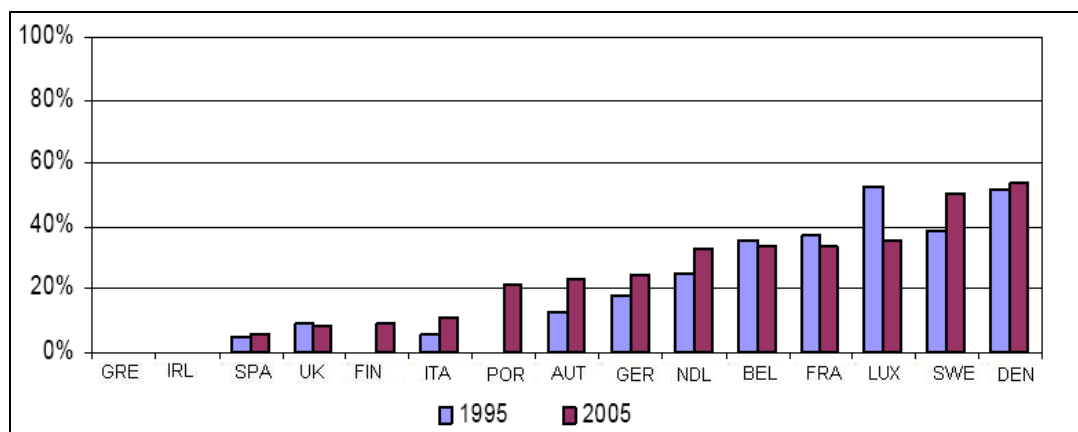
Broj energana i količina u njima termički obrađenog otpada u državama EU stalno rastu. Krajem 2003. u EU je radilo 405 energana na otpad koje su termički obrađivale oko 52 Mt/god komunalnog otpada (20 % od ukupne količine komunalnog otpada) [13]. Pritom je proizvedeno oko 25 TWh/god električne energije i odgovarajuća količina toplinske energije, čime je potrošnja fosilnih goriva smanjena za približno 10 Mt/god (tona ekvivalenta nafte), uz odgovarajuće smanjenje emisije stakleničkih plinova do kojeg dolazi prilikom njihovog izgaranja.

Slika 1 prikazuje količine proizvedenog otpada i mjere zbrinjavanja u zemljama EU-27 te posebno u starim članicama EU-15 i novim članicama EU-12. Prikazane su i projekcije do 2010. i 2020. godine.



Slika 1. Proizvodnja i metode zbrinjavanja komunalnog otpada u EU [14]

Praksa pojedinih europskih zemalja u termičkoj obradi komunalnog otpada znatno se razlikuje (Slika 2) što dokazuje kako se metode gospodarenja otpadom trebaju prilagoditi lokalno-regionalnim čimbenicima (količina otpada, sastav otpada, geografski čimbenici...).



Slika 2. Termička obrada komunalnog otpada u EU-15 (1995.-2005.) [15]

Kontrolirano skupljanje i iskorištavanje energije odlagališnog plina započelo je u razvijenijim državama početkom 1980.-ih godina i od tada broj energana na odlagališni plin u EU neprestano raste. 1985. godine u EU je bilo oko 65 energana, 1995. godine taj broj se povećao na 300, a 2005. se udvostručio (oko 650 energana na odlagališni plin). Proizvodnja od 10,7 TWh električne energije iz komunalnog otpada u 2005. godini u zemljama EU predstavlja povećanje od 7 posto u odnosu na 2004. godinu [16].

2.2. Uloga komunalnog otpada u energetske strategiji

Sigurnost dobave energije jedan je od najvažnijih zadataka svake društvene zajednice. Vlastita opskrbljenost energijom 2007. godine u Hrvatskoj je iznosila 46,7 %. Očekuje se postupno smanjivanje vlastite opskrbljenosti te će ona iznositi oko 28 % u 2030. godini [17], dok će ostali dio potrebne energije Hrvatska morati uvoziti. U tom smislu energetska uporaba otpada predstavlja doprinos u smanjenju energetske ovisnosti. Energija iz otpada u ukupnoj proizvodnji energije ne može predstavljati značajan udio, ali njezin lokalni značaj može biti velik. U industrijskim zonama i područjima bez energetske infrastrukture otpad se može koristiti kao distribuirani izvor energije.

U okviru Strategije predviđena je izgradnja regionalnih i županijskih centara za gospodarenje otpadom u sklopu kojih se planira izvedba postrojenja za mehaničko-biološku obradu otpada. Mogućnosti plasmana goriva iz otpada iz takvih postrojenja postoje u termoelektranama na ugljen, tvornicama cementa i drugim industrijama s industrijskim pećima te eventualnim budućim energanama na otpad.

Nacrt Zelene knjige predviđa znatnu uporabu obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. Za cilj je postavljeno ukupno 1545 MW instalirane snage u obnovljivim izvorima energije u 2020. godini, ne računajući velike hidroelektrane [18].

Tablica 1 prikazuje ciljeve za pojedine obnovljive izvore do 2020. godine (s pogledom na 2030. godinu).

Tablica 1. Ciljevi za pojedine obnovljive izvore energije [18]

IZVOR ENERGIJE	Električna snaga (MW)	
	2020.	2030.
Vjetroelektrane	1200	2000
Elektrane na biomasu	140	420
TE na komunalni otpad	40	60
Geotermalne elektrane	20	30
Sunčeve elektrane	45	250
Male hidroelektrane	100	140

Povećanje udjela energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj proizvedenoj energiji važan je cilj europske pa tako i hrvatske energetske politike koja je kao cilj definirala 20 % energije iz obnovljivih izvora energije do 2020. godine. Također, Protokol iz Kyota nalaže smanjenje

emisija stakleničkih plinova u razdoblju od 2008. do 2012. godine. Ratifikacijom Protkola iz Kyota Hrvatska se obvezala na smanjenje emisija stakleničkih plinova za 5 % u odnosu na bazu 1990. godinu. Energetska uporaba otpada pridonosi ispunjavanju oba navedena cilja istodobno; korištenje otpada (organskog dijela) kao obnovljivog izvora energije i smanjenje emisija stakleničkih plinova uštedom primarnih izvora energije.

U Hrvatskoj je 2007. godine bilo instalirano približno 52 MW električne i 671 MW toplinske snage iz obnovljivih izvora, a strukturu izvora prikazuje Tablica 2. Kako bi se potaknula proizvodnja energije iz obnovljivih izvora uvedene su posebne poticajne naknade kako prikazuje Tablica 3.

Tablica 2. Instalirani kapaciteti za proizvodnju električne i toplinske energije iz obnovljivih izvora energije (2007.) [17]

VRSTA IZVORA	INSTALIRANA TOPLINSKA SNAGA [MW]	INSTALIRANA ELEKTRIČNA SNAGA [MW]
Sunce	45,50	0,05
Vjetar	0	17,15
Biomasa	512,00	2,00
Male hidroelektrane	0	32,76
Geotermalna	113,90	0
UKUPNO	671,40	51,96

Tablica 3. Visine tarifne stavke (C) za isporučenu električnu energiju iz postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije snage veće od 1 MW [19]

VRSTA POSTROJENJA	C [kn/kWh]
a. Hidroelektrane instalirane snage do uključivo 10 MW	
a.1. energija do uključivo 5000 MWh proizvedenih u kalendarskoj godini	0,7512
a.2. energija za više od 5000 MWh do uključivo 15 000 MWh proizvedenih kalendarskoj godini	0,5988
a.3. energija za više od 15 000 MWh proizvedenih u kalendarskoj godini	0,4573
b. Vjetroelektrane	0,7076
c. Elektrane na biomasu	
c.1. kruta biomasa iz šumarstva i poljoprivrede	1,1322
c.2. kruta biomasa iz drvo-prerađivačke industrije (kora, piljevina, sječka...)	0,9036
d. Geotermalne elektrane	1,3718
e. Elektrane na biopljin iz poljoprivrednih nasada (kukuruzna silaža...) te organskih ostataka i otpada iz poljoprivrede i prehrambeno prerađivačke industrije (kukuruzna silaža, stajski gnoj, klaonički otpad, otpad iz proizvodnje biogoriva...)	1,3220
f. Elektrane na tekuća bio goriva	0,3919
g. Elektrane na odlagališni plin i plin iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda	0,3919
h. Elektrane na ostale obnovljive izvore (morski valovi, plima i oseka...)	0,5443

Termička obrada otpada ne nalazi se u sustavu poticaja, osim ako se ne radi o kogeneracijskom postrojenju za koje su predviđene tarifne stavke u visini 0,5543 kn/kWh i 0,2772 kn/kWh za višu i nižu tarifu.

Budući da se organski dio otpada može smatrati CO₂ neutralnim, postoji mogućnost uvođenja tarifne stavke i za termičku obradu komunalnog otpada. Samo organski (biorazgradivi) dio otpada smatra se obnovljivim izvorom energije te je potrebno odrediti udio biorazgradivog dijela u komunalnom otpadu (B_F). Tarifna stavka za komunalni otpad tada bi mogla biti:

$$C_{KO} = 1,322 \cdot B_F \text{ [kn/MWh]}$$

Iskustvo EU pokazuje kako postoje velika odstupanja u pogledu termičke obrade otpada. U nekim zemljama EU (Italija, Velika Britanija) postoje tarifne stavke za proizvedenu električnu energiju iz otpada, ali to nije pravilo [20]. Kako bi se među dostupnim mjerama za zbrinjavanje i uporabu otpada odabrale one optimalne, potrebno je izraditi tehnokonomsku analizu u koju su uključeni svi tehnički, ekonomski, okolišni i socijalni čimbenici. Mjere se međusobno razlikuju po svom učinku smanjenja emisija stakleničkih plinova kako je detaljno objašnjeno u poglavljima 6. i 7.

3. NAJBOLJE RASPOLOŽIVE TEHNIKE

Najbolje raspoložive tehnike u gospodarenju krutim komunalnim otpadom definiraju najbolje performanse tehnologija u odnosu na smanjenje količine odloženog otpada i iskorištavanje energije otpada i odlagališnog plina te smanjenje emisija u zrak, a uključuju sljedeće tehnike [12]:

- biološka obrada
- mehaničko-biološka obrada (MBO)
- energane na odlagališni plin (ENOP)
- energane na otpad (ENO)

3.1. Mjere iskorištavanja materijalnih i energetskeg potencijala komunalnog otpada i odlagališnog plina

3.1.1. Biološka obrada

Kompostiranje i procesi anaerobne obrade koriste se za biološku obradu odvojeno skupljenog biootpada (zeleni otpad, kuhinjski otpad i sl.), pri čemu se otpad prerađuje u kompost koji se može koristiti u poljoprivredi. Upotreba komposta ima korisne učinke u pogledu zamjene umjetnih gnojiva (čijom upotrebom također dolazi do emisija stakleničkih plinova), a ujedno se povećava skladištenje ugljika u tlu.

Kompostiranje ili aerobna obrada (uz prisutnost zraka) je enzimski katalizirani proces koji se odvija u nekoliko faza. Konačni produkti razgradnje organskog otpada su CO₂ i kompost, a

samim procesom početna masa otpada smanjena je za oko 60 %, što ovisi o uvjetima pri kojima se odvija proces (vlaga, temperatura, prisutnost kisika).

Anaerobna obrada (bez zraka) je nešto rjeđi i skuplji oblik biološke obrade, pri kojem se uz kompost proizvodi i bioplin, uporabiv za proizvodnju energije. Kompost je prije upotrebe potrebno stabilizirati, što dodatno poskupljuje postupak.

U odnosu na odlaganje neobrađenog otpada kompostiranje i anaerobna obrada smanjuju emisije stakleničkih plinova iz sustava gospodarenja otpadom, što je izraženije kod anaerobne obrade.

3.1.2. Mehaničko biološka obrada otpada (MBO)

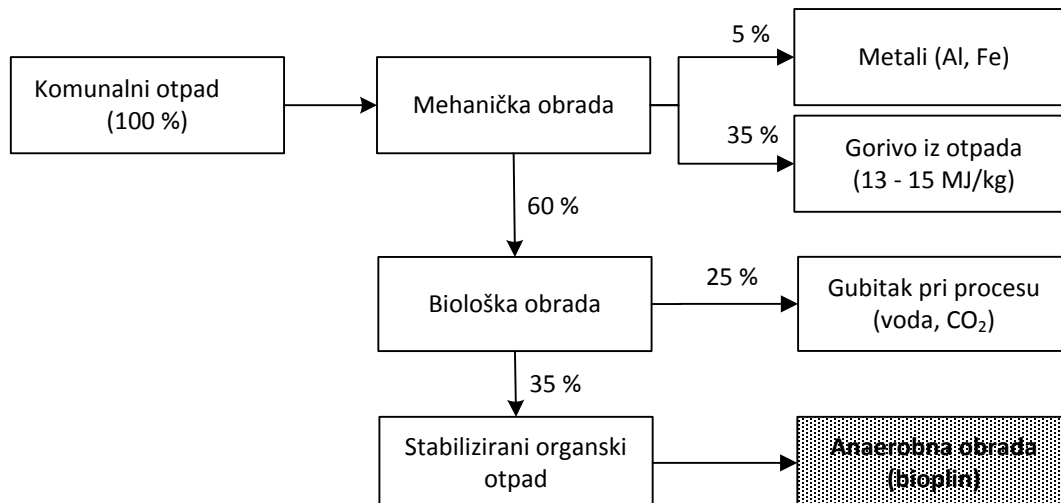
Postupci mehaničko-biološke obrade primjenjuju se kao pred-obrada otpada. Mehaničko-biološkim postupcima mogu se postići različiti rezultati:

- izdvajanje sirovina
- proizvodnja komposta
- proizvodnja gnojiva
- proizvodnja stabiliziranog produkta za odlagalište
- dobivanje bioplina za proizvodnju električne ili toplinske energije
- proizvodnja goriva iz otpada

U ovisnosti o ciljevima koji se žele postići mogu se odabrati različite kombinacije mehaničke i biološke obrade.

Mehaničko-biološkom obradom otpada smanjuje se masa i biološka aktivnost otpada, pri čemu se komunalni i slični otpad prerađuje u laku i tešku frakciju, odvajajući još i neke korisne komponente otpada (metali i sl.). Laka frakcija sadrži papir, karton, plastiku i sl., a iz nje se proizvodi gorivo iz otpada (RDF), koje se može upotrijebiti za proizvodnju energije u energanama na otpad, termoelektranama na ugljen, cementarama i sličnim industrijskim postrojenjima. Teška frakcija sadrži ostatke hrane, zelenog otpada i ostale lako biorazgradive komponente, uz staklo, metale itd., a iz nje se, uz prethodno odvajanje stakla i metala,

biološkom obradom (kompostiranje, anaerobna obrada) proizvodi djelomično inertizirani ostatak koji se može iskoristiti za pokrivanje odlagališta otpada ili proizvodnju bioplina (Slika 3).



Slika 3. Mehaničko-biološka obrada otpada [10]

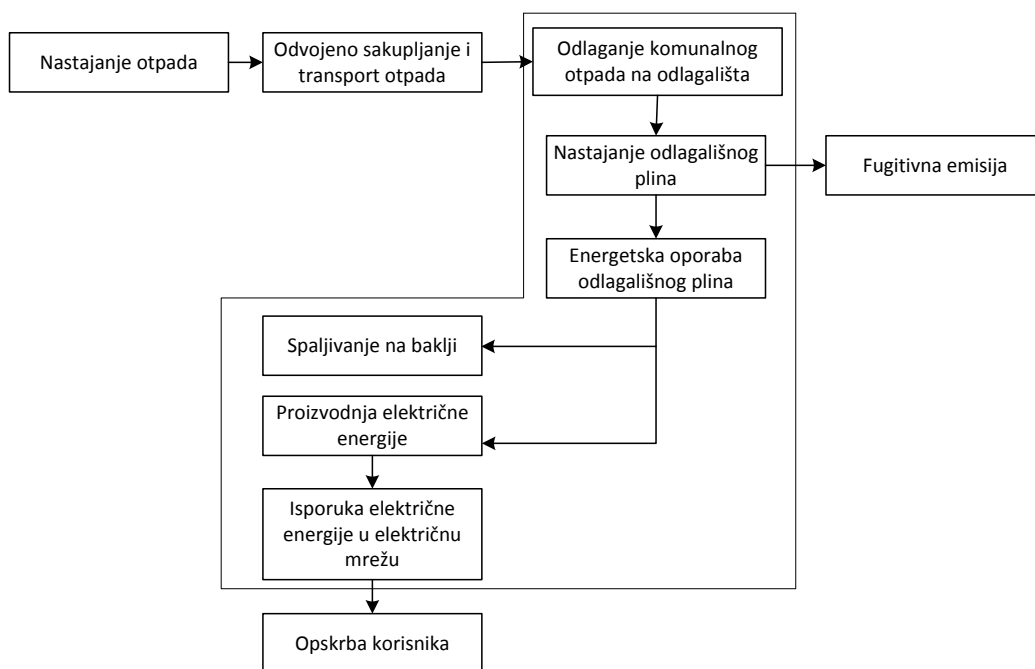
MBO doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova, osobito u slučaju kad se proizvedeno gorivo iz otpada koristi za proizvodnju energije i time zamjenjuju određene količine fosilnih goriva. Za industrijsku primjenu potrebni su veliki, stalni i stabilni izvori otpadnih materijala. Otpad se prethodno mora na adekvatan način obraditi i po potrebi obogatiti na gorivoj komponenti. Korištenje goriva iz otpada kao dopuskog goriva rezultira smanjenom potrošnjom primarnih izvora energije - fosilnih goriva. Anaerobnom biološkom obradom biorazgradivog stabiliziranog dijela otpada proizvodi se bioplin koji se može koristiti za proizvodnju električne energije. Komponenta biološkog (organskog) podrijetla smatra se neutralnom s obzirom na ugljikov dioksid (CO₂), a time se izravno smanjuje emisija CO₂ za količinu emisije nastalu proizvodnjom ekvivalentne energije dobivene izgaranjem fosilnih goriva.

3.1.3. Energane na odlagališni plin (ENOP)

Energana na odlagališni plin (ENOP) iskorištava energiju odlagališnog (deponijskog) plina za proizvodnju električne energije i/ili topline. Energija se može koristiti za pokrivanje vlastitih potreba postrojenja, za potrebe okolnih potrošača ili se plasira u električnu mrežu.

Proizvodnja odlagališnog plina iz odlagališta otpada traje desetljećima, a raspoložive količine plina za ekonomičnu proizvodnju energije traju dvadesetak godina. Otpad se na odlagalištu prekriva pokrovnim slojem, u svrhu sprečavanja oslobađanja odlagališnog plina u atmosferu, a sustavom cijevi i pumpi plin se sakuplja te u daljnjoj obradi spaljuje na baklji ili koristi u energetske svrhe. Oksidacija metana u ugljikov dioksid može nastupiti ako pokrovni sloj u potpunosti ne zadržava oslobođeni plin, odnosno, ako postoje pukotine na pokrovu te se u gornjim slojevima odlagališta otpad razgrađuje uz prisutnost zraka (aerobna razgradnja). Uz to, određena količina odlagališnog plina izlazi kroz pukotine na pokrovnom sloju odlagališta.

Potencijal iskorištenja odlagališnog plina uvjetovan je strukturom i karakteristikama pokrovnog sloja na odlagalištu te efikasnošću sistema otplinjavanja odlagališta. Sakupljeni plin se spaljuje na baklji ili se koristi za proizvodnju električne i/ili toplinske energije te kao zamjena za prirodni plin (Slika 4).



Slika 4. Postupak proizvodnje električne energije iz odlagališnog plina [10]

Direktivom je propisano skupljanje, obrađivanje i/ili korištenje odlagališnog plina sa svih onih odlagališta koja primaju biorazgradivi otpad. Skupljeni plin koji se ne može koristiti za proizvodnju energije potrebno je spaliti na baklji. Komunalni otpad u pravilu sadrži više od 50% biorazgradivog otpada, pa odlagališta komunalnog otpada podliježu odredbi Direktive.

Odlagališni plin, koji se smatra obnovljivim izvorom energije, mora se skupljati, obrađivati i izgarati sa ili bez energetskeg iskorištavanja.

Proizvodnja energije iz odlagališnog plina ekonomična je za velika odlagališta komunalnog otpada s relativno velikom proizvodnjom plina. Na manjim odlagalištima otpada odlagališni plin bi se također trebao skupljati i spaljivati na bakljama.

Proizvodnjom energije iz odlagališnog plina smanjuju se emisije stakleničkih plinova na dva načina:

- izgaranjem odlagališnog plina metan se zamjenjuje ugljikovim dioksidom koji ima 21 puta manji staklenički potencijal
- smanjuje se potrošnja fosilnih goriva čijim izgaranjem nastaju staklenički plinovi

Odlagališni plin sadrži najviše metana i ugljikovog dioksida, te čitav niz drugih plinovitih sastojaka, u pravilu štetnih po okoliš. Prosječna ogrjevna vrijednost plina je oko 5 kWh/m^3 ($\sim 18 \text{ MJ/m}^3$), a prosječna godišnja proizvodnja plina iz tone odloženog komunalnog otpada iznosi oko 6 m^3 . Uobičajene ENOP s motorima s unutrašnjim izgaranjem mogu iz tone odloženog otpada godišnje proizvesti približno 10 kWh električne i 15 kWh toplinske energije [21].

Spaljivane na baklji

Baklje se koriste za spaljivanje odlagališnog plina kada je koncentracija metana toliko niska da se ne može iskoristiti za proizvodnju energije. Također se koriste kao sigurnosni sustav postrojenja za proizvodnju energije iz odlagališnog plina. U slučaju kvara plinskog motora plin se preusmjerava i spaljuje na baklji.

Efikasnost spaljivanja na bakljama, koje mogu biti 'otvorene' ili 'zatvorene', može dostići do 99 %. Otvorene baklje spaljuju odlagališni plin kao otvoreni plamen s postavljenim vjetrobranom. Regulacija izgaranja je osnovna, ukoliko uopće postoji. Zatvorene baklje spaljuju odlagališni plin u vertikalnom, cilindričnom ložištu gdje obično postoji neki oblik regulacije izgaranja. Stjenke ložišta su obično toplinski izolirane kako bi se spriječio gubitak

toplina i omogućilo izgaranje na višim temperaturama. Spaljivanje odlagališnog plina ovisi o mnogim čimbenicima među kojima su najvažniji temperatura, vrijeme i turbulencija. Minimalno vrijeme zadržavanja je 0,3 sekunde na minimalnoj temperaturi od 1000 °C [22]. Moguće je koristiti i druge kriterije koji će imati isti učinak, npr. duže vrijeme zadržavanja uz nižu temperaturu i sl.

Spaljivanjem metana najvećim dijelom nastaje ugljikov dioksid, a u manjim količinama ugljikov monoksid, dušikov oksid, formaldehid te još neke organske komponente u tragovima.

3.1.4. Energane na otpad (ENO)

Termička obrada otpada uz iskorištavanje energije sudjeluje s više od 70 % u ukupnom obrađenom krutom komunalnom otpadu u svijetu, u čemu razvijene države sudjeluju s više od 90 %. Dva su osnovna tipa ENO s obzirom na sistem izgaranja komunalnog i sličnog otpada:

- ENO s izgaranjem na rešetki - najveći broj izvedenih postrojenja
- ENO s izgaranjem u fluidiziranom sloju (eng. *fluidized bed*) – koristi se u novije vrijeme, osobito za suizgaranje otpada s ugljenom.

Glavni ciljevi termičke obrade otpada su:

- smanjenje udjela organskih tvari u otpadu
- uništavanje organskih štetnih tvari
- izdvajanje anorganskih tvari (plemeniti metali i dr.)
- smanjenje mase i volumena otpada
- iskorištenje energije pohranjene u otpadu

U nastavku je dan pregled tehnologija koje se koriste za energetska iskorištavanje otpada.

3.1.4.1. Izgaranje

Primarni značaj izgaranja jest značajno smanjenje mase otpada (do 75 %) i volumena otpada (do 90 %) [5], čime se štedi često vrlo ograničeni prostor na odlagalištima otpada.

