

MOGUĆNOSTI ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASA ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE SA DEPONIJAMA U OPŠTINAMA CENTRALNE SRBIJE

POSSIBILITIES FOR UTILIZATION OF LANDFILL GAS FOR THE PRODUCTION OF ELECTRICITY FROM LANDFILLS IN THE MUNICIPALITIES OF CENTRAL SERBIA

Čedo LALOVIĆ*

Svaka lokacija na koju se odlaže komunalni otpad predstavlja bioreaktor koji generiše proceđne vode i gasove. Deponijski gas poseduje energetska vrednost, što ga čini potencijalnim gorivom za pogon gasnih motora u postrojenjima za kogeneraciju. Nakon izvršenog merenja sastava deponijskog gasa na 6 od 8 biotrnova ustanovljen je zadovoljavajući procenat udela metana u deponijskom gasu pa time i potencijal za njegovo korišćenje. Korišćenjem softverskog paketa „Ukraine LFG model v1“ dobijeni su podaci o časovnoj produkciji metana (574 m³/h) kao i preporuka o izboru odgovarajuće snage motora (0,6 MW). Detaljnom tehnno-ekonomskom analizom, uzimajući u obzir trenutne prodajne cene električne (6,9 c€/kWh) i toplotne energije (5 din/kWh), utvrđeno je da se investicija od 985.000 € isplati u periodu od 5 godina i 4 meseca.

Ključne reči: komunalni otpad, metan, deponijski gas, kogeneracija, model, biotrn

Each location where municipal waste is disposed represents a bioreactor that generates the leachate and gasses. Landfill gas has high energy value, which makes it a potential fuel for gas engines in cogeneration plants. After carrying out the measurements of composition of landfill gas at 6 of 8 biotorns the high share of methane in biogas was confirmed. Using the software package "Ukraine LFG model v1" hourly production of methane was calculated (574 m³/h). Also; according to methane production selection of gas engine for cogeneration was made (0.6 MW). Through detailed techno-economic analysis, taking into account the current sale prices of electricity (6.91 c€/kWh) and heat (5 RSD/kWh), it was found that for the investment of 985,000 € payback period is 5 years and 4 months

Key words: municipal solid waste, methane, landfill gas, cogeneration, model, biotrn

1 UVOD

Svaka lokacija na koju se odlaže komunalni otpad predstavlja bioreaktor koji generiše proceđne vode i gasove. Gas koji nastaje u telu deponije poznat je kao deponijski gas. Deponijski gas spada u „greenhouse“ gasove, odnosno gasove koji utiču na pojačanje efekta „staklene bašte“ i njegova nekontrolisana emisija doprinosi globalnom atmosferskom zagrevanju. Takođe, deponijski gas poseduje energetska vrednost, što ga čini potencijalnim gorivom za pogon gasnih motora i dobijanja električne i toplotne energije tim putem. Odlagalište gasa (LFG) je u suštini bioreaktor u kome se produkuje metan CH₄ (50-55%) i ugljen dioksid CO₂ (40-45%) uz prisustvo organskih nemetanskih jedinjenja u tragovima. Osim toga, CH₄ ima 25 puta veći globalni potencijal upozorenja u odnosu na CO₂ [1]. To praktično znači da jedna tona metana oštećuje ozonski omotač kao 28 tona ugljen dioksida. Zbog toga se mnogo više pažnje posvećuje emisiji metana CH₄. Negativan uticaj LFG na životnu sredinu može se smanjiti kroz njegovo prikupljanje, adekvatnu preradu i dalju upotrebu kao gorivo za pogon kogeneracijskih gasnih postrojenja. Na taj način, otpad se može koristiti za postizanje ekonomskih dobitaka kroz prodaju proizvedene energije. Ovaj metod korišćenja LFG kao obnovljivog izvora energije obično se subvencionise, što je primenjeno i u slučaju Srbije. Međutim, uprkos definisanim subvencijama [2], činjenica je da se još uvek upravljanje otpadom u Srbiji zasniva se na deponovanju na deponijama [3] i takav morfološki sastav otpada, sa više od

* Corresponding author: ekoteh.ar@gmail.com

60% biorazgradivog sadržaja, ima odlučujući uticaj za proizvodnju CH₄. Bez obzira na ovu činjenicu još uvek nema postrojenja za iskorišćenje LFG u Srbiji. Cilj ovog rada je da utvrdi potencijale za izgradnju takvih postrojenja, investicije potrebne za takva preduzeća i za period povraćaja za investicije potrebne u slučaju Srbije.

Toplotna moć deponijskog gasa je 4 - 6 kWh/ m³ što je približno polovini toplotne moći prirodnog gasa. Približni ekvivalenti deponijskog gasa sa ostalim uobičajenim gorivima su dati u tab. 1.

Tabela 1. Ekvivalent deponijskog gasa sa sadržajem metana od 50%

Gorivo	Ekvivalenti (na 10.000 l deponijskog gasa)
Prirodni gas	6.766
Propan	7,35
Butan	6,55
Benzin	39
Lož ulje	36
Srednje suvo drvo (kg)	13

U industrijskim zemljama nastaje 300 - 400 kg komunalnog otpada godišnje po osobi.. Procesi koji doprinose formiranju deponijskog gasa su bakterijsko razgradivanje , volatilizacija i hemijske reakcije unutar deponijske mase. Najveći deo deponijskog gasa formira se bakterijskom razgradnjom. S obzirom na to da komunalni otpad većim delom čini otpad organskog porekla, bakterije prisutne u deponiji razgrađuju taj otpad kroz četiri faze, a sastav gasa se menja tokom svake od tih faza [4].

