

Avtor prispevka:

Tomaž Levstek, Biotehniški center Naklo, Slovenija, tomaz.levstek@quest.arnes.si

Tehnologije izrabe deponijskega plina

Izvleček

V prispevku smo pregledali in primerjali različne tehnologije za energijsko izrabo deponijskega plina. Poleg motorjev z notranjim izgorevanjem, ki so najbolj uveljavljeni, smo primerjali še bolj napredne tehnologije, kot so organski Rankinov cikel, plinska turbina, Stirlingov motor in gorivna celica. Primerjali smo okoljsko sprejemljivost s stališča emisij NO_x, CO ter stopnjo zmanjšanja sproščenih toplogrednih plinov, izkoristek in porabo goriva za proizvedeno energijo in investicijske stroške ter stroške delovanja in vzdrževanja. Primerjava kaže, da so motorji z notranjim izgorevanjem kljub najvišjim emisijam, povprečnim izkoristkom in visokim investicijskim stroškom najbolj razširjeni. Gorivne celice glede na najboljši izkoristek in čisto tehnologijo v bližnji prihodnosti obetajo največ. Investicijski stroški, ki so najvišji, se z bolj množično uporabo počasi znižujejo, kratka življenjska doba pa se z novimi tehnološkimi odkritji in izboljšavami podaljšuje. Plinske turbine za uporabo deponijskega plina zaradi njegove spremenljive sestave in načina delovanja turbin niso najboljša rešitev. Do njihove širše uporabe verjetno ne bo prišlo. Rankinov organski cikel in Stirlingov motor zaradi svojih karakteristik in pomanjkanja raziskav pa trenutno tudi nista primerna načina za energijsko izrabo deponijskega plina.

Ključne besede: deponijski plin, energijska izraba, komunalni odpadki

LANDFILL GAS ENERGY RECOVERY TECHNOLOGIES

SUMMARY

In the article we reviewed and compared different technologies for energy utilization of landfill gas. In addition to internal combustion engines, which are the most established, we compared some more advanced technologies such as organic Rankine cycle, gas turbine, Stirling engine and the fuel cell. We compared: the environmental performance in terms of NO_x, CO releases, the rate of reduction of greenhouse gases emitted in the air, the fuel efficiency of produced energy, the costs of investment, operation and maintenance. The comparison shows that the internal combustion engine is the most widely used, despite the highest emission rates, the average yield and high investment costs. Fuel cells show the best efficiency and the most clear technology. Investment costs for the fuel cells are the highest

but slowly decrease with more widespread application. Their low life expectancy is increasing with new technological advances and improvements . Gas turbines are not the best solution for the use with landfill gas due to its variable composition and method of operation of the turbines. Their use for biogas energy recovery probably won't become widespread. Organic Rankine cycle and Stirling engine are currently not suitable method for the energy utilization of landfill gas because of its characteristics and the lack of research. We can summarized that the fuel cells are the most promising technology in the near future.

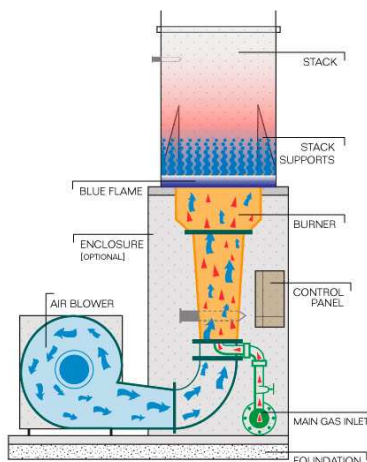
Keywords: landfill gas, energy recovery, municipal waste

