

N. Mustapić, I. Polović, B. Staniša\*

# MOGUĆNOSTI ENERGETSKOG ISKORIŠTAVANJA ODLAGALIŠNOG PLINA

UDK 628.477.2:620.91  
PRIMLJENO: 25.3.2008.  
PRIHVAĆENO: 10.4.2008.

**SAŽETAK:** U današnje vrijeme kada se velike količine otpada odlažu na odlagalištima otpada, uvelike je važna uporaba odlagališnog plina kao goriva. U ovome radu predstavljene su različite mogućnosti energetskog iskorištavanja odlagališnog plina, uzimajući u obzir i tradicionalne i inovativne tehnologije. Neke od tih tehnologija su proanalizirane pomoću tehnoekonomskih usporedbi.

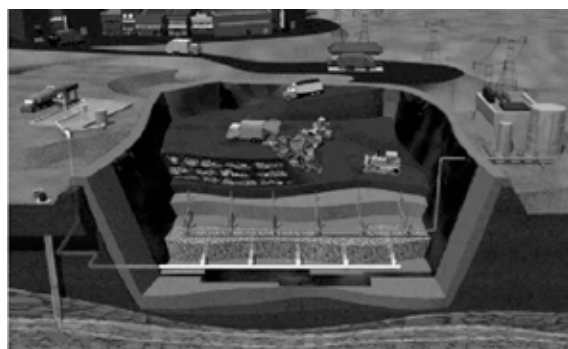
**Ključne riječi:** odlagališni plin, energetsko iskorištavanje, obnovljivi izvori energije

## UVOD

Odlagalište otpada je prostor za privremeno ili trajno odlaganje otpadnih tvari i najstariji je način zbrinjavanja otpada koji se i danas najčešće primjenjuje diljem svijeta za zbrinjavanje većine vrsta otpada. Na slici 1 prikazan je presjek tipičnog odlagališta komunalnog otpada sa svim njegovim najvažnijim elementima.

Ustvari odlagalište otpada predstavlja veliki biokemijski reaktor u koji ulaze voda i otpad koji se odlaže, a kao proizvod iz takvog reaktora izlaze odlagališni plin i otpadne vode. Prema definiciji, odlagališni plin označava sve plinove koji nastaju iz odloženog otpada. Odlagališni plin nastaje na odlagalištima otpada većim dijelom kao produkt kemijskih procesa u biorazgradivim tvarima, a manjim dijelom iz kemijskih procesa u kojima sudjeluju nerazgradive tvari sadržane u otpadu (*Cheremisinoff, 2003.*). Prepoznavši sve

negativne utjecaje na okoliš koje uzrokuje odlagališni plin, početkom 80-ih godina započelo se sa sakupljanjem, obradom te izgaranjem odlagališnog plina. U zadnjem desetljeću odlagališni plin počeo se energetski iskorištavati, odnosno upotrebljavati za proizvodnju električne i toplinske energije.



Slika 1. Prikaz tipičnog odlagališta komunalnog otpada

Figure 1. Typical communal waste disposal site

Proces biorazgradnje otpada i nastajanje odlagališnog plina provodi se u pet osnovnih faza (*Popov, Power, 1999., White, Robinson, Ren,*

\*Mr. sc. Nenad Mustapić, dipl. ing., Veleučilište u Karlovcu, Ivana Meštrovića 10, 47000 Karlovac, Ivan Polović, dipl. ing., Čistoća d.o.o., Gažanski trg 8, 47000 Karlovac, dr. sc. Branko Staniša, dipl. ing., Veleučilište u Karlovcu, Ivana Meštrovića 10, 47000 Karlovac.

2004.). U svakoj fazi odlagališni plin ima drugačiji kemijski sastav. Nakon finalne faze biorazgradnje otpada odlagališni plin ima kemijski sastav dan u Tablici 1 (Sandelli, 1992.). Odlagališni plin uglavnom se sastoji od metana i ugljičnog dioksida, te sadrži čitav niz drugih plinova u tragovima. Potrebno je istaknuti da je metan staklenički plin kao i ugljični dioksid, s time da metan kao plin ima 21 puta veći utjecaj na globalno zagrijavanje atmosfere od ugljičnog dioksida. Oko 4,5-15% metana u smjesi s kisikom predstavlja eksplozivnu smjesu.