1.1 Modeliranje procesa proizvodnje LFG

Polazna tačka za procenu potencijala deponije je određivanje stope proizvodnje LFG . Da bi se dobili relevantni rezultati, mora biti odabran adekvatan matematički model. Prema dostupnoj literaturi na ovu temu, količina LFG koja se generiše po jedinica mase otpada se kreće od 40 do 250 m³ po toni deponovanog otpada [5,6]. Najpopularniji softverski alati za modeliranje generisanja LFG (LandGEM, Ukrain i IPCC) koriste jednačinu prvog reda za izračunavanje brzine raspadanja otpada. Model prvog reda uključuje efekat starosti (otpada) na proizvodnju LFG [7]. Takođe moramo imati u vidu da na proizvodnju LFG utiču i klimatske karakteristike [8], kao i praksa upravljanje ,pa se jednačina prvog reda može se proširiti i na ove faktore. Ova jednačina primenjen je u Ukrajinskom modelu, koji je razvila Američka agencija za zaštitu životne sredine putem Globalne inicijative za metan. S obzirom da je ovo proširena jednačina daje najbolje rezultate, ista je implementirana u bazu podataka potencijala kogeneracije u Srbiji. Na osnovu podataka za svaku od predmetnih opština, ova jednačina izračunava količinu generisanog deponijskog gasa LFG. Proračun se temelji na formuli:

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) \cdot e^{-kt_{i,j}} \cdot MCF \cdot F \quad (1)$$

gde je :

Q_{LFG} - maksimalna očekivana brzina proizvodnje LFG [m³ / godišnje],

i - vremenski priraštaj od jedne godine,

n - godina izračunavanja,

j - vremenski prirast od 0,1 godine,

k - stopa generisanja CH₄ [godišnje],

L₀ - potencijalni kapacitet proizvodnje CH₄ [m³ / t],

M_i -masa čvrstog otpada odloženog u i-toj godini [t],

$t_{i,j}$ - starost j-tog dela otpadne mase M_i odložene u i-toj godini (decimalne godine),

MCF - faktor korekcije CH₄, i

F - faktor podešavanja požara

Primenom prethodne formule dobijamo količinu LFG koja se generiše za godinu dana na osnovu količine deponovanog otpada. Dakle, za izvođenje ove vrste proračuna mora se utvrditi godišnja količina odloženog otpada za vremenski period koji počinje od momenta njegovog odlaganja kao i morfološka kompozicija tog istog otpada.[9]

2 MERENJE SASTAVA I PRORAČUN ENERGETSKOG POTENCIJALA DEPONIJSKOG GASA NA DEPONIJAMA U KRAGUJEVCU KRALJEVU I ARANĐELOVCU

Merenje sastava deponijskog gasa moguće je vršiti na prethodno pripremljenim biotrnovima za prihvrat proizvedenog biogasa. Od tri obrađene deponije u Kragujevcu, Kraljevu i Aranđelovcu, jedino deponija u Jovanovcu poseduje 17 biotrnova, od kojih su 8 pristupačni, a preostali su zatrpani usled dugotrajne nekontrolisane akumulacije otpada. Na tim trnovima bilo je moguće vršiti merenje sastava deponijskog gasa [10]. Količina čvrstog komunalnog otpada koji se odlaže na deponiju je procenjena na 156 t/ dan, sa više od 50% biorazgradivog otpada. Do danas je oko 2 miliona tona otpada deponovano pa je prosečna dubina deponije 15 m. Deponije u Kraljevu - Kulagića Ada i Aranđelovcu - Misača ne poseduju aktivne biotrnove za prihvrat proizvedenog biogasa pa se merenja sastava biogasa nije vršilo već je njegov energetski potencijal urađen primenom matematičkog modela (1). Cilj merenja je potvrda proizvodnje deponijskog gasa, kao i određivanje njegovog sastava. Merenje je izvršeno pomoću uređaja za gasnu analizu „GEM 2000 plus“ proizvođača „Geotechnical Instruments“ iz Velike Britanije, specijalizovanog za proizvodnju aparature za ekstrakciju i analizu deponijskih gasova. Uređaj je projektovan za merenje koncentracije sledećih gasova: CH₄, CO, CO₂, H₂S, O₂ kao i za merenje temperature i atmosferskog pritiska. Na aktivnim biotrnovima deponije u Kragujevcu, koncentracija metana je bila oko 59%, što je zadovoljavajuće, obzirom da je za ekonomsku isplativost korišćenja metana kao energenta, potrebna najmanja koncentracija metana u deponijskom gasu od 35%.

Za izračunavanje energetskog potencijala deponijskog gasa korišćen je specijalizovani softver „Ukraine LFG Model v1“ koji je razvijen u „Microsoft EXCEL“ okruženju. Softver je koncipiran u 5 radnih listova (*Inputs, Disposal & LFG Recovery, Waste Composition, Output-Table, Output-Graph*), zbog jednostavnijeg unosa polaznih podataka i preglednosti dobijenih rezultata.

