

Dr Goran Bošković, dr Nebojša Jovičić, Mladen Josijević, Marko Milašinović,  
mr Saša Jovanović, dr Milun Babić  
Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

UDC: 628.472 (497.11)

## Mogućnosti iskorišćenja deponijskog gasa sa deponije komunalnog otpada u Kragujevcu

### REZIME

*Svaka lokacija na koju se odlaže komunalni otpad predstavlja bioreaktor koji generiše procedne 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 m<sup>3</sup>/h) kao i preporuka o izboru odgovarajuće snage motora (0,6 MW). Detaljnom tehno-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, deponijski gas, kogeneracija

### SUMMARY

*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 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 m<sup>3</sup>/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.*

**Keywords:** municipal solid waste, landfill gas, cogeneration

### 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 energetska vrednost, što ga čini potencijalnim gorivom za pogon gasnih motora i dobijanja električne i toplotne energije tim putem. Deponijski gas se sastoji od približno jednakih delova metana i ugljen-dioksida, ali i sa malim tragovima nemetanskih

organskih jedinjenja (NMOC). Nastaje razgradnjom organskih supstanci pod uticajem mikroorganizama u anaerobnim uslovima. U središtu deponije nastaje natpritisak, pa deponijski gas prelazi u okolinu.

Metan je zapaljiv gas, koji formira eksplozivnu smešu, kada je prisutan u koncentraciji između 5 i 15 procenata zapremine vazduha. Zapaljivost metana je i prednost, ali i odgovornost za vlasnika deponije. Prednost se ogleda u tome što gas može da bude izvor energije, a odgovornost, zbog obilja mogućnosti za degradaciju stanja životne sredine. Metan je više od 25 puta štetniji po klimu i ozonski omotač nego ugljen-dioksid, što praktično znači da 1 tona metana oštećuje ozonski omotač (efekat staklene bašte) kao 28 tona ugljen-dioksida [1]. Deponije su treći veliki

Tabela 1. - Ekvivalenti deponijskog gasa (sa sadržajem metana od 50%) [3]

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

Izvori metana posle pirinčanih polja i preživara [2]. Deponijski gas se može upotrebiti kao energent, koji nadoknađuje korišćenje konvencionalnih fosilnih goriva. Toplotna moć je 4÷6 kWh/m<sup>3</sup>, što je približno polovini toplotne moći prirodnog gasa. Približni ekvivalenti deponijskog gasa sa ostalim uobičajenim gorivima su dati u tabeli 1.

U industrijskim zemljama nastaje 300÷400 kg komunalnog otpada godišnje po osobi. Komunalni otpad se skuplja i odlaže na bezbednim i sanitarnim deponijama, koje podrazumevaju zaštitu podzemnih voda, kao i zaštitu vazduha od prljavog i opasnog deponijskog gasa.

Procesi koji doprinose formiranju deponijskog gasa su bakterijsko razgrađivanje, volatilizacija i hemijske reakcije. 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 faza [4].

#### MERENJE SASTAVA I PRORAČUN ENERGETSKOG POTENCIJALA DEPONIJSKOG GASA NA DEPONIJI GRADA KRAGUJEVCA

Grad Kragujevac poseduje deponiju koja se nalazi se u Jovanovcu 2 km severoistočno od centra grada, u blizini reke Uglješnice. Deponija je osnovana 1963. godine i ona je otvorenog tipa. Deponija prima sav sakupljen komunalni otpad iz opštine Kragujevac, opslužujući populaciju od oko 185.000 stanovnika. Deponija je površine 15 ha, nadmorske visine 164 m i po geografskim karakteristikama može se definisati kao ravnica. Količina čvrstog komunalnog otpada koji se odlaže na deponiju je procenjen na 156 t/dan, sa više od 50% biorazgradivog otpada. Do danas je oko 2 milion tona otpada deponovano pa je prosečna dubina deponije 15 m. U cilju prevencije nastanka požara i eksplozija, planirano je postavljanje 89 vertikalnih bušotina za ventilaciju i do sada je postavljeno 17. Svaka bušotina pokriva prečnik od 30 m i gas izlazi iz deponije na osnovu razlike pritiska u telu deponije i atmosferskog pritiska.

