

**UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU**

**IZRABA DEPONIJSKEGA PLINA V CENTRU ZA
RAVNANJE Z ODPADKI NOVA GORICA**

Diplomsko delo

Ivana LIKAR

Mentor: doc. dr. Gregor Drago Zupančič

Nova Gorica, 2010

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Gregorju D. Zupančiču za sodelovanje, strokovno pomoč in napotke pri izdelavi diplomskega dela. Hvala tudi g. Darju Rolihu iz Komunale Nova Gorica za vso pomoč pri zbiranju podatkov.

Še posebej pa se zahvaljujem staršem, ki so mi omogočili študij, me spodbujali in mi stali ob strani.

POVZETEK

Odlagališčni plin vsebuje v povprečju 45–60 % metana. Metan je močan toplogredni plin, zato smo se odločili raziskati, kako v Centru za ravnanje z odpadki Nova Gorica (v nadaljevanju CERO) ravnajo z odlagališčnim plinom. Prvi del diplomskega dela so predstavljale meritve deležev odlagališčnega plina na odlagališču. Povprečni volumski delež metana je v odlagališčnem plinu za leto 2008 znašal 45,7 %. V drugem delu smo s pomočjo matematičnega modela LandGEM izračunali nastale količine metana po posameznih brežinah od odprtja odlagališča do leta 2009. Vzporedno smo izračunali količine nastalega metana tudi s pomočjo Uredbe o spremembah in dopolnitvah Uredbe o odlaganju odpadkov na odlagališčih (v nadaljevanju Uredba) in primerjali rezultate, dobljene z obema metodama. Ugotovili smo, da se rezultati modela LandGEM od tistih, dobljenih s pomočjo Uredbe, razlikujejo za 4,3 %. Odločili smo se, da nadaljnje izračune opravimo z matematičnim modelom LandGEM. Iz dobljenih rezultatov smo izračunali učinkovitost zbirnega sistema, ki znaša 49,8 %. Zakonodaja predvideva zmanjševanje deleža biorazgradljivih odpadkov v komunalnih odpadkih. Glede na to smo predvideli tri scenarije zmanjševanja biorazgradljivih komunalnih odpadkov. Za vsak scenarij smo izračunali količine nastalega metana iz odlagališča. Iz izračunanih količin zajetega metana smo izračunali potencialno toplotno moč metana in izbrali primeren kogeneracijski modul. V Scenariju 1 bi kogeneracijski modul lahko obratoval do leta 2033, v Scenariju 2 do 2031, v Scenariju 3 pa le do leta 2030, v nadaljevanju bi zajeti metan morali sežigati na bakli. Količine metana smo izračunali tudi za ločeno zbrane biorazgradljive odpadke, ki bi se v prihodnosti lahko obdelovali v bioplinarni. V primeru, da bi se v CERO odločili za postavitve bioplinarne, bi nastali bioplin lahko združili z zajetim odlagališčnim plinom, na ta način bi kogeneracijske module po potrebi le dodajali glede na skupno količino plina. Izbrani kogeneracijski moduli bi tako s polno močjo obratovali v vseh treh scenarijih do leta 2045 in ne le do leta 2033, 2031 oziroma 2030.

Ključne besede: anaerobna predelava odpadkov, odlagališče, odlagališčni plin, sproizvodnja, komunalni odpadki, metan

ABSTRACT

Landfill gas contains on average 45–60 % methane, a potential greenhouse gas. Therefore, we have decided to investigate how the Center for waste management Nova Gorica (CERO) is handling landfill gas. First part of the diploma work represents measurements of quantities and composition of landfill gas from the landfill. The average volume percentage of methane in the year 2008 was 45,7 % . In the second part of the diploma work we used a mathematical model LandGEM and calculated the generated quantities of methane at separate slopes from the year of construction up to the year 2009. In parallel we also calculated the amounts of methane according to the Landfill regulation directive (LRD method) and then compared the results obtained with both methods. The results obtained differ only by 4,3 %. We decided to use the mathematical model LandGEM for further calculations. From the results obtained, we determined the efficiency of the collection system which was 49,8 %. The Landfill regulation directive directs mandatory reduction of biodegradable waste in municipal waste stream. We have then foreseen three scenarios with the reduction of biodegradable waste intake of the studied landfill. We calculated for each scenario the amount of methane generated from the landfill. With the calculated quantities of collected methane we have determined the potential energy of methane, and selected a suitable combined heat and power unit (CHP). The CHP unit can be operated according to the following scenarios; for the first scenario, by the year 2033, for the second scenario until 2031 and for the third scenario by the year 2030. After these periods the collected methane can be torched. We calculated as well the amounts of methane from separately collected biodegradable waste which could be used as a substrate in an anaerobic digester. In the case that CERO will decide for anaerobic digestion, we can join the produced biogas with the landfill collected methane. In such case additional CHP units can be applied accordingly to the produced biogas. The CHP units in this case would operate at full power in all three scenarios by the year 2045 and not just until 2033, 2031 and 2030.

Keywords: anaerobic digestion, cogeneration, landfill, landfill gas, municipal waste, methane

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Problem.....	1
1.2	Cilj diplomskega dela.....	1
2	TEORETIČNE OSNOVE	2
2.1	Komunalni odpadki	2
2.2	Shematski prikaz odlagališča.....	4
2.3	Odlagališčni plin.....	4
2.3.1	<i>Nastanek in sestava odlagališčnega plina</i>	<i>5</i>
2.3.2	<i>Dejavniki, ki vplivajo na nastanek odlagališčnega plina.....</i>	<i>7</i>
2.3.3	<i>Količine odlagališčnega plina</i>	<i>8</i>
2.4	Tehnologije zajema in izrabe odlagališčnega plina.....	8
2.5	Alternativni postopki – možnost ločenega zbiranja z bioplinarno.....	10
3	PRAKTIČNI DEL	13
3.1	Center za ravnanje z odpadki Nova Gorica	13
3.1.1	<i>Tehnologija za zajem plina.....</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Plinska črpalka z baklo.....</i>	<i>15</i>
3.2	Izračun količin metana v odlagališčnem plinu z matematičnim modelom LandGEM.....	17
3.2.1	<i>Enačba prve stopnje razkroja.....</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Parametri modela.....</i>	<i>17</i>
3.3	Izračun količin metana v odlagališčnem plinu z Uredbo	19
3.4	Izračun učinkovitosti zbirnega sistema	20
3.5	Izračun volumna metana z uporabo plinske enačbe.....	20
3.6	Izračun potencialne toplotne moči metana	21
3.7	Izračun količin nastalega bioplina iz biorazgradljivih odpadkov	21
3.8	Količine biorazgradljivih odpadkov, ki se lahko odložijo na odlagališča.....	21
3.9	Meritve na odlagališču	23
3.9.1	<i>Metode izvajanja meritev in merilna tehnika</i>	<i>23</i>
3.9.2	<i>Potek meritev</i>	<i>23</i>
4	REZULTATI IN RAZPRAVA	25
4.1	Rezultati meritev	25
4.2	Rezultati izračuna količin nastalega metana z matematičnim modelom LandGEM.....	26
4.3	Izračun količin nastalega metana z Uredbo	29
4.4	Primerjava količin nastalega metana v odlagališčnem plinu, računanih z matematičnim modelom LandGEM in z Uredbo	30
4.5	Izračun učinkovitosti zbirnega sistema odlagališčnega plina.....	31
4.6	Predvideni scenariji odlaganja odpadkov in izračun količin nastalega metana	32
4.7	Izračun bilance toplotne moči in predlog energetske izrabe odlagališčnega plina	35
4.8	Alternativni postopki – ločeno zbrani odpadki in bioplinarna.....	37
5	ZAKLJUČKI.....	44
6	VIRI.....	46

KAZALO SLIK

Slika 1: Razvrščanje odpadkov	2
Slika 2: Shematski prikaz odlagališča	4
Slika 3: Spreminjanje trajanja faz glede na aerobne oziroma anaerobne razmere	6
Slika 4: Shematski prikaz zbiranja in uporabe odlagališčnega plina	9
Slika 5: Shema štiristopenjskega procesa anaerobne razgradnje	10
Slika 6: Trajanje anaerobnega procesa v odvisnosti od temperature	11
Slika 7: Sesalna mreža z odplinjaki	14
Slika 8: Bakla za sežig odlagališčnega plina	16
Slika 9: Štiri veje zbirnega sistema	24
Slika 10: Instrument za merjenje odlagališčnega plina	24
Slika 11: Primerjava rezultatov izračuna z matematičnim modelom LandGEM in z Uredbo	31
Slika 12: Količine nastalega metana za različne scenarije	34
Slika 13: Emisije metana v atmosfero za različne scenarije	35
Slika 14: Grafični prikaz količin metana za Scenarij 1	40
Slika 15: Grafični prikaz količin metana za Scenarij 2	40
Slika 16: Grafični prikaz količin metana za Scenarij 3	41

KAZALO TABEL

Tabela 1: Komponente odlagališčnega plina	6
Tabela 2: Količina sproščenega bioplina za rastlinske odpadke	11
Tabela 3: Potencial proizvodnje metana in drugi parametri komunalnih odpadkov	12
Tabela 4: Karakteristike plinske črpalke z baklo	15
Tabela 5: Količine biorazgradljivih odpadkov, ki se lahko odložijo na odlagališča	22
Tabela 6: Glavne karakteristike merjenih veličin	23
Tabela 7: Izmerjeni volumski deleži metana za leto 2008	25
Tabela 8: Izmerjeni volumski deleži posameznih komponent odlagališčnega plina	26
Tabela 9: Lastnosti odlagališča	26
Tabela 10: Parametri modela	26
Tabela 11: Odlaganje odpadkov na brežine po letih	27
Tabela 12: Količine nastalega metana, proizvedene na leto po brežinah z uporabo matematičnega modela LandGEM	28
Tabela 13: Letne količine nastalega metana z uporabo matematičnega modela LandGEM in Uredbe	30
Tabela 14: Uporabljeni parametri za določen scenarij	32
Tabela 15: Količine nastalega metana na odlagališču za določen scenarij	33
Tabela 16: Potencialna toplotna moč zajetega metana	35
Tabela 17: Lastnosti delovanja kogeneracijskega modula Jenbacher Type 2 – J208	36
Tabela 18: Količine in potencialna toplotna moč nastalega metana v bioplinarni	37
Tabela 19: Izbrani kogeneracijski moduli za posamičen scenarij	38
Tabela 20: Karakteristike kogeneracijskega modula Jenbacher Type 3 – J312	38
Tabela 21: Seštevek potencialne toplotne moči zajetega metana in metana nastalega v bioplinarni	39
Tabela 22: Karakteristike kogeneracijskega modula Jenbacher Type 3 – J316	42

1 UVOD

Odpadek je po Zakonu o varstvu okolja¹ določena snov ali predmet, ko ga njegov povzročitelj ali druga oseba, ki ima snov ali predmet v posesti, zavrže, namerava ali mora zavreči.

1.1 Problem

Razvita civilizacija troši in s svojo potrošnjo, ki sega v vsa področja in panoge, povzroča na tone odpadkov. Odpadki obremenjujejo okolje, hkrati pa lahko predstavljajo tudi surovino, ker jih je mogoče ponovno uporabiti ali pa predelati. Področje ravnanja z odpadki je na svetovnem merilu uvrščeno med kritične teme, saj odpadki danes predstavljajo enega izmed največjih dejavnikov, ki ogrožajo naš planet. Problematika, povezana z odpadki, je obsežna, ker ne obsega le njihove predelave in odlaganja, ampak tudi vse izpuste, ki jih odpadki, odloženi na odlagališče, povzročijo. Zadnja leta je vse več govora o vremenskih spremembah, do katerih prihaja prav zaradi izpustov toplogrednih plinov. Med toplogredne pline uvrščamo tudi odlagališčni plin, ki nastaja pri razgradnji odpadkov. Odlagališčni plin vsebuje v povprečju 45–60 % metana in 40–55 % ogljikovega dioksida. Metan je močan toplogredni plin, saj prispeva kar 21-krat več h globalnemu segrevanju kot ogljikov dioksid².

1.2 Cilj diplomskega dela

V diplomskem delu smo raziskali, kako v Centru za ravnanje z odpadki Nova Gorica (v nadaljevanju CERO) upravljajo z nastalim odlagališčnim plinom, kakšno tehnologijo uporabljajo za zajetje le-tega in kako z njim ravnajo. Cilj diplomskega dela predstavljajo meritve metana v odlagališčnem plinu in nato s pomočjo matematičnega modela LandGEM izračuni letnih količin nastalega metana po posameznih brežinah na odlagališču. Vzporedno z matematičnim modelom smo izračunali količine nastalega metana tudi po Uredbi o spremembah in dopolnitvah Uredbe o odlaganju odpadkov na odlagališčih³ (v nadaljevanju Uredba) in primerjali dobljene vrednosti. Po izračunanih količinah nastalega metana v odlagališčnem plinu smo v nadaljevanju izračunali učinkovitost zbirnega sistema za zajem le-tega. Zakonodaja stremi k zmanjševanju deleža biorazgradljivih odpadkov na celotno količino odloženih komunalnih odpadkov, zato smo oblikovali tri scenarije, v katerih so prikazane variante zniževanja biorazgradljivih odpadkov v prihodnjih letih. Glede na zmanjšano količino odpadkov smo izračunali količino nastalega metana in preverili, koliko električne in toplotne energije bi lahko dobili iz zajetega metana s postavitvijo elektrarne oziroma kogeneracijskega modula na odlagališču. Alternativa h klasičnemu odlaganju odpadkov na odlagališče predstavlja anaerobna razgradnja in bioplinarna. Količina ločeno zbranih biorazgradljivih odpadkov bo glede na predvidene scenarije vsako leto naraščala. Predvideli smo, da se bo te odpadke predelalo v bioplinarni, zato smo glede na potencial metana izračunali za vsak scenarij nastale količine metana. Iz dobljenih količin metana smo v nadaljevanju preračunali potencialno toplotno moč metana in tako ugotovili, kakšen kogeneracijski modul bi bil najprimernejši za vsak scenarij posebej.

2 TEORETIČNE OSNOVE

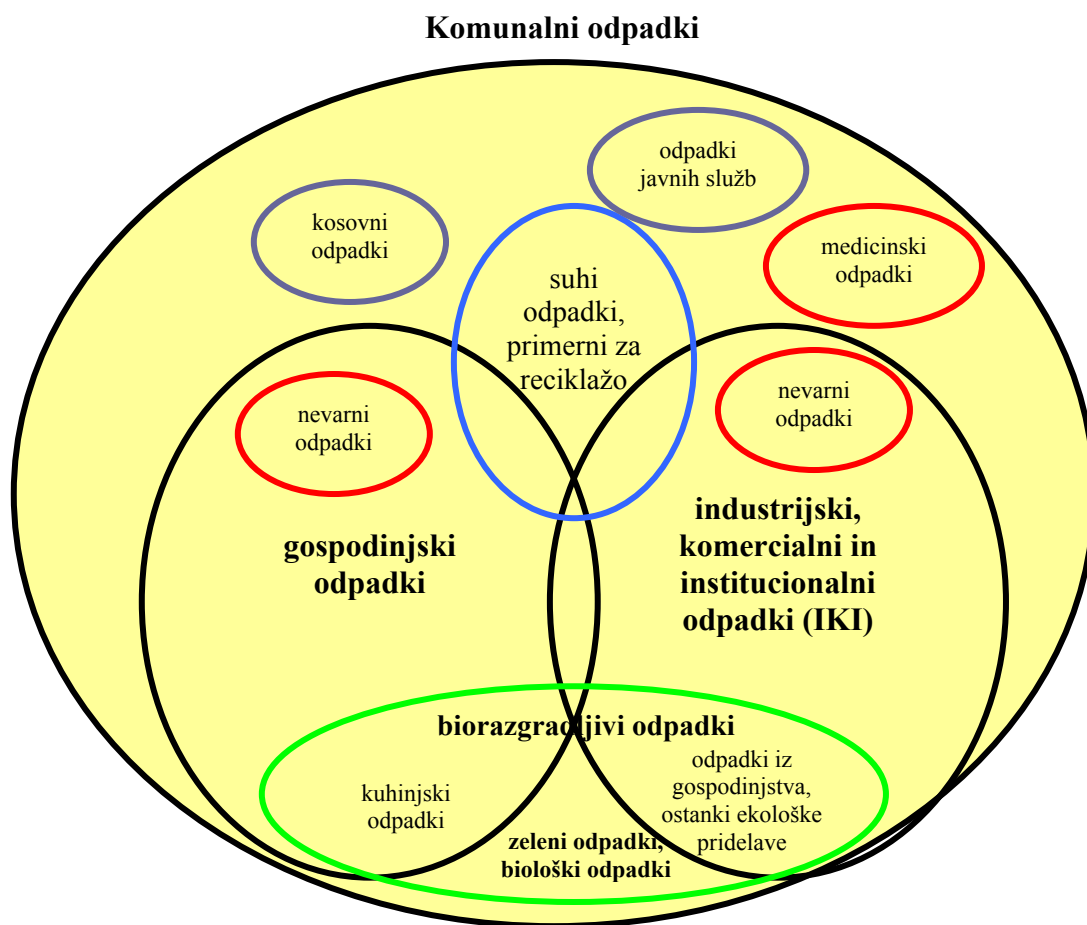
2.1 Komunalni odpadki

Odpadki so proizvod človeškega delovanja, saj nastajajo na vsakem koraku in se jim s trenutnim trendom življenja težko izognemo.

Komunalni odpadki obsegajo skoraj vse odpadke na področju, ki ga upravlja pristojna komunalna služba. Slika 1 prikazuje razvrščanje komunalnih odpadkov. Prikazane so različne vrste odpadkov:

- gospodinjski odpadki,
- industrijski, komercialni in institucionalni odpadki (v nadaljevanju IKI odpadki),
- kosovni odpadki,
- zeleni odpadki,
- odpadki javnih služb,
- ločeno zbrane frakcije za postopke obnove in
- nevarni odpadki.

Komunalni odpadki običajno ne vključujejo blata iz čistilnih naprav, gradbenih odpadkov, kmetijskih odpadkov in odpadkov, povzročenih z rudarjenjem⁴.



Slika 1: Razvrščanje odpadkov⁴

Biorazgradljivi odpadki so vsi odpadki, ki se lahko aerobno ali anaerobno razgradijo. Tovrstni odpadki so na primer ostanki živil, vrtni odpadki in papir. Biorazgradljivi odpadki so del gospodinjskih, IKI ter zelenih odpadkov. Ponekod se zbirajo tudi ločeno.