Najčešće korištena tehnologija za termičku obradu otpada jest izgaranje ukupnog, nerazvrstanog otpada na rešetki (eng. *mass-burn*). Takvom, nerazvrstanom otpadu potrebno je dodati gorivo kojim se povećava ogrjevna vrijednost otpada. Najčešće se kao dodatno gorivo koristi prirodni plin, ali i ugljen i drvena biomasa, naročito ako se otpad prethodno ne osuši. Rešetka na kojoj otpad izgara može biti izvedena kao ravna, kosa ili stepenasta.

Postoji nekoliko varijacija tehnologije izgaranja. Osim izgaranja na rešetki postoji izgaranje u rotacijskoj peći i izgaranje u fluidiziranom sloju.

Izgaranje na rešetki

Izgaranje krutog komunalnog otpada na rešetki (Slika 5) je najrasprostranjenije rješenje za termičko zbrinjavanje i oporabu otpada. Prije izgaranja, otpad se može podvrgnuti mehaničkoj obradi, najčešće samo grubom usitnjavanju, u svrhu bolje homogenosti po sastavu i veličini čestica.

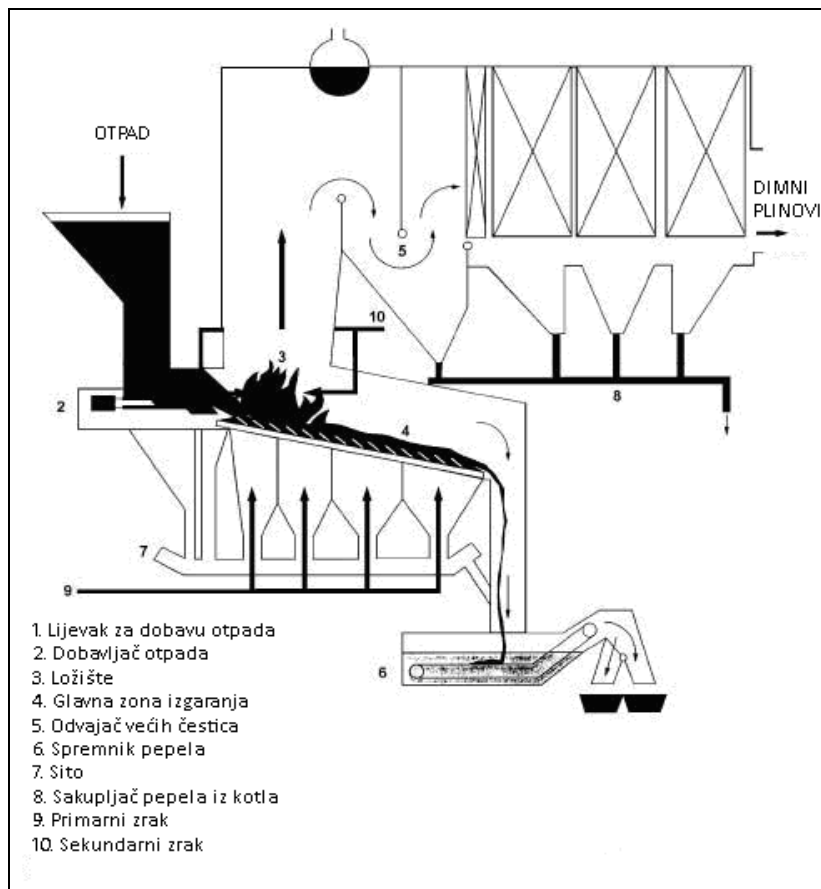
Otpad koji se pod utjecajem gravitacije i nadolazećeg otpada polako pomiče po kosoj rešetki samopodrživo izgara. Zrak koji je nužan kako bi se provelo izgaranje djelomično se dovodi iz spremnika za otpad. Primarni zrak upuhuje se kroz male otvore u rešetki u sloj otpada, dok se više zraka upuhuje iznad sloja otpada kako bi se dovršilo izgaranje (sekundarni zrak).

Temperatura u ložištu iznosi približno 950 °C (minimalno 850 °C), dok je vrijeme izgaranja između 45-60 minuta [23]. Količina kisika u ložištu mora uvijek iznositi barem 6 % volumnog udjela u dimnim plinovima, kako bi se osiguralo što potpunije izgaranje.

Potreban koeficijent pretička (viška) zraka (λ) iznosi:

$$\lambda = \frac{\text{Stvarno potrebna količina}}{\text{Teoretski potrebna količina}} = \frac{21}{21 - 6} = 1,4$$

Većina rešetki je hladena najčešće zrakom. Vodeno hlađenje najčešće se koristi kada je kalorična vrijednost otpada nešto veća, npr. 12-15 MJ/kg komunalnog otpada.



Slika 5. Sustav izgaranja na rešetki

Tehnologija izgaranja na rešetki pogodna je za obradu većih količina otpada, tj. više od 100.000 tona otpada godišnje. Povećanjem kapaciteta pogona, snižava se cijena spaljivanja po toni otpada, a povećava se i energetska učinkovitost uporabe [24].

Tablica 4 prikazuje prosječnu veličinu kapaciteta pogona za spaljivanje krutog komunalnog otpada u pojedinim zemljama EU [23].

Tablica 4. Prosječni kapacitet postrojenja za spaljivanje krutog komunalnog otpada u EU [23]

DRŽAVA	Prosječni kapacitet pogona za izgaranje krutog komunalnog otpada (10 ³ t/god)
Austrija	178
Belgija	141
Danska	114
Francuska	132
Njemačka	257
Italija	91
Nizozemska	488
Portugal	390
Španjolska	166
Švedska	136
Velika Britanija	246
Norveška	60
Švicarska	110
PROSJEČNO	193

Kapaciteti znatno variraju, jer ovise o mnogo faktora:

- Količini dostupnog otpada
- Blizini izvoru otpada (npr. većem gradu)
- Ekološkim zahtjevima okoline
- Nacionalnim politikama gospodarenja otpadom

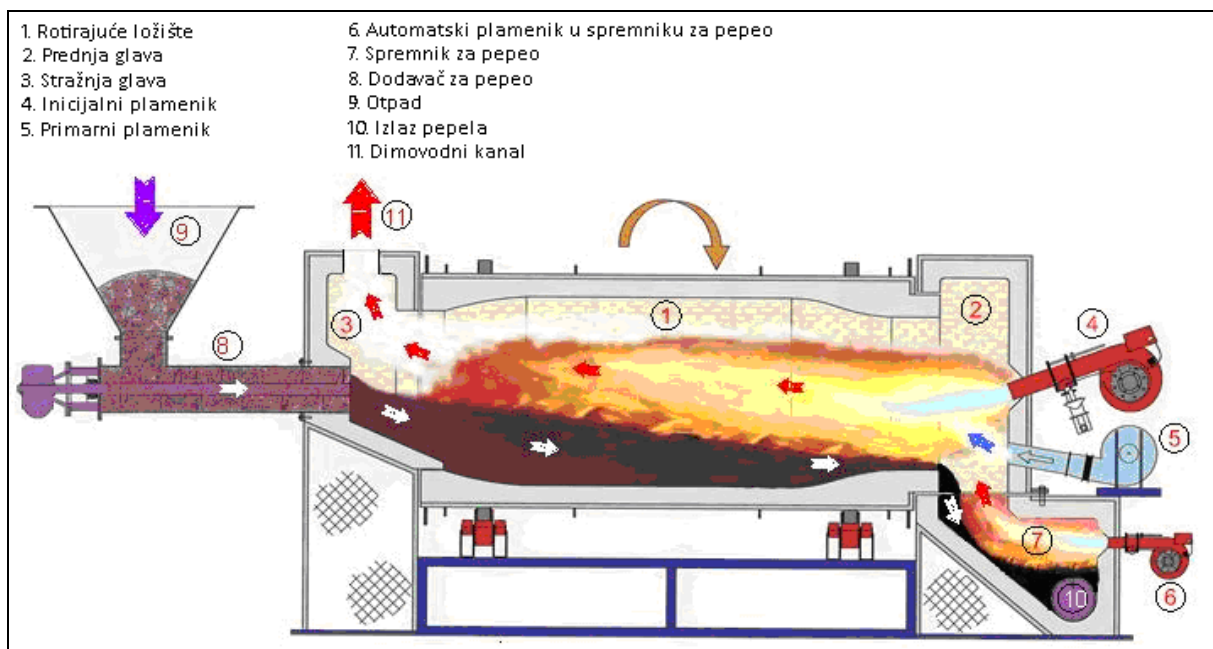
Pogoni za spaljivanje komunalnog otpada mogu primiti otpad koji je prethodno gotovo nepripremljen, osim odvajanja eventualnih krupnijih objekata (bijela tehnika, namještaj i sl.). Ipak, bez obzira što su ovi pogoni relativno fleksibilni, odvajanje otpada na izvoru je nužno ukoliko se želi postići ekološki odgovorna uporaba otpada i ušteda resursa.

Pravilnikom o načinima i uvjetima termičke obrade otpada [25] određeni su glavni uvjeti koje pogoni za spaljivanje moraju ispuniti. Tako pravilnik propisuje sadržaj ukupnog organski vezanog ugljika (TOC) u šljaci i pepelu, koji mora biti manji od 3 %. Propisana je i minimalna temperatura od 850 °C, koja mora biti održana najmanje 2 sekunde i nakon posljednjeg ubacivanja zraka i pod najnepovoljnijim uvjetima, kako bi se osiguralo potpuno izgaranje. Za spaljivanje opasnog otpada temperatura mora doseći najmanje 1100 °C.

Izgaranje u rotacijskoj peći

Izgaranje u rotacijskoj peći postupak je u kojem se otpad gravitacijski ili mehanički ubacuje u cilindričnu peć postavljenu pod kutom kako bi se, uz rotaciju peći, ostvario protok otpada kroz peć. Prolaskom kroz peć, otpad se termički obrađuje spaljivanjem koje se vrši pomoću plamenika. Nastali plinovi posebno se kasnije filtriraju i spaljuju, a proizvedena toplina koristi se za predgrijavanje otpada, ali i u druge svrhe, ovisno o vrsti postrojenja. Nastali pepeo se odlaže ili koristi u industriji građevinskog materijala.

Postupak spaljivanja otpada je vrlo robustan, s obzirom na to da se njime može obrađivati gotovo bilo kakav otpad, neovisno o vrsti i sastavu. Temperature na kojima se odvija izgaranje u rotacijskim pećima kreću se od 500 °C (za rasplinjavanje) do 1450 °C (za visokotemperaturno taljenje pepela). Slika 6 prikazuje shematski prikaz sustava s rotacijskom peći.



Slika 6. Sustav s rotacijskim ložištem [26]

Vrijeme izgaranja krutog otpada u rotacijskoj peći ovisi o kutu pod kojim je peć nagnuta i o brzini vrtnje same peći. Uobičajeno vrijeme od 30-90 minuta je dovoljno za adekvatno spaljivanje otpada.

Izgaranje u fluidiziranom sloju

Ova se tehnologija koristi desetljećima, najviše za spaljivanje homogenih goriva, kao što su ugljen, sirovi lignit, kanalizacijski mulj i biomasa (npr. drvo). Primjenjuje se i za izgaranje temeljito razvrstanog otpada, npr. goriva iz otpada (RDF-a).

Ložište je izvedeno u obliku vertikalnog cilindra. U donjem dijelu komore, sloj inertnog materijala (npr. pijeska ili pepela) na rešetki ili ploči je fluidiziran sa zrakom. Otpad koji se spaljuje kontinuirano se nanosi na fluidizirani sloj odozgora ili sa strane.

Predgrijani zrak se upuhuje u komoru kroz otvore na ploči, stvarajući fluidizirani sloj s pijeskom ili nekim drugim inertnim materijalom, ponekad uz dodatak vapnenca. Vapnenac se koristi za smanjenje sumporovih oksida (SO_x) i do 90 % [27], te može biti sadržan u inertnom sloju ili prskan u ložište. Otpad se uvodi u ložište pomoću pumpe ili pužnog vijka.

Zahvaljujući homogenom sastavu otpada i ravnomjernoj distribuciji otpada u fluidiziranom sloju, ovakvi sustavi u pravilu imaju uniformno raspodijeljenu temperaturu i udio kisika, što proces čini stabilnim. Za otpad heterogenog sastava, otpad se najprije mora pripremiti u smislu ujednačavanja veličine čestica u otpadu. Ovaj postupak zahtijeva relativno malu veličinu čestica, često do maksimalno 50 mm promjera čestice. Ovo se može postići mehaničkom obradom.

S obzirom da su troškovi predobrade (pripreme) otpada za ovaj postupak relativno visoki, ekonomski faktor je glavna prepreka većoj primjeni ove tehnologije. Ipak, djelomično se ovaj problem može riješiti selektivnim skupljanjem otpada, ali i razvojem viših standarda za gorivo iz otpada (RDF). Odvojeno prikupljen otpad (papir, plastika, karton) mora se oporabiti, a najčešće se reciklira. Otpad pogodan za reciklažu nije ekonomski ni ekološki prihvatljivo spaljivati, osim ako se radi o posebnim vrstama opasnog (medicinskog) otpada. Prikupljeni biootpad se kompostira ili koristi u procesu anaerobne digestije. Kombinacija dobro pripremljenog i kontroliranog otpada i tehnologije izgaranja u fluidiziranom sloju omogućava napredak u kontroli procesa izgaranja te potencijalno jednostavnije, a time i jeftinije pročišćavanje dimnih plinova.

Izgaranje u fluidiziranom sloju pokazuje veću konzistentnost u radu od tehnologije izgaranja na rešetki i može se efikasnije kontrolirati kako bi se postigla veća energetska učinkovitost, smanjio udio ostatnog pepela i emisije plinova u atmosferu. Također, budući da je kod ove tehnologije prisutna niža temperatura nego kod izgaranja na rešetki, smanjeno je stvaranje NO_x te ne dolazi do taljenja i lijepljenja pepela za isparivačke cijevi kotla. U Europi se tek očekuje veće korištenje ove tehnologije, usporedno s akumulacijom znanja i iskustva te padom cijene i većom energetsom učinkovitošću.

3.1.4.2. Piroliza

Piroliza je proces razgradnje otpada bez prisustva kisika, gdje se uz povišenu temperaturu termički razgrađuju organske molekule u otpadu. Produkti pirolize su pirolitički plin, ulje i koks. Ogrjevne vrijednosti u procesu pirolize leže između 5-15 MJ/m³ za komunalni otpad i između 15-30 MJ/m³ za gorivo iz otpada (RDF). U širem smislu, piroliza je zajednički naziv koji objedinjuje više različitih tehnoloških kombinacija koje sadrže, u pravilu, sljedeće korake:

- Proces tinjanja: Stvaranje plinova iz krutih čestica otpada pri temperaturama 400-600°C
- Piroliza: Termička razgradnja organskih molekula otpada pri temperaturama 500-800 °C
- Rasplinjavanje: Konverzija udjela ugljika u koksu pri temperaturama 800-1000 °C, uz pomoć sredstva za rasplinjavanje (npr. zrak ili para), u ugljikov monoksid i vodik
- Izgaranje: Ovisno o tehnologiji, plin i pirolitički koks izgaraju u ložištu

Prema rasponu temperatura pri kojima se odvija proces pirolize, razlikuje se niskotemperaturna (do 500 °C), srednjetemperaturna (od 500-800 °C), te visokotemperaturna (od 800 °C) piroliza.

S povišenjem temperature, povećava se i udio nastalog pirolitičkog plina, a smanjuje se udio krute i tekuće faze. Dimni plinovi se uvode u kotao u kojem se hlađenjem dimnih plinova proizvodi para koja se može koristiti za grijanje ili za pokretanje parne turbine.

3.1.4.3. Rasplinjavanje

Rasplinjavanje je postupak tijekom kojeg se pri povišenoj temperaturi u reaktor s gorivom bogatim ugljikom dovodi sredstvo za rasplinjavanje (kisik, vodena para, zrak ili ugljikov dioksid).

Produkt reakcije je smjesa plinova koja se naziva sintetski plin (eng. *syngas*). Tako dobiveni plin može se spaljivati kao gorivo u kogeneracijskim postrojenjima (istovremena proizvodnja topline i električne energije) ili se može upotrijebiti za sintezu različitih tekućih ugljikovodika u Fischer-Tropsch procesu (npr. kao sintetsko gorivo za motorna vozila).

Kako je za postupak rasplinjavanja potrebno gorivo (otpad) relativno homogenog sastava, to znači da je potrebno prethodno obraditi otpad. Zbog toga ova tehnologija još nije raširena kao postupak termičke obrade otpada. U manjim postrojenjima moguće je rasplinjavati tekući opasni otpad ili visokoenergetski otpad kao što je plastični otpad. Rasplinjavanje se može primijeniti i kao postupak naknadne obrade krute faze nastale u postupku pirolize.

Rasplinjavanje se može provoditi u uređajima za rasplinjavanje (reaktorima) u fiksnom sloju goriva, s rasplinjavanjem u struji smjese goriva i sredstva za rasplinjavanje te u postupku s fluidiziranim slojem.

Rasplinjavanje se može provoditi pri atmosferskom tlaku ili pri povišenom tlaku. U ovisnosti o izvoru topline koja se dovodi u prvoj fazi procesa, razlikuje se autotermno i altotermno rasplinjavanje. Rasplinjavanje je u osnovi endoterman proces te je potrebno dovesti toplinu. Autotermno rasplinjavanje je postupak pri kojem se toplina stvara u samom reaktoru dok se kod altotermnog procesa toplina dovodi izvana.

Također je poznata tehnologija rasplinjavanja na bazi plazme, koja predstavlja najnapredniji oblik rasplinjavanja. Trenutno se razvijaju pilot projekti u Japanu te se očekuje jači razvoj ove tehnologije u bliskoj budućnosti.

3.2. Identifikacija ključnih čimbenika zaštite okoliša u sektoru gospodarenja komunalnim otpadom

Gospodarenje komunalnim otpadom predstavlja niz aktivnosti koje u većoj ili manjoj mjeri utječu na okoliš u kojem se obavljaju. Utjecaji ovih aktivnosti na zrak, vode i tlo predstavljaju ključne čimbenike zaštite okoliša u sektoru gospodarenja komunalnim otpadom. Stoga se gospodarenje komunalnim otpadom mora provoditi u skladu s ekološkim normama.

Ključni čimbenici u sektoru gospodarenja komunalnim otpadom su:

- Emisije u zrak
- Vizualni utjecaj
- Onečišćenje voda
- Onečišćenje tla
- Zbrinjavanje pepela
- Utjecaj na ljudsko zdravlje
- Utjecaj na floru i faunu
- Buka

Sukladno tematici rada, dat je detaljniji osvrt na emisije u zrak s posebnim naglaskom na stakleničke plinove.

3.2.1. Emisije u zrak

Sastav otpada može značajno varirati te je stoga teško predvidjeti točan sastav emisija koje proizlaze iz aktivnosti gospodarenja komunalnim otpadom. Metan je ključan čimbenik u emisijama s odlagališta otpada. Većina postrojenja za obradu otpada emitira u zrak ugljikov dioksid, amonijak te krute čestice. Neugodni mirisi i hlapivi organski spojevi također nisu zanemarivi. Ostale štetne tvari koje se mogu pronaći na nekim lokacijama su vodikov klorid, amonijak, amini i vodikov sulfid. Dioksini i furani mogu nastati prilikom nepotpunog izgaranja otpada ili prilikom hlađenja dimnih plinova pri termičkoj obradi otpada i predstavljaju ekološki i zdravstveni problem. Tablica 5 prikazuje emisije u zrak koje se javljaju prilikom obrade otpada.

Tablica 5. Glavne emisije pri obradi otpada

GLAVNE EMISIJE U ZRAK	AKTIVNOSTI U OBRADI OTPADA
Kiseline (HCl)	Izgaranje Fizičko-kemijska obrada
Amonijak	Biološka obrada Fizičko-kemijska obrada
Ugljikovi oksidi	Energetski sustavi Termička obrada Biološka obrada
Mikrobiološko onečišćenje	Biološka obrada Biofilteri
Dušikovi oksidi (N ₂ O, NO, NO ₂)	Energetski sustavi Termička obrada Biološka obrada
Sumporovi oksidi	Energetski sustavi Termička obrada
Čestice (metali uključeni)	Energetski sustavi Pohrana i manipulacija Termička obrada
Hlapive organske tvari	Biološka obrada Obrada otpadnih ulja Obrada otpadnih otapala Sustavi za odvajanje ugljikovodika Pohrana i manipulacija organskim tvarima

Metan (CH₄) je najznačajniji staklenički plin koji se emitira iz procesa gospodarenja otpadom. Njegov staklenički potencijal 21 puta je veći od potencijala CO₂. Staklenički potencijal je mjera utjecaja plina na staklenički efekt u odnosu na utjecaj CO₂ koji je dogovorno uzet kao referentna vrijednost. Stoga se emisija stakleničkih plinova iskazuje kao ekvivalentna emisija ugljikovog dioksida [CO₂eq]. Tijekom anaerobne razgradnje odloženog komunalnog otpada dolazi do stvaranja metana koji se emitira u atmosferu ukoliko odlagalište nije opremljeno sustavom otplinjavanja. Emisije metana u atmosferu moguće je izbjeći adekvatnim sustavom otplinjavanja i energetske uporabe odlagališnog plina. Stvaranje metana moguće je umanjiti smanjenom količinom biorazgradivog otpada koja se odlaže na odlagalište.

Prilikom izgaranja jedne tone komunalnog otpada nastaje približno 0,7 do 1,7 tona CO₂ [23]. Ugljikov dioksid se ispušta izravno u atmosferu te kao staklenički plin pridonosi efektu staklenika. Pošto je komunalni otpad heterogena smjesa koja se sastoji od biorazgradivog dijela otpada i dijela otpada fosilnog podrijetla (npr. plastika, guma, stiropor, folije, sintetički

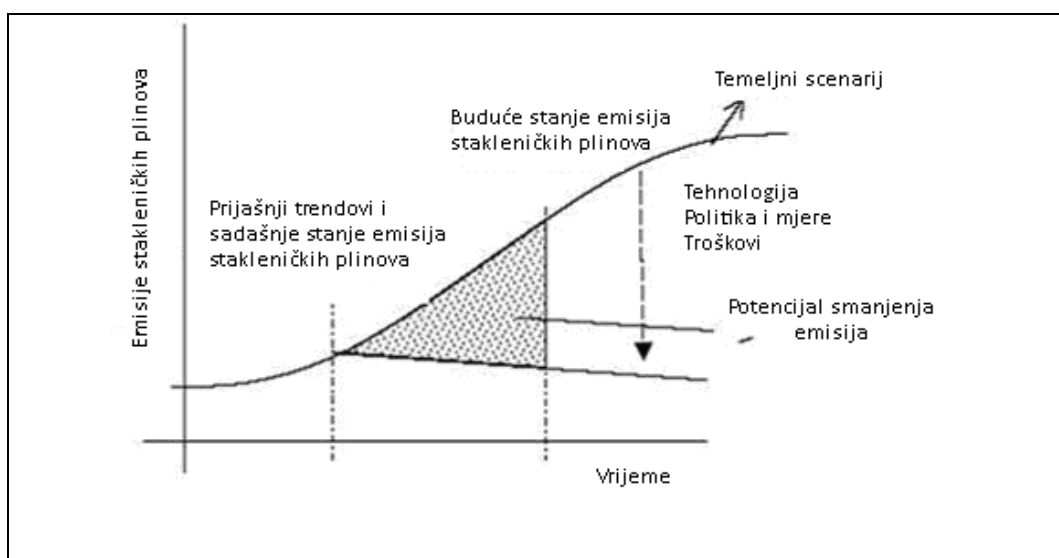
tekstil), udio CO₂ koji nastaje iz otpada koji nije biorazgradiv, a koji se smatra relevantnim za klimatske promjene, iznosi od 33-50 %.

Ugljikov monoksid (CO) u dimnim plinovima nastaje uslijed nepotpunog izgaranja ugljikovih spojeva. CO nastaje ukoliko postoji lokalni nedostatak kisika i/ili zbog nedovoljno visoke temperature izgaranja koja bi provela potpunu oksidaciju do CO₂. Kontinuirano mjerenje količine CO može se koristiti kao provjera efikasnosti procesa izgaranja, tj. razina CO je mjera kvalitete izgaranja. Nakon emisije u atmosferu, CO postupno oksidira do CO₂.