**Tablica 1. Prosječni kemijski sastav odlagališnog plina**

**Table 1. Average chemical composition of waste gas**

Sastav	Volumenski udio (%)	Prosječne vrijednosti (%)
metan (CH <sub>4</sub> )	35-60	50
ugljični dioksid (CO <sub>2</sub> )	35-55	45
dušik (N <sub>2</sub> )	0-20	5
kisik (O <sub>2</sub> )	0- 5	>1
sulfidi	1 –1.700 ppmv	21 ppmv

Europsko zakonodavstvo postavlja strogi hijerarhijski slijed zbrinjavanja otpada: sprečavanje nastajanja otpada - ponovna uporaba - recikliranje - termička obrada s pridobivanjem energije (Lemar, 2005.). Osnovni dokument Europske unije je direktiva o odlaganju otpada (1999.) koji propisuje postupanje s otpadom. U Hrvatskoj, također, postoji Pravilnik o uvjetima za postupanje s otpadom koji regulira pitanja praćenja sastava i količine odlagališnog plina, te skupljanja i obrade odlagališnog plina. Odlagališta otpada I. kategorije moraju imati sustav za sakupljanje i obradu odlagališnog plina na plinskoj stanici s bakljom.

Prema podacima Programa mjera za postupanje s otpadom u RH u 2004., od ukupno 149 nadziranih odlagališta u Hrvatskoj samo 5 ima izveden sustav za prikupljanje i obradu odlagališnog plina. Od ukupno 1.200.000 t komunalnog otpada koji se godišnje proizvede u Hrvatskoj, sustavom sakupljanja i obradom odlagališnog plina na plinskoj stanici s bakljom obu-

hvaćeno je približno 330.000 t (od čega je 90% količine otpada na odlagalište otpada u Jakuševcu). Preostala količina od 870.000 t otpada, od čega se može pretpostaviti da se najmanje 35% odnosi na biorazgradive tvari, aktivno sudjeluje u proizvodnji odlagališnog plina koji će se prije ili kasnije osloboditi iz tijela odlagališta i štetno utjecati na okoliš.

Za izračun specifične godišnje količine nastajanja odlagališnog plina po toni komunalnog otpada postoji više iskustvenih i matematičkih metoda. Po iskustvenoj metodi prema Earlsonu, iz tone otpada godišnje nastaje prosječno 11 m<sup>3</sup> odlagališnog plina. Na osnovi toga moguće je izračunati da se prema navedenim podacima 3.349.500 m<sup>3</sup> odlagališnog plina ne sakuplja i obrađuje na plinskoj stanici s bakljom. Ako se pretpostavi da je od te količine 50% metan, odlagališta otpada u Hrvatskoj godišnje proizvedu približno 2.300.000 m<sup>3</sup> metana, od čega se približno 1.675.000 m<sup>3</sup> slobodno emitira u atmosferu. Nekontroliranim oslobađanjem odlagališnog plina ne samo da se zagađuje atmosfera (emisija stakleničkih plinova), već se nepovratno gube i goleme količine energije u obliku metana kao mogućeg pogonskog goriva (Herenda, 2004.).

## MOGUĆA RJEŠENJA ENERGETSKOG ISKORIŠTAVANJA ODLAGALIŠNOG PLINA

Sustav za sakupljanje i obradu odlagališnog plina s plinskom stanicom s bakljom predstavlja značajan trošak pri sanaciji odlagališta otpada. Ekonomsku i ekološku opravdanost paralelne (naknadne) ugradnje sustava za energetsko iskorištavanje odlagališnog plina uz zakonom propisani sustav sakupljanja i obrade odlagališnog plina s plinskom stanicom s bakljom potrebno je provjeriti u svakom pojedinačnom slučaju. Danas u svijetu postoji čitav niz primjera energetskog iskorištavanja odlagališnog plina koji potvrđuju njegovu značajnu ekonomsku isplativost (SCS Engineers, 1997.). Analizom iskustva iz SAD-a i država Europske unije, mogućnosti energetskog iskorištavanja odlagališnog plina mogu se podijeliti na tri osnovne skupine:

- a) direktno spaljivanje odlagališnog plina u generatorima pare i vrelovodnim kotlovima
- b) proizvodnja električne energije te kogeneracija
- c) ostale mogućnosti uporabe odlagališnog plina.

### Direktno spaljivanje odlagališnog plina u generatorima pare i vrelovodnim kotlovima

Direktno spaljivanje odlagališnog plina u generatorima pare i vrelovodnim kotlovima jedan su od najjednostavnijih načina iskorištavanja odlagališnog plina u energetske svrhe. Najčešće se primjenjuju na većim odlagalištima koja imaju potrebe za većim količinama toplinske energije, za proizvodnju pare koja se upotrebljava u razne svrhe, te za proizvodnju vrela vode koja se upotrebljava u sustavu daljinskog grijanja u gradskoj mreži.