Deponija nema aktivni sistem za sakupljanje

i kontrolu deponijskog gasa. Postavljeno je 17 biotrnova, od kojih su 8 pristupačni, a preostali su zatpani. Na njima su vršena merenja sastava deponijskog gasa [5]. Cilj merenja je potvrda proizvodnje deponijskog gasa, kao i određivanje njegovog sastava. Merenje je izvršeno pomoću uređaja za gasnu analizu „GEM2000plus“ proizvođača „Geotechnical Instruments“ iz Velike

Britanije, specijalizovanog za proizvodnju aparature za ekstrakciju i analizu deponijskih gasova. Uređaj je projektovan za merenje koncentracije sledećih gasova: CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>, kao i za merenje temperature i atmosferskog pritiska.

Merenja sastava deponijskog gasa su izvršena su na svim raspoloživim biotrnovima na deponiji u Kragujevcu. Na pojedinim biotrnovima, koncentracija metana je veoma niska, jer je ventilaciona cev verovatno polomljena. Na ostalim biotrnovima, koncentracija metana je 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: 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.

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.

Radni list *Waste Composition*, slika 3, predstavlja tabelu morfološkog sastava otpada. Ovaj radni list se



Slika 1. - Radni list osnovnih podataka o deponiji

**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 <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Projected LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Baseline LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) |
| 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                                   | 1,096,319                | 63%                          |  | 319   | 0  |
| 2014                                | 63,700                                   | 2,060,019                | 61%                          |  | 327   | 0  |

Slika 2. - Količina deponovanog otpada po godinama

**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

PRODUCTION OF LANDFILL GAS BY YEAR AND RECOVERY

| Year | Waste Disposal (Metric Tonnes) | Cumulative Waste (Metric Tonnes) | Collection System Efficiency | Actual LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Projected LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Baseline LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Production of Landfill Gas (m <sup>3</sup> /hr) |        |           |          | Total LFG Production (m <sup>3</sup> /hr) |
|------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|---|--|---|--------|-----------|----------|---|
|      |                                |                                  |                              |  |   |  | Waste   | Actual | Projected | Baseline |   |
| 1963 | 24,000                         | 24,000                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1964 | 24,400                         | 48,400                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1965 | 24,900                         | 73,300                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1966 | 25,400                         | 98,700                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1967 | 25,900                         | 124,600                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1968 | 26,400                         | 151,000                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1969 | 26,900                         | 177,900                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1970 | 27,400                         | 205,300                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1971 | 27,900                         | 233,200                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1972 | 28,400                         | 261,600                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1973 | 28,900                         | 290,500                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1974 | 29,400                         | 319,900                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1975 | 29,900                         | 349,800                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1976 | 30,500                         | 380,300                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1977 | 31,100                         | 411,400                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1978 | 31,700                         | 443,100                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1979 | 32,300                         | 475,400                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 2013 | 62,500                         | 1,096,319                        | 63%                          | 319  | 319   | 319  | 319   | 319    | 319       | 319      | 319                                       |
| 2014 | 63,700                         | 2,060,019                        | 61%                          | 327  | 327   | 327  | 327   | 327    | 327       | 327      | 327                                       |

Slika 3. - Radni list morfološkog sastava otpada

**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

PRODUCTION OF LANDFILL GAS BY YEAR AND RECOVERY

| Year | Waste Disposal (Metric Tonnes) | Cumulative Waste (Metric Tonnes) | Collection System Efficiency | Actual LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Projected LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Baseline LFG Recovery (m <sup>3</sup> /hr at 50% CH <sub>4</sub> ) | Production of Landfill Gas (m <sup>3</sup> /hr) |        |           |          | Total LFG Production (m <sup>3</sup> /hr) |
|------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|---|--|---|--------|-----------|----------|---|
|      |                                |                                  |                              |  |   |  | Waste   | Actual | Projected | Baseline |   |
| 1963 | 24,000                         | 24,000                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1964 | 24,400                         | 48,400                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1965 | 24,900                         | 73,300                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1966 | 25,400                         | 98,700                           | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1967 | 25,900                         | 124,600                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1968 | 26,400                         | 151,000                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1969 | 26,900                         | 177,900                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1970 | 27,400                         | 205,300                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1971 | 27,900                         | 233,200                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1972 | 28,400                         | 261,600                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1973 | 28,900                         | 290,500                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1974 | 29,400                         | 319,900                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1975 | 29,900                         | 349,800                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1976 | 30,500                         | 380,300                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1977 | 31,100                         | 411,400                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1978 | 31,700                         | 443,100                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 1979 | 32,300                         | 475,400                          | 0%                           | 0  | 0   | 0  | 0   | 0      | 0         | 0        | 0   |
| 2013 | 62,500                         | 1,096,319                        | 63%                          | 319  | 319   | 319  | 319   | 319    | 319       | 319      | 319                                       |
| 2014 | 63,700                         | 2,060,019                        | 61%                          | 327  | 327   | 327  | 327   | 327    | 327       | 327      | 327                                       |

Slika 4. - Dobijeni rezultati

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 [6]. Nakon unetih vrednosti, dobijaju se podaci o količini deponijskog gasa.