Kosovni odpadki so odpadki, ki zaradi svojih dimenzij zahtevajo poseben način obravnave, na primer bela tehnika, staro pohištvo, vzmetnice. Gradbeni odpadki niso vključeni v to skupino.

Odpadki, primerni za suho reciklažo, so vsi materiali, ki se lahko reciklirajo; izvzeti so organski odpadki. V to skupino spadajo steklo, tkanine, embalaža in papir.

Zeleni odpadki so vsi organski odpadki, ki nastanejo na zelenih površinah, kot so zasebni vrtovi in javni parki. Vključujejo pokošeno travo, listje in ostale snovi, ki imajo zmožnost obnove. Zeleni odpadki so del gospodinjskih in IKI odpadkov ali pa se zbirajo ločeno.

Nevarni odpadki zahtevajo posebno ravnanje in načine odlaganja, ker so nevarni za ljudi, okolje, opremo ali proizvode predelave. Med nevarne odpadke spadajo odpadna olja, baterije, barve in kemikalije. V gospodinjstvu ponavadi nastajajo v majhnih količinah (pesticidi, olja, topila, barve, laki, razkužila, ostanki kemikalij, baterije, fluorescentne cevi, kisline in baze).

Medicinski odpadki so v običajni delitvi glede na njihovo nevarnost razdeljeni v štiri skupine:

- nenevarni odpadki, to so komunalni in biološki odpadki ter odpadki, primerni za reciklažo;
- odpadki, ki predstavljajo tveganje za osebe v stiku, obsegajo tipične medicinske proizvode, kontaminirane s krvjo, urinom ali drugimi telesnimi tekočinami;
- odpadki z veliko nevarnostjo okužbe (epidemiološka grožnja) vsebujejo materiale, kontaminirane s povzročitelji določenih bolezni;
- odpadki z drugimi tveganji (okoljskimi, toksikološkimi) obsegajo vse ostale materiale, ki jih v bolnišnicah zavržejo, na primer elektronske aparate, čistila, razkužila, zdravila, olja, barve.

Gospodinjski odpadki so odpadki iz gospodinjstev (organski odpadki, plastika, steklo in tudi nevarni odpadki kot so čistila, zdravila) in ostali odpadki, ki so zaradi svoje sestave podobni gospodinjskim, na primer odpadki iz trgovin, ki se zbirajo skupaj z gospodinjskimi odpadki.

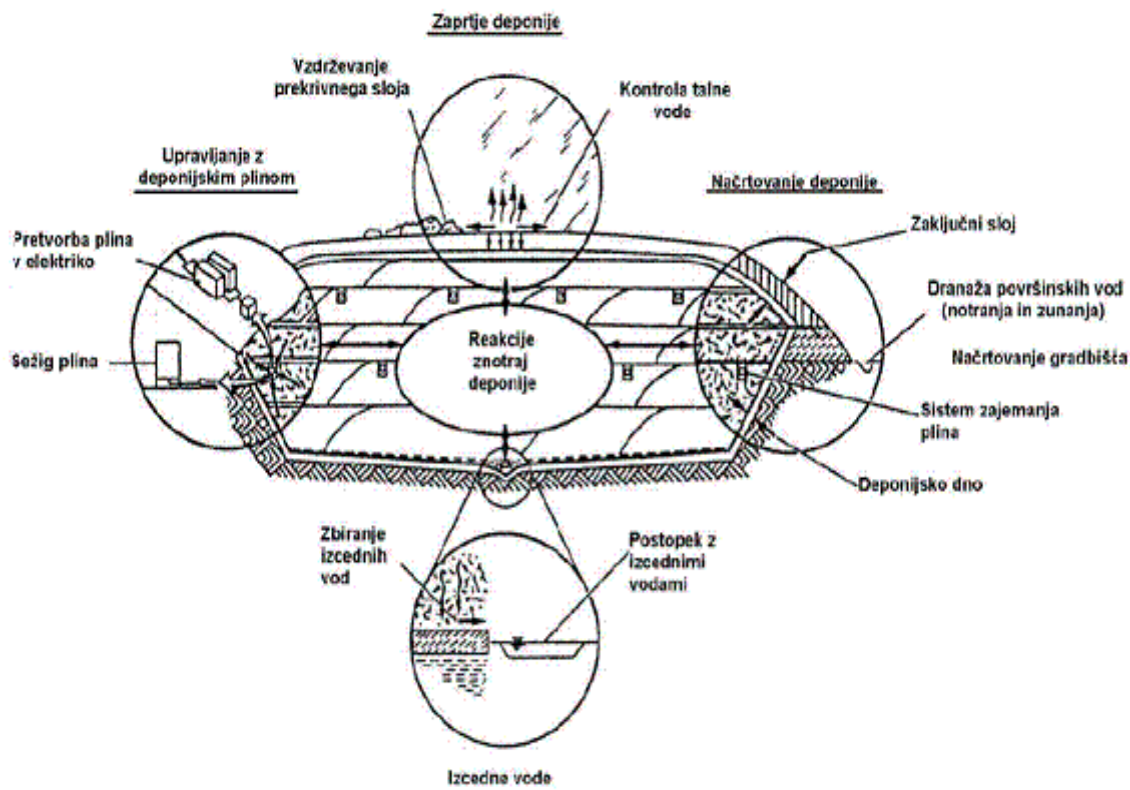
Industrijski, komercialni in institucionalni odpadki (IKI odpadki) so odpadki, ki nastajajo v različnih gospodinjskih strojih in ustanovah (šolah, vladnih zgradbah, bolnišnicah) in se zaradi podobnih lastnosti lahko obravnavajo na način kot gospodinjski odpadki (na primer ostanki hrane, papir, plastika).

Odpadki javnih služb so odpadki iz izbranih javnih služb, na primer odpadki, ki nastanejo pri vzdrževanju parkov in vrtov, odpadki iz ulic (smeti, vsebina smetnjakov, odpadki s tržnic)⁴.

Trendi nastajanja odpadkov se zvišujejo, na kar vpliva tudi rast populacije. Odpadki nam predstavljajo poleg velike izgube surovin tudi veliko izgubo energije, tako pri njihovem nastanku kakor tudi v fazi odlaganja oziroma predelave odpadka. Še vedno je najpogostejša rešitev odlaganje na odlagališče. V nadaljevanju je predstavljen shematski prikaz odlagališča in procesov, ki se na odlagališču odvijajo.

2.2 Shematski prikaz odlagališča

Odlagališče je prostor, namenjen odlaganju trdnih odpadkov na površino zemlje. Slika 2 nam prikazuje odlagališče kot celoto ter glavne procese, ki se na odlagališču in v telesu odlagališča odvijajo.



Slika 2: Shematski prikaz odlagališča⁵

Sledeče poglavje opisuje, kako iz odpadkov nastaja stranski produkt razkroja – odlagališčni plin.

2.3 Odlagališčni plin

Odlagališčni plin je plin, ki nastaja zaradi odloženih odpadkov. Gospodinjski odpadki v povprečju vsebujejo od 150 do 250 kg organskega ogljika v toni. Ti odpadki so biorazgradljivi in se s pomočjo mikroorganizmov brez prisotnosti kisika lahko spremenijo v odlagališčni plin. Proces se od odlagališča do odlagališča razlikuje zaradi različnih pogojev, kot so sestava odpadkov, stisnjenost odpadkov, vlage, prisotne na odlagališču, temperature in tako dalje. Vsi ti parametri prispevajo k nastanku glavnega odlagališčnega plina metana⁶.

2.3.1 Nastanek in sestava odlagališčnega plina

Razgradnja odpadkov na odlagališču poteka s pomočjo bakterij. To razgradnjo lahko razdelimo v pet faz. Slika 3 prikazuje faze nastanka odlagališčnega plina. Odpadki na odlagališču se odlagajo več desetletij, kar pomeni, da so starejši odpadki v drugi fazi kot pa tisti pravkar odloženi oziroma tisti, ki se na odlagališču nahajajo manj časa.

Faza I

V prvi fazi poteka razgradnja odpadkov s pomočjo aerobnih bakterij – to so mikroorganizmi, ki živijo le v prisotnosti kisika. Bakterije porabljajo kisik pri razgradnji dolgih molekularnih verig kompleksnih ogljikovih hidratov, beljakovin ter lipidov, ki jih vsebujejo odpadki. Vsebnost dušika je v prvi fazi najvišja, v naslednjih fazah pa se zmanjšuje. Prva faza traja, dokler je prisoten kisik, traja lahko dneve ali pa mesece, odvisno od razpoložljivosti kisika med odpadki. Vsebnost kisika se spreminja tudi glede na stisnjenost odpadkov pri zakopu⁷.

Faza II

Druga faza se prične, ko se kisik v odlagališču porabi in nastopijo anaerobni pogoji. V tej fazi anaerobne bakterije pretvorijo komponente, ki so nastale v prvi fazi v očetno, mlečno in mravljično kislino, ter alkohole, kot sta metanol in etanol. Odlagališče oziroma nahajališče odpadkov v tej fazi postane zelo kislo. Ko kislina pride v stik z vlago, prisotno na odlagališču, se določeni nutrienti raztopijo in tako dobimo spojine, ki vsebujejo dušik ter fosfor, ki sta razpoložljiva naraščajočemu številu različnih mikroorganizmov v odlagališču. Plinasta produkta tega procesa sta ogljikov dioksid in vodik. V primeru, da je med odpadke vnesen kisik, se mikrobiološki procesi vrnejo ponovno v prvo fazo⁷.

Faza III

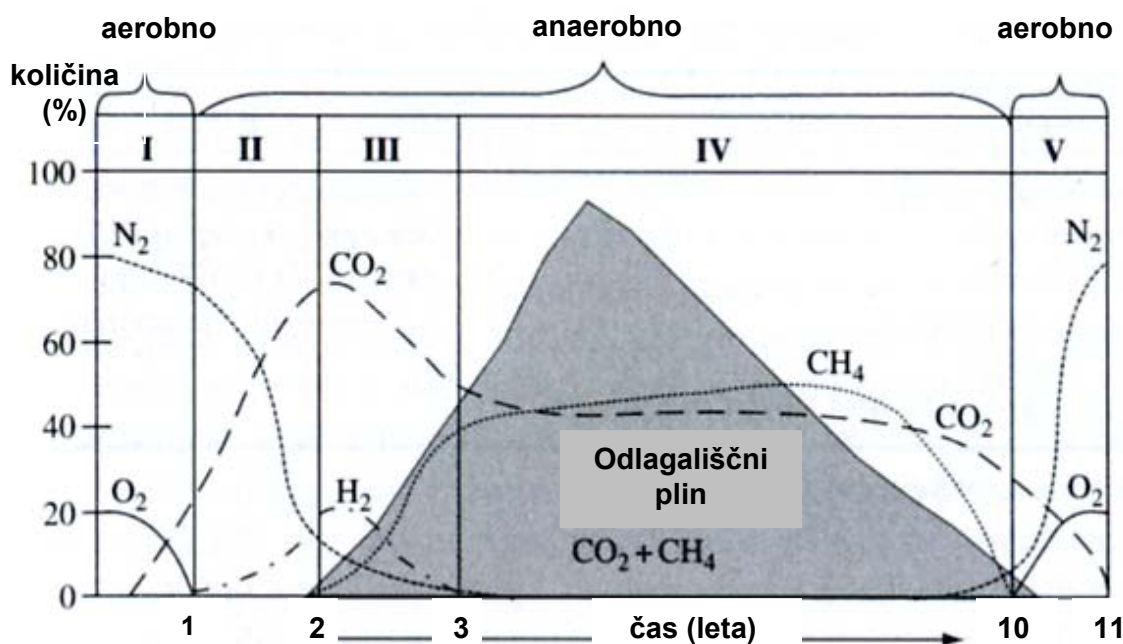
Tretja faza se prične, ko določene anaerobne bakterije porabijo organske kisline, nastale v drugi fazi in pri tem tvorijo acetat – organsko sol. Ta proces pripomore k temu, da postane odlagališče nekoliko bolj nevtralnno okolje, v katerem pričnejo delovati bakterije, ki proizvajajo metan. Kislinske in metanogene bakterije imajo simbiotski oziroma medsebojno koristen odnos. Kislinotvorne bakterije proizvajajo komponente, ki jih porabijo metanogene bakterije. Le-te porabljajo ogljikov dioksid in acetat, ki bi bil škodljiv za kislinske bakterije⁷.

Faza IV

Četrta faza se prične, ko postane razmerje med sestavo in nastankom odlagališčnega plina konstantno. Ta faza vsebuje po volumnu običajno 45–60 % metana, 40–55 % ogljikovega dioksida in 2–9 % ostalih plinov. Plin se proizvaja v stalnem razmerju približno 20 let, emitira pa se lahko tudi 50 let. Plin lahko nastaja tudi več kakor 20 let v primeru odpadkov, bogatih z organskimi snovmi (večje količine proizvedenih odpadkov živalskega izvora)⁷.

Faza V

Peta – zadnja faza nastopi, ko so reakcije razgradnje odpadkov končane, saj so se kislinske spojine porabile pri izdelavi metana in ogljikovega dioksida. Ob prisotnosti kisika aerobni mikroorganizmi počasi zamenjajo anaerobne in tako ponovno vzpostavijo aerobne pogoje ter pri tem ostanke metana pretvorijo v ogljikov dioksid in vodo⁸.



Slika 3: Spreminjanje trajanja faz glede na aerobne oziroma anaerobne razmere⁹

Tabela 1 prikazuje opis najpogostejših komponent odlagališčnega plina.

Tabela 1: Komponente odlagališčnega plina⁷

Komponenta	Procenti (vol %)	Lastnosti
metan (CH ₄)	45–60	Najpreprostejši ogljikovodik, plin brez barve in vonja, specifično lažji od zraka, gori z modrikastim plamenom, s kisikom ali zrakom tvori eksplozivno zmes.
ogljikov dioksid (CO ₂)	40–55	V manjših koncentracijah se nahaja v atmosferi (0,03 %). Je brezbarven, brez vonja in rahlo kisel.
dušik (N ₂)	2–5	Dušik sestavlja 79 % atmosfere. Je brez vonja, okusa in brez barve.
sulfidi	0–3	Binarne spojine z žveplom (na primer: H ₂ S). Imajo zelo neprijeten vonj.
kisik (O ₂)	0.1–1	Kisik sestavlja 21 % atmosfere. Je brez vonja, okusa in brez barve.
amoniak (NH ₃)	0.1–1	Amoniak je brezbarven plin ostrega vonja, lažji od zraka, zelo dobro topen v vodi.
nemetanske organske spojine – sekundarni plini	0.01–0.6	To so spojine, ki vsebujejo ogljik. Nemetanske organske spojine, ki se najpogosteje nahajajo v odlagališčih vsebujejo akrilonitrile, benzen, heksan, 1.1–dikloroetan, toluen, vinilklorid ...
vodik (H ₂)	0–0.2	Je brez vonja in brez barve.
ogljikov monoksid (CO)	0–0.2	Je brez vonja in brezbarven plin.

2.3.2 Dejavniki, ki vplivajo na nastanek odlagališčnega plina

Razmerje in količina – volumen odlagališčnega plina sta odvisna predvsem od lastnosti odloženih odpadkov (od sestave odpadkov in njihove starosti) in številnih dejavnikov, kot je vsebnost kisika na odlagališču – med odpadki, vsebnost vlage in temperature.

1. Sestava odpadkov

Organska snov v odpadkih pogojuje nastanek odlagališčnega plina. Več je organske snovi, več plina nastane pri bakterijski razgradnji. Nekateri organski odpadki lahko vsebujejo tudi nutrienste, kot so natrij, kalij, kalcij in magnezij, ki pospešujejo bakterijsko rast. Ob prisotnosti teh nutrientov poraste nastanek odlagališčnega plina. V nekaterih primerih pa lahko odpadki vsebujejo tudi bakterijam škodljive snovi, kar povzroči manjši nastanek odlagališčnega plina. Na primer, metanogene bakterije so lahko inhibirane v primeru, da odpadki vsebujejo visoke koncentracije soli⁷.

2. Kisik v odlagališču

Ko se v odlagališču porabi ves kisik, bakterije pričnejo proizvajati metan. Večja kot je koncentracija kisika v odlagališču, dlje časa bodo aerobne bakterije razkrajale odpadke v prvi fazi. V primeru, da so odpadki večkrat premešani oziroma odloženi tako, da niso stisnjeni, se poveča koncentracija kisika in posledično aerobne bakterije živijo dalj časa, proizvedejo večje količine ogljikovega dioksida in vode. V primeru pa, da so odpadki stisnjeni, bo prišlo dokaj hitro do nastanka metana, saj bodo anaerobne iz tretje faze zamenjale aerobne bakterije. Anaerobne bakterije bodo torej proizvajale velike koncentracije metana le v primeru, če kisik med odpadki ne bo več prisoten⁷.

3. Vsebnost vlage

Vlaga v odlagališču pospešuje nastanek odlagališčnega plina, saj pospešuje rast bakterij in pripomore k transportu nutrientov ter bakterij enakomerno med odpadki. Če je vsebnost vlage 40 % ali več na maso odpadkov, je nastanek odlagališčnega plina najvišji. V stisnjeno odloženih odpadkih je vsebnost vode nižja in s tem je zmanjšan tudi nastanek plina. Pri odpadkih, ki so zrahljani, tudi deževnica lažje prehaja in omogoča nastanek večjih količin plina⁷.

4. Temperatura

Višje temperature pospešujejo rast bakterijske aktivnosti in posledično tudi nastanek odlagališčnega plina. Vremenske spremembe imajo velik vpliv na nastanek plina v plitvih odlagališčih. To predvsem zato, ker bakterije niso tako izolirane pred temperaturnimi spremembami, kot so v globokih nahajališčih odpadkov, ki jih prekriva debela plast zemlje. Zaprto odlagališče običajno vzdržuje temperaturo, tako je nastanek plina največji. Bakterijska aktivnost oddaja toploto, tako da vzdržuje toploto nekje med 25 °C in 45 °C, v nekaterih primerih pa se temperatura lahko povzpne tudi na 70 °C. Povišane temperature pospešujejo hlapenje in kemijske reakcije⁷.

5. Starost odpadkov

Opadki, ki se nahajajo manj časa na odlagališču, bodo proizvajali več plina kakor starejši odpadki. Odlagališče proizvede znatne količine plina v času od 1–3 let. Največje količine plina se pojavijo od 5 do 7 let po tem, ko so bili odpadki odloženi. Manjše količine plina se lahko izločajo iz odloženih odpadkov tudi 50 let pozneje⁷.