Prednosti ovakvog načina energetskog iskorištavanja odlagališnog plina su:

- a) niski troškovi investicije i održavanja sustava
- b) dobro poznata tehnologija.

Osnovni nedostaci ovakvog načina energetskog iskorištavanja odlagališnog plina su:

- a) potrebne su veće količine odlagališnog plina da bi sustav bio rentabilan (veća odlagališta otpada)
- b) potreban je veći potrošač te toplinske energije koji ne smije biti previše udaljen od samog odlagališta (npr. veće naselje ili industrijski objekt).

### Proizvodnja električne energije iz odlagališnog plina te kogeneracija

Svjetska iskustva pokazuju da je najčešća uporaba odlagališnog plina kao izvora energije upravo proizvodnja električne energije. Postoji više dobro provjerenih tehnologija, te nekoli-

ko tehnologija u različitim tehnološkim fazama testiranja i istraživanja. Proizvodnja električne energije iz odlagališnog plina zasnovana je na ovim tehnologijama:

1. motori s unutrašnjim izgaranjem
2. motori s vanjskim izgaranjem
3. plinske mikroturbine
4. gorive ćelije.

Zbog povećanja ukupne iskoristivosti energetskih sustava, te zbog smanjenja emisije ugljičnog dioksida, potrebno je primjenjivati kogenerativnu proizvodnju električne i toplinske energije tamo gdje je to moguće (*Mustapić, Staniša, Mijović, 2007.*). Za svako odlagalište otpada potrebno je odgovarajućom studijom izvodljivosti utvrditi načine na koje bi se na što ekonomičniji način u kogeneraciji proizvedena toplina upotrebljavala.

Prema pretpostavljenim kapacitetima proizvodnje odlagališnog plina na našim odlagalištima, moguće je predvidjeti da će se u većini slučajeva primjenjivati mikro i mini, te mali kogeneracijski sustavi. U literaturi postoji čitav niz definiranja mikro i mini kogeneracijskih sustava. Direktiva o unapređenju kogeneracije (*2004.*) definira da je mikrokogeneracijska jedinica maksimalne snage manje od 50 kW, dok je mala kogeneracija jedinica instalirane električne snage do 1 MW. U Tarifnom sustavu za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije (*2007.*) definirano je da su mikrokogeneracijski sustavi oni koji imaju instaliranu električnu snagu manju od 50 kW, dok su mali kogeneracijski sustavi oni koji imaju instaliranu električnu snagu od 50 kW do 1 MW. Pod pojmom minikogeneracijskih sustava misli se na dio malih kogeneracijskih sustava čija je električna snaga veća od 50 kW, a manja od 200 kW.

### Motori s unutrašnjim izgaranjem

Uporaba motora s unutrašnjim izgaranjem za proizvodnju električne i toplinske energije najrašireniji je oblik primjene odlagališnog plina. Ova

vrsta agregata ubraja se u najstarije i dobro ispitane tehnologije u praksi. U primjeni susrećemo motore snage od nekoliko kW, pa do nekoliko MW (*Energy Nexus Group, 2002.*). Zbog značajnog udjela sumporovodika, te zbog ostalih specifičnosti odlagališnog plina, agregate koji rade s odlagališnim plinom potrebno je preraditi na odgovarajući način.

Osnovne prednosti motora s unutrašnjim izgaranjem u primjeni za energetsko iskorištavanje odlagališnog plina su:

- a) široki izbor snaga agregata
- b) mogućnost primjene na odlagalištima svih veličina
- c) relativno niski investicijski troškovi
- d) najčešće korišteni u praksi
- e) najstarija i najpoznatija tehnologija
- f) visoka iskoristivost i pouzdanost sustava
- g) mogućnost odabira više poznatih proizvođača opreme diljem svijeta
- h) dobra pokrivenost rezervnim dijelovima
- i) jednostavno i poznato održavanje agregata.

Osnovni nedostaci motora s unutrašnjim izgaranjem su:

- a) korozija pojedinih dijelova motora
- b) češći servisni intervali, skuplje održavanje
- c) visoka emisija dušikovih oksida u ispušnim plinovima
- d) dosta velika osjetljivost na postotak metana u odlagališnom plinu.