U okviru radnog lista *Inputs*, slika 1, unose se podaci o deponiji i to : ime, lokacija, godina osnivanja, kapacitet deponije, dubina, količina godišnjeg odloženog otpada, godišnji porast u procentima deponijskog otpada i drugi potrebni podaci. To su osnovni podaci potrebni za proračun količine deponijskog gasa.



Slika 1. - Radni list osnovnih podataka o deponiji

Radni list *Disposal & LFG Recovery*, slika 2, predstavlja prikaz količina deponovanog otpada po godinama od godine osnivanja deponije, pa sve do željene godine, za koju se određuje količina deponijskog gasa.

Ukraine Landfill Gas Model
Release Date: September 2009

Methane to Markets Developed by SCS Engineers for the U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program
with local support from SEC Biomass

DISPOSAL AND LFG RECOVERY WORKSHEET

Year	Waste Disposal Estimates (Metric Tonnes)	Cumulative Metric Tonnes	Collection System Efficiency	Actual LFG Recovery (m ³ /hr at 50% CH ₄)	Projected LFG Recovery (m ³ /hr at 50% CH ₄)	Baseline LFG Recovery (m ³ /hr at 50% CH ₄)
1963	24,000	24,000	0%		0	0
1964	24,400	48,400	0%		0	0
1965	24,900	73,300	0%		0	0
1966	25,400	98,700	0%		0	0
1967	25,900	124,600	0%		0	0
1968	26,400	151,000	0%		0	0
1969	26,900	177,900	0%		0	0
1970	27,400	205,300	0%		0	0
1971	27,900	233,200	0%		0	0
1972	28,400	261,600	0%		0	0
1973	28,900	290,500	0%		0	0
1974	29,400	319,900	0%		0	0
1975	29,900	349,800	0%		0	0
1976	30,500	380,300	0%		0	0
1977	31,100	411,400	0%		0	0
1978	31,700	443,100	0%		0	0
1979	32,300	475,400	0%		0	0
2013	62,500	1,996,319	61%		319	0
2014	63,700	2,060,019	61%		327	0

Slika 2. - Količina deponovanog otpada po godinama

Radni list *Waste Composition*, slika 3, predstavlja tabelu morfoloskog sastava otpada. Ovaj radni list se koristi za unos podataka o sastavu otpada, a unose se procentualni udeli pojedinih vrsta otpada. Podaci o sastavu otpada dobijeni su eksperimentalnim putem i korišćenjem razvijene metodologije [11]. Nakon unetih vrednosti, dobijaju se podaci o količini deponijskog gasa.

Slika 3. - Radni list morfološkog sastava otpada

Radni listovi *Output-Table*, slika 4 i *Output-Graph*, slika 5, su radni listovi sa izlaznim podacima. Prikazani su rezultati o količini deponijskog gasa, snaga odgovarajućeg motora za iskorišćenje deponijskog gasa, kao i dijagram generisanja deponijskog gasa i potencijal za iskorišćenje istog.

Na osnovu softverske analize došlo se do sledećih podataka:

deponija u Kragujevcu generiše 574 m³/h deponijskog gasa, deponija u Arandjelovcu generiše 237 m³/h a deponija u Kraljevu produkuje 210 m³/h. Na osnovu dobijenih rezultata o generisanju deponijskog gasa softverska preporuka je da se za ove količine gasa koriste motori snage 0,6 MW, 0,25MW i 0,21MW respektivno. U cilju što efikasnijeg i isplativijeg iskorišćenja gasa, predloženo je da se na svim deponijama koristi više motora manje snage i to:

Kragujevac : četiri modela manjih snaga, tj. dva modela snage 0,2 MW (TEDOM Cento T200) i dva modela snage 0,1 MW (MAN LC0836), umesto jednog modela instalisane snage 0,6 MW

Arandelovac : dva modela snage 0,1 MW eco 125 BG

Kraljevo : dva modela snage 0,1 MW (MAN LC0836)

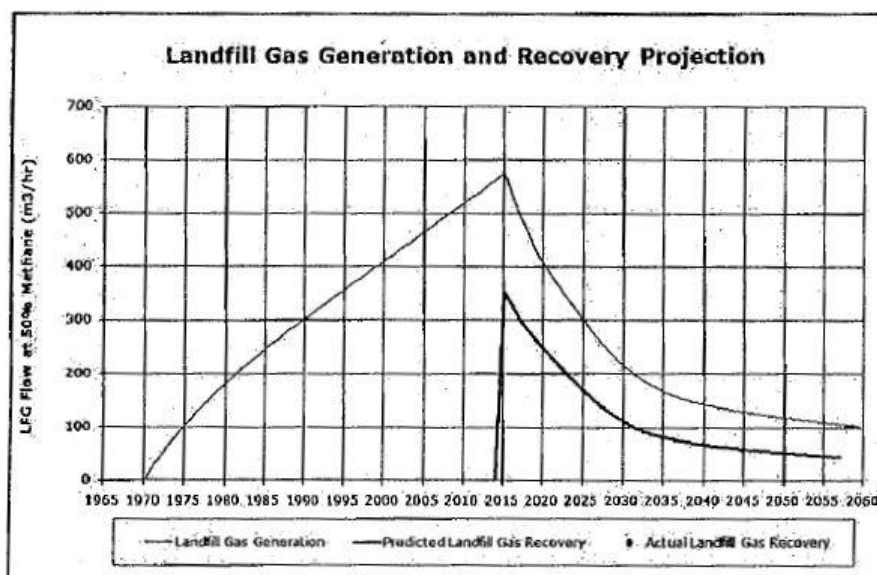
Landfill Gas Model
Release Date: September 2009