2.3.3 Količine odlagališčnega plina

Količine odlagališčnega plina¹⁰ se gibljejo do $300 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ odpadkov. Za pridobivanje energije iz odpadkov^{11a} morajo biti proizvedene količine odlagališčnega plina od 150 do $250 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Proizvodnja energije je seveda odvisna od količine odlagališčnega plina. Odlagališčni plin ima kurilno vrednost^{11b} med 15 in $21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$, zemeljski plin pa $37 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$. Kurilna vrednost plina je odvisna od sestave gorljivih plinov, kot je metan, in negorljivih, kot je ogljikov dioksid. Prisotnost ogljikovega dioksida zmanjšuje temperaturo plamena in gorljivo razmerje (odstotek), omejuje niz stabilnosti plamena in posledično znižuje učinkovitost gorenja¹⁰. Ogljikov dioksid se šteje kot inerten, ker ne gori in ne prispeva k energetski bilanci odlagališčnega plina⁸.

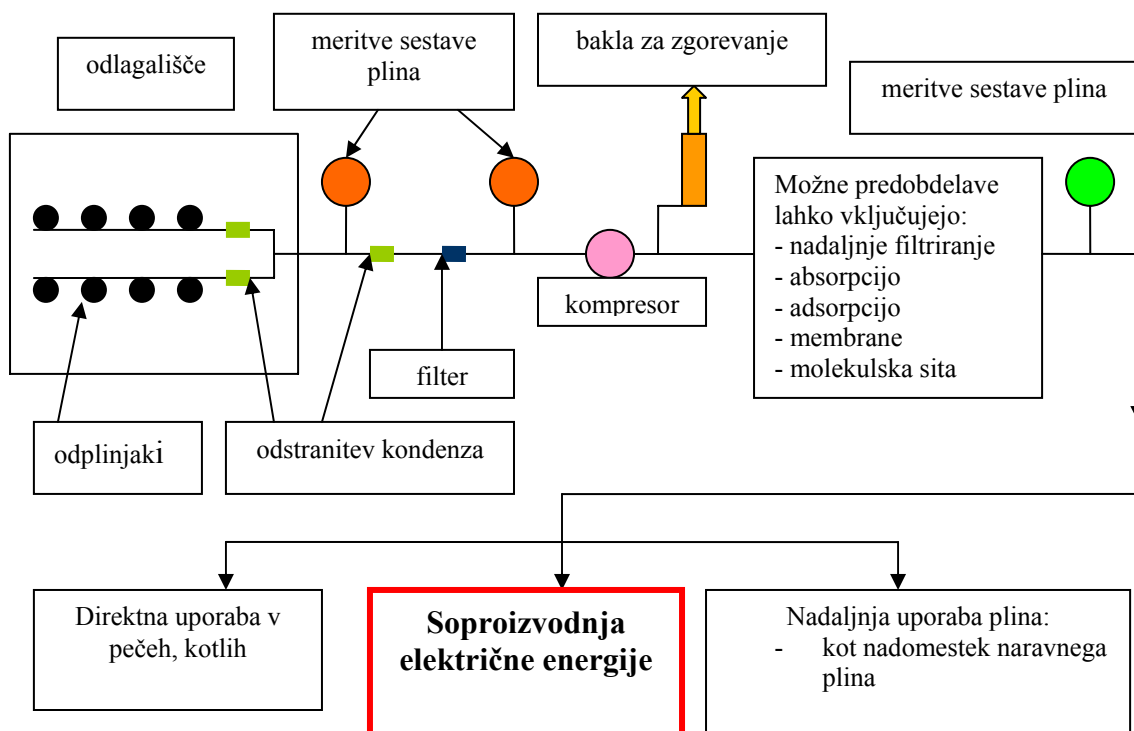
2.4 Tehnologije zajema in izrabe odlagališčnega plina

Razvoj vse večjih odlagališč v različnih državah zagotavlja gospodarske možnosti in ekonomske kriterije koristnosti odlagališčnega plina za pridobivanje energije.

Nastajanje odlagališčnega plina je posledica biološke razgradnje, v odlagališče vgrajenih organskih snovi. Odlagališče komunalnih odpadkov lahko pojmuje kot biokemični reaktor z biorazgradljivimi odpadki kot glavnim substratom. S sistemom zajetja odlagališčnega plina preprečimo nezaželeno uhajanje nastalega odlagališčnega plina v atmosfero, sočasno pa ga lahko uporabimo za proizvodnjo energije ali ga sežgemo in s tem preprečimo onesnaževanje ozračja s škodljivimi snovmi.

Zaradi vsebnosti metana je odlagališčni plin požarno nevaren, saj lahko pride do nevarnih požarov v notranjosti ali pa na površini odlagališča. V določenih mešanica z zrakom ($4,4$ – $15 \text{ vol}\%$) je metan tudi eksplozijsko nevaren¹².

Tehnologija izrabe energije temelji na sistemu zbiranja plinov, predobdelavi in tehnologiji proizvodnje energije, kar prikazuje Slika 4. Zbiranje plina poteka skozi vertikalne ali horizontalne vrtine, kar zavisi od tipa odlagališča, tehnik polnjenja odlagališča, nasutja odpadkov in nivoja vode. Plini se zbirajo skozi sistem preluknjanih cevi, ki so povezane v centralni cevovod. Razmik vrtin za optimalno zbiranje plinov zavisi od več faktorjev, med drugimi od stopnje nastajanja plina. Vrtine so običajno narazen med 20 in 50 metrov. Potreben je tudi sistem za odstranjevanje kondenzata, ker je temperatura plina nad okoliško temperaturo in je plin nasičen z vodno paro in hlapi organskih snovi. Ko se plin ohladi, vodna para kondenzira v vodo v ceveh, kar zmanjšuje uspešnost zbiranja plina in njegovega transporta. Kondenzacijski sistem uporablja za odstranitev vodne pare raztezne posode, ki vodno paro ohladijo, ta pa nato kondenzira. Filtri, ki so prisotni, odstranijo fine drobce materiala iz toka plina. Plin se nato stisne in po možnosti predobdelava, če je zahtevana visoka stopnja čistosti, na primer da se odstranijo plini, ki povzročajo korozijo. Taka predobdelava lahko vključuje nadaljnjo filtracijo, hlajenje plinov zaradi kondenzacije določenih komponent, absorpcijo in adsorpcijo ter druge čistilne tehnike, kot na primer membrane in molekulska sita za odstranitev snovi v sledovih^{13a, b}.



Slika 4: Shematski prikaz zbiranja in uporabe odlagališčnega plina^{13a}

V veliko primerih se odlagališčni plin sežge brez energetskega pokrivanja, da se uniči metan in organska mikro onesnaževala.

Alternativo h sežiganju odlagališčnega plina predstavlja soproizvodnja električne energije. Obstajajo trije režimi običajne uporabe odlagališčnega plina:

- sežig odlagališčnega plina na bakli
- soproizvodnja električne energije na plinskem motorju
- sežig na bakli in soproizvodnja električne energije na plinskem motorju

V začetnem obdobju odplinjanja se zajeti odlagališčni plin običajno sežge na bakli. Po stabilnem delovanju odplinjevalnega sistema pa je možno odlagališčni plin koristiti tudi za druge namene.

Alternativo h klasičnemu odlaganju odpadkov predstavlja bioplinarna in anaerobna predelava odpadkov.

2.5 Alternativni postopki – možnost ločenega zbiranja z bioplinarno

Nastanek bioplina

Anaerobna razgradnja organskih snovi poteka v štirih fazah, kot prikazuje Slika 5. Te faze so opisane v nadaljevanju.

Hidroliza – razgradnja velikih molekul. V tej fazi mikroorganizmi razgrajujejo celulozo, beljakovine in maščobe, prisotne v organskih odpadkih. Prisotni mikroorganizmi so fakultativni anaerobi, lahko preživijo z ali brez prisotnosti kisika.

Acidogeneza – kislinska faza – razgradnja beljakovin, maščob, ogljikovih hidratov v sladkorje, ki se nato razgradijo v CO_2 , H_2 , NH_3 , etanol in hlapne maščobne kisline. Koncentracija plina v tej fazi lahko doseže do 80 % ogljikovega dioksida in 20 % vodika.

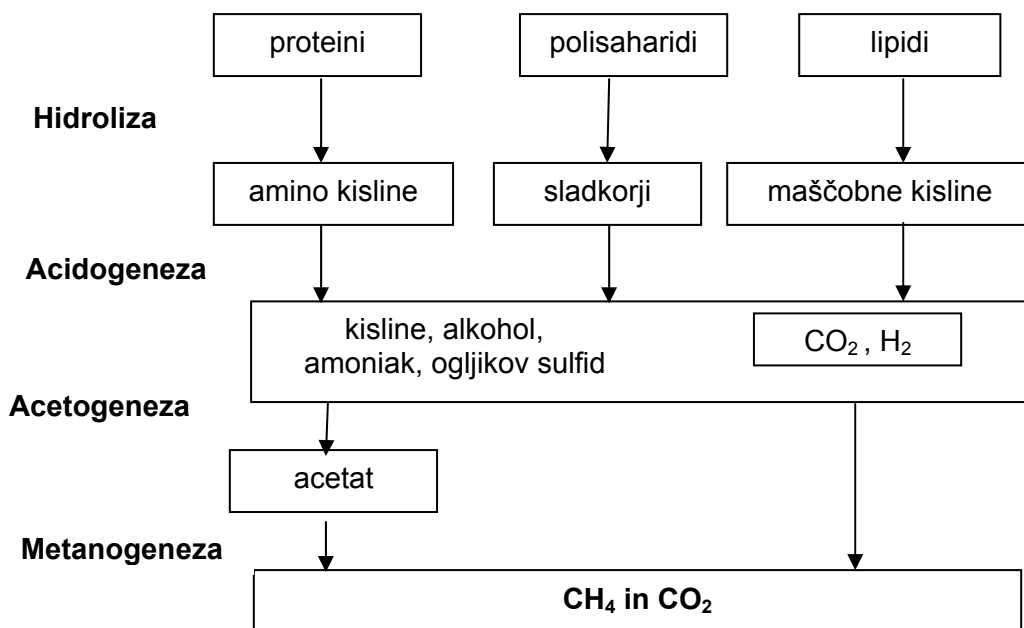
Acetogeneza – v tej fazi se organske kisline pretvorijo s pomočjo acetogenih mikroorganizmov v acetat, CO_2 in H_2 . Količine slednjih dveh se pričnejo zmanjševati.

Metanska faza – nadaljnja razgradnja z bakterijami v bioplin. Nizke koncentracije H_2 vzpodbudijo rast metanogenih bakterij, ki pretvorijo organske kisline in njihove derivate v CH_4 in CO_2 . V tej fazi sta prisotni dve vrsti mikroorganizmov glede na delovanje:

- acetotrofne bakterije
- hidrogenotrofne bakterije

Približno 70 % vsega metana se proizvede iz metilne skupine acetata, 30 % pa iz vodika in ogljikovega dioksida. Sestava nastalega bioplina znaša v povprečju približno 60 % metana in 40 % CO_2 . Idealni pogoji za anaerobno razgradnjo potekajo pri pH vrednosti od 6,8–7,5^{14a, b, c}.

Nastal bioplin ima kalorično vrednost^{14c} od 20 do 25 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

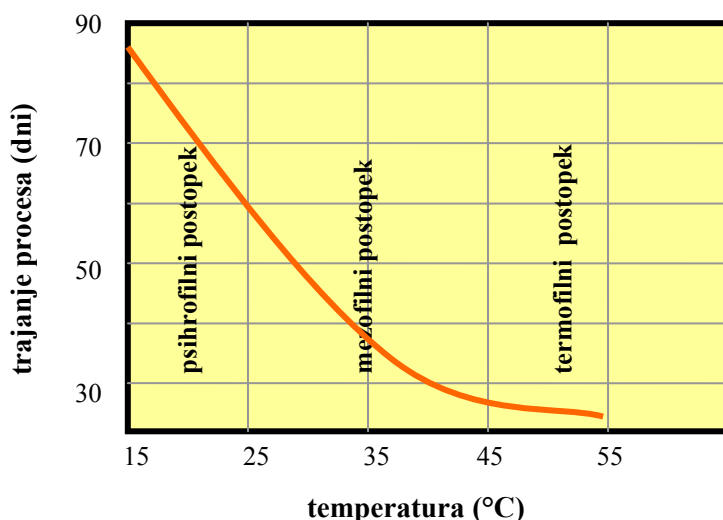


Slika 5: Shema štiristopenjskega procesa anaerobne razgradnje¹⁵

Razlikujemo tri vrste procesov v odvisnosti od temperature, ki jih prikazuje Slika 6.

- psihrofilni,
- mezofilni in
- termofilni proces.

Termofilni proces je najhitrejši, razgradnja pa najpopolnejša (med 75 in 85 %)¹⁶.



Slika 6: Trajanje anaerobnega procesa v odvisnosti od temperature¹⁶

Surovine

Bioplin lahko pridobimo skoraj iz vseh organskih materialov, ki vsebujejo zadosten delež ogljika in optimalno razmerje med deležem ogljika in dušika. Bakterije namreč porabljajo tako ogljik (iz ogljikovih hidratov) kot tudi dušik (iz proteinov). Pri tem ogljik porabljajo mnogo hitreje kot dušik. Če je ogljika preveč v primerjavi z dušikom, se ta porabi prej in nekaj ogljika (ta tvori metan) ostaja. Če pa je ogljika premalo, se preostali dušik veže v amoniak in proces se upočasni. Primerne organske snovi z razmerjem ogljika in dušika blizu idealni vrednosti so:

- fekalije domačih živali in ljudi,
- poljedelski odpadki (listje, žitni ostanki, ostanki pri pridelavi sadja in zelenjave),
- gojena biomasa (vodna kreša, vodni bršljan, alge) in
- ločeno zbrani biorazgradljivi komunalni odpadki¹⁶.

Količino sproščenega bioplina za rastlinske odpadke prikazuje Tabela 2.

Tabela 2: Količina sproščenega bioplina za rastlinske odpadke¹⁶

Vrsta odpadka	Suha snov (kg·kg ⁻¹)	Delež dušika (%)	Razmerje C:N	Bioplin (m ³ ·kg ⁻¹)
žitarice	1,0	0,7–1,1	150 : 1	0,2–0,3
trava	0,25	4	20 : 1	0,3–0,5
sadje	0,2	2,5–4,0	11 : 1	0,3–0,4
krompir	0,075	1,5	25 : 1	0,3–0,5
koruza	1,0	0,8	50 : 1	0,3–0,4
alge	0,12	1,9	100 : 1	0,4–0,5

Po končanem procesu pridobimo iz tone suhih odpadkov poleg bioplina tudi okoli 300 kg trdnega gnojila. Pri anaerobni razgradnji se glavni problemi pojavljajo zaradi

izločanja strupenega H₂S. Emisije plinov iz bioplinarne prav tako povzročajo neprijetne vonjave, kar se lahko omili z dobro zasnovano bioplinarne¹⁶.

Tabela 3 prikazuje potencial nastanka metana iz biorazgradljivih komunalnih odpadkov in druge parametre, ki izhajajo iz raziskav proučevanja anaerobne razgradnje komunalnih odpadkov¹⁷. Vzorci od 1–4 so mehansko sortirani vzorci, vzorec 5 pa ločeno zbrani organski odpadki.

Tabela 3: *Potencial proizvodnje metana in drugi parametri komunalnih odpadkov¹⁷*

Vzorec	Velikost delcev	CH ₄ potencial (m ³ ·kg ⁻¹)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (%)	razmerje C:N
1	> 100 mm	0,155	70,0	29,9	0,09	23,9 : 1
2	40–100 mm	0,093	68,1	31,8	0,10	19,7 : 1
3	10–40 mm	0,088	63,1	36,7	0,17	15,7 : 1
4	< 10 mm	0,030	42,7	57,2	0,14	16,2 : 1
5	delci raznih velikosti	0,084	71,6	28,3	0,09	17,0 : 1

V nadaljevanju je predstavljen Center za ravnanje z odpadki Nova Gorica in tehnologija za zajetje ter zgorevanje odlagališnega plina, prisotna na odlagališču.

3 PRAKTIČNI DEL

3.1 Center za ravnanje z odpadki Nova Gorica

CERO Nova Gorica je uvrščen med odlagališča nenevarnih odpadkov. Odlagališče je nastalo v 70. letih minulega stoletja. Trenutno število priključenih prebivalcev na center znaša 58000. Celotni volumen odlagališča je 3.105.000 m³. Volumen odloženih odpadkov je 1.282.500 m³. Odlagališče naj bi prenehalo z obratovanjem glede na sedanjo dinamiko leta 2045.

Območje centra meri okoli 30 ha in ga lahko razvrstimo v tri sklope površin:

- 17 ha tvori telo odlagališča in je namenjeno aktivnemu odlaganju nenevarnih odpadkov,
- 3 ha so površine, namenjene dolgoročnemu razvoju ravnanja z odpadki. Tu imamo v mislih površine za uporabo v prihodnosti razvitih načinov in tehnologij ravnanja z odpadki,
- 10 ha leži v varovalnem oziroma vplivnem območju¹⁸.

3.1.1 Tehnologija za zajem plina

Za preprečevanje neprijetnega vonja in varnosti odlagališča (požarne in eksplozijske) se odlagališče prisilno odplinja. Odlagališčni plin v telesu odlagališča ne sme ustvarjati nadtlaka, ker je v tem primeru uhajanje plina nekontrolirano. Za varnost pride zato v poštev le prisilno odsesavanje plina s plinsko sesalno črpalko, s katero ustvarjamo v telesu odlagališča podtlak.

Za zajem odlagališčnega plina je nameščena sesalna mreža s 17 odplinjaki (razporejenimi na 5 ha površine odlagališča) in plinska črpalka z baklo, kar zagotavlja podtlak v telesu odlagališča s sočasnim zajetjem 400 Nm³·h⁻¹ odlagališčnega plina, ki je voden na sežig z baklo¹⁹.