Dioksini i furani (PCDD i PCDF) su grupa spojeva, od kojih su neki vrlo toksični te se smatraju kancerogenima. Ovi spojevi nisu karakteristični samo za spaljivanje otpada već nastaju pri svim toplinskim procesima (npr. izgaranje vrtnog otpada, biomase, nekontrolirano spaljivanje komunalnog otpada na otvorenom, izgaranje ogrjevnog drva u pećima itd.) pod određenim uvjetima. Nastaju na nižim temperaturama (250-500 °C) dok se pri višim temperaturama (850 °C) učinkovito uništavaju. Ispuštanje dioksina i furana u atmosferu posljedica je ponovnog formiranja ovih spojeva u dimnim plinovima uslijed njihovog postupnog hlađenja tijekom postupaka pročišćavanja. Predstavljaju možda i najveći negativni utjecaj na zdravlje ljudi.

4. METODOLOGIJA

Nacionalne emisije stakleničkih plinova predstavljaju zbroj emisija iz različitih sektora; stoga se potencijal za ublažavanje analizira na sektorskoj razini [28]. Kako se nacionalne okolnosti vremenom mijenjaju, potencijal za ublažavanje treba biti procijenjen za određeno vremensko razdoblje. Takva procjena treba uzeti u obzir prijašnje trendove te sadašnje i buduće stanje onih čimbenika koji određuju potencijal za ublažavanje emisija svake države. S tim u svezi, Slika 7 prikazuje pojednostavljeni prikaz potencijala za smanjenje emisija stakleničkih plinova.



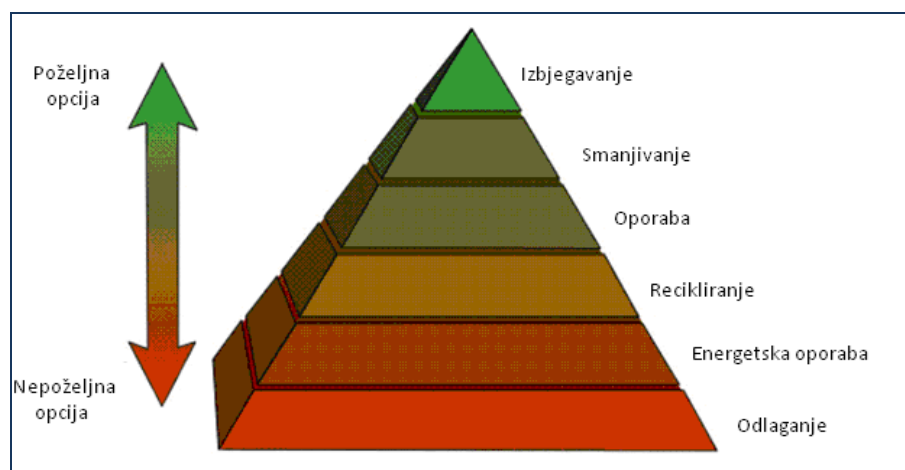
Slika 7. Potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova za određeno vremensko razdoblje [28]

Osnovni cilj koncepta gospodarenja komunalnim otpadom je smanjivanje količine otpada koji će se trajno odložiti i koji će biti inertan, kako bi što manje ugrožavao okoliš, klimu i

ljudsko zdravlje. Ovaj se koncept svodi na tri osnovna hijerarhijska načela: izbjegavanje, vrednovanje, odlaganje, poredanih po važnosti, a sadrži najvažnije mjere gospodarenja krutim komunalnim otpadom u Hrvatskoj [28]:

- Izbjegavanje nastajanja i smanjivanje količine komunalnog otpada
- Povećanje količine odvojeno skupljenog i recikliranog komunalnog otpada
- Povećanje obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada
- Smanjivanje količine odloženog biorazgradivog komunalnog otpada
- Spaljivanje metana na baklji i korištenje metana za proizvodnju električne energije
- Korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji
- Termička obrada komunalnog otpada i goriva iz otpada (energana na otpad)

Hijerarhijski koncept gospodarenja otpadom prikazuje Slika 8.



Slika 8. Hijerarhijski koncept gospodarenja otpadom

Potencijal smanjenja emisija stakleničkih plinova promatra se kroz 3 scenarija:

- Temeljni scenarij
- Scenarij s mjerama
- Scenarij s dodatnim mjerama

Scenariji obuhvaćaju mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Evaluacija potencijala smanjenja emisija pojedinog scenarija vrši se kroz analizu mjera koje pojedini scenarij obuhvaća. Na taj način moguće je međusobno usporediti scenarije i odrediti njihov ukupni potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova.

4.1. Model za proračun emisija stakleničkih plinova

Određivanje emisija stakleničkih plinova (CH₄ i CO₂) provodi se primjenom IPCC metodologije (Intergovernmental Panel on Climate Change, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, u daljnjem tekstu: *IPCC GPG*) [29]).

Najtočnije procjene emisija dobivaju se određivanjem emisije za svaku pojedinu vrstu otpada. Iskustvo dobre prakse (eng. *good practice*) preporučuje prilagođavanje modela, koje predlaže *IPCC GPG*, nacionalnim osobitostima. Jednostavni model (*Tier1*) u proračunu emisije koristi preporučene (eng. *default*) faktore emisije, dok detaljni model (*Tier2*) koristi nacionalne/regionalne faktore emisije za pojedine aktivnosti. Ako neka aktivnost značajno doprinosi ukupnim emisijama stakleničkih plinova, ona predstavlja ključni izvor emisije.

4.1.1. Određivanje emisije CH₄

Modeli, koje se koriste za proračun emisije CH₄ s odlagališta otpada, razlikuju se prema načinu procjene emisije te količini i vrsti podataka koji su potrebni za procjenu emisije.

Prema 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (u daljnjem tekstu: *IPCC Guidelines*) preporučuju se dva modela za proračun emisije CH₄ s odlagališta otpada: osnovni (eng. *default*) model i model raspadanja prvog reda (eng. *First Order Decay, FOD*).

Osnovni model se bazira na procjeni ukupne godišnje emisije CH₄ s odlagališta otpada u godini kad je otpad odložen. Pri tome, količina i struktura otpada tijekom proteklih nekoliko desetljeća mora biti stalna ili neznatno promjenjiva. U slučaju da se količina ili sastav odloženog otpada mijenja tijekom vremena, IPCC osnovni model ne pruža točne procjene emisija.

FOD model je precizniji jer uvrštava vremenski faktor u bilancu koji omogućava praćenje emisije tijekom duljeg vremenskog razdoblja. Iskustvo dobre prakse (eng. *good practice, IPCC Guidelines*), preporučuje upotrebu *FOD* modela koji uz trenutne (sadašnje) podatke koristi i podatke o količini i vrsti otpada unatrag nekoliko desetljeća. Aktivnosti koje predstavljaju ključne izvore emisije ovise o uvjetima i specifičnostima u pojedinoj zemlji.

4.1.1.1. Osnovni model

Određivanje emisije CH₄ pomoću osnovnog modela temelji se na količini otpada odloženog na različite tipove odlagališta, udjelu razgrađenog organskog ugljika u krutom (biorazgradivom) otpadu i udjelu CH₄ u odlagališnom plinu. Organski ugljik, koji je podložan biokemijskoj razgradnji, proporcionalan je količini stvorenog CH₄.

Ovaj se model najčešće primjenjuje za izračunavanje emisije CH₄ s odlagališta otpada, jer ne uračunava vremenski faktor u bilancu, a podložan je promjenama koje ovise o karakteristikama i uvjetima u pojedinoj zemlji ili regiji.

Godišnja emisija CH₄ računa se sljedećim izrazom:

$$\text{Emisija CH}_4 \text{ (Gg/god)} = [(\text{MSW}_T \cdot \text{MSW}_F \cdot L_0) - R] \cdot (1 - \text{OX})$$

gdje je:

MSW_T = ukupna stvorena količina krutog komunalnog otpada (Gg/god) (eng. *municipal solid waste*)

MSW_F = udio krutog komunalnog otpada odloženog na odlagalište

L₀ = potencijal generiranog metana [MCF · DOC · DOC_F · F · 16/12 (GgCH₄/Gg otpada)]

MCF = korekcijski faktor metana (eng. *methane correction factor*)

DOC = razgradivi organski ugljik (GgC/MSW_T) (eng. *degradable organic carbon*)

DOC_F = udio disimiliranog DOC

F = udio CH₄ u odlagališnom plinu

16/12 = faktor za pretvorbu C u CH₄

R = regenerirani, spaljeni CH₄ (Gg/god)

OX = oksidacijski faktor

MSW i MCF odražavaju način na koji se postupa s otpadom, tip odlagališta, kao i ukupan utjecaj postupaka obrade otpada na stvaranje metana. Sadržaj razgradivog organskog ugljika (DOC) ovisi o sastavu otpada, a označuje količinu organskog ugljika koji se može razgraditi biokemijskim putem. Izračunava se iz prosječnog udjela ugljika u različitim komponentama otpada. Određivanje udjela razgradivog organskog ugljika u komunalnom otpadu ostvaruje se korištenjem nacionalnih podataka ili upotrebom *default* vrijednosti pojedinih zemalja ili

regija (*Country Waste Generation, Composition and Disposal Data, IPCC Guidelines, Reference Manual*).

Ako je poznat sastav otpada, razgradivi organski ugljik može se izračunati pomoću izraza:

$$DOC = (0,4 \cdot A) + (0,17 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,3 \cdot D)$$

gdje je:

A = udio papira i tekstila u krutom komunalnom otpadu

B = udio otpadaka iz vrtova, parkova i ostalih otpadaka, koji nisu hrana, u krutom komunalnom otpadu

C = udio otpadaka hrane u krutom komunalnom otpadu

D = udio otpadaka drva i slame u krutom komunalnom otpadu

Razgradivi organski ugljik određuje se za vlažni otpad, a potrebno je izdvojiti lignin iz proračuna.

DOC_F je količina razgradivog organskog ugljika koja je razgrađena u odlagalištu otpada. Ukupna količina organskog ugljika ne razgradi se potpuno ili je ta razgradnja vrlo spora. Na temelju provedenih procjena, *IPCC Guidelines* preporučuje *default* vrijednost za DOC_F koja se kreće u intervalu 0,5 – 0,6, pri čemu je lignin izuzet iz proračuna.

Smjesa plinova emitiranih s odlagališta otpada sadrži najviše CH_4 i CO_2 . Udio CH_4 (F) može varirati od 0,4 do 0,6 (ovisno o sastavu otpada), a *default* vrijednost je 0,5. Spaljeni CH_4 (R) je količina CH_4 koja se regenerira u otpadu, a može se uporabiti kao izvor energije. *Default* vrijednost je 0.

Oksidacijski faktor označava količinu CH_4 koji je oksidiran u gornjim slojevima otpada ili u dijelovima gdje je prisutan kisik. Oksidacijski proces može smanjiti količinu generiranog CH_4 koji se emitira. *Default OX* je 0, što znači da ne dolazi do oksidacije. Razvijene zemlje s dobro uređenim odlagalištima otpada koriste $OX=0,1$, dok je kod zemalja u razvoju, koje imaju više neuređenih odlagališta, ta vrijednost bliža nuli. Prije uvrštavanja OX u izraz za izračunavanje godišnje emisije CH_4 potrebno je oduzeti regenerirani CH_4 .

4.1.1.2. Model raspadanja prvog reda

Model raspadanja prvog reda (eng. *First order decay, FOD*) je složeniji model za određivanje emisije CH₄ s odlagališta otpada, jer uzima u obzir činjenicu da se CH₄ emitira kroz dulje vremensko razdoblje. *IPCC Guidelines, Reference Manual* predlaže *FOD* model za određivanje emisije CH₄ s individualnih odlagališta, za nacionalno ili regionalno određivanje emisije CH₄ tijekom jedne godine te za određivanje godišnje emisije CH₄ u godini izrade inventara i prethodnim godinama.

Godišnja emisija CH₄ može se izračunati sljedećim izrazom:

$$\text{Generirani CH}_4 \text{ u godini } t \text{ (Gg/god)} = \sum_x [A \cdot k \cdot \text{MSW}_T(x) \cdot \text{MSW}_F(x) \cdot L_0(x) \cdot e^{-k(t-x)}]$$

za x = početna godina do t

gdje je:

t = godina određivanja emisije

x = godine za koje se uzimaju podaci

A = $(1 - e^{-k})/k$ – vremenski faktor

k = konstanta generiranja CH₄

$\text{MSW}_T(x)$ = ukupna stvorena količina krutog komunalnog otpada u godini x (Gg/god) (eng. *municipal solid waste*)

$\text{MSW}_F(x)$ = udio krutog komunalnog otpada odloženog na odlagalište u godini x

$L_0(x)$ = potencijal stvorenog metana [$\text{MCF}(x) \cdot \text{DOC}(x) \cdot \text{DOC}_F \cdot F \cdot 16/12$ (GgCH₄/Gg otpada)]

$\text{MCF}(x)$ = korekcijski faktor metana u godini x (eng. *methane correction factor*)

$\text{DOC}(x)$ = razgradivi organski ugljik (GgC/ MSW_T) u godini x (eng. *degradable organic carbon*)

$\text{DOC}_F(x)$ = udio disimiliranog DOC

F = udio CH₄ u smjesi plinova emitiranih sa odlagališta

16/12 = faktor za pretvorbu C u CH₄

Sumiranjem rezultata za sve godine (x) dobiva se sljedeći izraz:

$$\text{CH}_4 \text{ emitiran u god. } t \text{ (Gg/god)} = [\text{CH}_4 \text{ generiran u god } t - R(t)] \cdot (1 - \text{OX})$$

gdje je:

$R(t)$ = regenerirani CH_4 u godini određivanja emisije (Gg/god)

OX = oksidacijski faktor

$R(t)$ je potrebno oduzeti od generirane količine CH_4 prije uvrštavanja OX .

Konstanta brzine stvaranja CH_4 (k) ovisi o vremenu potrebnom da se organski ugljik u otpadu razgradi na polovicu početne mase ("vrijeme poluraspada"), a dobiva se iz izraza:

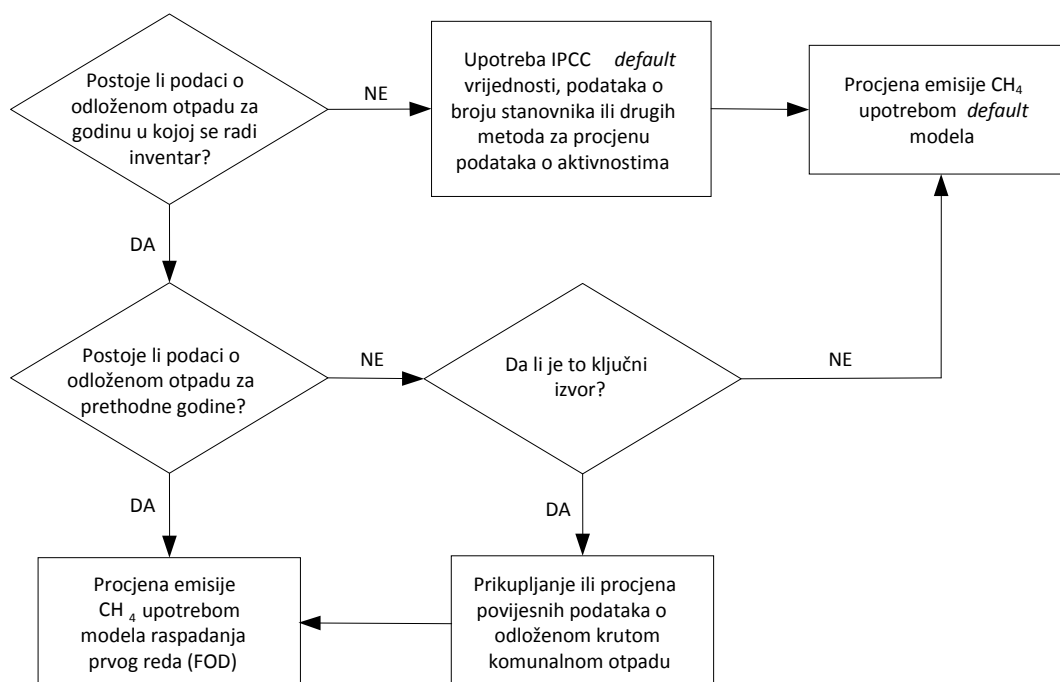
$$k = \ln 2 / t_{1/2}$$

FOD model uvrštava podatke unatrag nekoliko desetljeća (eng. *historical data*). Nacionalna izvješća trebala bi sadržavati 3 do 5 k da bi se postigli prihvatljivi i točni rezultati. Pri tome je u izvješće potrebno uvrstiti i sve promjene o načinima postupanja s otpadom u definiranom vremenu.

Velik broj faktora vezanih uz sastav otpada i uvjete u odlagalištu otpada utječu na primjenu konstante k . Predložena vrijednost za k (na osnovi mjerenja u razvijenim zemljama - SAD, Engleska, Nizozemska) kreće se u intervalu 0,03 – 0,2. Najveća brzina ($k = 0,2$ ili vrijeme poluraspada oko 3 godine) povezana je s dobro i brzo razgradivim otpadom te visokim sadržajem vlage u otpadu, kao što su otpaci hrane. Sporija brzina raspadanja ($k = 0,03$ ili vrijeme poluraspada oko 23 godine) povezana je s niskim sadržajem vlage u otpadu i sporo razgradivim otpadom, kao što je drvo i papir.

Za određivanje konstante k potrebno je točno odrediti sastav otpada koji se odlaže na odlagalište, kao i uvjete koji su prisutni u odlagalištu unatrag nekoliko desetljeća. Ako nisu dostupni ti podaci, predlaže se *default* vrijednost za k koja iznosi 0,05 (vrijeme poluraspada oko 14 god).

Dijagram izbora modela za proračun emisije CH_4 s odlagališta krutog komunalnog otpada (Slika 9) prikazuje parametre koji utječu na izbor modela. *Good practice* preporučuje izbor *FOD* metode jer mnogo točnije odražava emisije tijekom duljeg vremenskog razdoblja, ukoliko su dostupni podaci (količina i sastav otpada).



Slika 9. Blok dijagram izbora modela proračuna emisije CH_4 s odlagališta krutog komunalnog otpada [29]

Faktor emisije CH_4

Množenjem vrijednosti količine otpada odloženog na pojedini tip odlagališta s korekcijskim faktorom metana za pojedini tip odlagališta dobije se prosječni faktor za svaki tip odlagališta krutog komunalnog otpada. Ukoliko nisu poznate točne vrijednosti količine otpada koji se odlaže na pojedini tip odlagališta, koristi se *default* vrijednost za korekcijski faktor metana (*IPCC Guidelines, Reference Manual*). *Default* vrijednosti za korekcijski faktor metana (MCF), ovisno o tipu odlagališta, prikazuje Tablica 6.

Tablica 6. Klasifikacija odlagališta krutog komunalnog otpada i *default* vrijednosti za korekcijski faktor metana (MCF) [29]

TIP ODLAGALIŠTA	MCF- <i>default</i> vrijednost
Uređena	1,0
Neuređena - duboka (≥ 5 m dubine)	0,8
Neuređena - plitka (≤ 5 m dubine)	0,4
<i>Default</i> vrijednost - neodređena	0,6

Uređena odlagališta otpada imaju točno određeno mjesto i uvjete odlaganja i zbrinjavanja otpada, kontrolirajući mogućnost zapaljenja, a otpad se na odlagalištu prekriva, mehanički zbija ili sravnjuje s površinom zemlje. Iz vrijednosti korekcijskog faktora metana vidljivo je da neuređena odlagališta otpada imaju manji potencijal stvaranja metana, zbog većeg udjela aerobno razgrađenog otpada u gornjim slojevima odlagališta, što ne rezultira stvaranjem metana. U slučaju nepotpunih podataka o tipovima odlagališta, *IPCC Guidelines* preporučuje korištenje *default* vrijednosti 0,6.

Ulazni podaci za proračun emisije CH₄ s odlagališta komunalnog otpada

Ulazni podaci i njihovo određivanje bitan su čimbenik prilikom proračuna emisija stakleničkih plinova. Za primjenu *FOD* modela potrebno je poznavati podatke za godine koje prethode godinama za koje se vrši proračun, budući da je *FOD* dinamički model. Često su ti podaci nepotpuni ili ne postoje. U slučaju nepotpunih ili nepostojećih podataka moguće je procijeniti podatke uz određenu nesigurnost. Podaci se procjenjuju neizravno, uz pomoć dostupnih podataka koji su relevantni za procjenjivanje.

U Hrvatskoj nisu dostupni podaci o količini odloženog komunalnog otpada niti o udjelu stanovništva obuhvaćenog organiziranim prikupljanjem komunalnog otpada za razdoblje 1970.-1990. godine. Stoga se za navedeno razdoblje ovi podaci procjenjuju na temelju broja stanovnika i ekstrapolacijom proizvedene količine otpada po stanovniku.

I drugi parametri, kao što je udio biorazgradivog otpada i korekcijski faktor metana također se procjenjuju neizravno na temelju relevantnih podataka koji su dostupni.

4.1.2. Određivanje emisije CO₂

Emisija CO₂, koja je rezultat spaljivanja ugljika u otpadu fosilnog porijekla (plastika, tekstil, guma, otapala, otpadna ulja), uključuje se u proračun, dok se udio ugljika razgrađenog iz biomase (otpaci hrane, papir, drvo) ne uključuju u proračun emisije.

Emisija CO₂ računa se sljedećim izrazom:

$$\text{Emisija CO}_2 \text{ (Gg/god)} = \sum_i [IW_i \cdot CCW_i \cdot FCF_i \cdot EF_i \cdot 44/12]$$

gdje je:

i = MSW: kruti komunalni otpad (eng. *municipal solid waste*)

HW: opasni otpad (eng. *hazardous waste*)

CW: bolnički otpad (eng. *clinical waste*)

SS: kanalizacijski mulj (eng. *sewage sludge*)

IW_i = količina spaljenog otpada vrste i (Gg/god)

CCW_i = udio ugljika u otpadu vrste i

FCF_i = udio fosilnog ugljika u otpadu vrste i

EF_i = efikasnost izgaranja otpada vrste i

44/12 = faktor za pretvorbu C u CO₂

Faktor emisije CO₂

Emisija CO₂ izračunava se iz udjela ugljika u otpadu (nacionalne vrijednosti) ili korištenjem *default* vrijednosti za udio ugljika u otpadu (*Default Data for Estimation of CO₂ Emissions, IPCC GPG*). Faktori emisije temelje se na udjelu ugljika u otpadu fosilnog porijekla. U slučaju da su podaci o mjerenju CO₂ u izlaznim plinovima vrlo dobro dokumentirani, mogu se koristiti za određivanje nacionalnih vrijednosti udjela ugljika u otpadu.

Udio fosilnog i biogenog ugljika u otpadu dosta je promjenjiv, što ovisi o vrsti otpada. Ugljik u krutom komunalnom otpadu i bolničkom otpadu je fosilnog i biogenog porijekla, u kanalizacijskom mulju je udio fosilnog ugljika zanemariv, dok je ugljik u opasnom otpadu pretežno fosilnog porijekla.

5. TEMELJNI SCENARIJ

Temeljni scenarij pretpostavlja kontinuirani porast stvorenog krutog komunalnog otpada. Zbog djelovanja mjera izbjegavanja i smanjivanja količine otpada na izvoru, povećanja količine odvojeno skupljenog i recikliranog otpada te većeg obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada, udio otpada koji se odlaže na odlagalište postupno će se smanjivati.

Temeljni scenarij pretpostavlja primjenu osnovnih mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova:

- Izbjegavanje nastajanja i smanjivanje količine komunalnog otpada
- Povećanje količine odvojeno skupljenog i recikliranog komunalnog otpada
- Povećanje obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada

Izbjegavanje nastajanja i smanjivanje količine komunalnog otpada

Izbjegavanje nastajanja i smanjivanje količine proizvedenog komunalnog otpada je najviši prioritet gospodarenja komunalnim otpadom s ciljem smanjivanja količine i štetnosti otpada koji ulazi u sustav gospodarenja otpadom. Doprinos ove mjere teško je procijeniti budući da porastom životnog standarda raste i proizvodnja otpada po stanovniku. Uloga ove mjere ugrađena je u pretpostavku prema kojoj će proizvodnja komunalnog otpada rasti 2 % godišnje.