Developed by SES Engineers for the U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program, with local support from REC Energy

PRODUCTION OF LANDFILL GAS (LFG) AND RECOVERY
Atkinson, Erie, Ohio

Year	Total LFG (MMcf)	LFG at 5000 ft (MMcf)	Production (MMcf)	Recovery (MMcf)	Recovery %	LFG at 5000 ft (MMcf)		LFG at 5000 ft (MMcf)	LFG at 5000 ft (MMcf)	LFG at 5000 ft (MMcf)	LFG at 5000 ft (MMcf)	LFG at 5000 ft (MMcf)	LFG at 5000 ft (MMcf)
						Production	Recovery						
2012	61,402	1,821,252	154	238	35,222	28	0	0	0	0	0	0	0
2013	62,305	1,936,852	552	315	10,110	58	0	0	0	0	0	0	0
2014	63,262	2,070,122	903	391	10,211	58	0	0	0	0	0	0	0
2015	64,274	2,224,152	124	478	10,326	58	219	284	4,412	0,4	0	1,802	31,124
2016	65,342	2,398,182	233	574	10,452	58	308	353	4,512	0,5	0	1,879	31,492
2017	66,466	2,592,182	365	677	10,588	58	397	418	4,612	0,5	0	1,947	31,862
2018	67,646	2,806,152	521	782	10,734	58	486	480	4,712	0,5	0	1,997	32,232
2019	68,882	3,040,152	691	888	10,890	58	575	538	4,812	0,5	0	2,037	32,602
2020	70,174	3,294,152	874	994	11,056	58	664	592	4,912	0,5	0	2,067	32,972

Slika 4. - Dobijeni rezultati



Slika 5. Dijagram o količini deponijskog gasa

Tabela 2. Predlog gasnih motora na posmatranim deponijama

Grad	Produkcija gasa m ³ /h	Predložena mašina	Potrošnja m ³ /h	Električna snaga (kW)	Toplotna snaga (kW)	Efikasnost (%)
Kragujevac	570	ET340MABG	141	340	410	81,9
		BG LC0836	90	250	232	83,0
Arandelovac	237	eco 125 BG	56	125	185	85,5
		eco 80 BG	37	80	125	85,7
Kraljevo	205	2G120 BG	50	120	178	85,7
		FMB-100-BSM	39	81	128	84,1

Tabela 3. Tehno-ekonomska analiza ekonomski izvodljivih CHP postrojenja

Grad	Investicija u mašinu €kW ⁻¹	Investicija i sistem za prikupljanje i obradu (€)	Ukupna investicija	Troškovi održavanja (€/god)	Godišnja proizvodnja el. energije (MWh/god)	Godišnji neto profit (€/god)	Period povrata
Kragujevac	666	616292	1027153	65886	4720	260266	3,95
	738						
Arandelovac	929	303626	506043	28881	1640	84443	5,99
	1078						
Kraljevo	942	300022	500036	28468	1608	82645	6,00
	1074						

3 GASNI MOTORI SA UNUTRAŠNjim SAGOREVANJEM

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem uglavnom se koriste za iskorišćenje deponijskog gasa na deponijama koje proizvode dovoljno gasa za proizvodnju električne energije. Najčešće se koristi tri do pet motora manje snage. Postavljanje većeg broja motora manje snage praktikuje se iz više razloga među kojima su promenljiva količina dostupnog deponijskog gasa tokom vremena, mogućnost kontinualne proizvodnje energije u slučaju kvara na nekom od motora, i drugo. Kako je produkcija deponijskog gasa tokom životnog veka deponije promenljiva, većim brojem motora manje snage, moguće je u svakom trenutku obezbediti iskorišćenje visokog procenta raspoloživog deponijskog gasa uključivanjem svih ili samo nekih od raspoloživih motora. Ako bi se koristio samo jedan motor većeg kapaciteta, smanjenje produkcije deponijskog gasa bitno bi uticalo na smanjenje efikasnosti rada motora, usled čega bi cena proizvedene energije bila veća [10]. Postoje dve vrste motora sa unutrašnjim sagorevanjem:

- motori sa varničnim paljenjem, tzv. OTO motori i
- motori sa kompresionim paljenjem, odnosno Dizel motori.

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem su vrlo pogodni za korišćenje u manjim postrojenjima za proizvodnju električne i toplotne energije. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem su dostupni u opsegu od svega nekoliko kW, pa sve do 10 MW i pogodni su za korišćenje u raznim kogeneracionim postrojenjima. Najčešće se koriste motori koji generišu električnu energiju do 1 MW.