Slika 7 prikazuje razporeditev in povezavo odplinjakov na odlagališču. Odplinjaki so vrtine premera 80 cm do višine 1 m nad površjem. V izvrtan odplinjak je vgrajena vertikalna preluknjana PEHD (polyethylene high density oziroma polietilen visoke gostote) plinska cev, ki je obsuta s prodrom. Na te vertikalne preluknjane plinske cevi so v zaprtem delu odlagališča postavljene PEHD plinske sonde, na aktivnem delu odlagališča pa jeklene plinske sonde, ki omogočajo nadaljnjo izgradnjo odplinjakov. PEHD plinske sonde so z vkopanimi plinskimi cevmi povezane s plinsko črpalko, medtem ko je povezava jeklenih plinskih sond provizorična in prostoizračna, tako da je možno povezave odmikati v območju vgrajevanja odpadkov.



Slika 7: Sesalna mreža z odplinjaki¹⁹

V osrednjem in vzhodnem delu je nameščenih 17 PEHD plinskih sond, ki so v štirih vejah povezane z zbirnim kolektorjem plinske črpalke. Preostalih 5 sond je jeklenih na zahodnem aktivnem delu odlagališča. Pred priklopom vej na zbirni kolektor je v vsako vejo vgrajen kondenzni lonec za izločanje kondenza. Kondenzni lonci morajo biti do višine iztoka kondenza obsuti s prodom, da je zagotovljeno odtekanje kondenzata. Izločeni kondenzat se vrača v telo odlagališča.

Plinska sonda ima regulacijski ventil za pripranje sesanja plina in nastavka s čepom. En nastavek je za merjenje vsebnosti metana, drugi pa za zalivanje sonde. Čim večja je količina metana, bolj je ventil odprt. V suhih odlagališčih je izločanje kondenzata manjše, zato je potrebno vršiti kontrolo, ali je spodnji del plinske sonde zalit z vodo. Če je vode premalo, se običajno pokaže tudi pri merjenju plina, da je kvaliteta slaba, saj sesamo plin pod površjem in z njim tudi zrak, zato je treba sondo zaliti¹⁹.

3.1.2 Plinska črpalka z baklo

Za prisilni zajem odlagališčnega plina iz odlagališčnega telesa je potrebna plinska črpalka, ki ima prigrajeno visoko temperaturno baklo za sežig odlagališčnega plina. Povprečna zajeta količina odlagališčnega plina je $170 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, ki pa bo lahko z rastjo odlagališča tudi naraščala. Karakteristike plinske črpalke z baklo prikazuje Tabela 4.

Tabela 4: Karakteristike plinske črpalke z baklo⁶

Kapaciteta črpalke	$\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	max 600 min 125
Temperatura plina na vstopu	°C	max 30
Diferenčni tlak črpalke	mbar	250
Sesalni podtlak	mbar	max 60
Tlak za izrabo plina	mbar	140
Nazivna moč elektromotorja	kW	11
Zmogljivost bakle	$\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	max 600 min 125
Zmogljivost sežiga	kW	max 3000 min 600
Količina metana	vol %	30–50
Temperatura zgorevanja	°C	1000–1200

Slika 8 prikazuje baklo za sežig plina, ki je nameščena na odlagališču. Lokacija plinske črpalke z baklo je 30 m JV od cisterne za nafto za kompaktor, od transportnih poti je odmaknjena. Tu je zgrajen plato, na katerem je ograjen prostor velikosti 5x10 m. V ograjenem prostoru je zgrajena armirano betonska plošča velikosti 5x2,6 m. Na tej plošči je pritrjena mobilna plinska črpalka z baklo. Ograja je iz aluminija višine 2 m. Z ograjo je preprečen vstop nezaposlenim in živalim⁶.



Slika 8: Bakla za sežig odlagališčnega plina (foto: Ivana Likar)

V nadaljevanju smo predstavili metode izračuna potencialne količine metana, ki se lahko pridobi iz odpadkov, zbranih v CERO. Osnovno orodje našega izračuna je matematični model LandGEM, s katerim smo izračunali količine nastalega metana v odlagališčnem plinu. Primerjalno smo uporabili izračun, podan z Uredbo, ki smo ga opravili vzporedno, da preverimo rezultate, dobljene z matematičnim modelom LandGEM. Predstavljene so tudi metode izvajanja meritev odlagališčnega plina in potek meritev na odlagališču.

V nadaljevanju smo uporabili naslednje izraze:

- nastali metan – količina vsega nastalega metana na odlagališču ali v bioplinarni
- zajeti metan – to je metan, ki se ga zajame s pomočjo zbirnega sistema na odlagališču
- emisija metana – količina metana, ki je ne zajamemo in se sprosti v atmosfero

3.2 Izračun količin metana v odlagališčnem plinu z matematičnim modelom LandGEM

The Landfill Gas Emission Model (LandGEM) je matematični model v obliki računalniškega programa, s pomočjo katerega lahko ocenimo količino vseh nastalih odlagališčnih plinov, kot so metan, ogljikov dioksid in nemetanske organske spojine. Računalniški program je razvil tehnološki center Agencije za zaščito okolja v ZDA (Control Technology Center »CTC« of the U.S. Environmental Protection Agency). Program z navodili za njegovo uporabo se lahko naloži iz TTNWeb^{20,21}.

3.2.1 Enačba prve stopnje razkroja

Matematični model uporablja za osnovo enačbo prve stopnje razkroja, ki se glasi:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

kjer je:

- Q_{CH_4} – nastanek metana v času t [$m^3 \cdot \text{leto}^{-1}$ ali $t \cdot \text{leto}^{-1}$]
- $i = 1$ leto – čas porasta [leto]
- n – leto izračuna
- $j = 0,1$ leta – čas porasta [leto]
- k – koeficient hitrosti nastanka metana [leto^{-1}]
- L_0 – potencialna zmogljivost nastanka metana [$m^3 \cdot t^{-1}$]
- M_i – masa sprejetih odpadkov v i -tem letu [t]
- t_{ij} – leto j -tega dela mase odpadkov M_i sprejete v i -tem letu (decimalna leta na primer: 3,2 leta)²¹

3.2.2 Parametri modela

LandGEM uporablja naslednje podatke:

- Specifične podatke za določeno odlagališče.
- CAA set privzetih vrednosti – vrednosti, določene s Clean Air Act (CAA)²². CAA vrednosti nam določajo pričakovane maksimalne količine plinov in se nanašajo na zakonodajo o uporabi odlagališč v ZDA. Ta set vrednosti se uporablja predvsem za določanje uporabnosti predpisov na odlagališču. V nadaljevanju so ti parametri tudi opisani.
- AP-42 privzet set vrednosti se uporablja ob pomanjkanju podatkov za specifično odlagališče. Predstavlja povprečje količin nastalih plinov na odlagališčih v ZDA, ki jih je izdala U.S. Environmental Protection Agency v publikaciji »Compilation of Air Pollutant Emission Factors Ap-42« na podlagi opravljenih meritev po številnih odlagališčih. Popisane privzete vrednosti predstavljajo povprečne količine, priporočene za uporabo v modelu.

Začetno sestavo odlagališčnega plina v modelu predstavlja 50 % volumski delež metana in 50 % ogljikovega dioksida, ki ju lahko poljubno spremenimo, in tudi dodamo morebitne manjše koncentracije ostalih onesnaževal.

Za ocenitev količin nastalega odlagališnega plina iz odlagališča potrebujemo naslednje podatke:

- količino odpadkov, ki jo odlagališče namerava sprejeti
- količino do sedaj odloženih odpadkov ali pa podatek o letni količini odloženih odpadkov
- koeficient hitrosti nastanka metana (k)
- potencialno zmogljivost nastanka metana (L_0)
- leta obratovanja odlagališča
- podatek, ali se je na odlagališče odlagalo nevarne odpadke

Koeficient hitrosti nastanka metana k , višji kot je k , hitreje metan nastaja. Vrednost k je funkcija vsebnosti vlage v odpadkih, razpoložljivosti nutrientov v odpadkih, ki so potrebni za metanogenez, pH in temperature. Vrednost k se lahko giblje od $0,003$ do $0,21 \cdot \text{leto}^{-1}$. Privzeta vrednost modela je $0,05 \cdot \text{leto}^{-1}$ za CAA set podatkov.

Potencialna zmogljivost nastanka metana L_0 je odvisna od sestave komunalnih odpadkov. Višja kot je vsebnost celuloze in organskih odpadkov, višji je L_0 . Parameter L_0 se giblje od vrednosti $6,2$ do $270 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ odpadkov. Privzeta vrednost modela je $170 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ odpadkov za CAA set vrednosti.

Določitev ogljikovega dioksida

Matematični model uporablja za osnovo enačbo prve stopnje razkroja in ugotavlja letni nastanek posameznih plinov v obdobju, ki ga definiramo. Za določitev količine ogljikovega dioksida upoštevamo meritve volumskih deležev plina na odlagališču in iz celotne količine nastalega odlagališnega plina tako izračunamo količino ogljikovega dioksida.

Atmosferska onesnaževala in nemetanske organske spojine

Odlagališčni plin vsebuje nizke koncentracije onesnaževal, ki izhajajo iz izcednih vod in nastajajo pri razkroju odpadkov. Model nam lahko izračuna količine posameznih onesnaževal, če se za to odločimo. Količine onesnaževal temeljijo na koncentraciji zračnih onesnaževal v odlagališčnem plinu. Model vsebuje privzete vrednosti koncentracij zračnih onesnaževal, lahko pa jih tudi določimo sami na osnovi pridobljenih podatkov na odlagališču. Koncentracije onesnaževal so privzete po AP-42. Privzeta onesnaževala, vključena v model, so označena kot nevarna onesnaževala zraka (NO) oziroma angleško »hazardous air pollutant (HAP)« ali hitro hlapljive organske snovi (HOS) oziroma angleško »volatile organic compound (VOC)«. Koncentracija nemetanskih organskih spojin v odlagališčnem plinu je funkcija vrste odpadkov na odlagališču in hitrosti reakcij, ki proizvajajo različne spojine vsled anaerobne razgradnje odpadkov. Koncentracije ostalih organskih spojin so pridobljene iz podatkov testov v industriji in raznih agencijah. Program uporablja privzete vrednosti koncentracij, in sicer CAA ter AP-42, glede na to, ali je odlagališče z nevarnimi odpadki ali ne. Za točno določene vrednosti koncentracij na specifičnem odlagališču se opravijo meritve²¹.

Osnovno orodje našega izračuna je matematični model LandGEM, s katerim smo v nadaljevanju izračunali količine nastalega metana v odlagališčnem plinu. Primerjalno smo izračunali količine metana v odlagališčnem plinu z Uredbo, da preverimo rezultate, dobljene z matematičnim modelom LandGEM.

3.3 Izračun količin metana v odlagališčnem plinu z Uredbo

Nastanek letne količine metana iz odlagališča se v odvisnosti od stopnje razgradljivosti odpadkov izračuna na podlagi mase odloženih odpadkov v koledarskem letu, izražene v kg, na naslednji način:

$$S_{p,y} = Q_y * DOC * DOCF * F * k * A * e^{(-k*dt)} \quad (2)$$

kjer je:

- $S_{p,y}$ – letna količina nastalega metana v letu P, [kg],
- Q_y – celotna količina odloženih odpadkov v letu Y, [kg],
- DOC (degradable organic carbon) – delež razgradljivega organskega ogljika v odpadkih,
- DOCF – delež organskega ogljika v odpadkih, ki se pretvori v toplogredne pline,
- F – volumski delež metana v odlagališčnem plinu,
- k – letna stopnja razgradnje odpadkov,
- dt – čas od odložitve odpadkov v letu Y do njihove razgradnje v letu P (P-Y), izražen v letih, in
- A – normalizacijska konstanta, izračunana na podlagi časa, v katerem se vsi biorazgradljivi odpadki razgradijo (za razgradnjo v 50 letih pri $k = 0,05$ je $A = 1,3$).

Delež razgradljivega organskega ogljika (DOC) v odpadkih se izraža kot količnik med maso razgradljivega organskega ogljika v odloženih odpadkih in celotno maso odloženih odpadkov. DOC v odpadkih se izračuna na naslednji način:

$$DOC = 0,4 * A + 0,17 * B + 0,15 * C + 0,30 * D \quad (3)$$

kjer je:

- A – delež odpadnega papirja, lepenke in tekstila in je za leto 1995 enak 15 odstotkov mase nastalih komunalnih odpadkov,
- B – delež odpadkov iz zelene biomase in naravnega lesa, ki nastanejo kot odpadki z vrtov in parkov in kot odpadki pri predelavi rastlin, ki niso namenjene prehrani in je za leto 1995 enak 8 odstotkom mase nastalih komunalnih odpadkov,
- C – delež odpadne hrane in organskih odpadkov, ki nastanejo pri proizvodnji ali pripravi hrane, to so predvsem kuhinjski odpadki iz gospodinjstev, menz in restavracij, biorazgradljivi odpadki, ki nastajajo pri pripravi hrane rastlinskega izvora, in biorazgradljivi odpadki, ki nastanejo pri pripravi in predelavi mesa, rib in drugih živil živalskega izvora, in je za leto 1995 enak 32 odstotkom mase nastalih komunalnih odpadkov,
- D – delež odpadkov pri predelavi in obdelavi lesa in drugih odpadkov iz lesa, lubja in plute in je za leto 1995 enak 8 odstotkom mase nastalih komunalnih odpadkov.

Delež organskega ogljika, ki se pretvori v toplogredne pline (DOCF), se izraža kot količnik med maso razgradljivega organskega ogljika, ki se pretvori v toplogredne pline, in maso vsega razgradljivega organskega ogljika v odloženih odpadkih.

Delež metana (F) v odlagališčnem plinu se izraža kot količnik med prostornino metana v odlagališčnem plinu in prostornino vseh drugih plinov, ki nastanejo pri biorazgradnji odloženih odpadkov.

Če se delež organskega ogljika, ki se pretvori v toplogredne pline (DOCF), in delež metana (F) v odlagališčnem plinu posebej ne ugotavljata, se za izračun letne količine nastanka metana upoštevajo naslednje privzete vrednosti: DOCF = 0,55 in F = 0,50.

Letna stopnja razgradnje odpadkov (k) se izraža kot količnik med maso biorazgradljivih sestavin odpadkov, razgrajenih v enem letu, in celotno maso odloženih odpadkov. Če se letna stopnja razgradnje odpadkov (k) posebej ne ugotavlja, se za izračun nastanka letne količine metana upošteva naslednja privzeta vrednost: k = 0,05.

Skupna količina nastalega metana za posamezno obdobje se izračuna kot vsoto letnih količin nastalega metana od odprtja odlagališča na naslednji način:

$$S = \sum_{\Delta t=1}^{\Delta t=n} S_{p,y} \quad (4)$$

kjer je:

- $S_{p,y}$ – letna količina nastalega metana v letu P, [kg],
- Δt – čas od odložitve odpadkov v letu Y do njihove razgradnje v letu P, izražen v letih, pri tem je upoštevano, kot da v prvem letu odlaganja odpadkov ni nastanka metana ($\Delta t = 1$), [let]
- n – leto nastanka $S_{p,y}$ [let]

Količine nastalega metana v prvem letu ne moremo izračunati, ker se v izračunu upoštevajo letne količine odpadkov in zato v prvem letu obratovanja odlagališča ni rezultatov izračuna³.

3.4 Izračun učinkovitosti zbirnega sistema

Učinkovitost zbirnega sistema na odlagališču se izračuna po naslednji enačbi⁵:

$$\eta_{zs} = \frac{Z_{odl.plin}}{N_{odl.plin}} * 100 \quad (5)$$

kjer je:

- η_{zs} [%] – učinkovitost zajema odlagališčnega plina
- $Z_{odl.plina}$ – zajeti odlagališčni plin
- $N_{odl.plina}$ – celotna količina nastalega odlagališčnega plina

3.5 Izračun volumna metana z uporabo plinske enačbe

Matematični model LandGEM nam poda količine plinov v t·leto⁻¹ ali m³·leto⁻¹, izračun s pomočjo Uredbe³ pa samo v t·leto⁻¹. Zato potrebujemo splošno plinsko enačbo, s katero lahko iz t·leto⁻¹ izračunamo m³·leto⁻¹. Enačba se glasi²³:

$$p * V = \frac{m}{M} * R * T \quad (6)$$

kjer je:

- p – tlak plina, ki pri standardnih pogojih znaša $1,01 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ [N·m⁻²]
- V – prostornina snovi [m³]
- m – masa snovi [kg]
- M – molska masa [g·mol⁻¹]
- R – splošna plinska konstanta, ki znaša $8314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ [J·K⁻¹]
- T – temperatura; pri normalnih pogojih znaša 273 K [K]

3.6 Izračun potencialne toplotne moči metana

Potencialno toplotno moč metana izračunamo na sledeči način:

$$P = \dot{V}_{CH_4} * H_{CH_4} \quad (7)$$

kjer je:

- P – toplotna moč metana [kW]
- \dot{V}_{CH_4} – volumski pretok zajetega metana [m³·s⁻¹]
- H_{CH_4} – kurilnost metana²⁴, ki pri normalnih pogojih znaša 35,883 [MJ·m⁻³]

3.7 Izračun količin nastalega bioplina iz biorazgradljivih odpadkov

Potencialno količino metana, nastalega iz biorazgradljivih odpadkov v bioplinarni, izračunamo na sledeči način:

$$V_{CH_4} = m_{bio} * CH_{4pot} \quad (8)$$

kjer je:

- V_{CH_4} – potencialna količina (volumen) metana [m³]
- m_{bio} – masa biorazgradljivih odpadkov [kg]
- CH_{4pot} – metanski potencial biorazgradljivih odpadkov¹⁷ = 0,084 [m³·kg⁻¹]

3.8 Količine biorazgradljivih odpadkov, ki se lahko odložijo na odlagališča

Trdni komunalni odpadki vsebujejo 63 % organskih snovi. Direktiva EU o odlaganju odpadkov na odlagališčih (Direktiva Sveta 1999/31/ES)²⁵ postavlja stroge cilje za zmanjšanje količine biorazgradljivih komunalnih odpadkov, ki se lahko odložijo na odlagališča. Ključni ukrepi za doseganje tega cilja so: ločevanje na mestu nastanka, ločeno zbiranje in omejitve ter prepoved odlaganja.

Uredba o spremembah in dopolnitvah Uredbe o odlaganju odpadkov na odlagališčih s Prilogo 4 predvideva od leta 2001 postopno zmanjševanje biorazgradljivih odpadkov v

odloženih komunalnih odpadkih. Tabela 5 prikazuje predvideno zmanjševanje deležev biorazgradljivih organskih odpadkov.

