ISKORIŠTENJE DEPONIJSKOG GASA ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE SA DEPONIJA U CENTRALNOJ SRBIJI

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

Radmila LIŠANIN[1*], Čedo LALOVIĆ
Fakultet za primenjenu ekologiju Futura

Svaka lokacija na koju se odlaže komunalni otpad predstavlja bioreaktor koji generiše procedne vode i gasove.Deponijski_gas poseduje energetsku vrednost, što ga čini potencijalnim gorivom za pogon gasnih motora u postrojenjima za kogeneraciju. Nakon izvršenog merenja sastava deponijskog gasa na ugrađenim biotrnovima ustanovljen je zadovoljavajući procenat udela metana u deponijskom gasu pa time i potencijal za njegovo korišćenje u energetske svrhe. Korišćenjem softverskog paketa,, Ukraine LFG model v 1 " dobijeni su podaci o časovnoj produkciji metana (574 m3/h) kao i preporuka o izboru odgovarajuće snage motora (0,6 MW). Detaljnom tehno-ekonomskom analizom, a 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. Land.fill gas has high energy value, which makes it a potential fuel for gas engines in co generation plants. After carrying out the measurements of composition of land.fill gas at 6 of 8 bio thorns 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 is5 years and 4 months

***Key words:** municipal solid waste, methan, landfilI gas, cogeneration,model, biothorn*

1 UVOD

Svaka lokacija na koju se odlaže komunalni otpad predstavlja bioreaktor koji generiše procedne 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 energetsku 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 CH_4 (50-55%) i ugljen dioksid CO_2 (40-45%) uz prisustvo organskih nemetanskih jedinjenja u tragovima.Osim toga, CH_4 ima 25 puta veći globalni potencijal upozorenja u odnosu na CO_2 [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 CH_4. 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 subvencioniše, 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 60% biorazgradivog

* Corresponding author's email: radmilalisanin20@futura.edu.rs

sadržaja,ima odlučujući uticaj za proizvodnju CH_4. 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 sledećoj *tabeli 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 razgraduju taj otpad kroz četiri faze, a sastav gasa se menja tokom svake od tih faza [4].

2 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 m^3 po toni deponovanog otpada [5,6]. Najpopularniji softverski alat za modeliranje generisanja LFG (Ukrain LFG model v1) koristi jednačinu prvog reda za izračunavanje brzine raspadanja otpada. Najbitniji faktori koji utiču na proces formiranja deponijskog gasa jesu njegov morfološki sastav, prisustvo kiseonika u deponiji, sadržaj vlage, temperatura tela deponije kao i vreme deponovanja otpada.Model jednačine raspada 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 upravljanj otpadom , pa se jednačina prvog reda mora proširiti i na ove faktore. Ova jednačina primenjena je u Ukrajinskom modelu, koji je razvila Američka agencija za zaštitu životne sredine putem Globalne inicijative za metan. S obzirom da ova 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 (1) :

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

gde je :

Q_{LFG} - maksimalna očekivana brzina proizvodnje LFG [m^3 / godišnje],

i - vremenski priraštaj od jedne godine,

n - godina izračunavanja,

j - vremenski prirast od 0,1 godine,

k - stopa generisanja CH_4 [godišnje],

L_0 - potencijalni kapacitet proizvodnje CH_4 [m^3 / t],

Mi - 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 CH_4, 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 na deponiju kao i morfološka kompozicija tog istog otpada.[9].

3 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 prihvat proizvedenog biogasa.Obrađene deponije u Kragujevcu i Kraljevu poseduju ugrađene biotrnove (37+39), od kojih su **18+10** pristupačni, a preostali su zatrpani usled dugotrajne nekontrolisane akumulacije otpada.Na tim biotrnovima bilo je moguće vršiti merenje sastava deponijskog gasa [10]. Prosečna količina čvrstog komunalnog otpada koji se odlaže na deponije u Kragujevcu i Kraljevu procenjena je na 150 t/ dan, sa više od 50% biorazgradivog otpada. Do danas je deponovano oko 2 miliona tona otpada pa je prosečna dubina deponije 15 m.Cilj merenja količine deponijskog gasa je potvrda generisanja deponijskog gasa, kao i određivanje njegovog sastava. Merenje je izvršeno pomoću uređaja za gasnu analizu *„GEM 2000 plus"* proizvodača *„Geotechnical Instruments"* iz Velike Britanije, specijalizovanog za proizvodnju aparature za ekstrakciju i analizu deponijskih gasova.Uređaj je projektovan za merenje koncentracije sledećih gasova: CH_4 , CO, CO_2, H_2S ,O_2 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%.Izmerena koncentracija metana na deponiji u Kraljevu bila je 58%. Za izračunavanje energetskog potencijala deponijskog gasa korišćen je specijalizovani softver *„Ukraine LFG Model vl"* 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 nastavku su prikazani radni listovi originalnog softvera.