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.

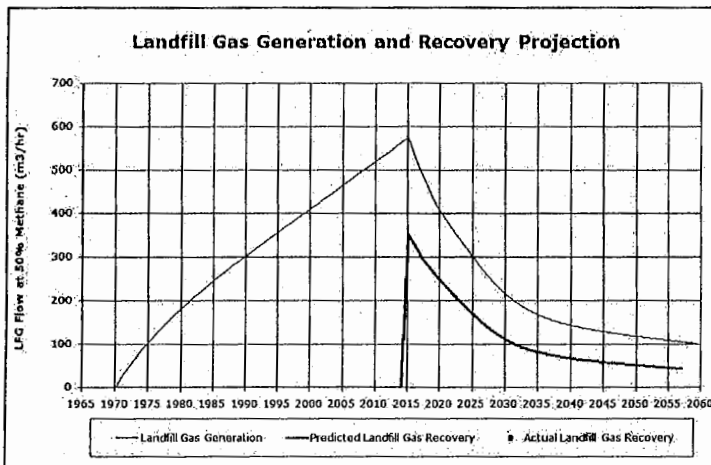
Kao rezultat softverske analize došlo se do podatka da deponija generiše 574 m<sup>3</sup>/h deponijskog gasa. Na osnovu dobijenih rezultata o generisanju deponijskog gasa, softverska preporuka je da je za ovu količinu gasa potreban motor snage 0,6 MW. U cilju što efikasnijeg i isplativijeg iskorišćenja gasa, predložena su 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 snage 0,6 MW.

### 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 [5].

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 generisanje 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. Primenu pronalaze u stambenim kućama, stambenim zgradama i institucijama, i u nekim manjim industrijskim postrojenjima. Najčešće se koriste motori koji generišu električnu energiju do 1 MW.



Slika 5. - Dijagram o količini deponijskog gasa

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, ali 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 [7], investicioni troškovi se mogu izračunati prema jednačini 1. U ove troškove ne ulaze troškovi izgradnje mašinske zgrade i instaliranja opreme.

$$I = 4639 \times P_{el}^{-0,333} \quad (1)$$

gde je:

$I$  – investicioni troškovi,

$P_{el}$  – instalisana snaga.

Iz jednačine 1 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 mogu da variraju u zavisnosti od instalacija. Oni 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 [7]:

$$C = 49406 \times P_{el}^{-0,2219} \quad (2)$$

gde je:

$C$  – 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.

#### PODSTICAJNE MERE ZA KORIŠĆENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Srbija je usvojila više zakonskih i podzakonskih dokumenata, kako bi podstakla investiranje u kogeneraciona postrojenja. Ti dokumenti se odnose na promovisanje korišćenja biomase i drugih vidova obnovljivih izvora, kao i kogeneracije. Na osnovu [8] i [9] Vlada Republike Srbije je donela uredbu o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije. Ovom uredbom bliže se definišu kategorije povlašćenih proizvođača električne energije, propisuju mere podsticaja, uslovi za njihovo ostvarivanje, način određivanja podsticajnog perioda, prava i obaveze koje iz tih mera proizlaze za povlašćene proizvođače i druge energetske subjekte i uređuje sadržinu ugovora i predugovora o otkupu električne energije od povlašćenog proizvođača.

Redovna godišnja korekcija podsticajnih otkupnih cena zbog inflacije u evro zoni vrši se u februaru svake godine, počevši od 2014. godine, prema sledećoj jednačini [10].

$$C_1 = C_0 \times (1 + P_{inf}/100) \quad (3)$$

gde je:

$C_1$  – nova podsticajna otkupna cena,

$C_0$  – stara podsticajna otkupna cena,

$P_{inf}$  – godišnja inflacija u evro zoni objavljena od strane nadležne institucije Evropske unije i izražena u %.

Godišnju inflaciju u evro zoni, na zahtev javnog snabdevača utvrđuje ministarstvo nadležno za poslove finansija.