Tabela 5: Količine biorazgradljivih odpadkov, ki se lahko odložijo na odlagališča³

Obdobje	Zmanjšanje letne količine odloženih biorazgradljivih komunalnih odpadkov, izraženo z zmanjšanjem odstotka biorazgradljivih komunalnih odpadkov (%)	Letna količina biorazgradljivih snovi v komunalnih odpadkih, izražena v odstotku mase komunalnih odpadkov (%)
2000	0	63
2001	5	60
2002	5	57
2003	5	54
2004	5	50
2005	5	47
2006	5	44
2007	10	38
2008	10	32
do konca 2012	5	28
do konca 2016	5	25
do konca 2019	5	22

Stanje na odlagališču CERO danes in scenariji ukrepanja

V CERO znaša delež biorazgradljivih snovi v komunalnih odpadkih 63 %⁶. Na obravnavanem odlagališču se delež odloženih biorazgradljivih odpadkov do leta 2009 še ne zmanjšuje. Ker so v CERO po Uredbi dolžni do leta 2019 zmanjšati količino biorazgradljivih odpadkov, smo predvideli tri možne scenarije po katerih bi lahko zmanjševali biorazgradljive odpadke v odloženih komunalnih odpadkih in tako dosegli in presegli zakonsko predpisane kriterije. V nadaljevanju so ti scenariji podani.

Scenarij 1

Scenarij 1 predvideva, da se bo leta 2010 delež biorazgradljivih odpadkov pričel radikalno zniževati za 10 % na leto. To pomeni, da bomo do leta 2019 dosegli delež, določen z Uredbo, ki znaša 22 % biorazgradljivih odpadkov na celotno maso komunalnih odpadkov in s tem zmanjšali tudi količino odloženih odpadkov na odlagališče. Od leta 2019 naprej do leta 2045 se ta delež ne bo spreminjal in je konstanten.

Scenarij 2

Scenarij 2 predvideva, da se bo leta 2010 delež biorazgradljivih odpadkov pričel radikalno zniževati za 10 % na leto. To pomeni, da bomo do leta 2019 dosegli delež, določen z Uredbo, ki znaša 22 % biorazgradljivih odpadkov na celotno maso komunalnih odpadkov in s tem zmanjšali tudi količino odloženih odpadkov na odlagališče. Od leta 2019 naprej smo predvideli, da se bo delež biorazgradljivih odpadkov vsako leto zniževal za 5 % in tako prišel do leta 2045 na 6 % biorazgradljivih odpadkov na celotno količino odloženih komunalnih odpadkov.

Scenarij 3

Scenarij 3 predvideva, da se bo leta 2010 delež biorazgradljivih odpadkov pričel radikalno zniževati za 10 % na leto. To pomeni, da bomo do leta 2019 dosegli delež, določen z Uredbo, ki znaša 22 % biorazgradljivih odpadkov na celotno maso komunalnih odpadkov in s tem zmanjšali tudi količino odloženih odpadkov na odlagališče. Od leta 2019 naprej smo predvideli, da se bo delež biorazgradljivih odpadkov vsako leto zniževal še naprej za 10 % in tako prišel do leta 2034 na 5 %. Od tega leta naprej bo delež biorazgradljivih odpadkov v komunalnih odpadkih konstanten, saj se biorazgradljive odpadke težko popolnoma izloči iz komunalnih odpadkov.

3.9 Meritve na odlagališču

Na odlagališču smo opravili meritve volumskih deležev CH₄, CO₂, H₂S, H₂ in O₂ ter volumskega pretoka odlagališčnega plina z namenom, da bomo na podlagi rezultatov teh meritev določili zmes plinov v odlagališčnem plinu. Te rezultate smo uporabili v izračunu količine metana v nastalem odlagališčnem plinu. Prav tako smo s pomočjo teh rezultatov ocenili učinkovitost zbirnega sistema v telesu odlagališča.

3.9.1 Metode izvajanja meritev in merilna tehnika

Meritve smo opravljali z napravo, namenjeno za meritve odlagališčnega plina, in sicer z instrumentom Landfill gas analyzer GA 2000, proizvajalca Geotechnical instruments, katerega glavne karakteristike merjenih veličin prikazuje Tabela 6.

Tabela 6: Glavne karakteristike merjenih veličin²⁶

veličina	oznaka	merilno načelo	merilno območje	enota
volumski delež metana	CH ₄	IR absorpcijska spektroskopija s selektivno valovno dolžino	0–100	%
volumski delež ogljikovega dioksida	CO ₂	IR absorpcijska spektroskopija s selektivno valovno dolžino	0–100	%
volumski delež kisika	O ₂	elektrokemična celica	0–25	%
volumski delež vodikovega sulfida	H ₂ S	elektrokemična celica	0–200	μl·l ⁻¹
volumski delež vodika	H ₂	elektrokemična celica	0–1000	μl·l ⁻¹

Rezultate meritev dobimo neposredno med meritvami samimi.

3.9.2 Potek meritev

Meritve so potekale vsak mesec v letu 2008 na odlagališču v neposredni bližini bakle za sežig plina na posameznih linijah zbirnega sistema. Zbirni sistem obsega štiri linije, v vsako izmed njih pa je speljano določeno število vodov, kot prikazuje Slika 7 v poglavju 3.1.1. Na vsaki liniji zbirnega sistema smo opravili po tri meritve. Nato smo

izračunali povprečne vrednosti volumskih deležev za posamezno komponento v odlagališčnem plinu. Slika 9 prikazuje štiri veje zbirnega sistema, Slika 10 pa Instrument za merjenje odlagališčnega plina.



Slika 9: Štiri veje zbirnega sistema (foto: Ivana Likar)



Slika 10: Instrument za merjenje odlagališčnega plina (foto: Ivana Likar)

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

V tem poglavju so podani rezultati meritev odlagališnega plina, izračuni količin nastalega in zajetega metana v odlagališčnem plinu z matematičnim modelom LandGEM in izračuni, dobljeni s pomočjo Uredbe. Izračunali smo tudi potencialno količino metana v bioplinu, ki bi jo dobili v primeru postavitve bioplinarne. Iz izračunane količine nastalega metana smo po različnih scenarijih določili potencialno toplotno moč metana in za vsak scenarij izbrali ustrezen kogeneracijski modul.

4.1 Rezultati meritev

Tabela 7 nam prikazuje rezultate opravljenih meritev, ki so potekale leta 2008 na odlagališču CERO.

Tabela 7: Izmerjeni volumski deleži metana (%) za leto 2008

CH ₄ (%)	Linija 1	Linija 2	Linija 3	Linija 4	Skupni vod
januar	52,8	46,8	56,7	61,0	47,1
februar	53,3	43,6	51,8	59,4	46,9
marec	65,4	60,8	53,9	55,1	61,2
april	20,4	54,0	46,4	42,7	44,5
maj	34,7	56,9	32,9	45,6	43,6
junij	47,8	34,5	26,2	38,4	44,7
julij	42,7	57,0	23,3	43,6	43,9
avgust	33,5	53,7	30,8	52,6	38,2
september	23,1	45,3	60,4	40,4	46,4
oktober	26,0	35,6	49,8	48,3	42,6
november	30,4	32,4	49,3	31,1	47,2
december	28,4	18,5	12,4	43,0	41,5
povprečna vrednost	38,2	46,3	41,2	46,8	45,7

Iz Tabele 7 je razvidno, da je povprečna volumska vrednost metana v odlagališčnem plinu za leto 2008 znašala 45,7 %. To vrednost smo uporabili v nadaljnjih izračunih.

Povprečni pretok plina na skupnem vodu je v letu 2008 znašal $170 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

V tabeli (Tabela 8) je podan primer opravljenih meritev za mesec avgust na odlagališču in dobljeni rezultati. Za ostale mesece so bile meritve opravljene na enak način.

Tabela 8: Izmerjeni volumski deleži posameznih komponent odlagališnega plina

merilno mesto	(CH ₄) [vol %]	(CO ₂) [vol %]	(O ₂) [vol %]	(H ₂ S) [µl·l ⁻¹]	(H ₂) [µl·l ⁻¹]
merilna negotovost	±7,6 %	±6,5 %	±1,6 %	±12,7 %	±64 %
linija 1					
1. meritev	33,0	25,5	5,0	1	21
2. meritev	33,5	25,5	5,0	1	24
3. meritev	33,6	25,5	4,9	1	27
pov.vrednost	33,5	25,5	5,0	1	24
linija 2					
1. meritev	53,7	33,8	1,0	10	76
2. meritev	53,7	33,7	1,0	11	78
3. meritev	53,8	33,7	1,0	10	76
pov.vrednost	53,7	33,7	1,0	10	77
linija 3					
1. meritev	30,7	22,7	8,1	8	63
2. meritev	30,9	22,8	8,1	8	64
3. meritev	30,8	22,8	8,1	7	63
pov.vrednost	30,8	22,8	8,1	8	63
linija 4					
1. meritev	52,0	28,5	5,7	14	35
2. meritev	52,6	28,6	5,7	14	35
3. meritev	53,2	28,6	5,7	13	35
pov.vrednost	52,6	28,6	5,7	14	35
skupni vod					
1. meritev	38,3	24,5	3,5	10	73
2. meritev	38,2	24,4	3,5	10	73
3. meritev	38,2	24,4	3,4	10	72
pov.vrednost	38,2	24,4	3,5	10	73

Ostali odlagališni plin je dušik N₂, v tabeli ni naveden, ker je inerten in se ga običajno ne podaja.

4.2 Rezultati izračuna količin nastalega metana z matematičnim modelom LandGEM

Po uspešno opravljenih meritvah na odlagališču smo z matematičnim modelom LandGEM izračunali količine nastalega metana v odlagališčnem plinu. Za model so potrebni podatki, ki jih prikazujeta Tabela 9 in Tabela 10.

Tabela 9: Lastnosti odlagališča

Lastnosti odlagališča	
Leto odprtja odlagališča	1975
Predvideno leto prenehanja obratovanja odlagališča	2045

Tabela 10: Parametri modela

Parametri modela	Enota	Količina
Koeficient hitrosti nastanka metana (k)	leto ⁻¹	0,05
Potencialna zmogljivost nastanka metana (L ₀)	m ³ ·t ⁻¹	75
Vsebnost metana	vol %	45,7

Koeficient hitrosti nastanka metana (k) – uporabili smo privzeto vrednost modela, ki je $0,05 \cdot \text{leto}^{-1}$ za CAA set podatkov.

Potencialno zmogljivost nastanka metana L_0 smo privzeli po meritvah, ki so bile opravljene na odlagališču, na katerem so se odlagali podobni odpadki – odlagališče Pobrežje v Mariboru, katere meritve so pokazale⁵, da je $L_0(CH_4) = 75$.

L_0 smo pri računanju različnih scenarijev zniževali za enak delež, kot smo v posameznem scenariju znižali delež biorazgradljivih odpadkov.

Vsebnost metana

Iz Tabele 7 je razvidno, da je povprečni volumski procent metana za leto 2008 znašal 45,7 %. Za izračun količine ogljikovega dioksida ali ostalih plinov v odlagališčnem plinu uporabimo rezultate meritev. Ker so v primerjavi z metanom in ogljikovim dioksidom ostali plini v majhnih količinah lahko prvi približek dobimo že, če upoštevamo razmerje med procentom metana in ogljikovega dioksida.

Količine odpadkov

V matematični model smo vnesli ocenjeno letno količino odpadkov na odlagališču CERO - 24000 ton⁶. Po podatkih CERO Nova Gorica znaša povprečni vnos komunalnih odpadkov brez različnih nekomunalnih odpadkov zadnjih 30 let 24000 ton. Ta količina ustreza količini celotne zmogljivosti odlagališča, ki znaša 1672547 ton, in obratovalnemu času, ki znaša 70 let. Na odlagališču CERO se komunalne odpadke odlaga po brežinah. Na obravnavanem odlagališču je trenutno 9 brežin. V spodnji tabeli (Tabela 11) so prikazana leta polnjenja brežin.

Tabela 11: Odlaganje odpadkov na brežine po letih¹⁹

Brežina	Leto odlaganja	Opombe
1	1975–1979	zapolnjena
2	1980–1983	zapolnjena
3	1984–1987	zapolnjena
4	1988–1991	zapolnjena
5	1992–1994	zapolnjena
6	1995–1998	zapolnjena
7	1999–2002	ni zapolnjena
8	2003–2006	ni zapolnjena
9	2007–2010	ni zapolnjena

Z matematičnim modelom LandGEM smo izračunali, koliko metana prispeva posamezna brežina v določenem letu. Postopek izračuna poteka na podoben način kot za celotno odlagališče, le da je v tem primeru potrebno obravnavati posamično brežino kot zaključeno celoto. Dobljene rezultate prikazuje Tabela 12. Količine nastalega metana smo izračunali do vključno leta 2009.

Tabela 12: Količine nastalega metana, proizvedene na leto po brežinah z uporabo matematičnega modela LandGEM

Leto	Brežina 1 CH ₄ (t)	Brežina 2 CH ₄ (t)	Brežina 3 CH ₄ (t)	Brežina 4 CH ₄ (t)	Brežina 5 CH ₄ (t)	Brežina 6 CH ₄ (t)	Brežina 7 CH ₄ (t)	Brežina 8 CH ₄ (t)	Brežina 9 CH ₄ (t)	Skupna količina CH ₄ (t)
1975	0,0									0,0
1976	58,7									58,7
1977	114,6									114,6
1978	167,7									167,7
1979	218,2									218,2
1980	266,3	0,0								266,3
1981	253,3	58,7								312,0
1982	241,0	114,6								355,5
1983	229,2	167,7								396,9
1984	218,0	218,2	0,0							436,2
1985	207,4	207,6	58,7							473,7
1986	197,3	197,5	114,6							509,3
1987	187,7	187,8	167,7							543,2
1988	178,5	178,7	218,2	0,0						575,4
1989	169,8	170,0	207,6	58,7						606,0
1990	161,5	161,7	197,5	114,6						635,2
1991	153,6	153,8	187,8	167,7						662,9
1992	146,1	146,3	178,7	218,2	0,0					689,3
1993	139,0	139,1	170,0	207,6	58,7					714,4
1994	132,2	132,4	161,7	197,5	114,6					738,3
1995	125,8	125,9	153,8	187,8	167,7	0,0				761,0
1996	119,7	119,8	146,3	178,7	159,5	58,7				782,6
1997	113,8	113,9	139,1	170,0	151,7	114,6				803,1
1998	108,3	108,4	132,4	161,7	144,3	167,7				822,7
1999	103,0	103,1	125,9	153,8	137,3	218,2	0,0			841,3
2000	98,0	98,1	119,8	146,3	130,6	207,6	58,7			859,0
2001	93,2	93,3	113,9	139,1	124,2	197,5	114,6			875,8
2002	88,6	88,7	108,4	132,4	118,2	187,8	167,7			891,8
2003	84,3	84,4	103,1	125,9	112,4	178,7	218,2	0,0		907,0
2004	80,2	80,3	98,1	119,8	106,9	170,0	207,6	58,7		921,5
2005	76,3	76,4	93,3	113,9	101,7	161,7	197,5	114,6		935,3
2006	72,6	72,6	88,7	108,4	96,7	153,8	187,8	167,7		948,4
2007	69,0	69,1	84,4	103,1	92,0	146,3	178,7	218,2	0,0	960,8
2008	65,7	65,7	80,3	98,1	87,5	139,1	170,0	207,6	58,7	972,7
2009	62,5	62,5	76,4	93,3	83,3	132,4	161,7	197,5	114,6	983,9

4.3 Izračun količin nastalega metana z Uredbo

Glede na to, da je matematični model LandGEM programiran za ameriška odlagališča, smo se odločili opraviti še primerjalni izračun količin nastalega metana na način, ki ga določa Uredba o spremembah in dopolnitvah Uredbe o odlaganju odpadkov na odlagališčih.

Za izračun količin metana $S_{P,Y}$ (letna količina nastalega metana v letu P, izražena v kg) smo upoštevali sledeče podatke:

- Q_Y – celotna količina odloženih odpadkov v letu Y, ki znaša 24000 ton;
- DOC (degradable organic carbon) – delež razgradljivega organskega ogljika v odpadkih, ki smo ga izračunali s pomočjo enačbe 3 in znaša 0,1456;
- DOCF – delež organskega ogljika v odpadkih, ki se pretvori v toplogredne pline in znaša po Uredbi 0,55;
- F – volumski delež metana v odlagališčnem plinu, ki smo ga določili s pomočjo meritev na odlagališču in znaša 45,7 %;
- k – letna stopnja razgradnje odpadkov, ki smo jo privzeli po Uredbi in znaša 0,05;
- dt – čas od odložitve odpadkov v letu Y do njihove razgradnje v letu P (P-Y), izražen v letih, in
- A – normalizacijska konstanta, izračunana na podlagi časa, v katerem se vse biorazgradljive sestavine odpadkov razgradijo (za razgradnjo v 50 letih pri k = 0,05 je $A = 1,3$)³.

S pomočjo enačbe 2 smo izračunali količino nastalega metana za količino odloženih odpadkov za vsako leto posebej in nato dobljene vrednosti sešteli in dobili skupno količino nastalega metana s pomočjo enačbe 4, katere končni rezultati so prikazani v Tabeli 13. Količine metana smo preračunali od odprtja odlagališča do leta 2009. Vzporedno s tem izračunom smo izračunali še količino nastalega metana z matematičnim modelom LandGEM za isto obdobje. Tabela 13 nam prikazuje dobljene rezultate.