Povećavanje količine odvojeno skupljenog i recikliranog komunalnog otpada

Tehnologije primarnog recikliranja s odvojenim skupljanjem komponenata otpada nalaze se u hijerarhiji prioriteta gospodarenja komunalnim otpadom i njihov doprinos smanjivanju količine i štetnosti otpada, uključivo emisije stakleničkih plinova, stalno raste. Odvojeno skupljene komponente otpada smanjuju količinu i štetnost otpada, koji dalje prolazi kroz sustav gospodarenja otpadom, a time u pravilu smanjuju emisije stakleničkih plinova. Kombinacijom tehnologija recikliranja otpada s tehnologijama izbjegavanja otpada, potrebno je smanjiti rast količine odloženog komunalnog otpada.

Odvojeno sakupljanje otpada u odnosu na sakupljanje nesortiranog otpada pruža mogućnost uporabe odvojenih frakcija otpada (npr. staklo, metal, papir) te kompostiranja ili anaerobne obrade biorazgradivog otpada. Za proračun emisija temeljnog scenarija pretpostavlja se kako se odvojeno skupljeni biorazgradivi otpad koristi kao sirovina za proizvodnju komposta. Ovo znači da se iz odvojeno skupljenog biorazgradivog otpada neće proizvoditi bioplina. Recikliranjem se iz otpada, na izvoru otpada, odvojenim skupljanjem izdvajaju korisne i štetne komponente otpada. Korisne komponente otpada (sekundarne sirovine) se nakon prerade koriste za dobivanje novih proizvoda, a štetne komponente (opasni otpad) se zbrinjavaju.

Strategijom su definirani kvantitativni ciljevi i rokovi koji se odnose na povećanje količine odvojeno skupljenog i recikliranog komunalnog otpada. Do 2010. godine predviđa se udio od 8 % odvojeno skupljenog i recikliranog komunalnog otpada, dok je u 2025. godini predviđeni udio od 25 % odvojeno skupljenog i recikliranog komunalnog otpada [28].

Povećanje obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada

Organiziranim skupljanjem i odvozom otpada na odlagališta u 2005. godini obuhvaćeno je oko 93 % stanovništva Hrvatske, što predstavlja znatan porast u odnosu na procijenjenih 80 % za 2000. godinu [30]. Strategijom su definirani kvantitativni ciljevi i rokovi koji se odnose na povećanje obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada. Do 2025. godine predviđa se gotovo potpuni obuhvat stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada [28]. Mjera povećanja obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada povećava ukupnu količinu koja se odlaže na odlagalište što izravno

utječe na povećanje emisija, jer model za proračun emisija uključuje samo organizirano prikupljeni otpad. Ipak, povećanom količinom organizirano skupljenog komunalnog otpada povećava se učinak ostalih mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova.

5.1. Ulazni podaci

Budući da podaci o stvorenom otpadu u Hrvatskoj za razdoblje 1970.-1990. godine nisu poznati, na temelju broja stanovnika te pretpostavljenog životnog standarda stanovnika procjenjuje se količina stvorenog otpada. Sastav proizvedenog otpada bitan je kako bi se mogao odrediti doprinos pojedinih mjera u smanjenju emisija stakleničkih plinova iz otpada. Udio biorazgradivi otpada u proizvedenom komunalnom otpadu u 1997. godini pretpostavljen je na 67 % [31]. Za potrebe proračuna emisija stakleničkih plinova prema temeljnom scenariju u okviru ovog rada dani su ulazni podaci:

Količina otpada:

- 1970.-1980. godine: 167 kg/stan/god
- 1980.-1990. godine: 200 kg/stan/god
- 1990.-2007. godine: porast količine otpada 209 - 379 kg/stan/god [31]
- 2008.-2030. godine pretpostavljen je porast stvorenog komunalnog otpada od 2 %/god

Količina odvojeno skupljenog i recikliranog otpada

Udjeli odvojeno skupljenog i recikliranog otpada definirani su Strategijom. Odvojeno skupljeni otpad 2005. godine iznosio je oko 58.000 tona što predstavlja udio od 4,2 % od ukupno skupljenog otpada uz dodatnih 12.400 tona biorazgradivog otpada koji se kompostirao. Strategija je za 2005. godinu predvidjela udio od 6 %, što se nije ostvarilo. Ovo kašnjenje uzeto je u obzir u 2030. godini kada se udio odvojeno skupljenog i recikliranog otpada procjenjuje na iznos koji Strategija predviđa za 2025. godinu. Sastav odvojeno skupljenog otpada u 2005. godini uzima se kao referentni sastav, a za potrebe proračuna pretpostavlja se kako će sastav odvojeno skupljenog otpada biti konstantan (Tablica 7). Udio biorazgradivog otpada u odvojeno skupljenom otpadu iznosi 50 % [30].

Tablica 7. Sastav odvojeno skupljenog komunalnog otpada 2005. godine [30]

Sastav	Masa [t]	Udio [%]
Papir i karton	17.826	30,7%
Plastika (osim PET)	669	1,2%
PET	1.759	3,0%
Gume	1.583	2,7%
Metal	11.804	20,4%
Staklo	9.804	16,9%
Ambalaža	6.338	10,9%

Strategija predviđa rast udjela odvojeno skupljenog komunalnog otpada:

- 8 % 2010., 12 % 2015., 18 % 2020. i 25 % 2025. godine (procjena za 2030. godinu ista je kao i za 2025. kako ne bi došlo do precjenjivanja doprinosa ove mjere)

Korekcijski faktor metana određen je prema preporuci *IPCC GPG* [31]. Za udio razgradivog organskog ugljika (DOC) u razdoblju 1970.-2005. godine uzeta je ista vrijednost (0,17), a kasnije se određuje prema udjelu biorazgradivog otpada u komunalnom otpadu koji se odlaže. Nakon 2005. godine DOC u temeljnom scenariju ima blagi trend rasta uslijed povećanog udjela odvojeno prikupljenog otpada. Uz pretpostavku da proizvedeni komunalni otpad sadrži 67 % biorazgradivog dijela, odvojenim skupljanjem otpada s udjelom biorazgradivog otpada od 50 % povećava se udio biorazgradivog otpada u odloženom komunalnom otpadu.

Tablica 8. Ulazni podaci (temeljni scenarij)

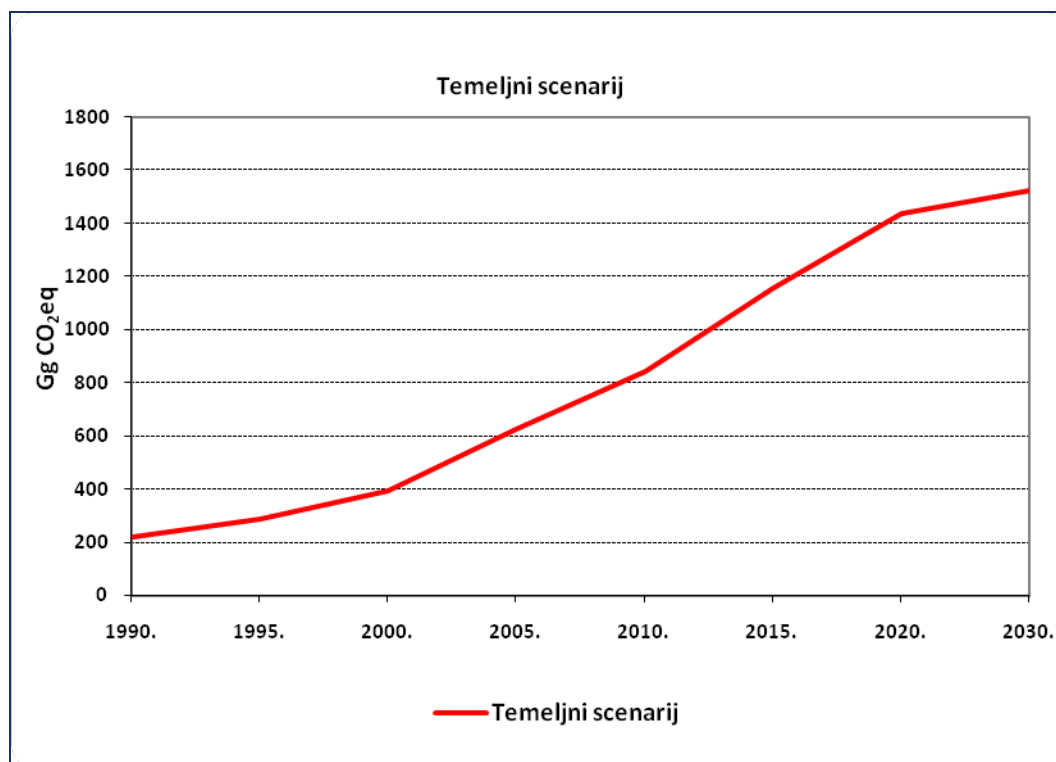
Godina	MSW _T (x)	MSW _F (x)	Odloženi MSW	MCF(x)	R(t)	OX	DOC(x)
1970	740.000	0,41	303.400	0,400	0	0	0,170
1971	758.000	0,42	317.602	0,400	0	0	0,170
1972	776.000	0,43	332.128	0,400	0	0	0,170
1973	794.000	0,44	346.978	0,400	0	0	0,170
1974	812.000	0,45	362.152	0,400	0	0	0,170
1975	830.000	0,45	377.650	0,400	0	0	0,170
1976	848.000	0,46	393.472	0,400	0	0	0,170
1977	866.000	0,47	409.618	0,400	0	0	0,170
1978	884.000	0,48	426.088	0,400	0	0	0,170
1979	902.000	0,49	442.882	0,400	0	0	0,170
1980	920.000	0,50	460.000	0,600	0	0	0,170
1981	928.000	0,51	472.352	0,600	0	0	0,170
1982	936.000	0,52	484.848	0,600	0	0	0,170
1983	944.000	0,53	497.488	0,600	0	0	0,170
1984	952.000	0,54	510.272	0,600	0	0	0,170
1985	960.000	0,54	523.200	0,600	0	0	0,170
1986	968.000	0,55	536.272	0,600	0	0	0,170
1987	976.000	0,56	549.488	0,600	0	0	0,170
1988	984.000	0,57	562.848	0,600	0	0	0,170
1989	992.000	0,58	576.352	0,600	0	0	0,170
1990	1.000.000	0,59	590.000	0,606	0	0	0,170
1991	980.000	0,61	598.780	0,606	0	0	0,170
1992	970.000	0,63	613.040	0,605	0	0	0,170
1993	985.000	0,65	643.205	0,606	0	0	0,170
1994	1.005.000	0,67	677.370	0,613	0	0	0,170
1995	1.060.000	0,70	736.700	0,623	0	0	0,170
1996	1.100.000	0,72	787.600	0,625	0	0	0,170
1997	1.150.000	0,74	847.550	0,632	0	0	0,170
1998	1.205.000	0,76	913.390	0,636	0	0	0,170
1999	1.253.000	0,78	976.087	0,654	0	0	0,170
2000	1.173.000	0,80	938.400	0,702	0	0	0,170
2001	1.258.750	0,80	1.007.000	0,727	0	0	0,170
2002	1.346.250	0,80	1.077.000	0,748	0	0	0,170
2003	1.433.750	0,80	1.147.000	0,767	0	0	0,170
2004	1.439.053	0,85	1.216.000	0,784	0	0	0,170
2005	1.449.381	0,89	1.286.078	0,799	0	0	0,172
2006	1.626.948	0,89	1.447.984	0,818	0	0	0,172
2007	1.683.132	0,89	1.609.890	0,835	0	0	0,172
2008	1.716.795	0,89	1.527.947	0,900	0	0	0,173
2009	1.751.131	0,90	1.576.017	0,900	0	0	0,173
2010	1.786.153	0,90	1.610.396	1,000	0	0	0,174
2011	1.821.876	0,89	1.621.470	1,000	0	0	0,174
2012	1.858.314	0,89	1.653.899	1,000	0	0	0,175
2013	1.895.480	0,88	1.668.022	1,000	0	0	0,176
2014	1.933.390	0,88	1.701.383	1,000	0	0	0,177
2015	1.972.057	0,87	1.718.056	1,000	0	0	0,178
2016	2.011.499	0,86	1.729.889	1,000	0	0	0,178
2017	2.051.729	0,85	1.743.969	1,000	0	0	0,179
2018	2.092.763	0,83	1.736.993	1,000	0	0	0,180
2019	2.134.618	0,82	1.750.387	1,000	0	0	0,181
2020	2.177.311	0,81	1.767.541	1,000	0	0	0,182
2030	2.395.042	0,75	1.796.281	1,000	0	0	0,189

5.2. Projekcije emisija (temeljni scenarij)

Tablica 9. Temeljni scenarij

Godina	CH ₄ emisije (FOD) [Gg]	CO ₂ eq emisije (FOD) [Gg]
1970	0,37	7,74
1971	0,74	15,47
1972	1,10	23,19
1973	1,47	30,92
1974	1,84	38,65
1975	2,21	46,40
1976	2,58	54,18
1977	2,95	61,99
1978	3,33	69,85
1979	3,70	77,74
1980	4,36	91,56
1981	5,01	105,18
1982	5,65	118,61
1983	6,28	131,87
1984	6,90	144,97
1985	7,52	157,93
1986	8,13	170,76
1987	8,74	183,47
1988	9,34	196,06
1989	9,93	208,57
1990	10,53	221,21
1991	11,12	233,57
1992	11,71	245,85
1993	12,32	258,72
1994	12,98	272,60
1995	13,74	288,58
1996	14,57	305,93
1997	15,49	325,21
1998	16,50	346,40
1999	17,63	370,24
2000	18,77	394,21
2001	20,08	421,68
2002	21,55	452,54
2003	23,17	486,62
2004	24,94	523,73
2005	29,97	629,43
2006	29,22	613,66
2007	31,64	664,50
2008	34,35	721,43
2009	37,07	778,40
2010	40,26	845,45
2011	43,34	910,17
2012	46,40	974,47
2013	49,39	1037,19
2014	52,37	1099,70
2015	55,28	1160,79
2016	58,09	1219,81
2017	60,84	1277,55
2018	63,46	1332,66
2019	66,03	1386,64
2020	68,55	1439,56
2030	72,66	1525,84

Slika 10 prikazuje emisije metana za temeljni scenarij. Emisije rastu uslijed povećanja obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem otpada te uslijed povećanog stvaranja otpada. Povećanjem udjela odvojeno skupljenog otpada u razdoblju 2005.-2030. godine dolazi do usporavanja rasta emisija.



Slika 10. Emisije CH₄ za temeljni scenarij

6. SCENARIJ S MJERAMA

Scenarij s mjerama pretpostavlja uključivanje dodatnih mjera i kvantificiranih ciljeva definiranih Strategijom i Planom. Mjere su usmjerene na smanjivanje količine odloženog biorazgradivog komunalnog otpada uz pretpostavljene vremenske pomake implementacije mjera u odnosu na Direktivu. Scenarij s mjerama osim mjera navedenih u temeljnom scenariju (poglavlje 5.) obuhvaća i sljedeće mjere:

- Mehaničko-biološku obradu komunalnog otpada koja obuhvaća:
 - Smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada
 - Proizvodnju i uporabu bioplina iz bioreaktora
 - Proizvodnju i korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji
- Spaljivanje metana na baklji i korištenje metana za proizvodnju električne energije

6.1. Mehaničko-biološka obrada komunalnog otpada

Doprinos mehaničko-biološke obrade komunalnog otpada u smanjenju emisija stakleničkih plinova proizlazi iz primjene više zasebnih mjera koje su sastavni dio mehaničko-biološke obrade. Mehaničkom obradom i sortiranjem proizvodi se gorivo iz otpada koje se koristi kao gorivo u industrijskim procesima (cementare) ili kao gorivo u ENO. Biološkom obradom biorazgradivog otpada proizvodi se bioplina koji se koristi za proizvodnju električne i toplinske energije. Stoga se i proračun doprinosa mehaničko-biološke obrade komunalnog otpada u

smanjenju emisija stakleničkih plinova vrši zasebno za mjere koje su sastavni dio procesa mehaničko-biološke obrade:

- Smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada
- Proizvodnja bioplina u bioreaktorima
- Proizvodnja i korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji

6.1.1. Smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada

Smanjenjem količine odloženog biorazgradivog otpada dolazi do smanjenja emisija stakleničkih plinova uslijed smanjenje emisije metana koji bi se emitirao s odlagališta. Strategijom su definirani kvantitativni ciljevi i rokovi koji se odnose na smanjenje količine odloženog biorazgradivog komunalnog otpada, a koji je potrebno podvrgnuti metodama biološke obrade. Do 2012. godine predviđa se smanjiti količina odloženog biorazgradivog otpada na 75 % od količine proizvedene 1997. godine, do 2015. godine na 50 %, dok se do 2020. godine ta količina predviđa smanjiti na 35 %. Rokovi su utvrđeni s pretpostavljenim vremenskim pomacima u odnosu na Direktivu [9].

Smanjenje količine biorazgradivog komunalnog otpada koji se odlaže na odlagališta otpada definirano je Direktivom, a postiže se povećanjem udjela otpada koji se podvrgava mehaničko-biološkoj obradi.

6.1.1.1. Ulazni podaci

Direktiva kvantificira smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada. Prema definiranim rokovima moguće je izračunati udio otpada koji se mora podvrgnuti mehaničko-biološkoj obradi kako bi se zadovoljili ciljevi Direktive. Polazni podatak je količina proizvedenog biorazgradivog otpada u 1997. godini. Uz procijenjenu količinu od 1.150.00 tona stvorenog komunalnog otpada te uz biorazgradivi udio od 67 % [31], referentna količina biorazgradivog komunalnog otpada iznosi 770.500 tona. Prema tome je moguće odrediti količinu odloženog biorazgradivog komunalnog otpada kako bi se zadovoljili ciljevi Direktive (Tablica 10).

Tablica 10. Količina otpada za MBO u svrhu ostvarivanja ciljeva Direktive

	1997.	2012.	2015.	2020.	2030.
Ukupna količina otpada [t]*	1.150.000	1.653.899	1.718.056	1.767.541	1.796.281
Biorazgradivi udio**	0,67	0,68	0,70	0,72	0,75
Količina biorazgradivog otpada [t]	770.500	1.132.561	1.204.754	1.265.804	1.341.059
Faktor smanjenja u odnosu na 1997. godinu	-	0,75	0,50	0,35	0,20
Dozvoljena količina odloženog biorazgradivog otpada [t]	-	577.875	385.250	269.675	154.100
Potrebna količina za MBO [t]	-	810.018	1.168.665	1.390.973	1.589.872
Udio otpada za MBO	-	0,49	0,68	0,79	0,89

* - ukupna količina otpada koja ostaje nakon odvojenog skupljanja

** - biorazgradivi udio otpada nakon odvojenog skupljanja

Iz prikazanih rezultata (Tablica 10) vidi se da je 2012. godine potrebno obraditi 49 % otpada koji ostaje nakon odvojenog skupljanja. Ovaj iznos za 2015. godinu iznosi 68 %, a za 2020. godinu 79 %. Za 2010. godinu se pretpostavlja kako će se 15 % komunalnog otpada (240.000 t) obrađivati mehaničko-biološkom obradom. Ciljevi Direktive ne obuhvaćaju 2030. godinu te se procjenjuje da će 2030. godine dozvoljena količina odloženog biorazgradivog otpada iznositi 20 % od referentne količine (1997. godina). Podatke za proračun emisije metana uz provođenje mjere smanjenja količine odloženog biorazgradivog otpada prikazuje Tablica 11.

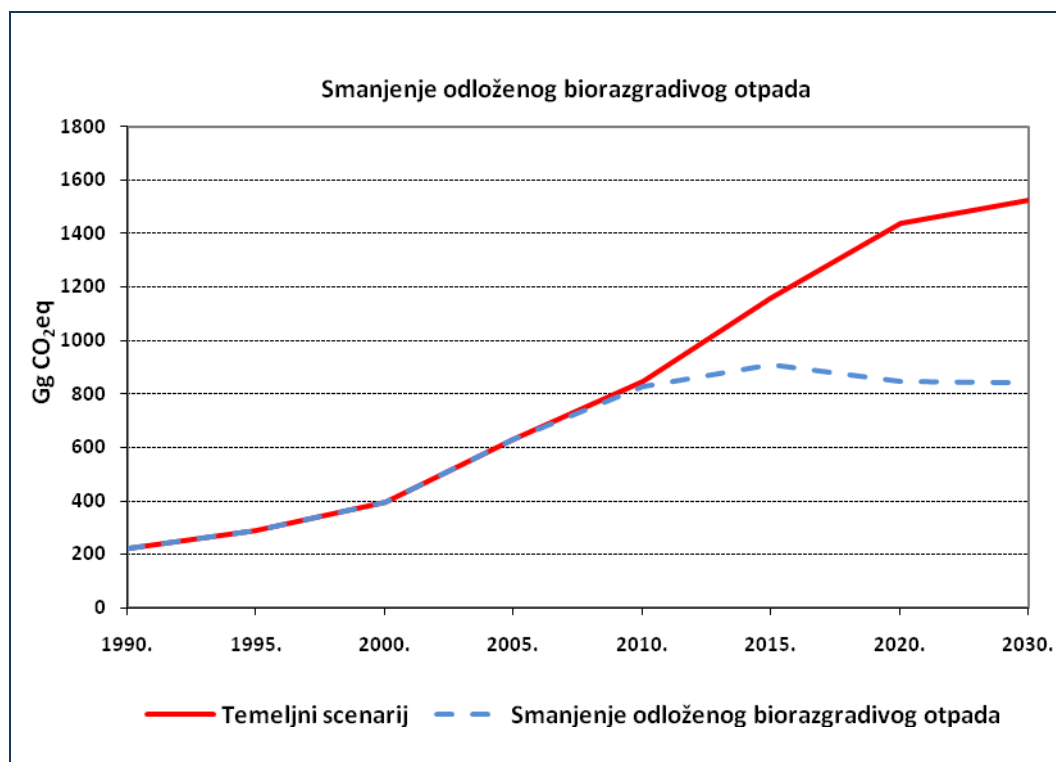
Tablica 11. Ulazni podaci (smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada)

Godina	MSW _T (x)	MSW _F (x)		MCF(x)	R(t)	OX	DOC(x)
1970	740.000	0,41	303.400	0,400	0	0	0,170
1971	758.000	0,42	317.602	0,400	0	0	0,170
1972	776.000	0,43	332.128	0,400	0	0	0,170
1973	794.000	0,44	346.978	0,400	0	0	0,170
1974	812.000	0,45	362.152	0,400	0	0	0,170
1975	830.000	0,45	377.650	0,400	0	0	0,170
1976	848.000	0,46	393.472	0,400	0	0	0,170
1977	866.000	0,47	409.618	0,400	0	0	0,170
1978	884.000	0,48	426.088	0,400	0	0	0,170
1979	902.000	0,49	442.882	0,400	0	0	0,170
1980	920.000	0,50	460.000	0,600	0	0	0,170
1981	928.000	0,51	472.352	0,600	0	0	0,170
1982	936.000	0,52	484.848	0,600	0	0	0,170
1983	944.000	0,53	497.488	0,600	0	0	0,170
1984	952.000	0,54	510.272	0,600	0	0	0,170
1985	960.000	0,54	523.200	0,600	0	0	0,170
1986	968.000	0,55	536.272	0,600	0	0	0,170
1987	976.000	0,56	549.488	0,600	0	0	0,170
1988	984.000	0,57	562.848	0,600	0	0	0,170
1989	992.000	0,58	576.352	0,600	0	0	0,170
1990	1.000.000	0,59	590.000	0,606	0	0	0,170
1991	980.000	0,61	598.780	0,606	0	0	0,170
1992	970.000	0,63	613.040	0,605	0	0	0,170
1993	985.000	0,65	643.205	0,606	0	0	0,170
1994	1.005.000	0,67	677.370	0,613	0	0	0,170
1995	1.060.000	0,70	736.700	0,623	0	0	0,170
1996	1.100.000	0,72	787.600	0,625	0	0	0,170
1997	1.150.000	0,74	847.550	0,632	0	0	0,170
1998	1.205.000	0,76	913.390	0,636	0	0	0,170
1999	1.253.000	0,78	976.087	0,654	0	0	0,170
2000	1.173.000	0,80	938.400	0,702	0	0	0,170
2001	1.258.750	0,80	1.007.000	0,727	0	0	0,170
2002	1.346.250	0,80	1.077.000	0,748	0	0	0,170
2003	1.433.750	0,80	1.147.000	0,767	0	0	0,170
2004	1.439.053	0,85	1.216.000	0,784	0	0	0,170
2005	1.449.381	0,89	1.286.078	0,799	0	0	0,172
2006	1.626.948	0,89	1.335.003	0,818	0	0	0,172
2007	1.683.132	0,89	1.497.987	0,835	0	0	0,172
2008	1.716.795	0,89	1.527.947	0,900	0	0	0,173
2009	1.751.131	0,90	1.576.017	0,900	0	0	0,173
2010	1.786.153	0,77	1.368.836	1,000	0	0	0,174
2011	1.821.876	0,68	1.238.876	1,000	0	0	0,174
2012	1.858.314	0,58	1.077.822	1,000	0	0	0,175
2013	1.895.480	0,48	909.830	1,000	0	0	0,176
2014	1.933.390	0,38	734.688	1,000	0	0	0,177
2015	1.972.057	0,28	549.778	1,000	0	0	0,178
2016	2.011.499	0,26	522.990	1,000	0	0	0,178
2017	2.051.729	0,24	492.415	1,000	0	0	0,179
2018	2.092.763	0,22	460.408	1,000	0	0	0,180
2019	2.134.618	0,20	426.924	1,000	0	0	0,181
2020	2.177.311	0,17	371.184	1,000	0	0	0,182
2030	2.395.042	0,08	197.591	1,000	0	0	0,189

6.1.1.2. Projekcije emisija**Tablica 12. Projekcije emisija (smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada)**

Godina	CH ₄ emisije (FOD) [Gg]	CO ₂ eq emisije (FOD) [Gg]
1970	0,37	7,74
1971	0,74	15,47
1972	1,10	23,19
1973	1,47	30,92
1974	1,84	38,65
1975	2,21	46,40
1976	2,58	54,18
1977	2,95	61,99
1978	3,33	69,85
1979	3,70	77,74
1980	4,36	91,56
1981	5,01	105,18
1982	5,65	118,61
1983	6,28	131,87
1984	6,90	144,97
1985	7,52	157,93
1986	8,13	170,76
1987	8,74	183,47
1988	9,34	196,06
1989	9,93	208,57
1990	10,53	221,21
1991	11,12	233,57
1992	11,71	245,85
1993	12,32	258,72
1994	12,98	272,60
1995	13,74	288,58
1996	14,57	305,93
1997	15,49	325,21
1998	16,50	346,40
1999	17,63	370,24
2000	18,77	394,21
2001	20,08	421,68
2002	21,55	452,54
2003	23,17	486,62
2004	24,94	523,73
2005	29,97	629,43
2006	29,22	613,66
2007	31,64	664,50
2008	34,35	721,43
2009	37,07	778,40
2010	39,51	829,70
2011	41,44	870,19
2012	42,79	898,58
2013	43,57	914,89
2014	43,77	919,10
2015	43,38	910,99
2016	42,93	901,52
2017	42,41	890,65
2018	41,83	878,34
2019	41,17	864,52
2020	40,37	847,67
2030	40,15	843,19

Uvođenjem mjere smanjenja odloženog biorazgradivog otpada vidljivo je kako se najveći potencijal smanjenja emisija ostvaruje u razdoblju 2015.-2020. godine (Slika 11). Ovo je posljedica provođenja mjere s ciljevima koje definira Direktiva.