### ***Motori s vanjskim izgaranjem – Stirling motori***

Iako je ova tehnologija poznata više desetljeća, njezina primjena u praksi tek je nedavno i realizirana (*Thombare, Verma, 2006.*). Stirlingov motor ima do 50% manje pokretnih dijelova od klasičnog motora s unutrašnjim izgaranjem. Budući da ne postoji direktni kontakt pokretnih dijelova i sredstava za podmazivanje s pogonskim gorivom, Stirlingov motor pogodan je za proizvodnju električne energije iz odlagališnog plina kao i kogeneraciju.

Osnovne prednosti Stirlingovih motora su:

- a) široke mogućnosti primjene
- b) potrebna minimalna predobrada plina prije same uporabe
- c) nije potrebna kompresija plina i skupi sustavi za ubrizgavanje plina pod tlakom
- d) jednostavno spajanje na električnu mrežu direktno preko generatora
- e) relativno veliki stupanj iskoristivosti sustava, do 30% kod proizvodnje električne energije, te do 80% kod kogeneracije
- f) tihi rad i minimalne vibracije motora
- g) niski troškovi održavanja, jedan servis godišnje
- h) relativno niski predvidivi troškovi proizvodnje energije.

Osnovni nedostaci primjene Stirlingovih motora pri energetskom iskorištavanju odlagališnog plina su:

- a) nova nedovoljno potvrđena tehnologija
- b) relativno mali broj primjera iz prakse
- c) trenutno se proizvode jedinice relativno malih nazivnih snaga
- d) mali broj proizvođača opreme i rezervnih dijelova.

### ***Plinske mikroturbine***

Plinske mikroturbine ubrajaju se u novu generaciju pogonskih agregata koje se uz prirodni plin uz određene modifikacije mogu pokretati i pomoću odlagališnog plina. Plinske mikroturbine su vrlo malih dimenzija, a sukladno tome i malih izlaznih snaga, uz puno veće brzine vrtnje u odnosu na klasične plinske turbine (*Pilavac-hi, 2002.*). Upravo je fleksibilnost ovih agregata rezultirala širokom primjenom na manjim odlagalištima i odlagalištima s manjom emisijom metana.

Osnovne prednosti plinskih mikroturbina su:

- a) male dimenzije i lako prenosive (težina pojedinih modela iznosi 405 kg)

- b) moguće je povezivanje više mikroturbina u jedinstven sustav, te se time znatno povećava fleksibilnost sustava ovisno o količini plina
- c) dobar su izbor za manja i starija odlagališta gdje je kvaliteta i količina odlagališnog plina nedostatna za neki od tradicionalnih sustava
- d) kompaktne su, malih dimenzija, imaju manje pokretnih dijelova, a uz uporabu zračnih ležajeva i zračnog hlađenja ne treba im podmazivanje i rashladne tekućine
- e) u komorama izgaranja realizira se potpunije izgaranje nego kod ostalih agregata i baklji s puno nižom emisijom štetnih plinova u ispušnim plinovima
- f) mogu raditi s najnižim postotkom metana u odlagališnom plinu (min. 35%)
- g) moguća je kogeneracija (proizvodnja vodene pare ili vrele vode).

Osnovni nedostaci plinskih mikroturbina su:

- a) imaju manju iskoristivost u odnosu na ostale agregate (do 28%), te stoga imaju veću specifičnu potrošnju goriva po kWh proizvedene električne energije
- b) relativno visoka cijena proizvodnje električne energije
- c) osjetljive su na nečistoće u odlagališnom plinu i trebaju predobradu plina prije upotrebe
- d) potrebno je više prateće opreme uz samu mikroturbinu, npr. kompresori visokog tlaka i dr.
- e) veći investicijski troškovi po kW, visoki troškovi održavanja po kWh proizvedene električne energije, pa je stoga dulje razdoblje povrata uloženi sredstava.

### **Gorive ćelije**

Sustav gorivih ćelija koji kao gorivo upotrebljava odlagališni plin jedan je od najmlađih tehnoloških dostignuća na području dobivanja

energije iz obnovljivih izvora energije. Gorive ćelije rade na istom načelu kao i baterije, odnosno energija nastala kemijskim procesom pretvara se direktno u električnu energiju.

Gorive ćelije koje su pogodne za rad s odlagališnim plinom kao gorivom mogu se podijeliti u dvije kategorije (*Lunghi, Bove, Deisderi, 2004., US Department..., 1998., EG&G technical service, 2002.*):

- a) MCFC - gorive ćelije s tekućim ugljikom
- b) SOFC- gorive ćelije s oksidima.