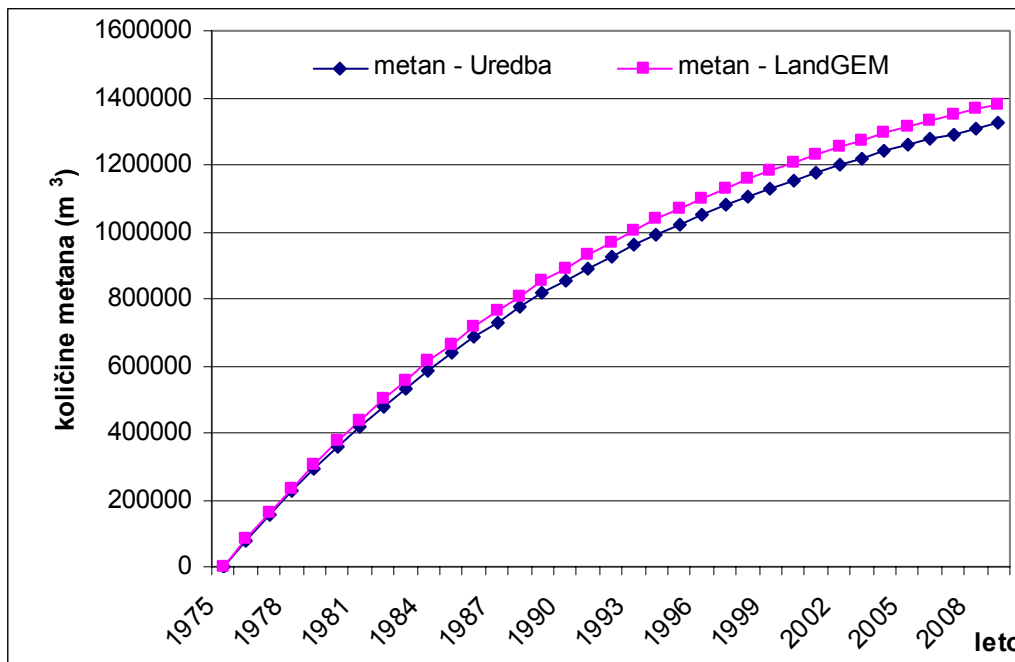
Tabela 13: Letne količine nastalega metana z uporabo matematičnega modela LandGEM in Uredbe

Leto	CH ₄ (t) LandGEM	CH ₄ (t) Uredba	Leto	CH ₄ (t) LandGEM	CH ₄ (t) Uredba
1975	0	0	1993	714,4	684,0
1976	58,7	56,2	1994	738,3	706,9
1977	114,6	109,7	1995	761,0	728,6
1978	167,7	160,6	1996	782,6	749,3
1979	218,2	208,9	1997	803,1	769,0
1980	266,3	255,0	1998	822,7	787,7
1981	312,0	298,7	1999	841,3	805,5
1982	355,5	340,4	2000	859,0	822,4
1983	396,9	380,0	2001	875,8	838,5
1984	436,2	417,7	2002	891,8	853,8
1985	473,7	453,5	2003	907,0	868,4
1986	509,3	487,6	2004	921,5	882,3
1987	543,2	520,1	2005	935,3	895,5
1988	575,4	550,9	2006	948,4	908,0
1989	606,0	580,3	2007	960,8	919,9
1990	635,2	608,2	2008	972,7	931,3
1991	662,9	634,7	2009	983,9	942,1
1992	689,3	660,0			

4.4 Primerjava količin nastalega metana v odlagališčnem plinu, računanih z matematičnim modelom LandGEM in z Uredbo

Slika 11 prikazuje razlike v izračunih količin nastalega metana v odlagališčnem plinu, izračunanih z matematičnim modelom LandGEM, v primerjavi z izračuni, dobljenimi s pomočjo Uredbe. Grafični podatki so prikazani v m³, ki smo jih iz ton preračunali s pomočjo enačbe 6. Upoštevali smo normalne pogoje.

Letne količine nastalega metana, izračunane s pomočjo matematičnega modela LandGEM za odložene odpadke, se bistveno ne razlikujejo z rezultati, dobljenimi z izračunom s pomočjo Uredbe, kar je razvidno tudi iz Slike 11. Z matematičnim modelom LandGEM smo izračunali 972,7 ton nastalega metana za leto 2008, po izračunu s pomočjo Uredbe pa 931,3 tone. Matematični model LandGEM torej poda za 4,3 % večje količine v primerjavi z izračuni, opravljenimi po Uredbi. Po dobljenih rezultatih lahko sklepamo, da matematični model LandGEM daje dobre in uporabne rezultate in je tako uporaben tudi za izračun nastalega metana za slovenska odlagališča. Nadaljnje izračune smo se zato odločili opraviti z matematičnim modelom LandGEM.



Slika 11: Primerjava rezultatov izračuna z matematičnim modelom LandGEM in z Uredbo

4.5 Izračun učinkovitosti zbirnega sistema odlagališnega plina

V Centru za ravnanje z odpadki Nova Gorica je kontroliran zajem odlagališnega plina in bakla za sežig odlagališnega plina pričela z obratovanjem konec leta 2007. Učinkovitost zajema odlagališnega plina smo izračunali za leto 2008.

Povprečni izmerjen pretok zajetega plina na skupnem vodu v letu 2008 znaša pri normalnih pogojih $170 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, to je letno 1489200 m^3 . Metana je v plinu v povprečju 45,7 %, kar znaša 680564 m^3 , oziroma $484,5 \text{ t} \cdot \text{leto}^{-1}$ metana. Iz Tabele 12 je razvidno, da je za leto 2008 po naših izračunih količina nastalega metana 972,7 t. Iz teh podatkov lahko izračunamo učinkovitost zajetja odlagališnega plina s pomočjo enačbe 5.

Učinkovitost zbirnega sistema odlagališnega plina η_{zs} na odlagališču komunalnih odpadkov CERO znaša 49,8 %, kar pomeni, da se skoraj polovica vsega nastalega odlagališnega plina zajame in tako zmanjša emisije metana v atmosfero. Za leto 2008 je emisija metana znašala 488,2 t.

Zbirni sistem na odlagališču po naši oceni deluje dobro, glede na to, da lahko razberemo iz literature, da je izkoristek zbirnega sistema običajno 50 % ali manj⁸. Za boljšo učinkovitost zbirnega sistema bi bilo smiselno odplinjake postaviti v rastru 20–30 m in jih tako zblížati, saj trenutno en odplinjak⁶ prekriva radij 45 m.

V nadaljevanju smo z matematičnim modelom LandGEM izračunali količine nastalega metana za predvidene scenarije.

4.6 Predvideni scenariji odlaganja odpadkov in izračun količin nastalega metana

Tabela 14 nam prikazuje vhodne podatke, ki smo jih uporabili za naš izračun za vsak scenarij posebej. Pri tem smo upoštevali zmanjšanje deleža količine odloženih biorazgradljivih komunalnih odpadkov po scenarijih, kot je opisano v poglavju 3.8. Hkrati z nižanjem deleža biorazgradljivih odpadkov smo linearno zniževali tudi potencialno zmogljivost nastanka metana (L_0) v odlagališču, ker se ta prav tako niža z manjšanjem deleža biorazgradljivih odpadkov.

Tabela 14: Uporabljeni parametri za določen scenarij

Leto	Scenarij 1			Scenarij 2			Scenarij 3		
	Delež B.R.O* (%)	Količina odpadkov (t)	L_0	Delež B.R.O* (%)	Količina odpadkov (t)	L_0	Delež B.R.O* (%)	Količina odpadkov (t)	L_0
2009	63	24000	75	63	24000	75	63	24000	75
2010	57	22488	68	57	22488	68	57	22488	68
2011	51	21127	61	51	21127	61	51	21127	61
2012	46	19902	55	46	19902	55	46	19902	55
2013	41	18800	49	41	18800	49	41	18800	49
2014	37	17808	44	37	17808	44	37	17808	44
2015	33	16915	40	33	16915	40	33	16915	40
2016	30	16112	36	30	16112	36	30	16112	36
2017	27	15389	32	27	15389	32	27	15389	32
2018	24	14738	29	24	14738	29	24	14738	29
2019	22	14152	26	22	14152	26	22	14152	26
2020	22	14152	26	21	13888	25	20	13625	24
2021	22	14152	26	20	13638	24	18	13150	21
2022	22	14152	26	19	13400	22	16	12723	19
2023	22	14152	26	18	13174	21	14	12339	17
2024	22	14152	26	17	12959	20	13	11993	15
2025	22	14152	26	16	12755	19	12	11682	14
2026	22	14152	26	15	12562	18	11	11402	13
2027	22	14152	26	15	12378	17	9	11149	11
2028	22	14152	26	14	12203	16	9	10922	10
2029	22	14152	26	13	12037	16	8	10718	9
2030	22	14152	26	13	11879	15	7	10534	8
2031	22	14152	26	12	11729	14	6	10369	7
2032	22	14152	26	11	11586	13	6	10220	7
2033	22	14152	26	11	11451	13	5	10086	6
2034	22	14152	26	10	11322	12	5	10086	6
2035	22	14152	26	10	11200	12	5	10086	6
2036	22	14152	26	9	11084	11	5	10086	6
2037	22	14152	26	9	10974	10	5	10086	6
2038	22	14152	26	8	10869	10	5	10086	6
2039	22	14152	26	8	10770	9	5	10086	6
2040	22	14152	26	7	10675	9	5	10086	6
2041	22	14152	26	7	10586	8	5	10086	6
2042	22	14152	26	7	10500	8	5	10086	6
2043	22	14152	26	6	10419	8	5	10086	6
2044	22	14152	26	6	10342	7	5	10086	6
2045	22	14152	26	6	10269	7	5	10086	6

* B.R.O. – biorazgradljivi odpadki

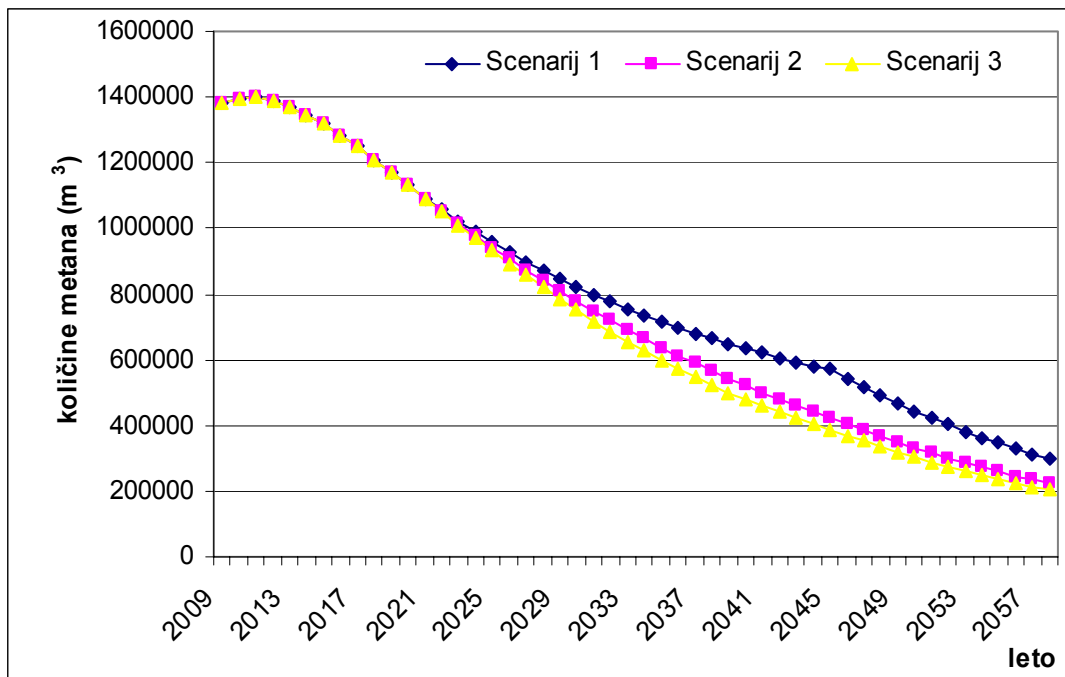
Količine nastalega metana so podane za vsak scenarij posebej in združene v isti tabeli (Tabela 15) zaradi lažje preglednosti.

Tabela 15: Količine nastalega metana na odlagališču za določen scenarij

Leto	Scenarij 1 CH ₄ (t)	Scenarij 2 CH ₄ (t)	Scenarij 3 CH ₄ (t)	Leto	Scenarij 1 CH ₄ (t)	Scenarij 2 CH ₄ (t)	Scenarij 3 CH ₄ (t)
2009	983,9	983,9	983,9	2034	523,5	472,9	446,6
2010	994,7	994,7	994,7	2035	510,0	454,2	426,8
2011	996,0	996,0	996,0	2036	497,1	436,5	407,9
2012	989,5	989,5	989,5	2037	484,9	419,2	390,0
2013	976,9	976,9	976,9	2038	473,2	402,3	373,0
2014	959,3	959,3	959,3	2039	462,2	386,2	356,8
2015	938,1	938,1	938,1	2040	451,6	370,6	341,3
2016	914,4	914,4	914,4	2041	441,6	355,6	326,7
2017	888,8	888,8	888,8	2042	432,1	341,0	312,7
2018	861,5	861,5	861,5	2043	423,0	327,1	299,4
2019	833,4	833,4	833,4	2044	414,4	313,9	286,8
2020	804,8	804,8	804,8	2045	406,2	301,0	274,8
2021	777,5	776,8	776,2	2046	386,3	288,6	263,4
2022	751,6	749,6	747,3	2047	367,5	274,5	250,5
2023	726,9	722,7	718,8	2048	349,6	261,2	238,3
2024	703,5	696,5	690,6	2049	332,5	248,4	226,7
2025	681,2	670,9	662,7	2050	316,3	236,3	215,6
2026	660,0	646,1	635,8	2051	300,9	224,8	205,1
2027	639,8	622,0	609,6	2052	286,2	213,8	195,1
2028	620,6	598,5	583,9	2053	272,3	203,4	185,6
2029	602,3	575,7	558,9	2054	259,0	193,5	176,5
2030	584,9	553,9	534,8	2055	246,3	184,0	167,9
2031	568,4	532,7	511,5	2056	234,3	175,1	159,7
2032	552,7	512,1	488,9	2057	222,9	166,5	151,9
2033	537,7	492,0	467,4	2058	212,0	158,4	144,5

Uredba predvideva s Prilogo 4 obvezno zmanjševanje biorazgradljivih odpadkov do leta 2019 na 22 % delež mase komunalnih odpadkov. Za vsak scenarij smo izračunali količine nastalega metana na odlagališču. Do leta 2020 so količine nastalega metana v vseh treh scenarijih enake, po tem letu pa se pokažejo odstopanja zaradi različnih scenarijev. Leta 2045 je po Scenariju 1 količina nastalega metana 406 t, po Scenariju 2 301 t, po Scenariju 3 pa 275 t metana, kar je 32 % manj kot v prvem in 9 % manj kot v drugem scenariju.

Slika 12 prikazuje dobljene rezultate izračunov nastalega metana, podane v m³, ki smo jih iz ton v m³ preračunali s pomočjo enačbe 6.



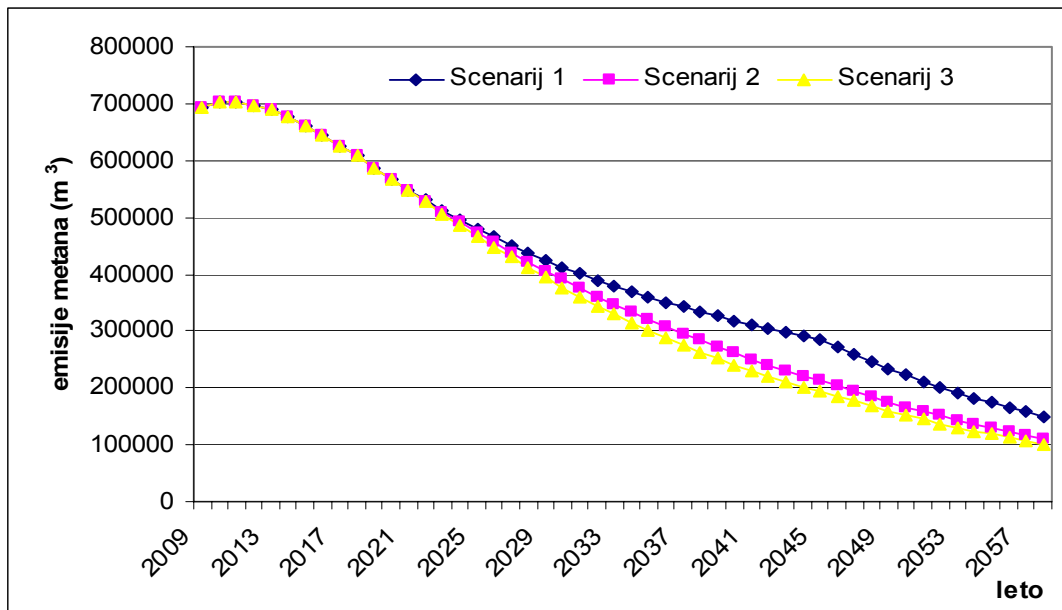
Slika 12: Količine nastalega metana za različne scenarije

Iz Slike 12 je razvidno, da se bodo količine nastalega metana z leti pričele zmanjševati, zaradi ločeno zbranih biorazgradljivih odpadkov.

Krivulja, ki ponazarja Scenarij 1 se nekoliko razlikuje od preostalih dveh. Razlog je v temu, da se v Scenariju 1 po letu 2019 količina biorazgradljivih odpadkov v komunalnih odpadkih ne spreminja oziroma se ne zmanjšuje ampak je konstantna.

Krivulji za drugi in tretji scenarij potekata podobno. Razlog za podoben potek krivulj je v temu, da se v Scenariju 2 količina biorazgradljivih odpadkov zmanjšuje od leta 2019 za 5 % in se tako zmanjša do leta 2034 na 10 % (do leta 2045 na 6 %). V tretjem scenariju pa se količina biorazgradljivih odpadkov zmanjšuje od leta 2019 za 10 % in tako doseže leta 2034 5 % biorazgradljivih odpadkov na celotno maso odloženih odpadkov.

Učinkovitost zbirnega sistema na odlagališču komunalnih odpadkov CERO znaša 49,8 %, kar pomeni, da se skoraj polovica vsega nastalega odlagališčnega plina zajame. Vzporedno z zmanjševanjem količin nastalega odlagališčnega plina se zmanjšujejo tudi emisije metana v atmosfero. Zmanjševanje emisij za vsak scenarij posebej prikazuje Slika 13.



Slika 13: Emisije metana v atmosfero za različne scenarije

4.7 Izračun bilance toplotne moči in predlog energetske izrabe odlagališčnega plina

V tem poglavju smo izdelali predlog energetske izrabe odlagališčnega plina. Izračunali smo bilanco toplotne moči zajetega metana v odlagališčnem plinu. Upoštevali smo količine plinov, navedene v Tabeli 15 in učinek zbirnega sistema. Tabela 16 prikazuje potencialno toplotno moč zajetega metana izračunano s pomočjo enačbe 7 za vsak scenarij posebej.