Slika 11. Emisije CH₄ uz mjeru smanjenja količine odloženog biorazgradivog otpada

6.1.2. Proizvodnja bioplina u bioreaktorima

Od ukupne količine komunalnog otpada koji ulazi u proces mehaničko-biološke obrade 35 % otpada (biorazgradivi dio) se puni u bioreaktore tijekom duljeg vremenskog razdoblja (do 5 godina). Tijekom procesa punjenja bioreaktora ne odvija se proces anaerobne digestije. Nakon što se bioreaktor popuni, dodavanjem vode pokreće se anaerobna digestija čiji je produkt bioplin koji se prikuplja i energetske iskoristava. Bioplin je smjesa metana i ugljikovog dioksida koji izgara u plinskom motoru proizvodeći električnu i/ili toplinsku energiju. Ostatak anaerobne digestije je inertni produkt koji se odlaže na odlagalište, a emisije iz ovog ostatka mogu se zanemariti.

Potencijal smanjenja emisije metana izračunat je *FOD* modelom u mjeri smanjenja odloženog biorazgradivog otpada, dok se potencijal smanjenja emisije ugljikovog dioksida izračunava na temelju potencijala bioplina. Budući da se biorazgradivi dio smatra CO₂

neutralnim, proizvodnjom energije iz bioplina ostvaruje se bonitet emisija. Osim boniteta emisija ostvaruje se i ekvivalentna ušteda fosilnih goriva. Donja ogrjevna vrijednost metana iznosi $37,8 \text{ MJ/m}^3$ [32], a udio metana u bioplinu iz bioreaktora iznosi 60-75 %. Udio metana ovisi o tehnologiji koja se primjenjuje i o sastavu otpada. Uz pretpostavljeni udio metana u bioplinu od 70 % donja ogrjevna vrijednost bioplina iznosi $26,46 \text{ MJ/m}^3$. Iz jedne tone obrađenog otpada iz bioreaktora dobiva se 60 m^3 bioplina [33].

Tablica 13. Karakteristike bioplina iz bioreaktorskog postrojenja

Bioplin	
Udio CH_4	70 %
Ogrjevna vrijednost CH_4 [MJ/m^3]	37,8
Ogrjevna vrijednost bioplina [MJ/m^3]	26,46
Proizvodnja bioplina [m^3/t]	60
Ušteda fosilnog goriva [toe/m^3]	$6,32 \times 10^{-4}$
Proizvodnja električne energije [kWh/m^3]*	1,84
Bonitet emisija [tCO_2/TJ]	56,1

*- uz ukupni faktor učinkovitosti plinskog motora i generatora $\eta = 0,25$

Prema zadanim podacima (Tablica 13) moguće je odrediti potencijal proizvodnje električne energije iz bioplina. Proizvodnja električne energije po kubnom metru bioplina računa se uz stupanj iskoristivosti sustava plinskog motora i generatora $\eta = 0,25$. Bonitet emisija može se izračunati uz pretpostavku korištenja bioplina umjesto prirodnog plina čiji je emisijski faktor $\text{EF} = 56,1 \text{ tCO}_2/\text{TJ}$ [34].

Tablica 14. Potencijal proizvodnje električne energije i bonitet emisija korištenjem bioplina

	2010.	2012.	2015.	2020.	2030.
Količina u bioreaktoru [t]	71.864	283.506	409.033	486.840	556.455
Proizvedeni bioplin [m^3]	4.311.834	17.010.384	24.541.971	29.210.427	33.387.315
Proizvedena električna energija [MWh]	7.923	31.257	45.096	53.674	61.349
Ušteda fosilnih goriva [toe]	2.725	10.751	15.511	18.461	21.101
Bonitet emisija [tCO_2]	1.600	6.313	9.108	10.840	12.390

6.1.3. Korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji

Tehnika korištenja goriva iz otpada moguća je zahvaljujući značajkama peći za proizvodnju klinkera. Visoke temperature u rotacijskoj peći (1000-2000 °C) i vrijeme zadržavanja koje je višestruko duže nego u spalionicama i energetske postrojenjima, omogućuju potpunu razgradnju svih organskih tvari. S druge strane, niska temperatura plinova na izlazu iz sustava rotacijska peć-mlin cementa (100 °C) ne ostavlja mogućnost da se u dimnim plinovima pojave pare teških metala. Pri zbrinjavanju otpadnih tvari u cementnoj peći organski dijelovi izgore, a anorganski dio (pepeo) se miješa sa sirovinom i uključuje u proizvod – klinker, te u konačni proizvod cement. To ujedno znači da ne postoji problem odlaganja, odnosno zbrinjavanja pepela.

Korištenje goriva iz otpada, dobivenog mehaničko-biološkom obradom, kao dopunskog goriva, rezultira smanjenom potrošnjom fosilnih goriva. Komponenta organskog podrijetla smatra se neutralnom s obzirom na CO₂, a time se izravno smanjuje emisija CO₂ za ekvivalentnu količinu proizvedene energije. Potencijal smanjenja emisije CH₄ uslijed smanjene količine odloženog biorazgradivog otpada već je uključen u mjeri smanjenja odloženog biorazgradivog otpada. Suizgaranjem komponenata otpada s fosilnim gorivima u rotacijskim pećima cementne industrije dodatno se postižu povoljni ekonomski i ekološki rezultati zbrinjavanjem ostataka izgaranja (šljaka, pepeo) ugradnjom u krajnji proizvod, cement.

Sa stajališta smanjenja emisije CO₂ bitno je definirati udio otpada biološkog podrijetla, koji se smatra neutralnim s obzirom na CO₂. Ovaj udio može značajno varirati i ovisi o tehnologiji i postupku mehaničko-biološke obrade. Pretpostavlja se da udio biorazgradivog otpada u gorivu iz otpada iznosi 40 % [35]. U otpad biološkog podrijetla ubraja se papir, karton, drvo, tekstil, a u otpad fosilnog podrijetla ulazi plastika i guma. Udio otpada fosilnog podrijetla u alternativnom gorivu doprinosi emisiji CO₂. Povećanje proizvodnje goriva iz otpada (RDF-a) premašuje potencijale cementne industrije [36], a višak goriva iz otpada može se spaljivati u energanama na RDF ili izvoziti.

6.1.3.1. Ulazni podaci

Budući da je potencijal smanjenja CH₄ već uključen u mjeri smanjenja odloženog biorazgradivog otpada, u nastavku je prikazan potencijal smanjenja emisije CO₂. U Hrvatskoj se cement proizvodi u 4 cementare (Dalmacijacement d.d., Holcim Hrvatska d.o.o., Našicecement d.d. i Istra Cement d.o.o.). U Istra Cementu d.o.o. se proizvodi aluminatni cement dok se u preostale 3 cementare proizvodi portland cement. Proces proizvodnje aluminatnog cementa je specifičan zbog čega se u proračun ne uključuje proizvodnja iz Istra Cementa d.o.o. Na temelju projekcija proizvodnje klinkera i utrošene energije u 3 hrvatske cementare koje proizvode portland cement može se odrediti količina goriva iz otpada koja se može iskoristiti kao zamjensko gorivo [36].

Pretpostavlja se da udio goriva iz otpada u gorivu za proizvodnju cementa može iznositi do 30 % bez potrebe za tehničkom rekonstrukcijom cementne peći. Ipak, ne može se očekivati trenutna zamjena 30 % goriva, već će se ona odvijati postupno. Prema planovima proizvodnje u cementarama udio od 30 % goriva iz otpada biti će ostvaren do 2020. godine. Planovi također predviđaju ostvarenje maksimalnih potencijala proizvodnje klinkera do 2020. godine. Ogrjevna vrijednost dobivenog goriva iz otpada ovisi o načinu obrade i sastavu otpada. Za proračun se uzima stalna ogrjevna vrijednost $H_d=15$ MJ/kg. Tablica 15 prikazuje količine goriva iz otpada koje se mogu proizvesti od količine komunalnog otpada koju je potrebno obraditi mehaničko-biološkom obradom kako bi se zadovoljila Direktiva. Za proračun potencijala smanjenja emisija korištenjem goriva iz otpada u cementnoj industriji uvedene su sljedeće pretpostavke:

- Donja ogrjevna vrijednost goriva iz otpada iznosi $H_d = 15$ MJ/kg
- 35 % otpada iz MBO izlazi kao gorivo iz otpada
- 40 % biorazgradivog otpada u gorivu iz otpada
- 10 % udio goriva iz otpada u gorivu za proizvodnju cementa 2010. godine
- 15 % udio goriva iz otpada u gorivu za proizvodnju cementa 2012. godine
- 20 % udio goriva iz otpada u gorivu za proizvodnju cementa 2015. godine
- 30 % udio goriva iz otpada u gorivu za proizvodnju cementa 2020. i 2030. godine

Tablica 15. Količina goriva iz otpada za cementnu industriju

GORIVO IZ OTPADA	2010.	2012.	2015.	2020.	2030.
Količina goriva iz otpada [t]	71.864	283.506	409.033	486.840	556.455

6.1.3.2. Potencijal smanjenja emisije CO₂

Proračun potencijala smanjenja emisije CO₂ u cementarama temelji se na ukupnom utrošku energije za proizvodnju klinkera u 3 promatrane cementare (Tablica 16) [36]. Postepenom zamjenom fosilnog goriva raste udio energije koja se dobiva iz goriva iz otpada. Uz stalnu ogrjevnu vrijednost može se izračunati količina goriva iz otpada koja se koristi u cementarama. Emisijski faktor goriva iz otpada iznosi EF = 1,376 tCO₂/t te se mogu izračunati emisije iz goriva iz otpada. Emisije iz borazgradivog dijela otpada koji čini 40 % ukupne količine RDF-a smatraju se CO₂ neutralnima te se ne uzimaju u obzir.

Prosječna ogrjevna vrijednost goriva u svakoj cementari izračunata je množenjem udjela pojedinog fosilnog goriva s njegovom ogrjevnom vrijednosti. Cementare za proizvodnju klinkera koriste ugljen, petrol koks, mazut, dizel, otpadna ulja i gumu te prirodni plin. Ukupna ogrjevna vrijednost goriva za proizvodnju klinkera izražena je kao prosječna vrijednost ogrjevnih vrijednosti goriva pojedinih cementara. Ogrjevna vrijednost goriva cementare dobivena je množenjem ogrjevnosti fosilnog goriva s njegovim udjelom u ukupnom gorivu za proizvodnju klinkera.

$$H_{dUK} = \frac{\sum_{i=1}^3 H_{d_i}}{3}$$

$$H_{d_i} = \sum_{j=1}^n H_{d_j} \cdot y_j$$

gdje je:

H_{dUK} - ukupna prosječna ogrjevna vrijednost goriva [MJ/kg]

H_{d_i} - prosječna ogrjevna vrijednost goriva pojedine cementare [MJ/kg]

H_{d_j} - ogrjevna vrijednost pojedinog fosilnog goriva [MJ/kg]

y_j - udio pojedinog fosilnog goriva u ukupnom gorivu

Izračunata ukupna prosječna ogrjevna vrijednost goriva iznosi 29,83 MJ/kg.

Analogijom se određuje i ukupni emisijski faktor:

$$EF_F = \frac{\sum_{i=1}^3 EF_i}{3}$$

$$EF_i = \sum_{j=1}^n EF_j \cdot y_j$$

gdje je:

EF_F - ukupni prosječni emisijski faktor (fosilna goriva) [tCO₂/t]

EF_i - prosječni emisijski faktor goriva pojedine cementare [tCO₂/t]

EF_j - emisijski faktor pojedinog fosilnog goriva [tCO₂/t]

y_j - udio pojedinog fosilnog goriva u ukupnom gorivu

Izračunati ukupni prosječni emisijski faktor goriva izonsi $EF_F = 2,76$ tCO₂/t.

Za energiju koja je dobivena iz goriva iz otpada uštedjela se ekvivalentna količina fosilnog goriva koja bi inače emitirala određenu količinu CO₂. Potencijal smanjenja emisije CO₂ korištenjem goriva iz otpada u cementnoj industriji upravo je razlika emisija koja se ostvaruje zamjenom fosilnog goriva:

$$P_C = FG \cdot EF_F - (RDF \cdot EF_{RDF}) \cdot B_F$$

gdje je:

P_C - potencijal smanjenja emisije CO₂ [t]

FG - količina fosilnih goriva [t]

EF_F - ukupni prosječni emisijski faktor za fosilna goriva [tCO₂/t]

RDF - količina goriva iz otpada [t]

EF_{RDF} - emisijski faktor goriva iz otpada [tCO₂/t]

B_F - udio fosilnog goriva u gorivu iz otpada (0,6)

Potencijali su prikazani tablično (Tablica 16). Potencijal za 2020. i 2030. je jednak budući da se do 2020. predviđa ostvarenje maksimalnih potencijala proizvodnje klinkera, a istodobno će i udio goriva iz otpada ostati 30 %. Emisije iz RDF-a prikazane su kao 60 % ukupnih emisija iz RDF-a, budući da se 40 % emisija iz biorazgradivog dijela smatra CO₂ neutralnim.

Tablica 16. Potencijal smanjenja emisija CO₂ u cementnoj industriji

	2010. (10 %)	2012. (15 %)	2015. (20 %)	2020. (30 %)	2030. (30 %)
Ukupno [GJ/god]	11.015.180	11.620.571	12.225.962	12.831.353	12.831.353
RDF [GJ/god]	1.101.518	1.743.086	2.445.192	3.849.406	3.849.406
Količina RDF-a [t]	73.435	116.206	163.013	256.627	256.627
EF _{RDF} [tCO ₂ /t]	1,376	1,376	1,376	1,376	1,376
Emisije iz RDF-a [tCO ₂ /god] (60 %)	60.628	95.939	134.583	211.871	211.871
EF _F [tCO ₂ /t]	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Emisije iz fosilnih goriva [tCO ₂ /god]	102.077	161.530	226.594	356.721	356.721
Potencijal [tCO₂/god]	41.449	65.591	92.011	144.850	144.850

Usporedbu proizvodnje goriva iz otpada i kapaciteta cementara prikazuje Tablica 17. Vidljivo je kako u 2010. godini potencijal proizvodnje goriva iz otpada ne može zadovoljiti kapacitet cementara, ali s obzirom na nesigurnost implementacije obiju mjera u 2010. godini ova se razlika može zanemariti u proračunu potencijala smanjenja emisije CO₂.

Tablica 17. Potencijal proizvodnje i korištenja goriva iz otpada [t]

GORIVO IZ OTPADA	2010.	2012.	2015.	2020.	2030.
Količina goriva iz otpada	71.864	283.506	409.033	486.840	556.455
Potencijal cementara	73.435	116.206	163.013	256.627	256.627
Neiskorišteni potencijal	-	167.301	246.020	230.213	299.828

6.2. Spaljivanje metana na baklji i korištenje metana za proizvodnju električne energije

6.2.1. Spaljivanje metana na baklji

Spaljivanje na baklji koristi se u slučajevima kada je koncentracija metana toliko niska da se ne može iskoristiti za proizvodnju energije. Efikasnost spaljivanja na bakljama, koje mogu biti 'otvorene' ili 'zatvorene', može dostići do 99 %, a ovisi o temperaturi, vremenu zadržavanja, sadržaju kisika i dr. Spaljivanjem metana najvećim dijelom nastaje ugljikov dioksid, a u manjim količinama ugljikov monoksid, dušikov oksid, formaldehid te još neke organske komponente u tragovima.

Direktivom je propisano skupljanje odlagališnog plina sa svih onih odlagališta koja primaju biorazgradivi otpad koji se treba obraditi i koristiti. Skupljeni plin koji se ne može koristiti za

proizvodnju energije potrebno je spaliti na baklji. Odlagališni plin, koji se smatra obnovljivim izvorom energije, mora se skupljati, obrađivati i izgarati sa ili bez energetske iskoristivosti.

6.2.1.1. Ulazni podaci

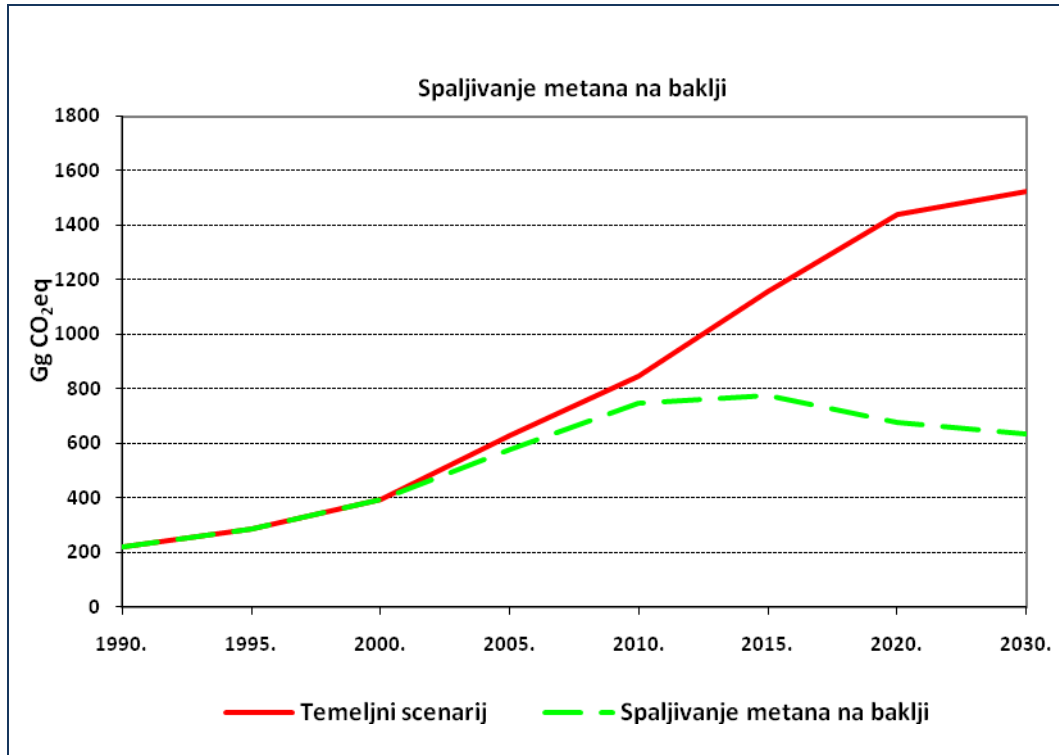
Mjera spaljivanja metana na baklji i korištenja metana za proizvodnju električne energije nastavlja se na mjere temeljnog scenarija i mjeru mehaničko-biološke obrade otpada. Prema karakteristikama odlagališta te količini i sastavu otpada odloženom na ta odlagališta, baklja se može instalirati na nekoliko velikih odlagališta [31]. Za proračun potencijala smanjenja emisija uzima se kako se osim iz otpada s odlagališta Jakuševac-Prudinec odlagališni plin može sakupljati i iz otpada s drugih odlagališta čija se količina procjenjuje na 25 % od količine otpada s odlagališta Jakuševac-Prudinec.