Gorive ćelije ubrajaju se u nove tehnologije koje su još u fazi razvoja. U budućnosti kada se ova tehnologija u potpunosti razvije, očekuje se značajna primjena u praksi.

Osnovne prednosti gorivih ćelija su:

- a) niska razina buke pri radu
- b) najniža emisija štetnih plinova u okoliš od svih do sada poznatih tehnologija
- c) električna iskoristivost sustava je vrlo visoka, čak do 50%
- d) pogodne su za kogeneraciju.

Osnovni nedostaci gorivih ćelija jesu:

- a) vrlo visoki investicijski troškovi, kao i troškovi rada i održavanja
- b) vijek trajanja gorivih elemenata-blokova iznosi najviše 5 godina (*Lunghi, Bove, Deisderi, 2004.*).

### **Ostale mogućnosti iskorištavanja odlagališnog plina**

U ovom poglavlju opisat će se ostale alternativne tehnologije i rješenja energetskog iskorištavanja odlagališnog plina. Jedno od mogućih rješenja je i iskorištavanje odlagališnog plina u industrijskim objektima koji su relativno blizu odlagališta otpada. Ovakva rješenja, ako ih je moguće realizirati, u praksi su se pokazala vrlo ekonomski opravdana.

### **Obrada odlagališnog plina za uporabu u plinovodima**

Odlagališni plin, ako se radi o velikim količinama, treba cjevovodom spojiti s mrežom gradskog plina, te upotrebljavati u industriji i kućanstvima. Odlagališni se plin zbog svojeg sastava i nečistoća koje sadrži mora predobraditi prije puštanja u mrežu kako bi zadovoljio stroge kriterije. U samom postupku čišćenja moraju se izdvojiti nečistoće, krute čestice, kondenzat, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S i neugodni miris, što je složeni proces i zahtijeva visoke investicijske troškove za uređaje koji obrađuju odlagališni plin.

Osnovne prednosti direktne uporabe odlagališnog plina u plinskoj mreži uz predobradu:

- a) stabilan, kontinuiran i dugoročan sustav
- b) jednostavan pristup mreži široke potrošnje
- c) niske vrijednosti emisije štetnih tvari
- d) nusproizvod CO<sub>2</sub> ima tržišnu vrijednost.

Osnovni nedostaci direktne uporabe odlagališnog plina:

- a) visoki investicijski troškovi i troškovi rada i održavanja u slučaju kada treba složena obrada plina (odvajanje CO<sub>2</sub>, nečistoća, kondenzata itd.)
- b) niske cijene plina na tržištu dovode u pitanje isplativost projekta
- c) nije za manja odlagališta, niti za kraća razdoblja uporabe
- d) poželjan veći potrošač koji nije previše udaljen od samog odlagališta.

### **Proizvodnja plinovitog goriva za motorna vozila**

Odlagališni plin može se posebnim tehnološkim procesima pripremiti za uporabu kao pogonsko gorivo za pokretanje radnih i transportnih motornih vozila, i to kao komprimirani plin ili kao ukapljeni plin. Motori koji pokreću takva vozila najčešće su standardni Ottovi motori s dodatnim elementima za uporabu plina kao pogonskog goriva. U svijetu postoji niz uspješnih primjera uporabe odlagališnog plina koji se kori-

sti za pogon kompaktna na samom odlagalištu, vozila za prikupljanje i odvoz otpada, gradskih autobusa te osobnih vozila (*Willumsen, 2005.*).

### **Uporaba odlagališnog plina za zagrijavanje plastenika i CO<sub>2</sub> za ubrzani rast biljaka u plastenicima**

Toplinska energija proizvedena u kogeneraciji može se vrlo ekonomično upotrebljavati za zagrijavanje plastenika ili staklenika tijekom većeg dijela godine. Također je eksperimentalno potvrđeno da dodavanje određene količine CO<sub>2</sub> kao zračnog gnojiva povećava rast biljaka. Upravo na temelju navedenih činjenica uobičajena koncentracija CO<sub>2</sub> u atmosferi je oko 350 ppm. Idealna koncentracija za brži rast biljaka je između 1000 i 1500 ppm.

Nakon izgaranja odlagališnog plina u nekom kogeneracijskom sustavu izlaze ispušni plinovi koji se nakon pročišćavanja mogu upuhivati u plastenike ili staklenik. Upuhivanje tako očišćenog CO<sub>2</sub> u plastenike povećava prinose uzgajanih biljnih vrsta od 30 do 60% ovisno o količini CO<sub>2</sub> i vrsti biljaka (*Jaffrin, Bentounes, Joan, Makhlouf, 2003.*).