### EKONOMSKA ANALIZA KOGENERACIONOG POSTROJENJA

Na osnovu odabranih modela snage 200 kW (TE-DOM Cento T200), 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 [11], 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 sprečio širenje krupnijih nečistoća iz tela deponije u sistem. Prema [11], cena sistema za sakupljanje, procesiranje i konverziju gasa ja na nivou od oko 450.000 €. Toškovi održavanja sistema, prema [12], iznose 37.700 € godišnje i to 1.655 € za bunare, 3.310 € za baklju i 32.740 € za blower.

Dimenzije objekta u kome će biti smeštene kogeneracione jedinice su određene u odnosu na dimenzije tih kogeneracionih jedinica. Dimenzije objekta su 20m x 13m x 5m. Za izgradnju ovakvog objekta potrebna su sredstva prikazana u tabeli 2.

Prema tabeli 2 ukupni troškovi mašinske zgrade iznose 1.979.800 dinara i kada se uzme 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 17.400

Tabela 2. - Troškovi objekta

| Vrsta troškova               | Cena [din] |
|------------------------------|------------|
| Troškovi temelja             | 254.202    |
| Troškovi zidova              | 551.702    |
| Troškovi krovne konstrukcije | 590.540    |
| Troškovi betonskog platoa    | 476.000    |
| Troškovi prozora i vrata     | 107.356    |

€. 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 3) koristeći sledeću jednačinu.

$$t_{pi} = (I + S + I_s + I_o) / ((S_1 \times x \times 24 \times 365) / 100) \quad (4)$$

gde je:

- $t_{pi}$  – vreme povraćaja investicije,
- $I$  – troškovi motora,
- $S$  – troškovi održavanja motora,
- $I_s$  – troškovi sistema za prikupljanje i procesiranje gasa,
- $I_o$  – 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 sagoravanjem 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 3. - Troškovi investicija i otkupna 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    |

Tabela 4. - Ekonomski tok projekta

|                             | Opis                   | I godina         | II godina      | III godina     | IV godina      | V godina       | VI godina      | VII godina     |
|-----------------------------|------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>I</b>                    | <b>PRILIV [€]</b>      | <b>266.756</b>   | <b>266.756</b> | <b>266.756</b> | <b>266.756</b> | <b>266.756</b> | <b>266.756</b> | <b>266.756</b> |
| 1.                          | Toplotna energija      | 125.355          | 125.355        | 125.355        | 125.355        | 125.355        | 125.355        | 125.355        |
| 2.                          | Električna energija    | 141.401          | 141.401        | 141.401        | 141.401        | 141.401        | 141.401        | 141.401        |
| <b>II</b>                   | <b>ODLIV [€]</b>       | <b>1.046.555</b> | <b>108.515</b> | <b>61.155</b>  | <b>108.515</b> | <b>61.155</b>  | <b>108.515</b> | <b>61.155</b>  |
| 1.                          | Investicije            | 985.400          | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
| 2.                          | Održavanje             | 0                | 47.360         | 0              | 47.360         | 0              | 47.360         | 0              |
| 3.                          | Plate                  | 47.000           | 47.000         | 47.000         | 47.000         | 47.000         | 47.000         | 47.000         |
| 4.                          | Porez na dobit         | 14.155           | 14.155         | 14.155         | 14.155         | 14.155         | 14.155         | 14.155         |
| <b>III</b>                  | <b>NETO PRILIV [€]</b> | <b>- 779.799</b> | <b>158.241</b> | <b>205.601</b> | <b>158.241</b> | <b>205.601</b> | <b>158.241</b> | <b>205.601</b> |
| <b>Diskontna stopa 10 %</b> |                        |                  |                |                |                |                |                |                |
| 1.                          | Diskontni faktor       | 0,909091         | 0,826446       | 0,751315       | 0,683013       | 0,620921       | 0,548102       | 0,493291       |
| 2.                          | Sadašnja vrednost [€]  | - 708.908        | 130.777        | 154.471        | 108.080        | 127.661        | 86.732         | 101.421        |

Tabela 5. - Period povratka investicije

| Godine veka projekta               | Neto priliv [€]            | Kumulativno neto priliva [€] |
|------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 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                      |
| <b>Period povratka investicije</b> | <b>5 godina i 4 meseca</b> |                              |

Toplotna efikasnost motora sa unutrašnjim sagorevanjem snage 100 kW iznosi 46,9 %, dok toplotna efikasnost motora snage 200 kW iznosi 48,1 %. Količina toplotne energije koju ovi motori daju je 286,2 kWh. Država Srbija nije definisala cenu po

kojoj bi se prodavala toplotna energija iz obnovljivih izvora energije, pa će se za ovaj proračun uzeti cena koju propisuje „Energetika“ D.O.O i ona iznosi 5 din/kWh [13]. Dobijena toplota će se po ovoj ceni prodavati okolnim domaćinstvima. Osim za grejanje domaćinstava, deo toplotne energije se može koristiti i za grejanje postrojenja. Prodajom toplotne energije postrojenje bi u prvoj godini ostvarilo zaradu u iznosu 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. Ovaj period će biti duži kada se u obzir uzmu troškovi održavanja postrojenja, plate radnika i porez na dobit.