Tablica 18. Ulazni podaci (spaljivanje metana na baklji)

Godina	MSW _T (x)	MSW _F (x)	Odloženi MSW	MCF(x)	R(t)	OX	DOC(x)
1970	740.000	0,41	303.400	0,400	0	0	0,170
1971	758.000	0,42	317.602	0,400	0	0	0,170
1972	776.000	0,43	332.128	0,400	0	0	0,170
1973	794.000	0,44	346.978	0,400	0	0	0,170
1974	812.000	0,45	362.152	0,400	0	0	0,170
1975	830.000	0,45	377.650	0,400	0	0	0,170
1976	848.000	0,46	393.472	0,400	0	0	0,170
1977	866.000	0,47	409.618	0,400	0	0	0,170
1978	884.000	0,48	426.088	0,400	0	0	0,170
1979	902.000	0,49	442.882	0,400	0	0	0,170
1980	920.000	0,50	460.000	0,600	0	0	0,170
1981	928.000	0,51	472.352	0,600	0	0	0,170
1982	936.000	0,52	484.848	0,600	0	0	0,170
1983	944.000	0,53	497.488	0,600	0	0	0,170
1984	952.000	0,54	510.272	0,600	0	0	0,170
1985	960.000	0,54	523.200	0,600	0	0	0,170
1986	968.000	0,55	536.272	0,600	0	0	0,170
1987	976.000	0,56	549.488	0,600	0	0	0,170
1988	984.000	0,57	562.848	0,600	0	0	0,170
1989	992.000	0,58	576.352	0,600	0	0	0,170
1990	1.000.000	0,59	590.000	0,606	0	0	0,170
1991	980.000	0,61	598.780	0,606	0	0	0,170
1992	970.000	0,63	613.040	0,605	0	0	0,170
1993	985.000	0,65	643.205	0,606	0	0	0,170
1994	1.005.000	0,67	677.370	0,613	0	0	0,170
1995	1.060.000	0,70	736.700	0,623	0	0	0,170
1996	1.100.000	0,72	787.600	0,625	0	0	0,170
1997	1.150.000	0,74	847.550	0,632	0	0	0,170
1998	1.205.000	0,76	913.390	0,636	0	0	0,170
1999	1.253.000	0,78	976.087	0,654	0	0	0,170
2000	1.173.000	0,80	938.400	0,702	0	0	0,170
2001	1.258.750	0,80	1.007.000	0,727	0	0	0,170
2002	1.346.250	0,80	1.077.000	0,748	0	0	0,170
2003	1.433.750	0,80	1.147.000	0,767	0	0	0,170
2004	1.439.053	0,85	1.216.000	0,784	0	0	0,170
2005	1.449.381	0,89	1.286.078	0,799	2.480	0	0,172
2006	1.626.948	0,89	1.335.003	0,818	1.611	0	0,172
2007	1.683.132	0,89	1.497.987	0,835	1.986	0	0,172
2008	1.716.795	0,89	1.527.947	0,900	2.627	0	0,173
2009	1.751.131	0,90	1.576.017	0,900	3.271	0	0,173
2010	1.786.153	0,77	1.368.836	1,000	3.951	0	0,174
2011	1.821.876	0,68	1.238.876	1,000	4.558	0	0,174
2012	1.858.314	0,58	1.077.822	1,000	5.135	0	0,175
2013	1.895.480	0,48	909.830	1,000	5.664	0	0,176
2014	1.933.390	0,38	734.688	1,000	6.127	0	0,177
2015	1.972.057	0,28	549.778	1,000	6.507	0	0,178
2016	2.011.499	0,26	522.990	1,000	6.869	0	0,178
2017	2.051.729	0,24	492.415	1,000	7.210	0	0,179
2018	2.092.763	0,22	460.408	1,000	7.529	0	0,180
2019	2.134.618	0,20	426.924	1,000	7.822	0	0,181
2020	2.177.311	0,17	371.184	1,000	8.073	0	0,182
2030	2.395.042	0,08	197.591	1,000	10.038	0	0,189

6.2.1.2. Projekcije emisija**Tablica 19. Projekcije emisija (spaljivanje metana na baklji)**

Godina	CH ₄ emisija (FOD) [Gg]	CO ₂ eq emisija (FOD) [Gg]
1970	0,37	7,74
1971	0,74	15,47
1972	1,10	23,19
1973	1,47	30,92
1974	1,84	38,65
1975	2,21	46,40
1976	2,58	54,18
1977	2,95	61,99
1978	3,33	69,85
1979	3,70	77,74
1980	4,36	91,56
1981	5,01	105,18
1982	5,65	118,61
1983	6,28	131,87
1984	6,90	144,97
1985	7,52	157,93
1986	8,13	170,76
1987	8,74	183,47
1988	9,34	196,06
1989	9,93	208,57
1990	10,53	221,21
1991	11,12	233,57
1992	11,71	245,85
1993	12,32	258,72
1994	12,98	272,60
1995	13,74	288,58
1996	14,57	305,93
1997	15,49	325,21
1998	16,50	346,40
1999	17,63	370,24
2000	18,77	394,21
2001	20,08	421,68
2002	21,55	452,54
2003	23,17	486,62
2004	24,94	523,73
2005	27,49	577,35
2006	27,61	579,83
2007	29,66	622,79
2008	31,73	666,26
2009	33,80	709,71
2010	35,56	746,73
2011	36,88	774,47
2012	37,65	790,75
2013	37,90	795,95
2014	37,64	790,43
2015	36,87	774,34
2016	36,06	757,28
2017	35,20	739,24
2018	34,30	720,24
2019	33,35	700,26
2020	32,29	678,14
2030	30,11	632,39

Slika 12. Emisije CH₄ uz mjeru spaljivanja metana na baklji

6.2.2. Korištenje metana za proizvodnju električne energije

Ukoliko postoji dovoljna količina metana, moguća je i proizvodnja električne energije korištenjem metana kao goriva, čime se štedi ekvivalentna količina fosilnih goriva. Količine stvorenog metana prikazuje Tablica 18, a metan čini oko 50 % sastava odlagališnog plina. Ostatak čini ugljikov dioksid i drugi plinovi u tragovima. Potencijal smanjenja emisije CH₄ izračunat je u mjeri spaljivanja metana na baklji. Pod pretpostavkom kako se sav prikupljeni odlagališni plin umjesto spaljivanja na baklji energetske oporablja u plinskim motorima, moguće je izračunati potencijal smanjenja emisije CO₂ uslijed uštede fosilnih goriva. Emisije CO₂ koje nastaju pri uporabi odlagališnog plina smatraju se CO₂ neutralnim. Stupanj iskoristivosti sustava plinskog motora i generatora procjenjuje se na $\eta = 0,25$. Izračunatu proizvedenu energiju prikazuje Tablica 20.

Ulazni podaci:

- 50 % udio metana u odlagališnom plinu
- Stupanj iskoristivosti sustava plinskog motora i generatora $\eta = 0,25$
- Ogrjevna vrijednost metana $H_d = 55,61$ MJ/t

Tablica 20. Energetska vrijednost odlagališnog plina i proizvedena električna energija

Godina	Skupljeni CH ₄ [t]	Energetska vrijednost [GJ]	Proizvedena električna energija [MWh]
2005.	2.480	137.909	9.577
2006.	1.611	89.604	6.222
2007.	1.986	110.451	7.670
2008.	2.627	146.114	10.147
2009.	3.271	181.890	12.631
2010.	3.951	219.712	15.258
2011.	4.558	253.477	17.603
2012.	5.135	285.543	19.829
2013.	5.664	314.953	21.872
2014.	6.127	340.743	23.663
2015.	6.507	361.859	25.129
2016.	6.869	381.970	26.526
2017.	7.210	400.951	27.844
2018.	7.529	418.666	29.074
2019.	7.822	434.973	30.206
2020.	8.073	448.942	31.177
2030.	10.038	558.209	38.765

Kako bi se izračunao potencijal smanjenja emisije CO₂ potrebno je izračunati koliko bi se fosilnog goriva trebalo utrošiti za proizvodnju iste količine električne energije. Potencijal se prikazuje u odnosu na prirodni plin i ugljen. Pretpostavlja se kako se ovi energenti koriste u većim termoelektranama. Uz faktor efikasnosti termoelektrana $\eta = 0,4$ mogu se izračunati potrebne ekvivalentne količine pojedinog fosilnog goriva. Uz emisijske faktore za pojedino fosilno gorivo izračunavaju se emisije CO₂ što ujedno predstavlja i potencijal smanjenja emisija budući da se upravo za taj iznos smanjuju emisije CO₂ korištenjem odlagališnog plina za proizvodnju električne energije (Tablica 21).

Tablica 21. Potencijal smanjenja emisija CO₂ pri proizvodnji električne energije iz odlagališnog plina

Godina	Proizvedena električna energija [MWh]	GJ	Ekvivalent ugljena [t]	Potencijal (ugljen) [tCO ₂]	Ekvivalent prirodnog plina [m ³]	Potencijal (prirodni plin) [tCO ₂]
2005.	9.577	86.193	3.078	8.473	2.268.239	4.835
2006.	6.222	56.002	2.000	5.505	1.473.743	3.142
2007.	7.670	69.032	2.465	6.786	1.816.633	3.873
2008.	10.147	91.322	3.261	8.977	2.403.199	5.123
2009.	12.631	113.681	4.060	11.175	2.991.610	6.378
2010.	15.258	137.320	4.904	13.499	3.613.692	7.704
2011.	17.603	158.423	5.658	15.573	4.169.031	8.888
2012.	19.829	178.464	6.374	17.543	4.696.431	10.012
2013.	21.872	196.846	7.030	19.350	5.180.148	11.043
2014.	23.663	212.964	7.606	20.934	5.604.320	11.947
2015.	25.129	226.162	8.077	22.232	5.951.627	12.688
2016.	26.526	238.731	8.526	23.467	6.282.407	13.393
2017.	27.844	250.595	8.950	24.633	6.594.593	14.058
2018.	29.074	261.666	9.345	25.722	6.885.956	14.679
2019.	30.206	271.858	9.709	26.724	7.154.158	15.251
2020.	31.177	280.589	10.021	27.582	7.383.918	15.741
2030.	38.765	348.881	12.460	34.295	9.181.069	19.572

Prikazani potencijali temelji se na pretpostavci kako se sav prikupljeni odlagališni plin energetske oporablja što nije realno. Budući da se u prikupljeni odlagališni plin ubraja i onaj s odlagališta na kojima nije ekonomski opravdano uvoditi energetske oporabu odlagališnog plina, tehnički potencijal ove mjere manji je nego što to prikazuje Tablica 21.

6.3. Ukupni potencijal scenarija s mjerama

Ukupni potencijal smanjenja emisija stakleničkih plinova scenarija s mjerama prikazuje Tablica 22.

Tablica 22. Ukupni potencijal smanjenja emisija CH₄ i CO₂ scenarija s mjerama [tCO₂eq]

	2010.	2015.	2020.	2030.
Smanjenje odloženog biorazgradivog otpada	15.752	249.801	591.886	682.656
Korištenje bioplina za proizvodnju električne energije	1.600	45.096	53.674	61.349
Korištenje RDF-a u cementnoj industriji	41.449	92.011	144.850	144.850
Spaljivanje metana na baklji	82.970	136.649	169.534	210.796
Korištenje metana za proizvodnju električne energije	7.704	12.688	15.741	19.572
Ukupni potencijal	149.475	536.244	975.685	1.119.224

7. SCENARIJ S DODATNIM MJERAMA

Scenarij s dodatnim mjerama osim mjera koje su navedene u temeljnom scenariju (poglavlje 5.) i scenariju s mjerama (poglavlje 6.) obuhvaća i mjeru termičke obrade komunalnog otpada. Komunalni otpad se može termički obrađivati bez prethodne obrade ili u postrojenjima koja spaljuju gorivo iz otpada.

7.1. Termička obrada komunalnog otpada (energana na otpad)

Proizvodnjom električne energije i/ili topline termičkom obradom komunalnog otpada smanjuju se emisije stakleničkih plinova u odnosu na odlaganje neobrađenog otpada. Kao produkti termičke obrade otpada nastaju ugljikov dioksid i vodena para koji imaju znatno manji potencijal globalnog zagrijavanja od metana, koji bi inače nastao razgradnjom otpada na odlagalištima. Proizvedena energija iz otpada ujedno smanjuje i količinu fosilnog goriva potrebnog za proizvodnju ekvivalentne količine energije, a time i emisije CO₂ koji bi nastao kao produkt izgaranja.

7.1.1. Ulazni podaci

Termička obrada komunalnog otpada podrazumijeva izgaranje otpada u ENO uz proizvodnju električne i toplinske energije. Primjenjena tehnologija je izgaranje na rešetki koja je najrasprostranjenija tehnologija za termičku obradu nesortiranog komunalnog otpada. Ostatni pepeo odlaže se na odlagalište ili se koristi kao sirovina u cementnoj industriji. Mjera

termičke obrade komunalnog otpada promatra se kao dodatna mjera. Stoga se prilikom izračunavanja potencijala ne promatra njezin pojedinačni potencijal u usporedbi s temeljnim scenarijem, već se taj potencijal izražava u odnosu na potencijal scenarija s mjerama. Kako bi se izračunao potencijal smanjenja emisija uvode se sljedeće pretpostavke:

- 350.000 tona komunalnog otpada termički se obrađuje 2015. i 2020. godine
- 200.000 tona termički se obrađuje 2030. godine

Usljed provedbe mjera koje su obuhvaćene temeljnim scenarijem i scenarijem s mjerama, a koje se temelje na Planu i Direktivi, smanjuje se količina otpada raspoloživog za termičku obradu. Tablica 23 prikazuje ulazne podatke za izračun potencijala smanjenja emisija metana za mjeru termičke obrade otpada. Varijabla TO označava količinu termički obrađenog otpada izraženu u tonama.

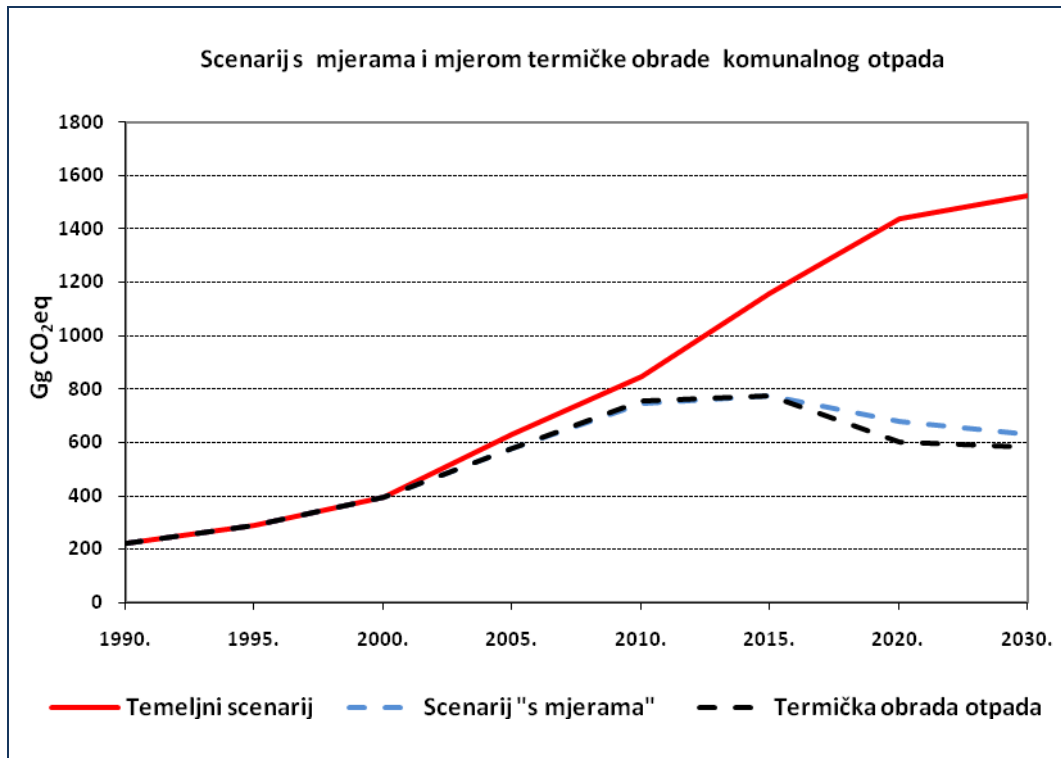
Tablica 23. Ulazni podaci (termička obrada komunalnog otpada)

Godina	MSW _T (x)	MSW _F (x)	Odloženi MSW	TO [t]	MCF(x)	DOC(x)
1970	740.000	0,41	303.400	0	0,400	0,170
1971	758.000	0,42	317.602	0	0,400	0,170
1972	776.000	0,43	332.128	0	0,400	0,170
1973	794.000	0,44	346.978	0	0,400	0,170
1974	812.000	0,45	362.152	0	0,400	0,170
1975	830.000	0,45	377.650	0	0,400	0,170
1976	848.000	0,46	393.472	0	0,400	0,170
1977	866.000	0,47	409.618	0	0,400	0,170
1978	884.000	0,48	426.088	0	0,400	0,170
1979	902.000	0,49	442.882	0	0,400	0,170
1980	920.000	0,50	460.000	0	0,600	0,170
1981	928.000	0,51	472.352	0	0,600	0,170
1982	936.000	0,52	484.848	0	0,600	0,170
1983	944.000	0,53	497.488	0	0,600	0,170
1984	952.000	0,54	510.272	0	0,600	0,170
1985	960.000	0,54	523.200	0	0,600	0,170
1986	968.000	0,55	536.272	0	0,600	0,170
1987	976.000	0,56	549.488	0	0,600	0,170
1988	984.000	0,57	562.848	0	0,600	0,170
1989	992.000	0,58	576.352	0	0,600	0,170
1990	1.000.000	0,59	590.000	0	0,606	0,170
1991	980.000	0,61	598.780	0	0,606	0,170
1992	970.000	0,63	613.040	0	0,605	0,170
1993	985.000	0,65	643.205	0	0,606	0,170
1994	1.005.000	0,67	677.370	0	0,613	0,170
1995	1.060.000	0,70	736.700	0	0,623	0,170
1996	1.100.000	0,72	787.600	0	0,625	0,170
1997	1.150.000	0,74	847.550	0	0,632	0,170
1998	1.205.000	0,76	913.390	0	0,636	0,170
1999	1.253.000	0,78	976.087	0	0,654	0,170
2000	1.173.000	0,80	938.400	0	0,702	0,170
2001	1.258.750	0,80	1.007.000	0	0,727	0,170
2002	1.346.250	0,80	1.077.000	0	0,748	0,170
2003	1.433.750	0,80	1.147.000	0	0,767	0,170
2004	1.439.053	0,85	1.216.000	0	0,784	0,170
2005	1.449.381	0,89	1.286.078	0	0,799	0,172
2006	1.626.948	0,89	1.447.984	0	0,818	0,172
2007	1.683.132	0,89	1.609.890	0	0,835	0,172
2008	1.716.795	0,89	1.527.947	0	0,900	0,173
2009	1.751.131	0,90	1.576.017	0	0,900	0,173
2010	1.786.153	0,77	1.368.836	0	1,000	0,174
2011	1.821.876	0,68	1.238.876	0	1,000	0,174
2012	1.858.314	0,58	1.077.822	0	1,000	0,175
2013	1.895.480	0,48	909.830	0	1,000	0,176
2014	1.933.390	0,38	734.688	0	1,000	0,177
2015	1.972.057	0,10	199.778	350.000	1,000	0,178
2016	2.011.499	0,09	172.990	350.000	1,000	0,178
2017	2.051.729	0,07	142.415	350.000	1,000	0,179
2018	2.092.763	0,05	110.408	350.000	1,000	0,180
2019	2.134.618	0,04	76.924	350.000	1,000	0,181
2020	2.177.311	0,01	21.184	350.000	1,000	0,182
2030	2.395.042	0,00	0	197.000	1,000	0,189

7.1.2. Projekcije emisija

Tablica 24. Projekcije emisija (termička obrada komunalnog otpada)

Godina	CH ₄ emisija (FOD) [Gg]	CO ₂ eq emisija (FOD) [Gg]
1970	0,37	7,74
1971	0,74	15,47
1972	1,10	23,19
1973	1,47	30,92
1974	1,84	38,65
1975	2,21	46,40
1976	2,58	54,18
1977	2,95	61,99
1978	3,33	69,85
1979	3,70	77,74
1980	4,36	91,56
1981	5,01	105,18
1982	5,65	118,61
1983	6,28	131,87
1984	6,90	144,97
1985	7,52	157,93
1986	8,13	170,76
1987	8,74	183,47
1988	9,34	196,06
1989	9,93	208,57
1990	10,53	221,21
1991	11,12	233,57
1992	11,71	245,85
1993	12,32	258,72
1994	12,98	272,60
1995	13,74	288,58
1996	14,57	305,93
1997	15,49	325,21
1998	16,50	346,40
1999	17,63	370,24
2000	18,77	394,21
2001	20,08	421,68
2002	21,55	452,54
2003	23,17	486,62
2004	24,94	523,73
2005	27,49	577,35
2006	27,61	579,83
2007	29,66	622,79
2008	31,87	669,29
2009	34,02	714,41
2010	35,87	753,29
2011	37,30	783,28
2012	38,20	802,21
2013	38,60	810,55
2014	38,49	808,39
2015	36,85	773,83
2016	35,22	739,61
2017	33,60	705,51
2018	31,97	671,43
2019	30,34	637,24
2020	28,64	601,49
2030	27,74	582,63



Slika 13. Emisije CH₄ uz mjeru termičke obrade komunalnog otpada

7.1.3. Potencijal smanjenja emisija CO₂ uz mjeru termičke obrade komunalnog otpada

Uvjet za termičku obradu komunalnog otpada je njegova energetska oporaba tj. proizvodnja električne i/ili toplinske energije. Ovime se štedi ekvivalentna količina fosilnih goriva čime se smanjuju emisije za udio biorazgradivog otpada u komunalnom otpadu. Ulazni podaci za izračun potencijala smanjenja emisija CO₂:

- 67 % biorazgradivog otpada u komunalnom otpadu
- Donja ogrjevna vrijednost komunalnog otpada $H_d = 7,5 \text{ MJ/kg}$
- Omjer proizvodnje električne i toplinske energije 0,5
- Stupanj iskoristivosti postrojenja $\eta = 0,65$

Energija koja se godišnje može proizvesti iz postrojenja (do 2020. godine):

$$E_{UK} = T_{KO} \cdot H_d \cdot \eta \cdot B_F = 350.000 \cdot 7,5 \cdot 0,65 \cdot 0,67 = 1.143.188 \text{ GJ/god}$$

gdje je:

E_{UK} - ukupna proizvedena energija [GJ/god]

T_{KO} - godišnja količina komunalnog otpada [t]

H_d - donja ogrjevna vrijednost komunalnog otpada [GJ/t]

η - stupanj iskoristivosti postrojenja (0,65)

B_F - udio biorazgradivog otpada u komunalnom otpadu (0,67)

Ova količina energije zamjenjuje ekvivalentnu količinu fosilnog goriva. Ušteda fosilnih goriva i smanjenje emisija CO₂ promatra se u vidu uštede zasebno ugljena i prirodnog plina. Za ekvivalentnu količinu energije iz ugljena ili prirodnog plina emitira se CO₂ ovisno o emisijskom faktoru za pojedino gorivo. Potencijal smanjenja emisija CO₂ uslijed izgaranja biorazgradivog dijela otpada prikazan je tablično (Tablica 25).

Tablica 25. Potencijal smanjenja emisija CO₂ uz mjeru termičke obrade komunalnog otpada

	2015.	2020.	2030.
Proizvedena enegrija iz komunalnog otpada [GJ]	1.143.188	1.143.188	643.451
Ekvivalent ugljena [t]	68.047	68.047	38.301
Potencijal (ugljen) [tCO ₂]	187.292	187.292	105.419
Ekvivalent prirodnog plina [m ³]	50.139.825	50.139.825	28.221.535
Potencijal (prirodni plin) [tCO ₂]	106.888	106.888	60.163

7.2. Korištenje goriva iz otpada u energani na otpad

Predviđeni kapacitet cementara nije dovoljan kako bi se iskoristila sva količina proizvedenog goriva iz otpada. Proizvodnja goriva iz otpada funkcija je količine otpada koja se obrađuje mehaničko-biološkom obradom, a koja je određena Direktivom. Količina koja se ne može iskoristiti u cementarama može se koristiti kao gorivo u energanama na otpad. Energane koje kao gorivo koriste gorivo iz otpada najčešće primjenjuju tehnologiju izgaranja na fluidiziranom sloju. Tablica 17 (poglavlje 6.) prikazuje količinu goriva iz otpada koja se može koristiti u energani na gorivo iz otpada.

Ulazni podaci

- Stupanj iskoristivosti energane na otpad $\eta = 0,65$
- Ogrjevna vrijednost goriva iz otpada $H_d = 15 \text{ MJ/kg}$
- 40 % biorazgradivog udjela u gorivu iz otpada
- Ogrjevna vrijednost ugljena $H_d = 28 \text{ MJ/kg}$
- Ogrjevna vrijednost prirodnog plina $H_d = 38 \text{ MJ/m}^3$
- Stupanj iskoristivosti termoelektrana na ugljen i prirodni plin $\eta = 0,6$ (kogeneracija)

Tablica 26. Potencijal mjere termičke obrade goriva iz otpada u energanama na otpad

	2012.	2015.	2020.	2030.
Količina RDF-a za ENO [t]	167.301	246.020	230.213	299.828
Proizvedena energija [GJ]	652.473	959.478	897.832	1.169.330
Ekvivalent ugljena [t]	38.838	57.112	53.442	69.603
Potencijal (ugljen) [tCO ₂]	106.897	157.194	147.095	191.575
Ekvivalent prirodnog plina [m ³]	28.617.222	42.082.373	39.378.608	51.286.404
Potencijal (prirodni plin) [tCO ₂]	61.006	89.711	83.947	109.332

8. ANALIZA GRANIČNIH TROŠKOVA

Granični troškovi (eng. *marginal cost, MC*) predstavljaju razliku troškova referentnog scenarija i troškova scenarija s mjerama za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Troškovi uključuju sve investicijske i pogonske troškove te prihode koji se ostvaruju određenim rješenjem. Zbog međusobne usporedivosti svi troškovi se iskazuju kao ekvivalentni godišnji troškovi. Ekvivalentnim godišnjim troškovima (eng. *equivalent annual cost, EAC*) sve investicije diskontiraju se na godišnje troškove u vremenskom razdoblju vijeka trajanja opreme i pribrajaju godišnjim troškovima pogona i održavanja. U proračunu je primijenjena diskontna stopa od 8 %.