Na ovaj način može se na vrlo ekonomičan način iskoristiti zemlja oko odlagališta otpada koja inače ima vrlo nisku vrijednost. Budući da se kod većine odlagališta otpada predviđa izgradnja pogona za kompostiranje, stječu se idealni uvjeti za ekološki uzgoj biljaka.

### **PRELIMINARNA ANALIZA EKONOMSKE OPRAVDANOSTI PREDLOŽENIH RJEŠENJA**

Da bi se dobila jasnija slika ekonomske opravdanosti pojedinih mogućnosti energetskog iskorištavanja odlagališnog plina, usporedit će se neka tehnička rješenja pojedinih tehnologija koristeći podatke koji su dostupni u literaturi. U Tablici 2. i Tablici 3. dani su usporedni prikazi osnovnih tehničkih, ekonomskih i emisijskih podataka za pojedine tehnologije koje će se razmatrati.

**Tablica 2. Usporedni prikaz osnovnih tehničkih i ekonomskih podataka za pojedine tehnologije****Table 2. Comparative overview of technical and economic indicators for different technologies**

Tehnologija	Nazivna snaga	Stupanj električne iskoristivosti	Troškovi investicije (\$/kW)	Troškovi održavanja (cent/kWh)
Motori SUI	75 kW-5 MW	27 - 36%	1.000-1.700	1,5-4,5
Stirling motori	55 – 155 kW	25 – 30%	1.500-2.000	0,8-1,0
Mikroplinske turbine	30-200 kW	20 – 27%	1.800-3.000	1,5-3,0
Gorive ćelije	200 kW	40 – 50%	4.000-5.000	2,0-4,0

**Tablica 3. Osnovne karakteristike pojedinih tehnologija****Table 3. Basic characteristics of different technologies**

Osnovne karakteristike	Motori SUI	Stirling motori	Mikroturbine	Gorive ćelije
Električna iskoristivost sustava	33%	30%	28%	50%
Potrošnja goriva (kJ/kWh)	10.972	9.390	12.872	7.174
Emisije u okoliš (µg/kj)				
NO <sub>x</sub>	56,6	3,11	15	u tragovima
CO	56,6	15	19	1,4

Procjena nastalih količina odlagališnih plinova zbog mikrobiološke razgradnje otpada opisuje se odgovarajućim matematičkim modelom:

$$dV/dt = V_0 \cdot e^{kt} \quad [1]$$

gdje su:

V - volumen nastalog odlagališnog plina

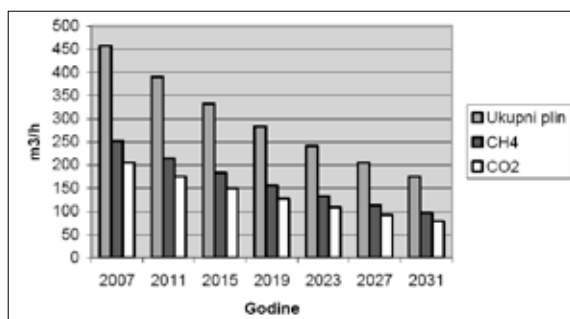
t - vrijeme

k - konstanta

V<sub>0</sub> - volumen plina koji nastane razgradnjom 1 t otpada.

Kada se spomenuti matematički model nadopuni odgovarajućim korekcijskim faktorima, moguće je procijeniti godišnje količine odlagališnog plina. Osnovni faktori koji utječu na količinu odlagališnog plina su: karakteristike otpada, temperatura, pH-vrijednost i sadržaj vlage na odlagali-

štu, obuhvatnost kontroliranog skupljanja plina, koncentracije soli (kao što su sulfati i nitrati) i dr. (*Fundurulja, 2007.*). U svrhu što boljeg predviđanja nastalih godišnjih količina odlagališnog plina na nekom odlagalištu razvijeni su odgovarajući softverski paketi (*Landfill Gas Emissions Model, 2005.*). U fazi planiranja ili procjene izvodljivosti sustava za energetska iskorištavanja odlagališnih plinova mogu se primjenjivati izračunate godišnje količine odlagališnog plina. Međutim, izvedbeni projekti ovakvih sustava moraju se temeljiti isključivo na podacima izmjerenim na odlagalištu dobiveni na osnovi velikog broja različitih mjerenja koja su se na odlagalištu sustavno provodila najmanje godinu dana. Na slici 2 prikazani su rezultati proračuna očekivanih godišnjih količina odlagališnog plina za jedno tipično odlagalište starosti 30 godina.