Na tržištu postoji veliki broj proizvođača kogeneracionih jedinica koje koriste motore sa unutrašnjim sagorevanjem. Neki od njih proizvode i koriste svoje motore (MAN, TEDOM, WAUKESHA, JENBACHER,), dok drugi koriste motore već pomenutih proizvođača, ili proizvode svoje kogeneracione jedinice sa drugačijim karakteristikama. Iz kataloga pomenutih, ali i drugih proizvođača pronađen je 61 motor sa unutrašnjim sagorevanjem, za iskorišćenje deponijskog gasa. Efikasnost kogeneracionih jedinica koje koriste motore sa unutrašnjim sagorevanjem, kreće se u opsegu od 29,5 do 42,8% za generisanje električne energije, dok je ukupna efikasnost između 79,5 i 96%. Efikasnost generisanja električne energije ima rastući trend, tj. modeli veće snage imaju veću efikasnost i obrnuto. Kada su u pitanju najmanji modeli, snage do 100 kW, efikasnost u generisanju električne energije se kreće u opsegu od 29,5 do 33,1%. Ukupna efikasnost za iste modele je između 80,5 i 96%. Efikasnost u generisanju električne energije za modele snage raspona 101- 500 kW se kreće od 33 do 42,8%. Ukupna efikasnost za iste modele je od 79,5 do 87,3%.

Kogeneracione jedinice koje koriste motore sa unutrašnjim sagorevanjem snage 501- 1.000 kW imaju efikasnost generisanja električne energije od 36,6 do 42,8%, a njihova ukupna efikasnost je u opsegu od 83 do 88,6%. Kogeneracione jedinice koje koriste motore sa unutrašnjim sagorevanjem snage 1.001- 2.000 kW imaju efikasnost generisanja električne energije u opsegu od 38,5 do 42,8%, a njihova ukupna efikasnost se kreće od 83,3 do 89,2%. Kogeneracione jedinice koje koriste motore sa unutrašnjim sagorevanjem čija snaga prelazi 2.000 kW imaju efikasnost u generisanju električne energije od 41,9 do 42,8%, dok se ukupna efikasnost kod ovih modela kreće od 84 do 89,1%.

Investicioni troškovi (€/kW) motora sa unutrašnjim sagorevanjem zavise od veličine postrojenja, odnosno instalisane snage - P_{el} [kW], kvaliteta i tehnologije. Prema [12], investicioni troškovi se mogu izračunati prema jednačini (2). U ove troškove ne ulaze troškovi izgradnje mašinske zgrade i instaliranja opreme

$$I = 4639 \times P_{el}^{-0,33} \quad (2)$$

gde su: I - investicioni troškovi, P_{el} - instalisana snaga.

Iz jednačine (2) sledi da su za motore manje instalisane snage, potrebna veća ulaganja po kW instalisane snage. Oni se kreću od oko 2500 €/kW za najmanje modele, pa do 300 €/kW za modele snage od oko 3 MW.

Troškovi održavanja generalno zavise od kvaliteta goriva, veličine postrojenja ali i od broja uključivanja i isključivanja. U zavisnosti od instalisane snage, mogu se izračunati troškovi održavanja [€/MWh] i to u skladu sa sledećom jednačinom 3. [12]:

$$C = 4,9406 \times P_{el}^{-0,2219} \quad (3)$$

gde su: C - troškovi održavanja.

Može se uzeti, kao alternativa, da troškovi održavanja iznose 4% od ukupne investicije. Troškovi održavanja su obrnuto srazmerni instalisanoj snazi motora, pa su troškovi održavanja [€/MWh] za motore manje snage veći i obrnuto.

3.1 Procena investicija i njihov period povrata

Da bi se pojednostavila evaluacija i procena, kapitalne investicije (TI) u kogeneracijska postrojenja se računaju kao zbir ulaganja u motore, ulaganja u sisteme za sakupljanje i prerada biogasa, investicije u električnu opremu i konačno, investicije u sistem kontrole. Manja ulaganja se ne uzimaju u obzir jer su zanemarljiva u odnosu na kapitalna ulaganja TI. Izbor odgovarajućeg modela motora izvršen je na osnovu potrošnje modela motora dostupnog na tržištu, tako da potrošnja po satu motora odgovara satnoj proizvodnji biogasa na deponijama komunalnog otpada. Zbog nepravilnog tretmana deponovanog otpada (nedostatak zbijanja ili odgovarajućih pokrivača deponije), često se dešava oksidacija CH_4 u zemljištu koje pokriva deponiju [13], čime se smanjuje količina koja se može koristiti za svrhe dobijanja energije. Pored toga, nije moguće sakupiti sve proizvedene LFG i koristiti ih za proizvodnju energije. Efikasnost sistema za prikupljanje gasa obično se kreće od 50-75% [9]. Stoga se u ovom istraživanju razmatra usvojeni nivo efikasnosti sistema prikupljanja gasa od 60% kao realističan. Uzeli smo u obzir i smanjenje količine biorazgradivog otpada deponovana u skladu sa Direktivom o deponijama Srbije [14] Pošto određeni udeo biorazgradivog otpada treba tretirati odvojeno, količina LFG-a će takođe biti smanjena, što je bilo pogodeno na motorima manje snage koji su izabrani u našem radu. Pravi izbor motora dovodi do slučaja maksimalnog nivoa efikasnosti, a samim tim i do povoljnijeg perioda otplate (PBP). Za tri deponije analizirane u ovom radu, napravljen je izbor od dva Otto motora prema prethodno utvrđenim kriterijima. Nominalne vrednosti snage motora, efikasnost i cena se uzimaju iz kataloga proizvođača. Ove vrednosti se koriste za procenu investicija u motore. Investicije u sisteme za prikupljanje gasa i preradu gasa zavise od oblasti pokrivenosti i dubinu deponije, ali i od njenih kontura. Oblik deponije utiče na broj bušotina za sakupljanje gasa koje treba instalirati na deponiju. Prema nekim izvorima [15], najveća efikasnost sistema za sakupljanje biogasa se postiže kada se gas prikuplja iz bušotine čiji je prečnik 90 mm i čija pokrivenost ima radijus R od 25 m instalirani su na udaljenosti od 1.73 R . Preporučeni prečnik cevi koje se koriste u cevovodu za sakupljanje gasa iznosi 160 mm. Pored investicija u sistem prikupljanja gasa, u proračune se takođe uzimaju u obzir investicije u sve one sisteme neophodne za preradu gasa i pripreme za njegovu efikasnu upotrebu u motorima.