Izračunom graničnih troškova utvrđuje se koliki su troškovi primjene pojedinih mjera u odnosu na potencijal smanjenja emisija. Konačni rezultat proračuna je trošak iskazan u monetarnoj jedinici po jednoj toni smanjene emisije CO₂ [€/t CO₂eq].

Proračun graničnog troška prikazan je za 2010. i 2015. godinu, ovisno o početku primjene pojedine mjere. Prema izračunatom graničnom trošku mogu se projicirati ukupni godišnji troškovi za razdoblje 2010.-2030.

Osnovni izrazi za proračun troškova su sljedeći [37]:

$$EAC = \frac{C_t \cdot r}{1 - (1+r)^{-t}} + O_t - R_t$$

$$\Delta EAC = EAC_m - EAC_n$$

$$MC = \Delta EAC / (E_n - E_m)$$

EAC - ekvivalentni godišnji troškovi (€/god)

ΔEAC - razlika ekvivalentnih godišnjih troškova dva scenarija (€/god)

EAC_m - ekvivalentni godišnji troškovi scenarija smanjenja emisije (€/god)

EAC_n - ekvivalentni godišnji troškovi referentnog scenarija (€/god)

E_m - emisija rješenja kojim se smanjuje emisija (t/god)

E_n - emisija referentnog rješenja (t/god)

C_t - troškovi kapitala - investicije (€/god)

O_t - troškovi održavanja pogona (€/god)

R_t - prihod od prodaje proizvoda i energije (€/god)

r - diskontna stopa (%)

t - vrijeme (god)

Pozitivni granični trošak predstavlja trošak po jedinici smanjenja emisije, a negativna vrijednost označava ostvarenje prihoda. Sve mjere s negativnim graničnim troškom su ekonomski isplative. Na razini EU prihvaćeno je da granični trošak od 20 €/tCO₂eq predstavlja prag ispod kojeg primjena mjera zadovoljava kriterij troškovne učinkovitosti (eng. *cost-effectiveness*).

Polazni podaci koji se odnose na investicije za pojedine mjere predstavljaju procjene. Izračunati troškovi služe za procjenu koje su mjere u području ekonomski isplativih mjera, koje su u području umjerenog i prihvatljivog troška, a koje su u području relativno visokog troška.

8.1. Mehaničko-biološka obrada komunalnog otpada

Postupak mehaničko-biološke obrade (MBO) nije jednoznačno određen te stoga i troškovi obrade značajno variraju. Za godišnje troškove MBO postrojenja najvažniju ulogu imaju prihodi od prodaje proizvoda i energije. MBO postrojenje može proizvoditi kompost, bioplin i gorivo iz otpada koji se kasnije mogu prodati na tržištu.

U proračunu graničnih troškova MBO postrojenja uračunati su potencijali smanjenja emisija stakleničkih plinova koji se mogu ostvariti primjenom sljedećih mjera

- smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada
- proizvodnja i uporaba bioplina iz bioreaktora
- proizvodnja i korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji

U proračun troškova nisu uračunati prihodi od ulazne naknade za otpad i prodaje proizvoda i energije.

Da bi se izračunao granični trošak mehaničko-biološke obrade komunalnog otpada, uspoređuju se troškovi izgradnje, pogona i održavanja odlagališta u odnosu na troškove MBO postrojenja za ekvivalentnu količinu komunalnog otpada. Sustavno gospodarenje otpadom i izgradnja dovoljnog broja postrojenja za MBO očekuje se do 2015. godine te se stoga granični trošak izračunava za 2015. godinu. Tada je potrebno obraditi 1.168.665 t komunalnog otpada mehaničko-biološkom obradom u svrhu ispunjavanja ciljeva Direktive.

Ulazni podaci:

- Kapacitet MBO postrojenja - 125.000 t/god
- Ukupni godišnji troškovi MBO postrojenja – 65 €/t [38]
- Kapacitet odlagališta za komunalni otpad – 350.000 t/god
- Godišnji troškovi pogona i održavanja odlagališta – 15 €/t [38]

Tablica 27. Granični trošak obrade otpada anaerobnom digestijom

Referentni scenarij (odlagalište)			MBO		
Oznaka	Jedinica	Iznos	Oznaka	Jedinica	Iznos
C_t	€/god	98.628.000	C_t	€/god	135.000.000
r	%	8,0	r	%	8,0
t	god	20	t	god	20
O_t	€/god	15.750.000	O_t	€/god	58.500.000
R_t	€/god	0	R_t	€/god	0
EAC_n	€/god	25.795.480	EAC_m	€/god	72.250.048
			E_n-E_m	tCO ₂ /god	386.907
			MC	€/tCO₂eq	120,07

Kako bi se obradila potrebna količina otpada, potrebno je izgraditi 9 postrojenja za mehaničko-biološku obradu ili 3 odlagališta navedenog kapaciteta. Prikazane cijene (Tablica 27) su ukupne cijene za potrebnu infrastrukturu uz napomenu kako cijene mogu značajno varirati u ovisnosti o uvjetima i tehnologiji obrade. Prema izračunatim graničnim troškovima, mjera mehaničko-biološke obrade komunalnog otpada ne zadovoljava kriterij ekonomičnosti, budući da ulazi u kategoriju mjera s visokim graničnim troškovima.

8.2. Spaljivanje metana na baklji

Troškovi spaljivanja metana na baklji odnose se na troškove početne investicije i godišnje troškove održavanja. Sustav baklje predstavlja relativno jednostavan tehnički sustav čije održavanje nije zahtjevno i skupo. U troškove ove mjere nije uključena izgradnja sustava za otplinjavanje i zdenaca za prikupljanje odlagališnog plina budući da je on sastavni dio saniranog odlagališta.

Ulazni podaci:

- Troškovi nabave i instalacije jedne baklje zatvorenog tipa kapaciteta 250 m³/h iznose 80.000 € [39]
- Troškovi nadzora i održavanja iznose 5 % početne investicije
- Životni vijek baklje $t = 20$ godina

U 2010. godini pretpostavlja se instalacija četiri baklje kapaciteta 250 m³/h koje bi mogle obraditi sav stvoreni metan. Početna investicija tada iznosi 320.000 €.

Tablica 28. Granični trošak spaljivanja metana na baklji

Oznaka	Jedinica	Iznos
C_t	€/god	320.000
r	%	8,0
t	god	20
O_t	€/god	16.000
R_t	€/god	0
EAC_m	€/god	48.593
E_m	tCO ₂ /god	82.970
MC	€/tCO₂eq	0,59

Izračunati granični trošak spaljivanja metana na baklji (Tablica 28) iznosi 0,59 €/tCO₂ što čini ovu mjeru opravdanu s ekološkog i ekonomskog stajališta, budući da prema troškovima spada u kategoriju mjera s niskim troškovima.

8.3. Proizvodnja električne energije iz odlagališnog plina

Uz smanjenje emisije metana spaljivanjem odlagališnog plina predviđena je i moguća proizvodnja električne energije iz odlagališnog plina koja je ekonomična za velika odlagališta komunalnog otpada s relativno velikom proizvodnjom plina.

U 2010. godini potencijal za proizvodnju električne energije iz odlagališnog plina iznosi 15.258 MWh. Ukoliko se pretpostavi kako bi plinski motori radili 95 % vremena te uz prosječni godišnji stupanj opterećenja od 80 %, potrebno je ukupno instalirati oko 2,5 MW snage u plinskim motorima.

Ulazni podaci:

- Troškovi nabave i instalacije jednog postrojenja za proizvodnju električne energije iz odlagališnog plina snage 850 kW iznosi 600.000 € [40]
- Troškovi pogona i održavanja iznose 10 % početne investicije
- Životni vijek plinskog motora $t = 10$ godina
- Prodajna cijena električne energije iznosi 5,37 c€/kWh

Kako bi se ostvario navedeni potencijal za proizvodnju električne energije iz odlagališnog plina, u 2010. godini potrebna su tri postrojenja za energetske oporabu odlagališnog plina.

Tablica 29. Granični trošak korištenja metana za proizvodnju električne energije

Oznaka	Jedinica	Iznos
C_t	€/god	1.800.000
r	%	8,0
t	god	10
O_t	€/god	180.000
R_t	€/god	819.114
EAC_m	€/god	-370.861
E_m	tCO ₂ /god	90.674
MC	€/tCO₂eq	-4,09

Granični trošak mjere korištenja metana za proizvodnju električne energije (Tablica 29) temelji se na pretpostavci kako se sav prikupljeni odlagališni plin energetske oporablja u plinskim motorima. Tehnički potencijal je manji, a granični trošak značajno ovisi o udjelu energetske oporabljenog odlagališnog plina. Ovisnost graničnog troška o udjelu energetske oporabljenog odlagališnog plina obrađena je u poglavlju 9.

8.4. Korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji

Trošak uvođenja mjere korištenja goriva iz otpada u cementnoj industriji odnosi se na nabavu i instalaciju sustava za prihvatanje i doziranje goriva iz otpada. Pretpostavlja se da je moguće 30 % goriva zamijeniti gorivom iz otpada bez dodatne tehničke prilagodbe. Također, pretpostavlja se kako cementare ne plaćaju gorivo iz otpada, već plaćaju samo transport. Referentni scenarij pretpostavlja upotrebu fosilnih goriva za proizvodnju klinkera. Trošak fosilnih goriva uračunat je u troškove održavanja pogona kako bi se mogao usporediti s troškovima goriva nakon uvođenja goriva iz otpada. Poznati su ukupni godišnji troškovi cementara i godišnja potrebna energija za proizvodnju klinkera [36]. Na temelju ovih podataka moguće je izračunati specifični trošak po jedinici energije:

$$C_C = C_{FG} / E_C = 25.885.673 / 11.015.180 = 2,35 \text{ €/GJ}$$

gdje je:

C_C - specifični trošak po jedinici energije [€/GJ]

C_{FG} - trošak goriva za proizvodnju klinkera [€/god]

E_C - ukupna potrebna energija za proizvodnju klinkera [GJ/god]

Specifični trošak po jedinici energije služi za izračun uštede nakon uvođenja goriva iz otpada. U 2010. godini predviđeno je 10 % udjela goriva iz otpada u ukupnom gorivu u cementarama. Ušteta uslijed smanjene količine fosilnih goriva (U_C) nakon uvođenja goriva iz otpada iznosi:

$$U_C = E_C \cdot 0,1 \cdot C_C = 2.478.415 \text{ €/god}$$

Ulazni podaci:

- Investicija u sustav za prihvata i doziranje goriva iz otpada iznosi 2 €/t klinkera [41]
- 10 % udio goriva iz otpada (2010. godina)
- 1.187.000 €/god - trošak transporta goriva iz otpada u cementare [41]
- Životni vijek sustava za doziranje $t = 25$ godina

Tablica 30. Granični trošak korištenja goriva iz otpada u cementnoj industriji

Referentni scenarij (fosilna goriva)			Korištenje goriva iz otpada		
Oznaka	Jedinica	Iznos	Oznaka	Jedinica	Iznos
C_t	€/god	0	C_t	€/god	6.300.000
r	%	8,0	r	%	8,0
t	god	25	t	god	25
O_t	€/god	25.885.673	O_t	€/god	25.114.086
R_t	€/god	0	R_t	€/god	0
EAC_n	€/god	25.885.673	EAC_m	€/god	25.704.262
			$E_n - E_m$	tCO ₂ /god	41.449
			MC	€/tCO₂eq	-4,38

Iz prikaza graničnog troška mjere korištenja goriva iz otpada u cementnoj industriji (Tablica 30) vidljivo je kako ova mjera osim smanjenja emisija donosi i značajnu uštedu. Ipak, granični trošak uvelike ovisi o cijeni goriva iz otpada te troškovima transporta. Ovisnost graničnog troška o cijeni goriva iz otpada obrađena je u poglavlju 9.

8.5. Termička obrada komunalnog otpada

Za proračun graničnog troška ove mjere pretpostavlja se kako postrojenje za termičku obradu otpada (PTOO) proizvodi električnu energiju i toplinu (kogeneracija). Investicijski troškovi ovise o kapacitetu energane na otpad. Postrojenje je izvedeno kao sustav s dvije rešetke za spaljivanje komunalnog otpada. Ukupni kapacitet postrojenja iznosi 350.000 t/god. Granični trošak mjere termičke obrade komunalnog otpada promatran je u odnosu na troškove odlaganja otpada na odlagalište komunalnog otpada. Godišnji troškovi postrojenja za termičku obradu otpada (PTOO) su poznati [42]. U godišnje troškove PTOO uračunati su i prihodi od prodaje električne i toplinske energije. Troškovi odlagališta odnose se na izgradnju, pogon i održavanje.

Ulazni podaci:

- Kapacitet postrojenja za termičku obradu komunalnog otpada - 350.000 t/god
- Ukupni godišnji troškovi postrojenja za termičku obradu – 100 €/t
- Kapacitet odlagališta za komunalni otpad – 350.000 t/god
- Godišnji troškovi pogona i održavanja odlagališta – 15 €/t [38]
- Životni vijek postrojenja $t = 20$ godina

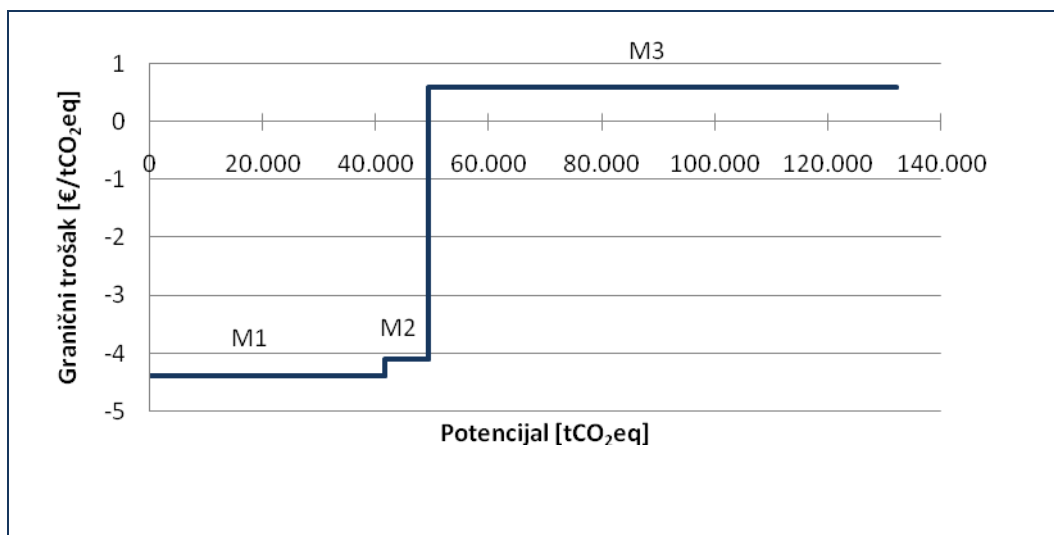
Tablica 31. Granični trošak termičke obrade komunalnog otpada

Referentni scenarij (odlagalište)			Termička obrada komunalnog otpada		
Oznaka	Jedinica	Iznos	Oznaka	Jedinica	Iznos
C_t	€/god	32.876.712	C_t	€/god	150.000.000
r	%	8,0	r	%	8,0
t	god	20	t	god	20
O_t	€/god	5.250.000	O_t	€/god	21.548.183
R_t	€/god	0	R_t	€/god	0
EAC_n	€/god	8.598.566	EAC_m	€/god	36.826.014
			$E_n - E_m$	tCO ₂ /god	210.000
			MC	€/tCO₂eq	134,42

Prema izračunatim graničnim troškovima mjere termičke obrade komunalnog otpada (Tablica 31) vidljivo je kako ova mjera ne zadovoljava kriterij ekonomičnosti, budući da ulazi u kategoriju mjera s visokim graničnim troškovima.

8.6. Krivulja graničnih troškova

U svrhu određivanja prioriteta mjera sa stajališta njihove ekonomičnosti, na temelju definiranih troškova izrađena je krivulja graničnih troškova. Na apscisi je iskaz potencijala pojedine mjere, a na ordinati cijena smanjenja emisije.

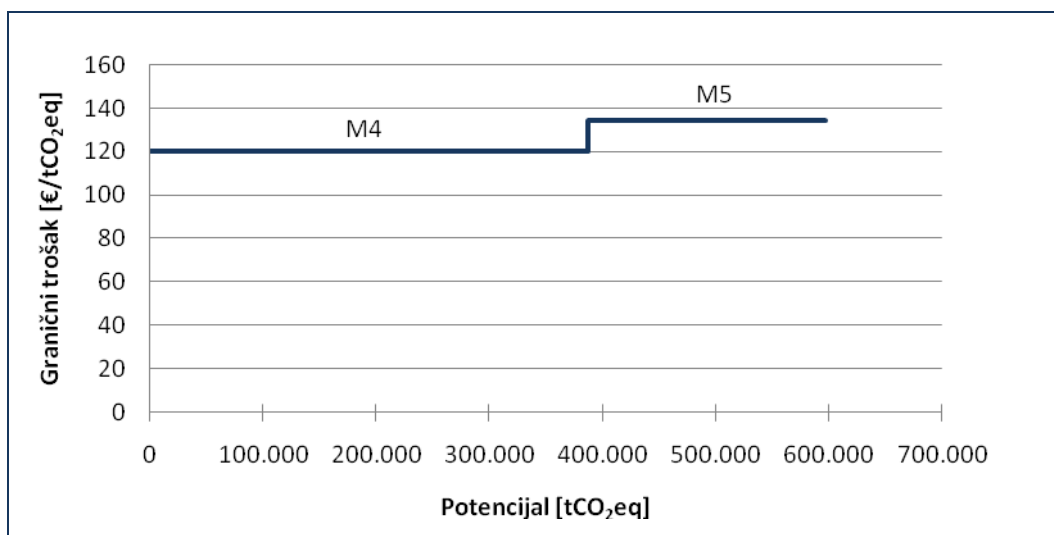


Slika 14. Krivulja graničnih troškova mjera M1, M2 i M3 (2010. godina)

M1 – korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji

M2 – korištenje metana iz bioreaktora za proizvodnju električne energije

M3 – spaljivanje metana na baklji



Slika 15. Krivulja graničnih troškova mjera M4 i M5 (2015. godina)

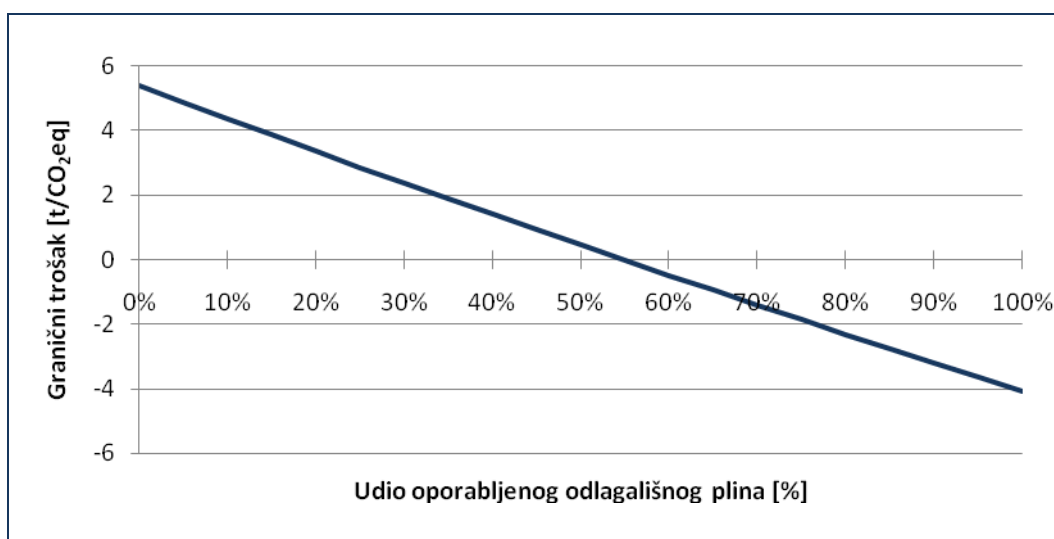
M4 – mehaničko-biološka obrada komunalnog otpada

M5 – termička obrada komunalnog otpada

9. ANALIZA OSJETLJIVOSTI

9.1. Utjecaj količine obrađenog plina na granični trošak uporabe odlagališnog plina

Udio metana u odlagališnom plinu bitan je čimbenik pri proizvodnji električne energije korištenjem odlagališnog plina kao goriva u plinskim motorima. Pri nedovoljnom udjelu metana (<30 %) odlagališni plin spaljuje se na baklji bez energetske uporabe. Ovime se smanjuje udio energetski oporabljenog odlagališnog plina. Izračunati granični trošak (poglavlje 8.) odnosi se na maksimalnu količinu oporabljenog odlagališnog plina, dok je trošak uporabe tehničkog potencijala viši i ovisi o udjelu oporabljenog odlagališnog plina. Ovisnost graničnog troška o udjelu oporabljenog odlagališnog plina prikazuje Slika 16.

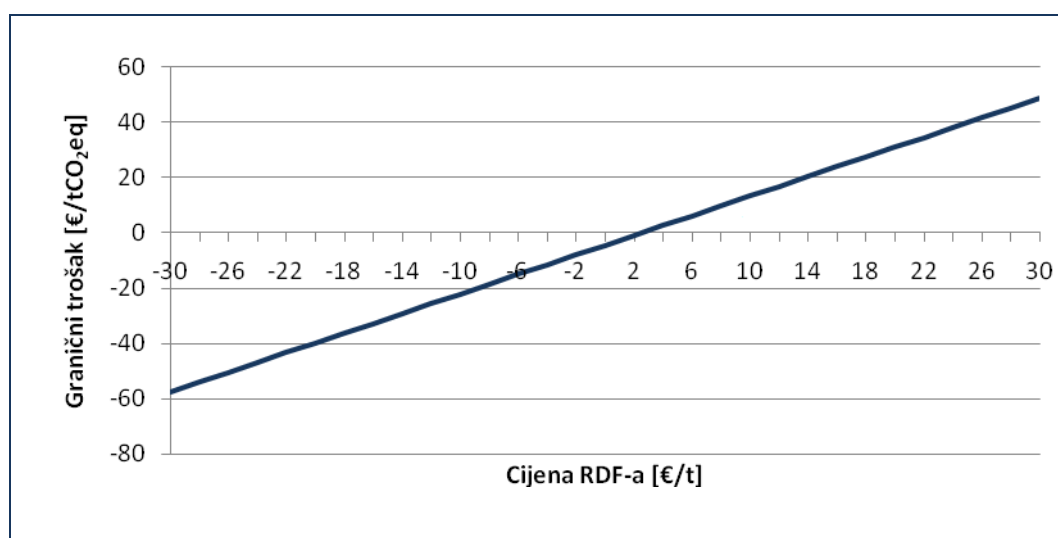


Slika 16. Ovisnost graničnog troška uporabe odlagališnog plina o udjelu oporabljenog odlagališnog plina

Ukoliko se udio oporabljenog odlagališnog plina smanji na 80 %, granični trošak iznosi -2,32 €/tCO₂eq, a ukoliko se smanji na 50 %, granični trošak iznosi 0,45 €/tCO₂eq.

9.2. Utjecaj cijene goriva iz otpada na granični trošak korištenja goriva iz otpada u cementnoj industriji

Izračunati granični trošak za korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji (poglavlje 8.) pretpostavlja da cementare gorivo iz otpada dobivaju bez plaćanja naknade, osim troškova transporta. Ukoliko se u troškove kao varijabla uvede i cijena goriva iz otpada, granični trošak bitno se mijenja. Moguće je pretpostaviti dva različita scenarija. Prvi scenarij pretpostavlja da cementare plaćaju naknadu za gorivo iz otpada čime se granični trošak povećava. Drugi scenarij pretpostavlja da cementare primaju naknadu za korištenje goriva iz otpada čime se granični trošak smanjuje. Ovisnost graničnog troška o cijeni goriva iz otpada prikazuje Slika 17.