Slika 2. Grafički prikaz očekivanih količina odlagališnog plina za jedno tipično odlagalište starosti 30 godina

Figure 2. Expected quantities of waste gas for a typical 30-year-old site

Za izračun isplativosti odgovarajućeg sustava primijenjena je metoda NSV, odnosno metoda određivanja sadašnje vrijednosti, koja se izračunava prema ovim izrazima:

$$NSV = -I_0 + \sum_{k=1}^n F_k (1 + TK)^{-k} \quad [2]$$

$$F_k = n_r \cdot [(CoE \cdot W) - (TO \cdot W)] \quad [3]$$

gdje su:

NSV - neto sadašnja vrijednost

$I_0$  - investicijski troškovi

$n$  - vijek trajanja opreme, agregata (pretpostavka je 10 godina, osim za MCFC 5 godina)

$F_k$  - tok novca za k-tu godinu

$n_r$  - broj efektivnih sati rada na godinu (pretpostavljena vrijednost je 7.680 h/god)

$W$  - snaga agregata (kW)

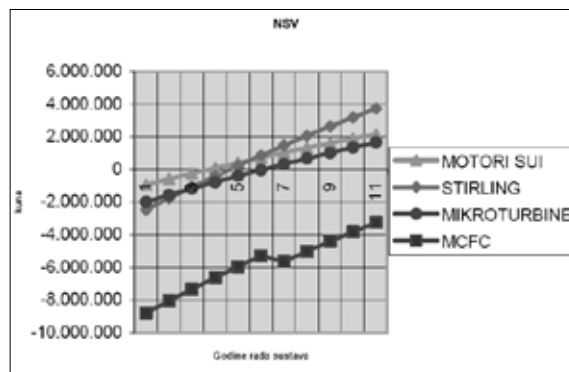
$CoE$  - cijena električne energije kn/kWh (pretpostavljena je vrijednost od 0,36 kn/kWh)

$TO$  - troškovi rada i održavanja agregata (kn/kWh)

$TK$  - troškovi kapitala (u našem primjeru pretpostavljena je vrijednost od 3%).

Troškovi novog bloka gorivih ćelija iznose oko 30% investicijskih troškova ( $I_0$ ) i moraju se mijenjati svakih 5 godina (Lunghi, Bove, Deisderi, 2004.).

Na slici 3 prikazani su rezultati proračuna neto sadašnje vrijednosti za pojedina rješenja za pretpostavljeni vijek otplate opreme od 10 godina.



Slika 3. Neto sadašnja vrijednost za pojedina rješenja u razdoblju od 10 godina

Figure 3. Net present value for different solutions over 10 years

U proračunu toka novca kod investicija za predložena rješenja uzeli smo u obzir samo prihod ostvaren od prodaje električne energije, bez prihoda koji bi se ostvarivao od prodaje toplinske energije.

Kao model za proračun neto sadašnje vrijednosti primijenjeni su podaci za prosječno manje odlagalište komunalnog otpada starosti oko 30 godina s odloženih cca 500.000 tona otpada uz pretpostavljeni udio biorazgradivog otpada oko 35%.

Količine odlagališnog plina koje nastaju na jednom takvom odlagalištu bile bi dostatne za rad jednog od predloženih tehničkih rješenja za razdoblje od narednih 20 godina. Kod proračuna neto sadašnje vrijednosti uzete su u obzir karakteristike pojedinih agregata prikazanih u Tablici 4.



**Tablica 4. Karakteristike agregata korištenih pri proračunu neto sadašnje vrijednosti****Table 4. Characteristics of units used to calculate net present value**

Tehnologija	Nazivna snaga	Potrošnja odlagališnog plina	Specifična potrošnja energije
Motori SUI	170 kW	108 m <sup>3</sup> /h	10.972 kJ/kWh
Stirling motori	200 kW	164 m <sup>3</sup> /h	9.390 kJ/kWh
Mikroplinske turbine	200 kW	150 m <sup>3</sup> /h	12.872 kJ/kWh
Gorive ćelije (MCFC)	400 kW	166 m <sup>3</sup> /h	7.174 kJ/kWh

## ZAKLJUČAK

Ekonomsku i ekološku opravdanost paralelne (naknadne) ugradnje sustava za energetske iskorištavanje odlagališnog plina, uz zakonom propisani sustav sakupljanja i obrade odlagališnog plina s plinskom stanicom s bakljom, potrebno je provjeriti u svakom pojedinačnom slučaju odlagališta. Svakako treba ispitati mogućnost uporabe toplinske energije iz kogeneracije u svrhu zagrijavanja plastenika ili staklenika, ili direktnu uporabu odlagališnog plina u eventualnom obliku industrijskom objektu.