Tabela 16: Potencialna toplotna moč zajetega metana

Leto	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Leto	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3
	T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)		T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)
2010	795	795	795	2035	408	363	341
2011	796	796	796	2036	397	349	326
2012	791	791	791	2037	387	335	312
2013	781	781	781	2038	378	321	298
2014	767	767	767	2039	369	309	285
2015	750	750	750	2040	361	296	273
2016	731	731	731	2041	353	284	261
2017	710	710	710	2042	345	273	250
2018	688	688	688	2043	338	261	239
2019	666	666	666	2044	331	251	229
2020	643	643	643	2045	325	240	220
2021	621	621	620	2046	309	231	210
2022	601	599	597	2047	294	219	200
2023	581	577	574	2048	279	209	190
2024	562	557	552	2049	266	199	181
2025	544	536	530	2050	253	189	172

„se nadaljuje„

"nadaljevanje Tabele 16,

Leto	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Leto	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3
	T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)		T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ (kW)
2026	527	516	508	2051	240	180	164
2027	511	497	487	2052	229	171	156
2028	496	478	467	2053	218	163	148
2029	481	460	447	2054	207	155	141
2030	467	443	427	2055	197	147	134
2031	454	426	409	2056	187	140	128
2032	442	409	391	2057	178	133	121
2033	430	393	373	2058	169	127	115
2034	418	378	357				

*T.M. – toplotna moč

Glede na izračunano potencialno toplotno moč (Tabela 16) smo poiskali primeren kogeneracijski modul za odlagališče CERO proizvajalca Jenbacher, kjer bi odlagališčni plin lahko uporabili za proizvodnjo električne in toplotne energije. Odločili smo se za modul Jenbacher Type 2, ki je najprimernejši za obravnavano odlagališče. Modul Jenbacher Type 2 – J208 je poleg bioplina primeren tudi za izkoriščanje odlagališčnega plina²⁷. Karakteristike kogeneracijskega modula prikazuje Tabela 17.

Tabela 17: Lastnosti delovanja kogeneracijskega modula Jenbacher Type 2 – J208²⁷

Električna moč	kW	330
Koristna toplotna moč	kW	400
Moč dovedenega odlagališčnega plina (potencialna toplotna moč)	kW	852
50 % obremenitev agregata	kW	426
Električni izkoristek pri 100 % obremenitvi	%	38,7
Toplotni izkoristek pri 100 % obremenitvi	%	47,0
Skupni izkoristek	%	85,7

Obratovanje kogeneracijskega modula je po podatkih proizvajalca mogoče do 50 % moči dovedenega plina²⁷. Kot lahko ocenimo iz Tabele 16, bi v Scenariju 1 kogeneracijski modul lahko obratoval do leta 2033, v Scenariju 2 do 2031, v Scenariju 3 pa le do leta 2030. Manj močni moduli se serijsko ne proizvajajo, zato bi morali po končanem obratovalnem času kogeneracijskega modula odlagališčni plin sežigati na bakli.

Kogeneracijski moduli proizvajalca Jenbacher obratujejo 60000 ur, kar pomeni v povprečju 10 let obratovanja pred prvim remontom, če upoštevamo dejstvo, da kogeneracijski modul obratuje običajno z manj kot 100 % obremenitvijo. Iz ekonomskega vidika je remont ugodnejši, ker znaša le tretjino cene novega kogeneracijskega modula²⁸. V primeru, da bi na odlagališču CERO postavili kogeneracijski modul leta 2010 bi v vseh treh scenarijih bilo potrebno opraviti le en remont in sicer leta 2020 oziroma 2021.

Iz Tabele 16 vidimo, da bi za leto 2010 lahko pridobili iz odlagališčnega plina 795 kW potencialne toplotne moči. Iz podatkov podanih v Tabeli 17 lahko preračunamo, da bi tako pridobili 308 kW električne moči, kar znaša²⁴ 0,086 kWh·s⁻¹. Če upoštevamo, da bi kogeneracijski modul na leto obratoval približno 6000 ur dobimo letno vrednost električne energije, ki znaša 1857600 kWh. Toplotni izkoristek znaša 47 % kar pomeni 374 kW koristne toplotne moči in znaša 2241900 kWh koristne toplotne energije za leto 2010.

4.8 Alternativni postopki – ločeno zbrani odpadki in bioplinarna

Alternativo h klasičnemu zbiranju odpadkov predstavlja ločeno zbiranje biorazgradljivih odpadkov in postavitve bioplinarne. Izbrani scenariji predvidevajo zmanjševanje količin biorazgradljivih odpadkov oziroma njihovo striktno ločevanje. V izračunu smo uporabili vse ločeno zbrane organske odpadke, ki po scenarijih niso odloženi na odlagališče. Te ločeno zbrane odpadke lahko uporabimo v bioplinarni in tako nastali metan v nadaljevanju porabimo za soproizvodnjo električne energije. Tabela 18 prikazuje izračunane količine nastalega metana s pomočjo enačbe 8 in 6 glede na različne scenarije in izračun potencialne toplotne moči metana s pomočjo enačbe 7.

Tabela 18: Količine in potencialna toplotna moč nastalega metana v bioplinarni

Leto	Scenarij 1		Scenarij 2		Scenarij 3	
	CH ₄ (t)	T.M.* CH ₄ (kW)	CH ₄ (t)	T.M.* CH ₄ (kW)	CH ₄ (t)	T.M.* CH ₄ (kW)
2010	97	155	97	155	97	155
2011	184	294	184	294	184	294
2012	263	420	263	420	263	420
2013	333	532	333	532	333	532
2014	397	634	397	634	397	634
2015	454	726	454	726	454	726
2016	505	808	505	808	505	808
2017	552	882	552	882	552	882
2018	594	949	594	949	594	949
2019	631	1008	631	1008	631	1008
2020	631	1008	648	1035	665	1062
2021	631	1008	664	1061	695	1111
2022	631	1008	679	1085	723	1155
2023	631	1008	694	1109	747	1194
2024	631	1008	707	1131	769	1230
2025	631	1008	721	1152	789	1261
2026	631	1008	733	1171	807	1290
2027	631	1008	745	1190	823	1316
2028	631	1008	756	1208	838	1339
2029	631	1008	767	1225	851	1360
2030	631	1008	777	1241	863	1379
2031	631	1008	786	1257	873	1396
2032	631	1008	795	1271	883	1411
2033	631	1008	804	1285	892	1425
2034	631	1008	812	1298	892	1425
2035	631	1008	820	1311	892	1425
2036	631	1008	828	1323	892	1425
2037	631	1008	835	1334	892	1425
2038	631	1008	841	1345	892	1425
2039	631	1008	848	1355	892	1425
2040	631	1008	854	1365	892	1425
2041	631	1008	860	1374	892	1425
2042	631	1008	865	1382	892	1425
2043	631	1008	870	1391	892	1425
2044	631	1008	875	1399	892	1425
2045	631	1008	880	1406	892	1425

*T.M. – toplotna moč

Glede na izračunano potencialno toplotno moč (Tabela 18) smo poiskali primerne kogeneracijske module, ki bi jih lahko uporabili za izrabo metana, nastalega v bioplinarni. Tabela 19 prikazuje predlagane kogeneracijske module za posamičen scenarij. Tabela 20 prikazuje karakteristike izbranih kogeneracijskih modulov.

Tabela 19: Izbrani kogeneracijski moduli za posamičen scenarij²⁷

	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3
Kogeneracijski modul	Jenbacher Type 3 J312 (1301 kW)	Jenbacher Type 3 J312 (1301 kW)	Jenbacher Type 3 J312 (1301 kW)
Obratovanje od-do leta:	2015–2045	2015–2034	2015–2026
Kogeneracijski modul	-	Jenbacher Type 3 J312 (1561 kW)	Jenbacher Type 3 J312 (1561 kW)
Obratovanje od-do leta:	-	2035–2045	2027–2045

Izbrani kogeneracijski modul Jenbacher Type-3 J312 naveden v Tabeli 19 ima vgradno moč 1301 kW. Lahko bi izbrali manjši kogeneracijski modul Jenbacher Type 2 – J208, z maksimalno obremenitvijo do 852 kW, ki bi obratoval od leta 2012 do leta 2016. Po tem času bi morali odvečni plin ali sežigati na bakli ali pa dodati še en tak modul, kar pa v našem primeru ni ekonomsko upravičeno, saj bi dobili 1704 kW vgradne moči, kar presega naše potrebe.

V prvem scenariju bi torej opravili v obratovalnem obdobju kogeneracijskega modula dva remonta in sicer prvega okoli leta 2025, drugega pa leta 2035.

V drugem scenariju bi opravili samo en remont po desetih letih obratovanja in to okoli leta 2025. Po letu 2034 pa bi kogeneracijski modul morali zamenjati z močnejšim z vgradno močjo 1561 kW, kot je prikazano v Tabeli 19.

V tretjem scenariju bi izbrani kogeneracijski modul obratoval 10 let, po tem času bi ga zamenjali z močnejšim kogeneracijskim modulom z vgradno močjo 1561 kW. Po desetih letih obratovanja bi opravili remont, ki bi pokril obdobje obratovanja bioplinarne do leta 2045.

Tabela 20: Karakteristike kogeneracijskega modula Jenbacher Type 3 – J312²⁷

		J312 (1301 kW)	J312 (1561 kW)
Električna moč	kW	526	625
Koristna toplotna moč	kW	558	680
Moč dovedenega odlagališčnega plina (potencialna toplotna moč)	kW	1301	1561
50 % obremenitev agregata	kW	650	781
Električni izkoristek pri 100 % obremenitvi	%	40,4	40,0
Toplotni izkoristek pri 100 % obremenitvi	%	42,9	43,6
Skupni izkoristek	%	83,3	83,6

Kot je razvidno iz Tabele 19 bi kogeneracijski moduli v primeru obratovanja bioplinarne lahko pričeli z obratovanjem komaj leta 2015, kar pomeni, da pet let proizvedenega bioplina ne bi mogli izkoriščati, zato predlagamo združitev zajetega odlagališčnega plina s plinom nastalim v bioplinarni.

Tabela 21 prikazuje potencialno toplotno moč metana iz zajetega odlagališčnega plina, potencialno toplotno moč iz bioplina nastalega v bioplinarni in seštevek potencialne toplotne moči obeh plinov, ki smo ga izračunali za vsak scenarij posebej.

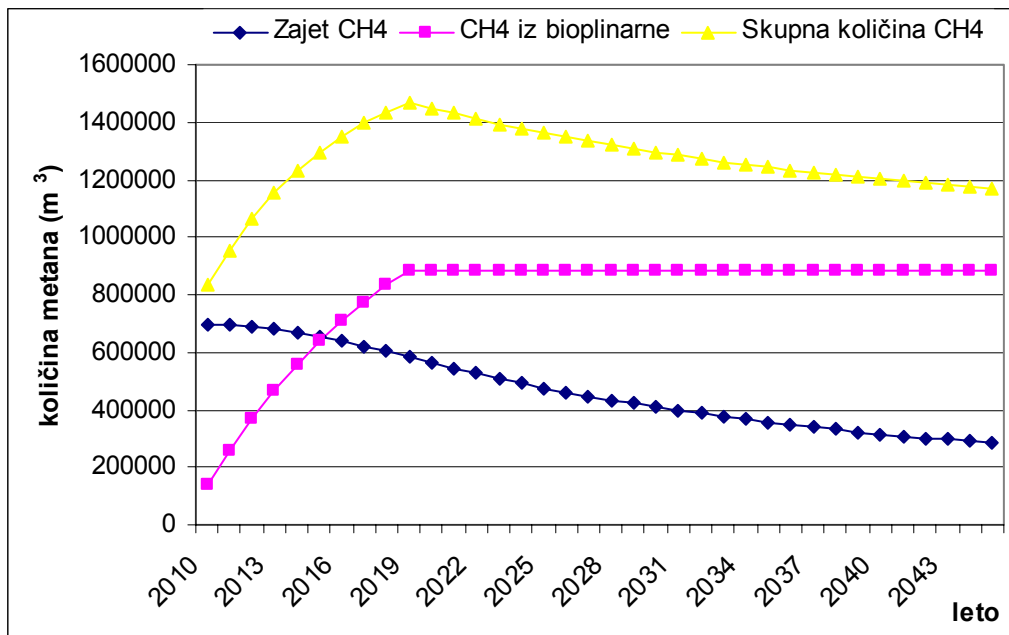
Tabela 21: Seštevek potencialne toplotne moči zajetega metana in metana nastalega v bioplinarni

Leto	Scenarij 1			Scenarij 2			Scenarij 3		
	T.M.* zajet. CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ iz bioplin (kW)	Skupna T.M.* (kW)	T.M.* zajet. CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ iz bioplin. (kW)	Skupna T.M.* (kW)	T.M.* zajet. CH ₄ (kW)	T.M.* CH ₄ iz bioplin. (kW)	Skupna T.M.* (kW)
2010	795	155	950	795	155	950	795	155	950
2011	796	294	1090	796	294	1090	796	294	1090
2012	791	420	1211	791	420	1211	791	420	1211
2013	781	532	1313	781	532	1313	781	532	1313
2014	767	634	1401	767	634	1401	767	634	1401
2015	750	726	1476	750	726	1476	750	726	1476
2016	731	808	1539	731	808	1539	731	808	1539
2017	710	882	1592	710	882	1592	710	882	1592
2018	688	949	1637	688	949	1637	688	949	1637
2019	666	1008	1674	666	1008	1674	666	1008	1674
2020	643	1008	1651	643	1035	1678	643	1062	1705
2021	621	1008	1629	621	1061	1682	620	1111	1731
2022	601	1008	1609	599	1085	1684	597	1155	1752
2023	581	1008	1589	577	1109	1686	574	1194	1768
2024	562	1008	1570	557	1131	1688	552	1230	1782
2025	544	1008	1552	536	1152	1688	530	1261	1791
2026	527	1008	1535	516	1171	1687	508	1290	1798
2027	511	1008	1519	497	1190	1687	487	1316	1803
2028	496	1008	1504	478	1208	1686	467	1339	1806
2029	481	1008	1489	460	1225	1685	447	1360	1807
2030	467	1008	1475	443	1241	1684	427	1379	1806
2031	454	1008	1462	426	1257	1683	409	1396	1805
2032	442	1008	1450	409	1271	1680	391	1411	1802
2033	430	1008	1438	393	1285	1678	373	1425	1798
2034	418	1008	1426	378	1298	1676	357	1425	1782
2035	408	1008	1416	363	1311	1674	341	1425	1766
2036	397	1008	1405	349	1323	1672	326	1425	1751
2037	387	1008	1395	335	1334	1669	312	1425	1737
2038	378	1008	1386	321	1345	1666	298	1425	1723
2039	369	1008	1377	309	1355	1664	285	1425	1710
2040	361	1008	1369	296	1365	1661	273	1425	1698
2041	353	1008	1361	284	1374	1658	261	1425	1686
2042	345	1008	1353	273	1382	1655	250	1425	1675
2043	338	1008	1346	261	1391	1652	239	1425	1664
2044	331	1008	1339	251	1399	1650	229	1425	1654
2045	325	1008	1333	240	1406	1646	220	1425	1645

*T.M. – toplotna moč

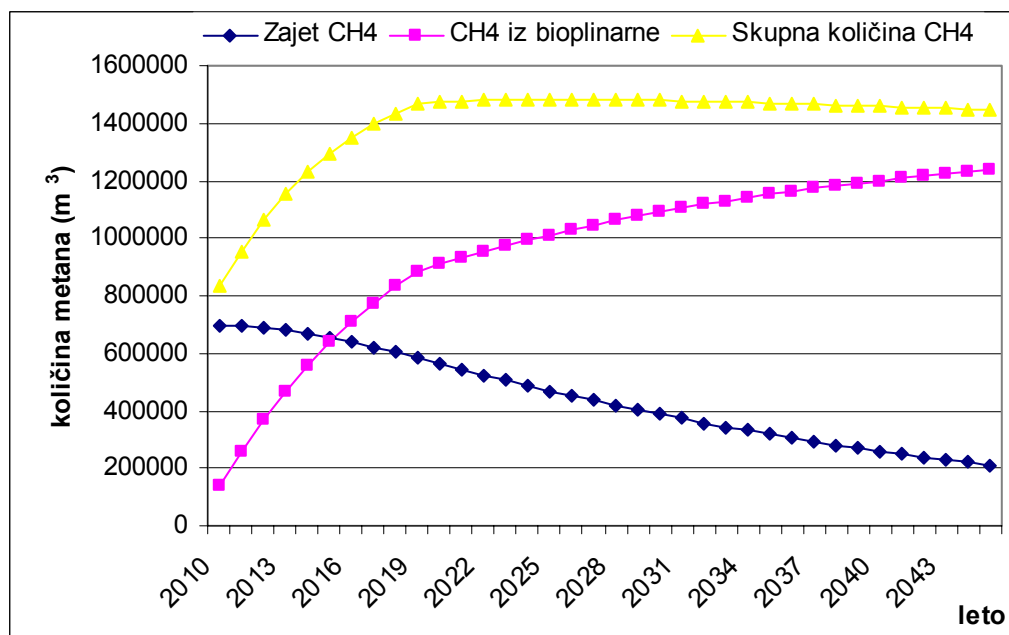
Iz Tabele 21 je razvidno, da je za vsak scenarij posebej v določenem obdobju dosežena maksimalna skupna količina plina in posledično tudi toplotne moči. Zaradi lažje predstave podatkov prikazanih v Tabeli 21 smo se odločili predstaviti rezultate tudi v grafični obliki, v m³ za vsak scenarij posebej.

Slika 14 prikazuje podatke za Scenarij 1.



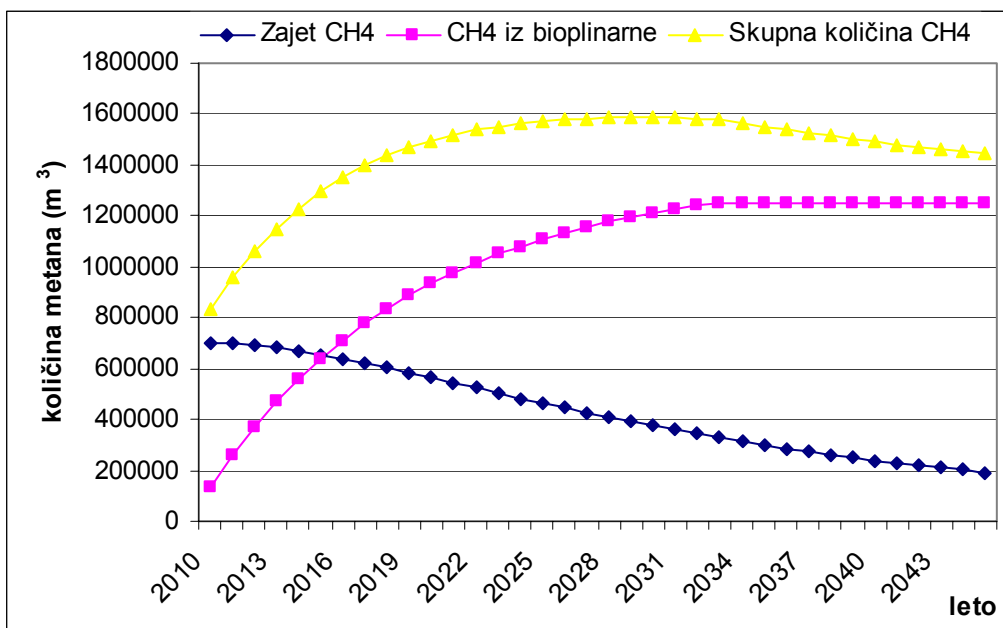
Slika 14: Grafični prikaz količin metana za Scenarij 1

Slika 15 prikazuje podatke za Scenarij 2.