U tabeli 4 je prikazan ekonomski tok projekta u periodu od 7 godina. Priliv novca dolazi od prodaje električne i toplotne energije, po već utvrđenim cenama. Odliv novca u prvoj godini predstavljaju svi

Tabela 6. - Neto sadašnja vrednost projekta

| Godine veka projekta                    | Neto priliv ekonomskog toka [€] | Sadašnja vrednost [€] |
|---|---------------------------------|-----------------------|
| I                                       | - 779.799                       | - 708.908             |
| II                                      | 158.241                         | 130.777               |
| III                                     | 205.601                         | 154.471               |
| IV                                      | 158.241                         | 108.080               |
| V                                       | 205.601                         | 127.661               |
| VI                                      | 158.241                         | 86.732                |
| VII                                     | 205.601                         | 101.421               |
| VIII                                    | 158.241                         | 70.252                |
| IX                                      | 205.601                         | 82.150                |
| X                                       | 158.241                         | 56.903                |
| <b>Suma</b>                             | <b>833.810</b>                  | <b>227.721</b>        |
| <b>Neto sadašnja vrednost [€]</b>       | <b>227.721</b>                  |                       |
| <b>Relativna neto sadašnja vrednost</b> | <b>0,27</b>                     |                       |

troškovi izgradnje postrojenja, plate radnika i porez na dobit. U prvoj godini projekta nema troškova održavanja, a nakon toga postrojenje će se održavati svake druge godine. Za jedno ovakvo postrojenje potrebno je 10 radnika, sa prosečnim mesečnim primanjima od 45.000 dinara. Porez na dobit, za investicije manje od 1.500.000 € iznosi 10 %. Ukupna investiciona ulaganja u ovaj projekat su 985.400 €, pa je porez na dobit u ovom slučaju 10 %.

U tabeli 5 je prikazan period povratka investicionih ulaganja u projekat. Period povratka investicionih ulaganja je 5 godina i 4 meseca i kraći je od životnog veka projekta, pa je projekat zadovoljavajući.

U tabeli 6 je prikazana neto sadašnja vrednost projekta i ona iznosi 227.721 €. Relativna neto sadašnja vrednost je izračunata kao odnos sadašnje vrednosti investicionih troškova uz diskontnu stopu od 10 % i neto sadašnje vrednosti projekta i iznosi 0,27. Praktično, ovo znači da na svaku jedinicu ulaganja, projekat obezbeđuje 0,27 jedinica za reinvestiranje. Obzirom da su i neto i relativna neto sadašnja vrednost pozitivne, projekat je prihvatljiv.

## ZAKLJUČAK

U Srbiji je problem sa deponijama stalna pojava, pa je tako i deponija u Kragujevcu daleko od ekološki prihvatljive i uređene deponije. Na deponiju se dnevno odlaže oko 150 tona čvrstog komunalnog otpada.

Korišćenjem softvera *Ukraine LFG Model v1*, dobijena je potencijalna količina deponijskog gasa na deponiji u Jovanovcu, a na osnovu količine gasa i energetski potencijal, koji iznosi 0,6 MW. 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 3 do 5 motora manje snage, kako bi se u svakom trenutku obezbedilo iskorišćenje visokog procenta raspoloživog deponijskog gasa. Predloženo je korišćenje većeg broja motora manje snage, odnosno 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.

Ukupna investicija za izgradnju kogeneracionog postrojenja kapaciteta 0,6 MW iznosila bi 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. 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 4 meseca. Ekonomskom analizom dolazi se do zaključka da je projekat ekonomski isplativ.