Period povrata (PBP) investicija se izračunava prema jednačini (4):

$$PBP = \frac{TI}{ANP} \quad (4)$$

gde je :

TI [€] ukupna investicija, a
ANP [€ godišnje] - neto profit godišnje.

Na osnovu nominalne snage motora, ANP se izračunava uzimajući u obzir troškove sistema održavanja jednačina (5):

$$ANP = (APEE \cdot PE) - AMC \quad (5)$$

gde je :

APEE godišnja proizvodnja električne energije,

PE - cena proizvedene električne energije i

AMC - troškovi održavanja.

Godišnja kalkulacija APEE se izračunava za 8000 radnih sati, dok se PE za kogeneracijsko postrojenje određuje na osnovu FEED-In tarife i iznosi 0,0691 € / kWh [14]. Troškovi održavanja zavise od električne snage motora i izračunavaju se na sledeći način:

$$AMC = 4,9406 \cdot EP^{-0,2219} \cdot 10 \quad (6)$$

gde je EP [€ po MWh] nominalna električna snaga motora.

4 EKONOMSKA ANALIZA KOGENERACIONOG POSTROJENJA

Na osnovu odabranih modela snage 200 kW (TEDOM Cento T 200), odnosno 100 kW (MAN LC0836) i korišćenjem jednačina 1 i 2, dobijaju se troškovi investicije kupovine motora i održavanja motora. Investicija kupovine motora snage 200 kW iznosi 318.000 €, dok je za motore snage 100 kW potrebno izdvojiti 200.000 €. Ukupna suma koju je potrebno investirati u motore iznosi 518.000 €. Troškovi održavanja motora snage 200 kW iznose 6.100 €, dok za motore snage 100 kW isti troškovi iznose 3.560 €, pa ukupni troškovi održavanja ovih motora iznose 9.660 €.

Prema prethodnim istraživanjima [16], sprovedenim na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, na deponiji Jovanovac, potrebno je izbušiti 40 vertikalnih bunara prečnika 800 mm. U bunarima će biti smeštene perforirane cevi, odnosno, sonde spoljašnjeg prečnika 100 mm. Sonde nisu perforirane celom dužinom, već samo donji deo. Gornji deo nije perforiran kako bi se sprečio ulaz vazduha u sistem. Sonde će biti postavljene na dubini od 10 m, a na rastojanju od 60 m. Nakon postavljanja sondi u prethodno izbušene bunare, oko njih će biti položen kamen prečnika oko 30 mm. Kamen se polaže kako se bunar ne bi urušio, ali i da bi sprečilo širenje krupnijih nečistoća iz tela deponije u sistem. Prema [16], cena sistema za sakupljanje, procesiranje i konverziju gasa je na nivou od oko 450.000 €. Toškovi održavanja sistema, prema [17], iznose 37.700 € godišnje i to 1.655 € za bunare, 3.310 € za baklju i 32.740 € za blover.

Dimenzije objekta u kome će biti smeštene kogeneracione jedinice su određene u odnosu na dimenzije tih kogeneracionih jedinica. Proračunske dimenzije objekta su 20m x 13m x 5m. Za izgradnju ovakvog objekta potrebna su sredstva u procenjenom iznosu od 1.979.800.dinara

Prema prethodnoj proceni ukupni troškovi mašinske zgrade iznose 1.979.800 dinara i kada se uzmu u obzir i neki nepredviđeni dodatni troškovi, ukupni troškovi će iznositi oko 2.000.000 dinara. Uz trenutni srednji kurs evra prema NBS, ukupni troškovi iznose oko 17.000 €. Napominje se da u ovu analizu izgradnje objekta nisu uračunati troškovi građevinskih radova.

Vreme povraćaja investicije predstavlja ocenu ekonomske opravdanosti investicije. S obzirom da kogeneracione jedinice troše gas koji se proizvodi na samoj deponiji i nije suštinski trošak, postrojenje će uvek raditi sa dobitkom. Procena vremena povraćaja investicije biće određena kao odnos instalacionih troškova kogeneracione jedinice, troškova održavanja motora, troškova izgradnje sistema za sakupljanje, procesiranje i konverziju gasa, troškova izgradnje mašinske zgrade i dobiti od generisanja električne energije pri važećim podsticajnim merama (tabela 4) koristeći sledeću jednačinu.