Slika 15: Grafični prikaz količin metana za Scenarij 2

Slika 16 prikazuje podatke za Scenarij 3.



Slika 16: Grafični prikaz količin metana za Scenarij 3

Za prvi scenarij bo maksimalna skupna količina metana dosežena leta 2019, v drugem scenariju leta 2024 oziroma 2025, v tretjem scenariju pa leta 2029. Po teh letnicah skupna količina metana prične padati, kljub temu, da količina bioplina nastalega v bioplinarni z leti narašča oziroma je konstantna. Razlog za zmanjšane količine skupnega metana je v tem, da se zmanjša količina nastalega odlagališčnega plina, zaradi zmanjševanja količin odloženih biorazgradljivih odpadkov. Odlagališčni plin namreč izhaja počasneje, kot se je odlagališče polnilo. Zato lahko tudi po več letih še izhaja plin, ki je posledica nakopičenih odpadkov preteklih let. V našem primeru je zato maksimum seštevka obeh plinov posledica v preteklosti nakopičenih odpadkov, katerih plin nastaja kasneje kot so bili odpadki odloženi.

Po letu 2045, ko bo odlagališče zaprto se bo količina nastalega metana v odlagališčnem plinu – modra krivulja počasi približevala ničli. Količina bioplina – roza krivulja pa bo v primeru predelave biorazgradljivih odpadkov po letu 2045 konstantna, čeprav je težko napovedati kaj se bo po letu 2045 zgodilo.

Po pregledu in oceni rezultatov se nam zdi smiselno, da bi bioplinarno postavili v bližini zajema odlagališčnega plina. Na ta način bi lahko takoj po izgradnji bioplinarne in pričetku njenega delovanja zajeti odlagališčni plin in bioplin, nastal v bioplinarni, združili in izkoristili skupno količino plina na kogeneracijskem modulu. Prednost tega je v tem, da bi tako zajeti plin lahko bolje izkoristili že v kogeneracijskem modulu, ki smo ga določili za odlagališčni plin. Z večanjem količine plina (bioplina in odlagališčnega plina skupaj) in naraščanjem potreb po močnejšem kogeneracijskem modulu bi te lahko le dodajali ali pa jih zamenjali z močnejšimi kogeneracijskimi moduli. Zajeti odlagališčni plin pa bi tako do konca obratovanja odlagališča koristili za pridobivanje električne in toplotne energije in ga ne bi bilo treba sežigati na bakli, kot bi to morali storiti v primeru, če bioplinarne ne bi postavili.

V prvem in drugem scenariju bi h kogeneracijskemu modulu, ki je predviden za izkoriščanje zajetega odlagališčnega plina v primeru postavitve bioplinarne, enostavno

dodali še en tak modul Jenbacher Type 2 – J208 (852 kW), katerega karakteristike prikazuje Tabela 17. Na ta način bi dobili vgradno moč 1704 kW, kar bi zadostovalo, če pogledamo rezultate iz Tabele 21 in ugotovimo, da je predvidena skupna maksimalna toplotna moč plina za prvi scenarij 1674 kW, za drugi scenarij pa 1688 kW. Do leta 2016 bi zadostoval en modul in šele po letu 2016 bi dodali drugega. Če bi se odločili za to rešitev bi pri obeh kogeneracijskih modulih opravili le potrebno število remontov. V primeru, da bi prvi kogeneracijski modul bil preveč obrabljen pa bi ga morali zamenjati.

Tabela 22 prikazuje karakteristike kogeneracijskih modulov omenjenih v nadaljevanju razprave.

Tabela 22: Karakteristike kogeneracijskega modula Jenbacher Type 3 – J316²⁷

		J316 (1735 kW)	J316 (2086 kW)
Električna moč	kW	703	834
Koristna toplotna moč	kW	744	910
Moč dovedenega odlagališnega plina (potencialna toplotna moč)	kW	1735	2086
50 % obremenitev agregata	kW	867	1043
Električni izkoristek pri 100 % obremenitvi	%	40,5	39,9
Toplotni izkoristek pri 100 % obremenitvi	%	42,9	43,7
Skupni izkoristek	%	83,4	83,6

V primeru, da bi postavili bioplinarno leta 2010, bi namesto dveh modulov že na samem začetku lahko vgradili en sam modul.

Za prvi scenarij bi v tem primeru na začetku vgradili kogeneracijski modul z vgradno močjo 1735 kW in sicer model Jenbacher Type 3 – J316. Glede na to, da se remont oziroma zamenjava modulov opravi na približno deset let, kar je seveda odvisno tudi od obrabljenosti samega kogeneracijskega modula bi najverjetneje v tem primeru opravili en remont okoli leta 2021 in nato leta 2031 kogeneracijski modul zamenjali z novim, nekoliko šibkejšim modulom. Kot je razvidno iz Tabele 21 v prvem scenariju skupna toplotna moč zajetega odlagališnega plina in plina iz bioplinarne po letu 2019 prične padati. Po letu 2031 bi se zaradi padanja potencialne toplotne moči plina odločili za kogeneracijski modul Jenbacher Type 3 – J312 z vgradno močjo 1561 kW, katerega karakteristike prikazuje Tabela 20. Ta kogeneracijski modul bi obratoval do konca obratovanja odlagališča.

V drugem scenariju bi se v primeru postavitve bioplinarne v letu 2010 odločili za kogeneracijski modul z vgradno močjo 1735 kW in sicer model Jenbacher Type 3 – J316. V tem scenariju bi glede na čas obratovanja odlagališča in čas obratovanja modula bilo potrebno izvesti vsaj dva remonta, kar pa bi bilo odvisno predvsem od obrabljenosti modula. V primeru, da bi bil kogeneracijski modul preveč obrabljen bi namesto drugega remonta morali zamenjati modul z novim modulom z enakimi karakteristikami.

V tretjem scenariju je skupna količina plina nekoliko višja kot v prvih dveh, kar je posledica tega, da tretji scenarij upošteva največ ločeno zbranih biorazgradljivih odpadkov. V tem scenariju bi v primeru izkoriščanja zajetega odlagališnega plina in bioplina, nastalega v bioplinarni na začetku združitve plina uporabili kogeneracijski modul Jenbacher Type 3 – J316, z vgradno močjo 1753 kW, ki bi obratoval prvo desetletje. Po letu 2021 bi morali modul zamenjati zaradi naraščanja količin bioplina.

Odločili bi se lahko za kogeneracijski modul Jenbacher Type 3 – J316, z vgradno močjo 2086 kW, pri katerem bi opravili v njegovem življenjskem obdobju en do dva remonta, odvisno od obremenjenosti oziroma obrabljenosti le tega.

V vseh treh scenarijih bi skupni količini plina (zajetega odlagališnega plina in bioplina) lahko dodajali še zemeljski plin ali pa bi lahko pridobili še dodatno količino biorazgradljivih odpadkov iz drugih virov in tako zagotovili delovanje kogeneracijskih modulov s polno močjo.

5 ZAKLJUČKI

V diplomskem delu smo raziskali, kako v Centru za ravnanje z odpadki – CERO upravljajo z nastalim odlagališčnim plinom, kakšno tehnologijo uporabljajo za zajetje le-tega in kako z njim ravnajo.

Meritve odlagališčnega plina so pokazale, da je povprečje volumskega deleža metana v odlagališčnem plinu za leto 2008 znašalo 45,7 %.

Z matematičnim modelom LandGEM smo izračunali količine nastalega metana od odprtja odlagališča do leta 2009 za vsako brežino posebej in tako dobili podatek, koliko ton metana posamična brežina prispeva v določenem letu. Ker je LandGEM programiran za ameriška odlagališča, smo opravili še vzporedni izračun količin nastalega metana z Uredbo. Letne količine nastalega metana, izračunane s pomočjo matematičnega modela LandGEM za odložene odpadke, se bistveno ne razlikujejo z rezultati, dobljenimi z izračunom s pomočjo Uredbe. Z matematičnim modelom LandGEM smo izračunali 972,7 ton metana za leto 2008, po izračunu z Uredbo pa 931,3 ton. Model LandGEM torej poda za 4,3 % večje količine v primerjavi z izračuni, opravljenimi po Uredbi. Odločili smo se, da za nadaljnje delo in izračune uporabimo matematični model LandGEM.

Z dobljeno količino nastalega metana za leto 2008 smo izračunali učinkovitost zbirnega sistema, ki znaša 49,8 %, kar pomeni da se približno polovica nastalega metana zajame in sežge na bakli, polovica nastalega metana pa uide v atmosfero. Po naši oceni zbirni sistem deluje dobro, saj smo iz literature zasledili, da je učinkovitost zbirnega sistema običajno precej manj kot 50 %⁸.

V nadaljevanju smo z različnimi scenariji raziskali, kako bo zmanjšanje biorazgradljivih odpadkov, ki je zakonsko določeno z Uredbo vplivalo na količine nastalega metana na odlagališču. Določili smo tri scenarije, v vsakem scenariju se je delež biorazgradljivih odpadkov zniževal drugače.

Ugotovili smo, da se z ločevanjem biorazgradljivih odpadkov zmanjšajo količine nastalega odlagališčnega plina. Posledično se zmanjšajo tudi emisije metana v atmosfero.

Iz zajetih količin metana smo nato izračunali bilanco potencialne toplotne moči in poiskali primeren kogeneracijski modul proizvajalca Jenbacher. Odločili smo se za Jenbacher Type 2 – J208, ki je po našem mnenju najprimernejši za obravnavano odlagališče. V Scenariju 1 bi kogeneracijski modul lahko obratoval do leta 2033, v Scenariju 2 do 2031, v Scenariju 3 pa le do leta 2030. Manj močnih kogeneracijskih modulov proizvajalec serijsko ne izdeluje, zato bi morali po končanem obratovalnem času kogeneracijskega modula odlagališčni plin sežigati na bakli.

Ločeno zbranih biorazgradljivih odpadkov bo zaradi zmanjšanja odložene količine vsako leto več, zato smo izračunali količine nastalega metana in potencialno toplotno moč nastalega metana v primeru ločenega zbiranja odpadkov in postavitve bioplinarne. Izračuni so pokazali, da več kot bi ločeno zbrani odpadki predelali v bioplinarni, manj bo onesnaževanja atmosfere z emisijami metana in posledično tudi več energije iz obnovljivega vira.

Naš predlog je, da se na odlagališču CERO v čim krajšem času postavi kogeneracijski modul, ki bi pričel s takojšno izrabo zajetega odlagališčnega plina. S sežiganjem odlagališčnega plina na bakli nastaja posredna ekonomska škoda, saj bi lahko s tem plinom proizvedli na primer v letu 2010 1857600 kWh električne energije in 2241900 kWh koristne toplotne energije in to iz obnovljivega vira energije.

V Centru za ravnanje z odpadki Nova Gorica potekajo aktivnosti, za zmanjševanje deleža biorazgradljivih odpadkov v odloženih odpadkih. Zadnje leto smo lahko na goriškem zasledili intenzivno osveščanje prebivalcev o ločenem zbiranju odpadkov in pomenu ločenega zbiranja za okolje. Sklepamo lahko, da bodo naše napovedi o povečevanju ločeno zbranih biorazgradljivih odpadkih uresničene in da bo količina tovrstnih odpadkov pričela naraščati. Zato predlagamo, da je bioplinarno na odlagališču CERO smiselno zgraditi čim prej, in to v neposredni bližini zajema odlagališčnega plina. Ob pričetku obratovanja bioplinarne bi tako lahko združili zajeti odlagališčni plin iz odlagališča s plinom, nastalim v bioplinarni. Prednost tega bi bila v tem, da bi ves zajeti plin in plin iz bioplinarne izkoristili za sproizvodnjo električne energije in se zaradi manjšanja količin prvega tako izognili sežiganju zajetega odlagališčnega plina na bakli.

6 VIRI

1. Zakonu o varstvu okolja. (*Uradni list RS*, št. 39/06)
2. Colin Baird. 2003. Environmental chemistry. Second edition. W.H. Freeman and Company New York, str. 191–200
3. Uredba o spremembah in dopolnitvah Uredbe o odlaganju odpadkov na odlagališčih (*Uradni list RS*, št. 53/2009)
4. Martin Steiner, Ulrich Wiegel. 2008. Ravnanje z odpadki. Knjiga o osnovah ravnanja z odpadki. Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, str. 2–5
5. Krajnc A. 2002. Modeliranje molske količine in sestave deponijskega plina. Fakulteta za strojništvo. Univerza v Mariboru, str. 10, 90–95
6. Komunala Nova Gorica d.d., Cesta 25. junija 1. 5000 Nova Gorica. Projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja in izvedbo. Zajem in izraba odlagališnega plina in sanacija tesnitve pokrova in bokov odlagališča. Št. projekta D0008. Št. načrta: 13/23. September 2003
7. ATSDR. 2001. Landfill Gas Primer, An Overview for Environmental Health Professionals, str. 3–14
<http://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/html/intro.html> (3.6.2008)
8. Paul T. Williams. 2005. Waste Treatment and Disposal. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd., str. 197–205
9. Paul T. Williams. 2005. Waste Treatment and Disposal. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd., str. 197–205. Cit. po:
Waste Management paper 26B. 1995. Landfill design, Construction and Operation Practice, Department of the environment, HMSO, London.
10. Qin W., Egolfopoulos F.N. and Tsotsis T.T. 2001. Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation. Chemical Engineering Journal, 82, str. 157–172.
11. Paul T. Williams. 2005. Waste Treatment and Disposal. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd., str. 230–236. Cit. po:
 - a. Loening A. 2003. Predictions and projections; looking at the power generation potential of landfill gas, Waste Management World. International Solid Waste Association, Copenhagen, November-December.
 - b. Waste Management Paper 27. 1994. Landfill Gas. Department of the Environment, HMSO, London.
12. Varnostni list METAN
[http://www.linde.com/international/web/lq/si/like35lgsi.nsf/repositorybyalias/ind_methan/\\$file/metan.pdf](http://www.linde.com/international/web/lq/si/like35lgsi.nsf/repositorybyalias/ind_methan/$file/metan.pdf) (26.1.2010)

13. Paul T. Williams. 2005. Waste Treatment and Disposal. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd., str. 230–236. Cit. po:
 - a. Brown K.A. and Maunder D.H. 1994. Exploitation of landfill gas: A UK perspective, *Water Science and Technology*, 30, 143–151
 - b. Stegmann R. 1996. Landfill gas utilisation: An overview. In, *Landfilling of Waste: Biogas*. Christensen T.H., Cossu R. and Stegmann R. (Eds.), E & FN Spon, London.
14. Paul T. Williams. 2005. Waste Treatment and Disposal. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd., str. 357– 364. Cit. po:
 - a. Diaz L.F., Savage G.M., Eggerth L.L. and Golueke C.G. 1993. *Composting and Recycling of Municipal Solid Waste*. Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 1993.
 - b. Wheatley A. 1990. *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. Elsevier Applied Science, London.
 - c. IEA Bioenergy. 1996. *Bioenergy, biogas from municipal solid waste: Overview of systems and markets for anaerobic digestion of MSW*. IEA Bioenergy, Energy Recovery from MSW Task anaerobic Digestion Activity. National renewable energy Laboratory, Harwell, 1996.
15. C.R. Rhyner, L.J. Schwartz, R.B. Wenger, M.G. Kohrell. 1995. *Waste management and resource recovery*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, str. 220–224
16. Sašo Medved, Peter Novak. 2000. *Varstvo okolja in obnovljivi viri energije*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, str. 158 – 162
17. V. Grilc, G.D. Zupančič, R. Marinšek Logar, M. Sežun. 2008. *Municipal waste as a potential source of alternative energy*. Venice 2008, Second International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy; 17-20 November 2008.
18. Komunala Nova Gorica d.d., Cesta 25. junija 1. 5000 Nova Gorica. [http://www.komunala-ng.si/mma_bin.php/\\$fld/2007031309270017/\\$fName/CENTER+ZA+RAVNANJE+Z+ODPADKI+NOVA+GORIC1.pdf](http://www.komunala-ng.si/mma_bin.php/$fld/2007031309270017/$fName/CENTER+ZA+RAVNANJE+Z+ODPADKI+NOVA+GORIC1.pdf) (30.4.2008)
19. Komunala Nova Gorica d.d., Cesta 25. junija 1. 5000 Nova Gorica. Projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja in izvedbo. Izraba odlagališčnega plina. Št. projekta 17–07–09.
20. Programska oprema LandGEM: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software> (15.6.2008)
21. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (15.6.2008)
22. The Clean Air Act (CAA) <http://epw.senate.gov/envlaws/cleanair.pdf> (3.3.2009)

23. Strnad J. 1977. Fizika, 1. del; mehanika, toplota. Državna založba Slovenije, Ljubljana, str. 186
24. Puhar J. 1994. Krautov strojniški priročnik. Enajsta slovenska izdaja. Tehniška založba Slovenije, str. 65, 202
25. Direktiva sveta 1999/31/ES z dne 26. aprila 1999 o odlaganju odpadkov na odlagališčih:
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1999L0031:20031120:SL:PDF> (19.5.2009)
26. GA2000 Range Gas Analysers Operating Manual
[http://www.geotech.co.uk/Downloads/GA2000%20Range%20Operating%20Manual%20\(3\).pdf](http://www.geotech.co.uk/Downloads/GA2000%20Range%20Operating%20Manual%20(3).pdf) (26.1.2010)
27. Jenbacher landfill engine:
<http://ge.ecomagination.com/site/products/jenl.html#linksdownloads> (14.5.2009)
28. Co Jen, GE Energy, Jenbacher gas engines, Issue 3/2009:
http://www.ge-energy.com/prod_serv/products/recip_engines/en/cojen_issue_2009_en/GE_Co_Jen.pdf (22.9.2009)