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.

Methane to Markets

Ukraine Landfill Gas Model
Release Date: September 2019
Developed by SCS Engineers for the U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program
with local support from SEC Biomass

	PROJECTION OF LANDFILL GAS GENERATION AND RECOVERY INPUT WORKSHEET			INSTRUCTIONS: Edit all items with yellow lettering following the instructions next to each ite Instructions below describe input requirements.
1	Landfill name:	<Ime deponije>		1. Enter landfill name. This will feed into the Output Table.
2	City:	<kraljevo>		2. Enter city where the landfill is located. This will feed into the Output Tab
3	Province:	Serbia	3	3. Select province from the dropdown menu. Click on arrow and select state region.
4	Site-specific waste composition data?	No		4. Select No if there is no data, Yes if there is data. If Yes, input site spec
5	Year opened:	1971		5. Enter year landfill began receiving waste.
6	Annual disposal for latest year with data in tonnes per year (Mg/yr)	58,600	Mg	6. Enter the annual disposal rate for the most recent year with disposal rec
7	Year of annual disposal estimate	2019		7. Enter the most recent year with disposal records. If no disposal records
8	Waste in place estimate available in tonnes (Mg)?	Yes		8. Indicate whether data is available on metric tonnes of waste in place. S annual disposal data are available, enter figures for each year with data in D
9	Waste in place estimate for end of 2008 or most recent year:	2,096,400	Mg	9. Enter estimated amount of waste in place. Estimate should reflect the m measure for mass (Mg) or volume (m3) will be automatically selected based
10	Estimated in-place waste density in Mg per m^3 (typical range: 0.5-1.0):	0.65	Mg/m^3	10. Enter estimated in-place density. Estimate should be between 0.5 and
11	If waste in place estimate is in volume (m3), convert to Mg:	2,096,400	Mg	11. This value is calculated automatically (no user inputs)
12	Year of waste in place estimate:	2014		12. Enter year for waste in place estimate listed above.

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 2019

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 (m3/hr at 50% CH4)	Projected LFG Recovery (m3/hr at 50% CH4)	Baseline LFG Recovery (m3/hr at 50% CH4)
1970					0	0
1971	37,600	74,800	0%		0	0
1972	38,000	112,800	0%		0	0
1973	38,400	151,200	0%		0	0
1974	38,800	190,000	0%		0	0
1975	39,200	229,200	0%		0	0
1976	39,600	268,800	0%		0	0
1977	40,000	308,800	0%		0	0
1978	40,400	349,200	0%		0	0
1979	40,800	390,000	0%		0	0
1980	41,200	431,200	0%		0	0
1981	41,600	472,800	0%		0	0
1982	42,000	514,800	0%		0	0
1983	42,400	557,200	0%		0	0
1984	42,800	600,000	0%		0	0
1985	43,200	643,200	0%		0	0

INSTRUCTIONS:

Waste Disposal Estimates: Input annual waste disposal rates in Column B below only for years
calculations based on estimates provided by user in "Inputs" worksheet.

Collection System Efficiency: Collection system effciency is calculated based on user inputs.
year in Column D below.

Actual LFG Recovery: If a collection system is installed, input into Column E below the average
IN ZEROS.

Baseline LFG Recovery: Enter into Column F below the baseline LFG flows at 50% methane. See

	Collection Efficiency Calculations	
Account for site management practices:	85%	Discount is 15% if site is or was n
Account for waste depth:	85%	Progressive discount if <10 m dee
Account for wellfield coverage of waste area:	85%	Coverage factor adjustment
Account for soil cover type and extent:	77%	Final cover = 90%; intermediate c
Account for bottom liner:	77%	Discount is 5% x % area without l
Account for waste compaction:	74%	Discount is 3% if no compaction
Account for focused tip area:	70%	Discount is 5% if no focused tip a
Account for leachate:	61%	Discount is up to 30% depending

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 po IPCC 2019 smernicama [11].