$$t_{pi} = (I + S + I_s + I_a) / ((S_1 \cdot X \cdot 24 \cdot 365) / 100) \quad (4)$$

gde je:

t_{pi} ; - vreme povraćaja investicije,

I - troškovi motora,
 S - troškovi održavanja motora,
 I_S - troškovi sistema za prikupljanje i procesiranje gasa
 I_a - troškovi objekta
 S_1 - podsticajna otkupna cena,
 x - količina električne energije

Ukupna suma izgradnje postrojenja kapaciteta 600 kW iznosi 985.400 €. Električna efikasnost motora sa unutrašnjim sagorevanjem snage 100 kW iznosi 38,4 %, dok električna efikasnost motora snage 200 kW iznosi 39,2 %. Ukupna količina električne energije koju ovi motori daju je 233,6 kWh. Sa podsticajnim merama, otkupna cena električne energije za takvo postrojenje je 6,91 c€/kWh, pa bi zarada u prvoj godini iznosila 141.401 €. Ako se uzme u obzir da investitor poseduje sumu potrebnu za izgradnju postrojenja, vreme povraćaja investicije samo od prodaje električne energije bilo bi oko 7 godina.

Tabela 4. Troškovi investiranja i ukupna cena energije

Investicija	Cena
Troškovi motora (€)	518.000
Troškovi održavanja motora	9.660
Troškovi sistema za prikupljanje i procesiranje gasa (€)	450.000
Troškovi održavanja sistema za prikupljanje i procesiranje gasa (€)	37.700
Troškovi izgradnje objekta	17.400
Otkupna cena (c€/kWh)	6,91

Toplotna efikasnost motora sa unutrašnjim sagorevanjem snage 100kW iznosi 46,9%, dok toplotna efikasnost motora snage 200kW iznosi 48,1%. Količina toplotne energije koju ovi motori daju je 286,2kWh. U Srbiji još uvek nije definisana otkupna cena toplotne energije iz OIE ali se kao reporna može uzeti cena „Energetike” D.O.O. u Kragujevcu od 5 din/kWh. Prodajom toplotne energije postrojenje bi u prvoj godini ostvarilo zaradu od 125.355 €.

Ukupna zarada na godišnjem nivou iznosi 266.756 €. Period povraćaja investicije je znatno smanjen prodajom električne i toplotne energije i iznosi oko 4 godine. Na osnovu izrade ekonomskog toka projekta jasno je da priliv novca dolazi od prodaje električne i toplotne energije po utvrđenim cenama. Odliv novca u prvoj godini predstavljaju troškovi izgradnje postrojenja, plate radnika i porez na dobit. U prvoj godini projekta nema troškova održavanja da bi se nakon toga postrojenje održavalo svake druge godine. Ovakvo postrojenje zapošljava 10 radnika sa primanjima od 45.000 dinara. Porez na dobit za investicije manje od 1.500.000 € iznosi 10%. Ukupna investiciona ulaganja u ovaj objekat na deponiji Jovanovac u Kragujevcu iznose 985.400 € pa je porez na dobit za ovaj projekat 10%. Na osnovu ove analize može se konstatovati da je projekat prihvatljiv.

Tabela 5. Neto sadašnja vrednost projekta

Godina veka projekta	Neto priliv (€)	Kumulativni neto priliv (€)
I	- 779.799	-779.799
II	158.241	-621.558
III	205.601	-415.957
IV	158.241	-257.716
V	205.601	-52.115
VI	158.241	106.126
VII	205.601	311.727
Period povratka investicije	5 godina i 4 meseca	

5 ZAKLJUČAK

Upravljanje otpadom u Srbiji zasniva se na deponovanju u deponijama. Problem sa deponijama prisutan je kao stalna pojava, pa su tako i deponije u Kragujevcu, Kraljevu i Aranđelovcu daleko od ekološki prihvatljivih i uređenih deponija. Na ovim deponijama se dnevno odlaže oko 320 tona čvrstog komunalnog otpada. U ovom istraživanju, kreirana je baza podataka o potencijalima ko-generacije opštinskih deponija na teritoriji tri grada Centralne Srbije. Pored toga, izvedena je tehno-ekonomska analiza mogućnosti izgradnje kogeneracijskih postrojenja na postojećim deponijama. Korišćenjem specijalizovanog softvera *Ukraine LFG Model* vi, dobijena je potencijalna količina deponijskog gasa na deponijama Jovanovac, Kulagića Ada i Misača u iznosu od 1007 m³/h a na osnovu količine gasa i energetske potencijal, koji iznosi 1,01 MW. Dobijeni rezultati pokazuju da se na ovim deponijama mogu izgraditi tri kogeneracijska postrojenja sa ukupnom električnom energijom nominalne snage 1,0 MV i 1,26 MV nominalne snage grejanja. Deponijski gas se može iskoristiti u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, koji se istovremeno mogu koristiti za dobijanje električne i toplotne energije. Kako se tokom vremena količina deponijskog gasa menja, preporučuje se korišćenje 2 do 3 motora manje snage, kako bi se u svakom trenutku obezbedilo iskorišćenje visokog procenta raspoloživog deponijskog gasa i pogonska spremnost postrojenja. Predloženo je korišćenje više gasnih motora manje snage. Na deponiji Jovanovac u Kragujevcu izabrana su dva motora snage 200 kW i dva motora snage 100 kW. Količina električne energije koju motori sa unutrašnjim sagorevanjem mogu da proizvedu na ovoj deponiji je 233 kWh, dok je količina toplotne energije koju proizvode 286 kWh. Na deponijama Kulagića Ada i Misača predložena su dva manja gasna motora snage po 100 kW. Količina električne energije koju motori sa unutrašnjim sagorevanjem mogu da proizvedu na ovim deponijama je 105 kWh, dok je količina toplotne energije koju proizvode 125 kWh. Izgradnjom predloženih postrojenja, pored ekonomskih koristi, smanjio bi se pritisak na životnu sredinu. Spaljivanjem LFG u našim postrojenjima za kogeneraciju smanjila bi se emisija CO₂ ekvivalentna 81.000 tona godišnje. Međutim, implementacija projekata za korišćenje otpada u energetske svrhe pored ispunjavanja tehničkih uslova takođe se suočava i sa socio-kulturnim problemima. Stoga će se buduća istraživanja fokusirati na pronalaženje rješenja za ove probleme, kao i na pronalaženje sredstava za finansiranje projekata ove vrste.