Motori s unutarnjim izgaranjem i mikroplinske turbine predstavljaju ekonomski isplativa rješenja za energetske iskorištavanje odlagališnog plina. Gorive ćelije za sada ne predstavljaju ekonomski opravdan način energetske iskorištavanja odlagališnog plina zbog previsokih investicijskih troškova.

## LITERATURA

Cheremisinoff, N.P.: *Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies*, Elsevier Sciences, USA, 2003.

*Direktiva 2004/8/EZ*, 11. veljače 2004., Direktiva o unapređenju kogeneracije na temelju potrošnje korisne topline na unutrašnjem tržištu energije kojom se izmjenjuje i dopunjuje Direktiva 92/42/EEZ.

*Energy Nexus Group*, Technology characterization: Reciprocating engines, Environmental Protection Agency, USA, 2002.

*EG&G technical service*, Fuel cell handbook, 6th ed., US Department of Energy, Morgantown (WV), 2002.

*EU Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste*, 1999.

Fundurulja, D.: *Studija utjecaja na okoliš ciljanog sadržaja sanacije odlagališta otpada Ilovac*, IPZ uniprojekt TERRA, Zagreb, 2007.

Herenda, J.: Odlagališni plin u funkciji sanacije i izgradnje odlagališta komunalnog otpada s osvrtnom na plinske stanice s bakljom, *VIII. međunarodni simpozij gospodarenja otpadom*, Zagreb, 2004.

Jaffrin, A., Bentounes, N., Joan, M., Makhlof, S.: *Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth*, France, 2003.

*Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)*, Version 3.02 User's Guide, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington DC, 2005.

Lemar, P.Jr.: *CHP Systems for landfills and wastewater treatment plant*, Salt Lake City, Utah, 2005.

Lunghi, P., Bove, R., Desideri, U.: LCA of a fuel cells based landfill gas energy conversion technologies, *J. Power Sources*, 131, 2004., 120–1266.

Mustapić, N., Staniša, B., Mijović, B.: Mikro i mini kogeneracijski sustavi, 6. međunarodna znanstvena konferencija o proizvodnom inženjstvu, U: *Zbornik radova*, RIM 227., 24.-26. listopada 2007., Plitvička jezera.

Pilavachi, P.A.: Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power, *Applied Thermal Engineering*, 22, 2002., 2003-2014.

Popov, V.N., Power, H.: *Landfill emission of gases into the atmosphere: Boundary element analysis*, WIT press, USA, 1999.

*Pravilnik o uvjetima za postupanje s otpadom*, N.N., br. 123/97.

*Program mjera za postupanje s otpadom u Republici Hrvatskoj u 2004.*, Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, Zagreb, travanj 2004.

Sandelli, G.J.: *Demonstration of Fuel Cells To Recover Energy from Landfill Gas (Phase I Final Report: Conceptual Study, EPA-600-R-92-007)*,

International Fuel Cells Corporation, Washington, DC, 1992.

SCS Engineers: *Comparative analysis of landfill gas utilization technologies*, File No. 0293066, SCS Engineers, Washington, DC, 1997.

*Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije*, N.N., 33/07.

Thombare, D.G., Verma, S.K.: Technological development in the Stirling cycle engines, *Renewable and sustainable energy reviews*, 2006. (article in press-available online)

*US Department of Energy and Electric Power Research*, Landfill gas cleanup for fuel cell power generation, Final report, 1998.

White, J., Robinson, J., Ren, Q. : Modelling the biochemical degradation of solid waste in landfills, *Waste Manage*, 24, 2004., 227-240.

Willumsen, H.C.: *Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide*, Vilborg, Denmark, 2005.

## USING WASTE GAS AS AN ENERGY SOURCE

*SUMMARY: Our modern way of life causes enormous amounts of waste to be deposited at waste disposal sites, thus making it imperative to use the waste gas as fuel. The paper presents various modes of using waste gas as a source of energy, focusing on traditional and on more recent, innovative methods. Some technologies are analysed using techno-economical comparisons.*

**Key words:** waste gas, energy exploitation, renewable energy sources

*Subject reviews*  
*Received: 2008-03-25*  
*Accepted: 2008-04-10*