Ukraine Landfill Gas Model

Release Date: September 2019

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

SITE-SPECIFIC AND DEFAULT WASTE COMPOSITION TABLE FOR MODEL INPUTS

Waste Category	Enter Site Specific Data	UKRAINE	USA
Food Waste	37.6%	36.1%	13.4%
Paper and Cardboard	13.7%	14.3%	23.8%
Garden Waste (Green Waste)	10.2%	9.8%	4.8%
Wood Waste	1.9%	1.9%	10.1%
Rubber, Leather, Bones, Straw	0.4%	2.2%	2.8%
Textiles	5.3%	3.4%	4.4%
Other Organics	3.7%	0.4%	0.9%
Metals	1.3%	2.3%	6.3%
Construction and Demolition Waste	0.0%	3.6%	12.8%
Glass and Ceramics	5.4%	6.2%	5.4%
Plastics	12.4%	5.8%	12.7%
Other Inorganic Waste	8.2%	14.1%	2.7%
Percent very fast decay organic waste (1)	41.3%	36.5%	14.3%
Percent medium-fast decay organic waste (2)	10.2%	9.8%	4.8%
Percent medium-slow decay organic waste (3)	18.9%	17.7%	28.2%
Percent slow decay organic waste (4)	2.3%	4.1%	12.9%
Total Organic Waste	72.7%	68.1%	60.2%
Total Inorganic Waste	27.3%	31.9%	39.8%
Average very fast decay organic waste moisture (1)	70%	70%	

Slika 3.Morfološki sastav otpada

Nakon unetih vrednosti ulaznih parametara dobijemo podatke o količini deponijskog gasa.Radni listovi Output-Table slika 4. i Output-Graph slika 5. su radni listovi sa izlaznim podacima.

Ukraine Landfill Gas Model

Release Date: September 2019

Methane to Markets

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

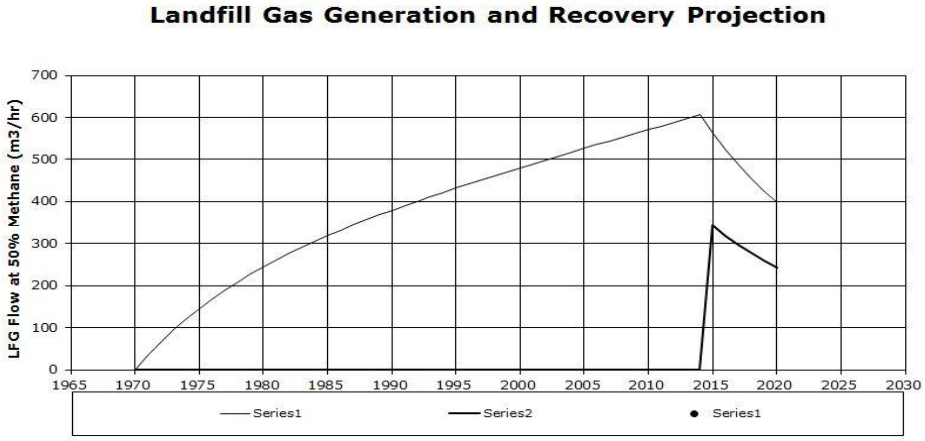
PROJECTION OF LANDFILL GAS GENERATION AND RECOVERY

<Ime deponije>

<kraljevo>, Kulagića Ada

Year	Disposal (Mg/yr)	Refuse In-Place (Mg)	LFG Generation			Collection System Efficiency (%)	Predicted LFG Recovery			Maximum Power Plant Capacity* (MW)	Baseline LFG Flow (m3/hr)	Methane Emissions Reduction Estimates**	
			(m^3/hr)	(cfm)	(MJ/hr)		(m^3/hr)	(cfm)	(MJ/hr)			(tonnes CH_4/yr)	(tonnes CO_2eq/yr)
1970			0	0	0	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1971	37,600	74,800	34	20	648	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1972	38,000	112,800	66	39	1,240	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1973	38,400	151,200	95	56	1,784	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1974	38,800	190,000	121	71	2,284	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1975	39,200	229,200	145	86	2,745	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1976	39,600	268,800	168	99	3,174	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1977	40,000	308,800	189	111	3,572	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1978	40,400	349,200	209	123	3,944	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1979	40,800	390,000	227	134	4,293	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1980	41,200	431,200	245	144	4,621	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1981	41,600	472,800	261	154	4,931	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1982	42,000	514,800	277	163	5,224	0%	0	0	0	0.0	0	0	0
1983	42,400	557,200	292	172	5,502	0%	0	0	0	0.0	0	0	0

Slika 4.Dobijeni rezultati generisanja CH_4



Slika 5. Dijagram o količini deponijskog gasa

Na osnovu softverske analize korišćenjem paketa LFG Model v1 došlo se do sledećih podataka:

1. deponija u Kragujevcu generiše **574** m^3/ h deponijskog gasa,

2.deponija u Kraljevu generiše **240** m^3/h deponijskog gasa

3. deponija u Aranđelovcu generiše **237** m^3/ 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 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

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

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

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	574	ET340MABG	141	340	410	81,9
		BG LC0836	90	250	232	83,0
Aranđelovac	237	eco 120 BG	50	120	178	85,5
		eco 80 BG	37	80	125	85,7
Kraljevo	240	2G125 BG	56	125	185	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						
Aranđelovac	929	303626	506043	28881	1640	84443	5,99
	1078						
Kraljevo	942	300022	500036	28468	1608	82645	6,00
	1074						

4 GASNI MOTORI SA UNUTRAŠNJIM SAGOREVANJEM

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem uglavnom se koriste za iskorišćenje deponijskog gasa na deponijama koje produkuju 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]. 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 I MW.

Na tržištu postoji veliki broj proizvodača 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 proizvodača, 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 izmedu 79,5 i 96%. Investicioni troškovi (€/kW) motora sa unutrašnjim sagorevanjem zavise od veličine postrojenja, odnosno instalisane snage - Pel [kW], kvaliteta i tehnologije. Prema [12], investicioni troškovi se mogu izračunati prema jednačini (2).

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

I - investicioni troškovi
Pel - instalisana snaga.

lz 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.

5 PROCENA INVESTICIJA I NJIHOV PERIOD POVRATA

Da bi se pojednostavila evaluacija 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. 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 pogođeno na motorima manje snage koji su izabrani u našem radu. 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. 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

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

$$\boldsymbol{PBP = \frac{TI}{ANP}} \tag{4}$$

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

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

$$\mathbf{ANP = (APEE \cdot PE) - AMC} \tag{5}$$

gde je
APEE - godišnja proizvodnja električne energije,
PE - cena proizvedene električne energije
AMC - troškovi održavanja.

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

$$\text{AMC} = 4{,}9406 \cdot \boldsymbol{EP^{-0{,}2219}} \cdot \mathbf{10} \tag{6}$$

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

Ukupna zarada na godišnjem nivou prodajom električne i toplotne energije ovog postrojenja iznosi 266.756 €.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. 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.

6 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 380 tona čvrstog komunalnog otpada. U ovom istraživanju, kreirana je baza podataka o potencijalima kogeneracije opštinskih deponija na teritoriji tri grada Centralne Srbije. Korišćenjem specijalizovanog softvera *Ukraine LFG Model v1,* dobijena je potencijalna količina deponijskog gasa na deponijama Jovanovac, Kulagića Ada i Misača u iznosu od 1007 m^3/h a na osnovu količine gasa i energetski 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.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 CO_2 ekvivalentna 81.000 tona godišnje. Međutim, implementa- cija projekata za korištenje 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.

7 Literatura

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

[2] **Official Gazette of RS 08/13**.Decrete of Incentive for Privileged *Power Produced Feed-in Tarrifs 20*13

[3] **Stanisavljević N.et.al**.Methane emissions from Landfills in Serbia and Potential Mitigation Strategies a Case Study , *Waste Management and Research* 3,(2016) 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 og 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**.,Comparasion 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 Ambience Temperature and Operational-Constructive Parameters on Landfill Gas Ge-neration.- 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 , *Jurnal of Cleaner Production. 55 (2013)* Sep. pp.84-91

[10] **Ubavin D, Maoduš N, Milovanović D,** *Mogućnosti iskorištenja deponijskog gasa ,* Kompakt magazine, br.13. str.27-37, Asocijacija za upravljanje čvrstim otpadom,2015

[11] **Vujić G, Ubavin D**, Utvrđivanje 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 diferent CHP technologies,* Applied Energy, vol.98,pp.502-511,2012
[13] **Vujić.G, et al**.,Barriers for Implementationof „Waste to Energy"in Developing and Transition Countries : a Case Study of Serbia, *Journal of Material Cycles and Waste Management, published online on April15th,* 2015
[14] **Official Gazzete of RS 92/10**, Regulation of Waste Disposal on Landfills , 2018
[15] **Martin.S. Fernandez S**. Management of biogas in Landfills of Municipal Solid waste, Government of the Principa- lity of Asturias , Service Publica in Asturias, Oviedo, Spain 2000.
[16] **Jeftović M,Jovičić N,Milovanović D,Bošković G,Milašinović M,Jovičić G**, Idejno rešenje postrojenja za kogeneraciju deponijskog gasa iz komunalnog otpada,Katedra za energetiku i procesnu tehniku,FIN Kragujevac, 2017