1 Uvod

Deponijski plin nastaja na odlagališčih odpadkov kot produkt anaerobne, mikrobne razgradnje bioloških odpadkov z visoko vsebnostjo ogljika (150 – 250 kg ogljika na tono odpadkov). Večja količina bioloških odpadkov, pomeni več deponijskega plina. Sestavljen je v glavnem iz 30 – 70 odstotkov metana (CH_4), 20 - 60 odstotkov ogljikovega dioksida (CO_2) in številnih drugih plinov ter spojin v manjših količinah. Za okolje je škodljiv predvsem metan, saj je toplogredni plin s potencialom globalnega segrevanja 25 do 100 let. To pomeni, da v povprečju vsak kilogram metana v 100 letih segreje Zemljo za 25 krat bolj kakor enaka količina CO_2 . Poleg tega je lahko nevaren tudi zaradi svoje eksplozivnosti in strupenosti ob vdihavanju. Zaradi vsebnosti merkaptanov in vodikovega sulfida pa je tudi krivec za neprijetne vonjave, ki se širijo okoli odlagališč. Hitrost razgradnje organskih snovi in količina deponijskega plina sta odvisna predvsem od sestave odpadkov, količine vode in gostote. Glede na to organske odpadke razvrščamo v dve skupini. V prvi so tisti, ki se razgradijo hitro (tri mesece do pet let), v drugi pa razgradnja poteka počasi skozi daljše obdobje (do petdeset let ali več). Količina deponijskega plina običajno doseže svoj vrh dve leti po odložitvi odpadkov in potem pada v obdobju približno 25 let ali več. Če bi se strogo držali navodil evropske Direktive o odlagališčih (31/1999/CE) in takoj zaprli vsa odlagališča odpadkov, bi kljub temu imeli še veliko let probleme s sproščanjem metana iz odlagališč. V Evropi po nekaterih ocenah izvira iz sektorja odpadkov 30% antropogenih emisij metana. Poleg tega delež emisij metana v celotni količini toplogrednih plinov iz odlagališč v EU znaša 2,4%. Celotno količino sproščenih toplogrednih plinov z odlagališča v celotnem obdobju njegovega delovanja lahko z osnovno primerjalno vrednostjo izračunamo brez kontrolnih in merilnih naprav. Glede na prisotnost metana in ogljikovega dioksida v deponijskem plinu se celotno količino toplogrednih plinov v času obratovanja odlagališča lahko oceni na $1,3\text{E}+09$ kg CO_2 ekvivalenta, kar pomeni približno 1365 kg CO_2 ekvivalenta na tono odloženih trdnih odpadkov. (Lombardi et al., 2006).

2 Sežig plina

V skladu z Direktivo 31/1999/CE naj bi se ves deponijski plin na odlagališčih zbiral in nato predelal ali uporabil. Če ga ni mogoče uporabiti za proizvodnjo energije, mora biti sežgan. Namen sežiga je predvsem varno odstranjevanje gorljivih sestavin, ki imajo negativen vpliv na okolje, pa tudi kontrola neprijetnih vonjav zaradi sestavin plina. Poznamo odprti in zaprti sežig. Pri odprtem načinu zgorevanje poteka na odprti bakli, kar pomeni nepopolno kontrolo (slika 2). Meritve kažejo, da pri tem približno 15% nezgorelega plina uide v atmosfero (Eden et al., 1999). Poleg tega je lahko zaradi nizke turbulence, temperature in vsebnosti kisika zgorevanje na robu bakle nepopolno, kar lahko vodi do tvorbe dioksinov, furanov in policikličnih aromatskih ogljikovodikov.



Slika 1: Zaprto zgorevanje deponijskega plina

Vir: <http://abutech.com/products/flares/low-emission-flare-lef/>



Slika 2: Odprti sežig

Vir: http://www.mrw-tech.com/pia_loading_terminal_flares.html

Zaprti tip zgorevanja poteka navadno v vertikalnem cilindričnem ohišju, kjer je zagotovljena kontrola zgorevanja. Zaradi izoliranega ohišja so toplotne izgube manjše, višje temperature pa omogočajo bolj popolno zgorevanje (slika 1). V primerjavi z možnimi vplivi na okolje in zdravje je sežiganje deponijskega plina ob popolnem zgorevanju z dovolj zraka bolj koristno, kot pa njegovo spuščanje v ozračje. Seveda pa je sežig ekonomsko upravičen predvsem pri nizkih vsebnostih metana v deponijskem plinu (20 – 40%), ko je energetska izraba nesmiselna. Sežig plina pri višjih vsebnostih metana je ekonomsko smiselno samo v primeru majhnih odlagališč, ko je odpadkov premalo za konstantno količino metana, ki je potrebna za energetska izrabo. Pri dovolj velikih količinah odpadkov in posredno deponijskega plina s primerno vsebnostjo metana pa je sežig ekonomsko potraten, saj vso kemijsko energijo metana izgubimo v obliki toplote v ozračje.