**Napomena:** Rad nastao kao rezultat istraživanja na projektu „ISTRAŽIVANJE KOGENERACIONIH POTENCIJALA U KOMUNALNIM I INDUSTRIJSKIM ENERGANAMA REPUBLIKE SRBIJE I MOGUĆNOSTI ZA REVITALIZACIJU POSTOJEĆIH I GRADNJU NOVIH KOGENERACIONIH POSTROJENJA (III 42013)“ koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil, *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill Inc., New York, 1993.
- [3] Zakon o upravljanju otpadom, Član 7, Službeni glasnik RS br. 36/2009 i 88/2010.
- [4] G. Vujić, M. Martinov, D. Ubavin, *Studija mogućnosti korišćenja komunalnog otpada u energetske svrhe (Waste to energy) na teritoriji AP Vojvodine i RS*, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008.
- [5] D. Ubavin, N. Maoduš, D. Milovanović, *Mogućnosti iskorišćenja deponijskog gasa*, Kompakt magazin, br. 13, str. 27–37, Asocijacija za upravljanje čvrstim otpadom, 2013.
- [6] 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, 2009.
- [7] 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.

- [8] Zakon o energetici, Član 59 – stav 6, Službeni glasnik RS br. 57/11, 80/11 – ispravka, 93/12 i 124/12.
- [9] Zakon o Vladi, Član 42 – stav 1, Službeni glasnik RS br. 55/05, 71/05 – ispravka, 101/07, 65/08, 16/11, 68/12 – US i 72/12.
- [10] Uredba o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije, Član 13 i 14, („Službeni glasnik RS”, br. 57/11, 80/11 – ispravka, 93/12, 124/12, 55/05, 71/05 - ispravka, 101/07, 65/08, 16/11, 68/12 – US i 72/12.
- [11] M. Jevtović, N. Jovičić, D. Milovanović, G. Bošković, M. Milašinić, G. Jovičić, *Idejno rešenje postrojenja za kogeneraciju deponijskog gasa iz komunalnog otpada grada Kragujevca*, Katedra za energetiku i procesnu tehniku, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2012.
- [12] *LFG Energy Project Development Handbook*, US Environmental Protection Agency, USA, 2009.
- [13] *Odluka o povećanju cena toplotne energije*, br 9/17, „Energetika“ D.O.O, Kragujevac, 2013.

Zavisnost kompleksnih  
od merenih gromen  
mesta na kom je po

RESUME

U radu je dat pregled osnovnih  
datih osnovnih na delovima  
kolonizacija. Detaljno je  
navedeno na posebnom testu  
načrt 30 i 31. Grafiki  
prikazuju mesta na kom je postavljeno  
kompleksnih koeficijenta koji povezuje  
posebno istaknuto na važnosti primenjenog  
balansiranja.

Ključne reči: vibracije, dobavljanje, kompleksni

SUMMARY

This study contains brief introduction to term "vibration" with special emphasis on the imbalance. The concept of complex and the definition of balance is provided. Balancing instruments have been shown in detail graphically. Measurements were performed, whereby we used measuring instruments "Schenck TP 30" and the ISO of measuring instrument, the angular position of the division and the reflective tape has been graphically displayed. It points to the role of complex coefficients which is possessed by service analysis process within. It shows the importance of proper use of complex coefficients for the successful balancing.

Key words: vibrations, unbalanced, complex coefficient, balancing, reflective tape.

UVOD

Vibracija je kretanje oko referentnog položaja koje se ponavlja tokom vremena. Vibracija je kolektivno svakodnevno kao mesto dobrog ili lošeg rada neke mašine ili uređaja. Da bi došlo do pojave vibracije mora postojati spoljašnje ili unutrašnje delovanje na sklop tj potrebno mu je dovesti energiju u vidu porinućine tj uzbuđene sile.

1.1 Parametri vibracija

Svaka tačka tela koja viši oscilatorno kretanje ima u svakom trenutku u odnosu na neki referentni položaj izvrsnu vrednost za pomeranje, brzinu i ubrzanje

vibracije. Na sinusoidalne signale postoji matematička povezanost ovih parametara a u funkciji fреквенции i vremena. Svako vibraciono kretanje takođe može prikazati obratnim vektorom. Vektori pomeranja i ubrzanja koji imaju istu osnovu daju istu fреквенцију međusobno su povezani na sledeći način: Vektor ubrzanja je 90° ispred vektora pomeranja, a vektor ubrzanja 90° ispred vektora brzine. U ISO sistemu za ove tri veličine koriste se sledeće jedinice:

- \* Pomerak: m; mm; μm
- \* Brzina: m/s; mm/s
- \* Ubrzanje: m/s<sup>2</sup>

Pomerak se najčešće koristi pri balansiranju, jer se relativno veliki pomeraji obično dešavaju na frekve-