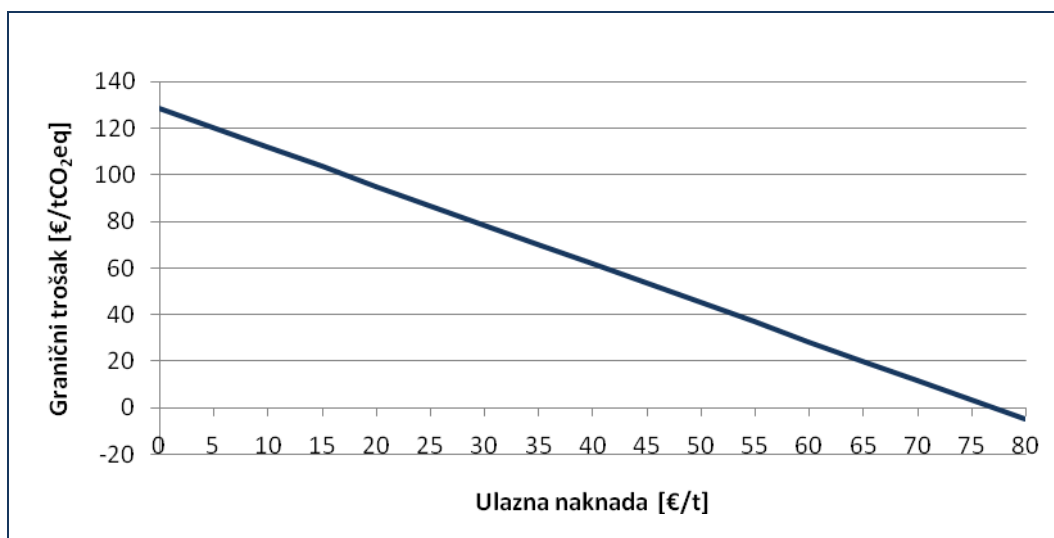


Slika 17. Ovisnost graničnog troška korištenja RDF-a u cementnoj industriji o cijeni RDF-a

Vidljivo je da uz cijenu goriva iz otpada od 2 €/t nema troška za cementare, dok pri cijeni od 14 €/t granični trošak premašuje 20 €/tCO₂.

9.3. Utjecaj ulazne naknade na granični trošak termičke obrade komunalnog otpada

Granični trošak termičke obrade komunalnog otpada (poglavlje 8.) ne uključuje ulaznu naknadu koju bi postrojenje primalo. Ulazna naknada predstavlja prihod koji postrojenje prima za termičku obradu jedne tone komunalnog otpada. Ovisnost graničnog troška o iznosu ulazne naknade prikazuje Slika 18.



Slika 18. Ovisnost graničnog troška termičke obrade komunalnog otpada o visini ulazne naknade

Vidljivo je kako pri ulaznoj naknadi od 65 €/t granični trošak iznosi prihvatljivih 20 €/tCO₂eq dok se pri 77 €/t trošak anulira. Za ulazne naknade veće od 77 €/t postrojenje ostvaruje prihode za svaku uštedenu tonu CO₂ koja se ne emitira uslijed primjene termičke obrade komunalnog otpada. Ovdje se radi o prihodu od ulazne naknade, a ne o prihodu uslijed smanjenja emisije CO₂. Dodatni prihodi mogu se ostvariti ukoliko postrojenje djeluje u sustavu trgovanja emisijama što bi dodatno umanjilo granični trošak.

10. RASPRAVA

Odlaganje krutog komunalnog otpada je za sada jedina metoda gospodarenja tom vrstom otpada u Hrvatskoj. Odlagališta krutog komunalnog otpada u Hrvatskoj razvrstana su u nekoliko kategorija, ovisno o primijenjenom sustavu gospodarenja otpadom, statusu legalnosti (opremljenosti potrebnim dozvolama), volumenu (kapacitetu i količini odloženog otpada) i značaju. Na 60 velikih odlagališta (oko 20 % od ukupno registriranih odlagališta) odloženo je oko 85 % krutog komunalnog otpada. Zbog toga, velika odlagališta odražavaju realno stanje sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom u zemlji. U sljedećem se razdoblju očekuje smanjivanje broja službenih odlagališta krutog komunalnog otpada uz postupno formiranje regionalnih i županijskih centara gospodarenja otpadom i povećanje udjela saniranih i zatvorenih odlagališta.

Održivo gospodarenje komunalnim otpadom podrazumijeva provedbu niza mjera koje će omogućiti ublažavanje ljudskog utjecaja na okoliš i životni prostor. U hijerarhijskom konceptu gospodarenja komunalnim otpadom sadržana je i većina mjera koje doprinose smanjenju emisija stakleničkih plinova. Osnovna načela hijerarhijskog koncepta; prevencija nastajanja otpada, ponovna uporaba, materijalna i energetska uporaba te odlaganje ostatnog otpada, poredana su po važnosti. Na temelju ciljeva i mjera definiranih Strategijom i Planom utvrđena je dinamika implementacije mjera, sa ciljem iskorištavanja materijalnih i energetskih potencijala komunalnog otpada i odlagališnog plina, uz korištenje najboljih raspoloživih tehnika u odnosu na troškove i ekološku prihvatljivost.

Očuvanje primarnih izvora energije primjenom komunalnog otpada kao obnovljivog izvora energije, ekološke koristi koje se očituju smanjenjem emisija stakleničkih plinova i ostalih onečišćujućih tvari te pozitivni socijalno-gospodarski učinci naglašavaju važnost i doprinos održivog gospodarenja komunalnim otpadom. Održivom i učinkovitom energetsom strategijom potiče se korištenje obnovljivih izvora energije i energetska učinkovitost te stvara poticajno okruženje za provedbu mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova, što je od posebne važnosti iz perspektive hrvatskih obveza prema Protokolu iz Kyota.

Mjerenja metana i ugljikovog dioksida najučinkovitije i najtočnije se mogu provesti upotrebom infracrvenih senzora. Međutim, u Hrvatskoj za sada ne postoji sustavno mjerenje emisije metana na odlagalištima komunalnog otpada. Stoga se za procjenu emisije metana s odlagališta otpada koriste kinetički modeli kojima se opisuje brzina razgradnje organskog otpada, odnosno brzina stvaranja metana. Osnovni parametri modela za procjenu emisije metana su količina i sastav odloženog krutog komunalnog otpada, uvjeti u odlagalištu i postupci koji se primjenjuju pri odlaganju otpada, makrokinetičke značajke (temperatura, vlaga, koncentracija kisika, atmosferski tlak) te meteorološki uvjeti, koji imaju značajan utjecaj na brzinu razgradnje organskog otpada, odnosno emisiju metana.

Razgradnjom organskog otpada u odlagalištu metan se emitira kroz dulje vremensko razdoblje. Izbor kinetičkog modela ovisi o raspoloživosti i kvaliteti ulaznih parametara - količini i sastavu odloženog otpada te kategoriji i karakteristikama odlagališta. Stvaranje metana u procesu anaerobne digestije na odlagalištima traje 20-30 godina. Ova činjenica dodatno otežava proračun emisija jer je potrebno poznavati ulazne podatke za razdoblje od prije 30 i više godina, što često nije moguće. Zbog toga se potrebni ulazni podaci procjenjuju na temelju relevantnih dostupnih podataka, što povećava nesigurnost procjene. Na temelju raspoloživih podataka procijenjene su količine i sastav odloženog otpada te glavne značajke odlagališta za cijelo razdoblje proračuna, a za procjenu emisije metana korišten je *IPCC FOD* model [31]. Kao stranka UNFCCC-a Hrvatska se obvezala izrađivati godišnje inventare stakleničkih plinova korištenjem IPCC metodologije.

Pitanje smanjenja emisija stakleničkih plinova vezano je uz sve gospodarske djelatnosti u Hrvatskoj, a implementacija najboljih raspoloživih tehnika u gospodarenju otpadom

omogućena je međusektorskim utjecajem i učinkom pojedinih mjera. U svrhu analize mogućnosti smanjenja emisija stakleničkih plinova u gospodarenju komunalnim otpadom izrađena su tri scenarija: temeljni scenarij, scenarij s mjerama i scenarij s dodatnim mjerama. Temeljni scenarij pretpostavlja kontinuirani porast stvorenog komunalnog otpada. Zbog djelovanja mjera izbjegavanja i smanjivanja količine otpada na izvoru, povećanja količine odvojeno skupljenog i recikliranog otpada te većeg obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada, udio otpada koji se odlaže na odlagališta postupno će se smanjivati. Temeljni scenarij pretpostavlja primjenu osnovnih mjera za smanjenje emisija stakleničkih plinova:

- Izbjegavanje nastajanja i smanjivanje količine komunalnog otpada
- Povećanje količine odvojeno skupljenog i recikliranog komunalnog otpada
- Povećanje obuhvata stanovništva organiziranim skupljanjem komunalnog otpada

Scenarij s mjerama pretpostavlja uključivanje dodatnih mjera i kvantificiranih ciljeva definiranih Strategijom i Planom. Mjere su usmjerene na smanjenje količine odloženog biorazgradivog komunalnog otpada uz pretpostavljene vremenske pomake implementacije mjera u odnosu na Direktivu. Scenarij s mjerama osim mjera navedenih u temeljnom scenariju obuhvaća i sljedeće mjere:

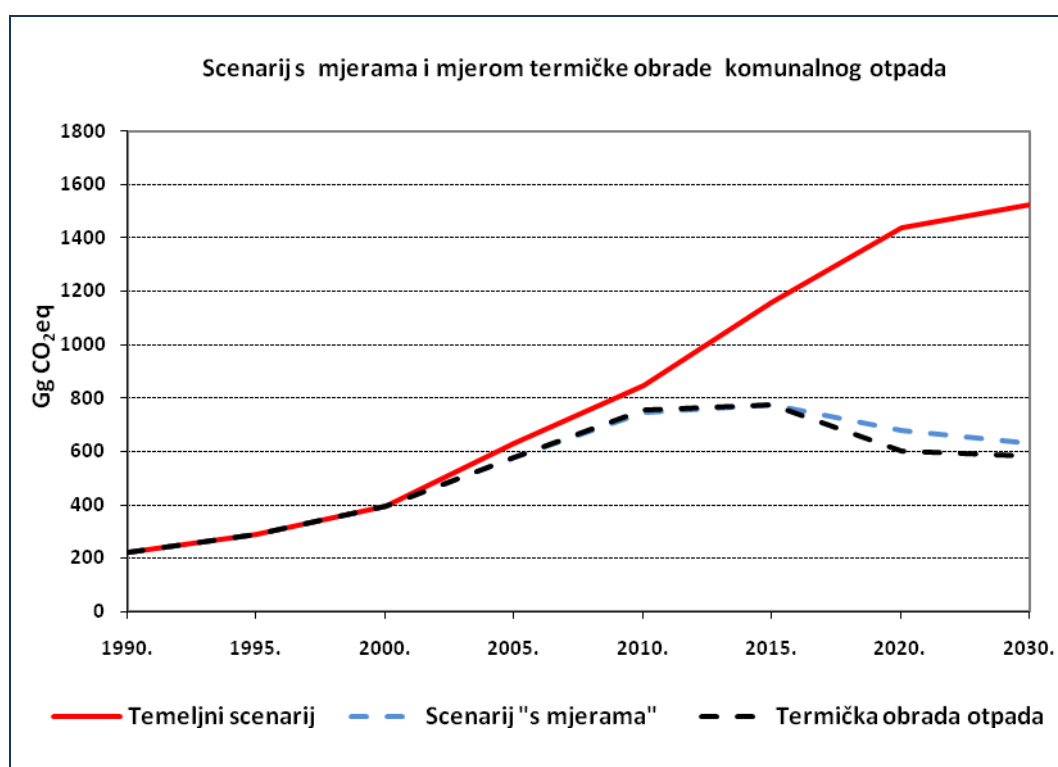
- Mehaničko-biološku obradu komunalnog otpada koja obuhvaća:
 - Smanjenje količine odloženog biorazgradivog otpada
 - Proizvodnju i uporabu bioplina iz bioreaktora
 - Proizvodnju i korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji
- Spaljivanje metana na baklji i korištenje metana za proizvodnju električne energije

Scenarij s dodatnim mjerama osim mjera koje su navedene u temeljnom scenariju i scenariju s mjerama obuhvaća i mjeru termičke obrade komunalnog otpada. Komunalni otpad se može termički obrađivati bez prethodne obrade ili u postrojenjima koja spaljuju gorivo iz otpada.

Izračun potencijala smanjenja emisija stakleničkih plinova koji se može postići primjenom mjera uključenih u scenarije temelji se na pretpostavkama usklađenim s ciljevima Direktive. Implementacija mjera usklađena je s postavljenim ciljevima i rokovima definiranim

Strategijom i Planom pri čemu se vodilo računa o realnoj primjenjivosti pojedine mjere. Troškovna prihvatljivost mjera uključenih u scenarije također je jedan od ograničavajućih faktora primjene mjera, a analizom osjetljivosti razmatrana je ekonomičnost mjera u ovisnosti o promjeni pojedinih parametara.

Potencijal smanjenja emisija izražava se kao razlika emisija temeljnog scenarija i scenarija koji pretpostavljaju primjenu mjera. Budući da temeljni scenarij uključuje provedbu osnovnih mjera za smanjenje emisija, dinamika provedbe mjera temeljnog scenarija izravno će utjecati na projekcije emisija. Zbog velikog broja ulaznih podataka koji su međusobno zavisni, a čija je nesigurnost velika, procijenjene emisije scenarija (Slika 19) također imaju veliku nesigurnost.



Slika 19. Emisije CH₄ temeljnog scenarija, scenarija s mjerama i mjerom termičke obrade komunalnog otpada

Tablica 32 prikazuje maksimalne potencijale smanjenja emisija stakleničkih plinova koji se mogu postići primjenom mjera uključenih u scenarij s mjerama i scenarij s dodatnim mjerama, prema pretpostavkama navedenim u poglavljima 6. i 7.

Tablica 32. Ukupni potencijal smanjenja emisija CH₄ i CO₂

POTENCIJAL [tCO ₂ eq]	2010.	2015.	2020.	2030.
SCENARIJ S MJERAMA				
Smanjenje odloženog biorazgradivog otpada	15.752	249.801	591.886	682.656
Korištenje bioplina za proizvodnju električne energije	1.600	45.096	53.674	61.349
Korištenje goriva iz otpada u cementnoj industriji	41.449	92.011	144.850	144.850
Spaljivanje metana na baklji	82.970	136.649	169.534	210.796
Korištenje metana za proizvodnju električne energije	7.704	12.688	15.741	19.572
Ukupni potencijal	149.475	536.244	975.685	1.119.224
SCENARIJ S DODATNIM MJERAMA				
Termička obrada komunalnog otpada	-	187.292*	187.292*	105.419*
	-	106.888**	106.888**	60.163**
Termička obrada goriva iz otpada (energana na otpad)	106.897**	157.194*	147.095*	191.575*
	61.006***	89.711**	83.947**	109.332**

* - potencijal ostvaren zamjenom ugljena s komunalnim otpadom/gorivom iz otpada

** - potencijal ostvaren zamjenom prirodnog plina s komunalnim otpadom/gorivom iz otpada

x - prikazani su potencijali za 2012. godinu

Primjena pojedine mjere ovisi prvenstveno o ostvarivanju ciljeva i rokova definiranih Strategijom i Planom, a koji su usklađeni s Direktivom. Ukoliko se uz potencijal smanjenja emisija stakleničkih plinova kao kriterij za primjenu mjere uvede i troškovna učinkovitost, rezultati pokazuju da su mjere uključene u scenarij s mjerama ekonomične, osim mehaničko-biološke obrade komunalnog otpada. Navedene mjere ulaze u kategoriju niskih ili negativnih troškova, odnosno ostvareni su prihodi koji se prvenstveno odnose na uštedu fosilnog goriva. Mjere koje ne zadovoljavaju kriterij ekonomičnosti su mehaničko-biološka i termička obrada komunalnog otpada, budući da ulaze u kategoriju s visokim graničnim troškovima. Rezultatima analize osjetljivosti za tri karakteristične mjere prikazani su slučajevi u kojima se promjenom pojedinih parametara utječe na ekonomičnost mjere. To se prvenstveno odnosi na mjere mehaničko-biološke i termičke obrade komunalnog otpada. Formiranjem naknade na zbrinjavanje komunalnog otpada vrijednost graničnih troškova bila bi niža što bi uvjetovalo i veću vjerojatnost primjene navedenih mjera.

U sklopu Plana zaštite i poboljšanja kakvoće zraka u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2008. do 2011. godine [43] postavljena je pravna osnova za propisivanje kvota emisija s ciljem uspostave sustava trgovanja emisijama CO₂. Za sada nije predviđeno dodjeljivanje kvota operaterima koji se bave djelatnošću gospodarenja otpadom, ali treba uzeti u obzir i činjenicu da će se sustav trgovanja emisijama nakon prvog obvezujućeg razdoblja (2008.-2012.) vjerojatno proširiti i na druge stakleničke plinove i sektore, uključujući odlaganje i termičku obradu komunalnog otpada. U tom slučaju ekonomski prihvatljive mjere zauzet će značajnu ulogu u ostarivanju nacionalnih ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova.

11. ZAKLJUČAK

Primjenom najboljih raspoloživih tehnika u gospodarenju komunalnim otpadom značajno se mogu smanjiti emisije stakleničkih plinova. Ostvarivanjem hijerarhijskog koncepta gospodarenja otpadom, uz korištenje tehnoloških postupaka za oporabu komunalnog otpada i odlagališnog plina, cjelokupno gospodarenje komunalnim otpadom potrebno je uskladiti s načelima održivog razvoja i ekološke prihvatljivosti.

Iako je potencijal proizvodnje energije iz otpada malen u odnosu na ukupnu potrošnju energije u Hrvatskoj, otpad kao obnovljivi izvor energije ima značajan potencijal na lokalnoj razini. Gospodarenje komunalnim otpadom otvara mogućnosti zapošljavanja i poduzetništva. Ušteda fosilnog goriva u cementnoj industriji nudi mogućnost smanjenja troškova proizvodnje, a time se povećava konkurentnost proizvoda na tržištu.

Implementacijom mjera uključenih u scenarije smanjenja emisija u gospodarenju otpadom, značajniji potencijali smanjenja mogu se očekivati tek nakon 2015. godine, uz uvjet da sustav gospodarenja otpadom bude organiziran kao integralna cjelina svih subjekata na nacionalnoj, regionalnoj i lokalnoj razini, uz predviđeno osnivanje regionalnih i županijskih centara gospodarenja otpadom, koji će biti centralna mjesta za obradu i odlaganje komunalnog otpada. Ekonomski prihvatljive mjere zauzet će značajnu ulogu u ostvarivanju nacionalnih ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova. Održivo gospodarenje komunalnim otpadom je nužnost, a provedba ovisi o izboru mjera na temelju analiza sveukupnih troškova i koristi.

12. LITERATURA

- [1] Zakon o otpadu (NN 178/04, 111/06, 60/08, 87/09)
- [2] Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (NN 130/05)
- [3] Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (NN 85/07)
- [4] Zakon o potvrđivanju Kyotskog protokola uz Okvirnu konvenciju ujedinenih naroda o promjeni klime (NN - Međunarodni ugovori, 05/07)
- [5] klima. mzopu.hr
- [6] Hublin, A.: Energetski potencijal otpada – smjernica regionalnog koncepta održivog razvoja X. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb 2008., Milanović, Zlatko (ur.), Zagreb: Gospodarstvo i okoliš d.o.o., 2008., str. 69. – 76.
- [7] Council Resolution on a Community Strategy for Waste Management 97/C76/01
- [8] Waste Framework Directive 2008/98/EC
- [9] Landfill Directive 99/31/EC
- [10] Hublin, A., Anić Vučinić, A.: Održivo gospodarenje komunalnim otpadom – energetska, ekološka i ekonomska korist, Tehnologije zaštite zraka, Vasić-Rački, Đurđa (ur.), Zagreb, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, 2008. , str. 109. – 115.
- [11] Stanić, Z.; Čerškov M. : Analiza mogućnosti ekološkog zbrinjavanja otpada u termoelektranama, 8. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom, Zagreb, 2004.
- [12] European Commision: Waste Management Options and Climate Change, 2001.
- [13] Case studies on waste minimisation practices in Europe, European Environment Agency, 2003.
- [14] European Environmental Agency: Brifeing 2008.
- [15] European Topic Centre on Resource and Waste Management: Municipal waste management and greenhouse gases, 2008.

-
- [16] Hublin, A., Kisić, Z.: Komunalni otpad - doprinos obnovljivim izvorima energije, Obnovljivi izvori energije u Republici Hrvatskoj, Krajač, Tomislav (ur.), Zagreb: Sektor za industriju HGK, Zajednica obnovljivih izvora energije, 2007., str. 167 – 179.
- [17] Ministarstvo rada, gospodarstva i poduzetništva, RH: Energija u Hrvatskoj 2007.
- [18] Ministarstvo rada, gospodarstva i poduzetništva: Prilagodba i nadogradnja strategije energetskeg razvoja Republike Hrvatske: Nacrt Zelene knjige, 2008.
- [19] http://www.hrote.hr/hrote/obnovljivi/OIE_vece_od_1_MW.pdf
- [20] Bontoux, L.: The Incineration of Waste in Europe: Issues and Perspectives, 1999.
- [21] V. Potočnik: Tehnologije za ublažavanje klimatskih promjena u sektoru Gospodarenje otpadom, Elaborat u okviru projekta Climate Change Enabling Activity (Phase II), Technology Needs Assessment Report; Ekonerg, 2005.
- [22] Guidance on Landfill Gas Flaring, Environment Agency 2002.
- [23] Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, European Commission, 2006.
- [24] Schneider, D.R., Bogdan, Ž., Kirac, M.: Postrojenje za energetske oporabu komunalnog otpada: tehno-ekonomska analiza, X. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb 2008., Milanović, Zlatko (ur.), Zagreb: Gospodarstvo i okoliš d.o.o., 2008., str. 635. – 658.
- [25] Pravilnik o načinima i uvjetima termičke obrade otpada (NN 45/07)
- [26] www.iaeg.com
- [27] www.gec.jp
- [28] Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva: Scenariji smanjenja emisija stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj za „Post-kyotsko“ razdoblje do 2020., s pogledom na 2030. i 2050. godinu, Ekonerg, 2009.
- [29] Intergovernmental Panel on Climate Change: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, Waste
- [30] Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva: Razvoj smjernica za početak implementacije Plana gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj, Ekonerg, 2007.
- [31] Ministry of Environmental Protection, Physical Planning and Construction: National Inventory Report 2009., Ekonerg, 2009.
- [32] Bossel, U.: Well-to-Wheel Studies, Heating Values, and the Energy Conservation Principle, European Fuel Cell Forum, 2003.
- [33] Mechanical-Biological-Treatment: A Guide for Decision Makers Processes, Policies and Markets, Annexe D, Juniper, 2005.
- [34] Intergovernmental Panel on Climate Change: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2, Energy
- [35] European Commission: Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives, General Environment, Final Report, 2003.
-

-
- [36] Croatia Cement, g.i.u.: Hrvatska industrija cementa i klimatske promjene, Ekonerg, 2007.
- [37] UNEP: Economics of Greenhouse Gas Limitations, Main Reports – Methodological Guidelines, Denmark, 1999.
- [38] Tsilemou, K., Panagiotakopoulos, D.: Apporoximate cost functions for solid waste treatment facilities, Laboratory of Project Management, Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace, Xanthi, Greece, 2006.
- [39] IEA Bioenrgy: Biogas Flares: State of the Art and Market Review, 2000.
- [40] Getes d.o.o.: Zahvat i energetska iskorištenje deponijskog plina, interni materijal, 2007.
- [41] Schneider, R. D., Bogdan, Ž.: Analysis of a sustainable system for energy recovery from municipal solid waste in Croatia, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 5th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, 2009.
- [42] Studija o utjecaju na okoliš PTOO u gradu Zagrebu, NOVUM/UTW-EPZ, 2006.
- [43] Plan zaštite i poboljšanja kakvoće zraka u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2008. do 2011. godine (NN 61/08)