Investiciona ulaganja u ovom radu kalkulirana su samo za najveću deponiju Jovanovac u Kragujevcu. Ukupna investicija za izgradnju kogeneracionog postrojenja kapaciteta 0,6 MW iznose oko 985.000 €. Prodajom samo električne energije godišnji priliv bi iznosio oko 140.000 € i period otplate postrojenja bi iznosio oko 7 godina. Republika Srbija nije propisala cenu po kojoj bi se prodavala toplotna energija dobijena iz obnovljivih izvora energije, pa je za ovu analizu uzeta cena koju propisuje „Energetika“ D.O.O. Kragujevac. Prodajom toplotne energije godišnji priliv postrojenja bi se povećao za sumu od oko 125.000 € i period otplate bi se smanjio na 4 godine. Međutim; detaljnom ekonomskom analizom, u kojoj su uračunati i troškovi održavanja, troškovi plata radnika i porez na dobit dobija se da period za povraćaj investicije iznosi 5 godina i četiri meseca. Ekonomskom analizom dolazi se do zaključka da je projekat ekonomski isplativ.

5.1 Skraćenice:

LFG - deponijski gas
CHP - kombinovana toplota i energija
PBP - period otplate
TI - ukupna investicija (kapitalno ulaganje)
ANP - neto profit godišnje
AMC- troškovi održavanja
EP - nominalna električna snaga

6 Literatura

- [1] Sing, B.K. et.al. Mikroorganisms and Climate Change: Terrestrial Feedback and Mitigation Options, *Nature Reviews Microbiology*, 8(2010) Nov. pp. 779-790

- [2] Official Gazette of RS 08/13. Decree of Incentive for Privileged *Power Produced Feed-in Tariffs 2013*
- [3] Stanisavljević N. et al. Methane emissions from Landfills in Serbia and Potential Mitigation Strategies a Case Study, *Waste Management and Research* 3,(2012) 10, pp.1095-1103
- [4] G.Vujić, M.Martinov, D.Ubavin, Studija mogućnosti korišćenja komunalnog otpada u energetske svrhe.
- [5] Humer, M. Lechner, Alternative Approach to the Elimination of Greenhouse Gases from Old Landfills, *Waste Management and Research*, 17 (1999) 6, pp. 443 - 452
- [6] Themelis, N. Ullo, P. Methane Generation in Landfills, *Renewable Energy*, 32(2007), 7, pp. 1243-1257
- [7] Bogner, J., et al., Comparison of models for Predicting Landfill Methane Recovery Publication. Report No. GR-LG 0075, SWANA- The Solid Waste Association of North America, Silver Spring, Md. USA, 1998
- [8] Vujić, G., et al. Influence of Ambient Temperature and Operational-Constructive Parameters on Landfill Gas Generation.- Case Study Novi Sad, *Thermal Science*, 14 (2010), pp.555-564
- [9] Rubio-Romero, J.C. et al. Profitability analysis of Biogas Recovery in Municipal Solid Waste Landfills, *Journal of Cleaner Production*. 55 (2013) Sep. pp.84-91
- [10] D.Ubavin, N.Maoduš, D.Milovanović, *Mogućnosti iskorišćenja deponijskog gasa*, Kompakt magazine, br.13. str.27-37, Asocijacija za upravljanje čvrstim otpadom
- [11] G.Vujić, D.Ubavin, *Utvrdjivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije*. Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
- [12] L.Mikael, *The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden- A comparison of different CHP technologies*, *Applied Energy*, vol.98, pp.502-511, 2012
- [13] Vujić, G., et al., Barriers for Implementation of „Waste to Energy” in Developing and Transition Countries : a Case Study of Serbia, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, published online on April 15th, 2015
- [14] Official Gazette of RS 92/10, Regulation of Waste Disposal on Landfills, 2010
- [15] Martin, S. Fernandez S. Management of biogas in Landfills of Municipal Solid waste, Government of the Principality of Asturias, Service Publica in Asturias, Oviedo, Spain 2000
- [16] M.Jeftović, N.Jovičić, D.Milovanović, G.Bošković, M.Milašinović, G.Jovičić, Idejno rešenje postrojenja za kogeneraciju deponijskog gasa iz komunalnog otpada grada Kragujevca, Katedra za energetiku i procesnu tehniku, FIN, Kragujevac, 2012
- [17] LFG *Energy Project Development Handbook US Environmental Protection Agency, USA*, 2009