Pri predpostavki, da ves deponijski plin zajamemo, kot predvideva evropska direktiva, in ga preko zgorevanja na bakli pretvorimo v CO_2 , je celotna količina toplogrednih plinov odlagališča, tako metana kot CO_2 na bakli, ocenjena na približno $5,77\text{E}+08$ kg CO_2 ekvivalenta, kar pomeni približno 577 kg CO_2 ekvivalenta na tono odloženih trdnih odpadkov (Lombardi et al., 2006).

3 Motorji z notranjim izgorevanjem

Uporaba motorjev z notranjim izgorevanjem je ena od najbolj razširjenih tehnologij pretvorbe deponijskega plina v električno energijo. Primerna moč sistema za ekonomsko upravičenost je med 1-3 MW. Zaradi uveljavljene tehnologije je ekonomsko tveganje pri tem manjše v primerjavi z ostalimi tehnologijami. Po drugi strani pa potrebujemo relativno zapleten sistem hlajenja, ki poveča stroške in emisije plinov v ozračje. Zgorevanje v valjih je možno na dva načina, s pomočjo svečke, kot pri vseh Ottovih motorjih, ali z vbrizgom goriva pod visokim pritiskom, kot je to v Dieselskih motorjih. Dieselski motorji so morda po konstrukciji bolj primerni, ker so zaradi svoje robustnosti in večje kompaktnosti manj občutljivi na primesi v

gorivu, poleg tega zgorevanje poteka pri višjih temperaturah. Vendar je za vžig potrebno dodajati plinsko olje. Danes se za izrabo deponijskega plina večinoma uporabljajo Ottovi motorji (več kot 98%), ki imajo enostavnejšo konstrukcijo in ne potrebujejo dodatnega goriva za vžig. Na približno 25 – 35 tisoč delovnih ur zahtevajo tedenski generalni servis, njihova delovna doba pa je približno 20 let ali več, kar je seveda odvisno od obremenitve in predvsem od števila obratov, pri katerih delujejo. Raziskave dokazujejo, da motorji z dvema gorivoma proizvajajo večje količine emisij kot motorji s svečko. Motorje z notranjim izgorevanjem lahko uporabimo tudi v kogeneracijski enoti kar pomeni, da izrabljamo tudi toploto, ki se sprošča pri gorenju. S tem se seveda izkoristek, ki znaša 33%, drastično poveča. Količina sproščenih toplogrednih plinov v ozračje pri uporabi deponijskega plina kot goriva je 469 kg CO₂ ekvivalenta na tono odpadkov. Zaradi relativno velikega hrupa motorjev, ki znaša od 80-110 dBA, je večinoma potrebno poskrbeti za njegovo zmanjšanje. Investicijski stroški naprave so odvisni od velikosti in posledično moči motorjev. Enota z močjo 1MW stane 1 milijon evrov, poleg tega pa letni stroški delovanja in vzdrževanja znašajo še 88 €/kW/leto. Motorji manjši od 1MW stanejo 1800 € na kW, letni stroški delovanja in vzdrževanja pa znašajo 160 €/kW (Bove and Lunghi, 2006).

Tabela 1: Karakteristike motorja z notranjim izgorevanjem na deponijski plin

Električni izkoristek	33%
Poraba goriva (kJ/kWh)	10972
Emisije (µg/kJ):	
NO _x	56,6
CO	56,6

Vir: (Bove and Lunghi, 2006)

4 Plinske turbine

Kljub temu, da je število instaliranih turbin majhno v primerjavi z motorji z notranjim izgorevanjem, predstavljajo drugo najbolj uporabljeno tehnologijo za pretvorbo deponijskega plina. Manjše število turbin je moč pripisati:

- relativno velikim energijskim izgubam pri manjših turbinah v primerjavi z motorji z notranjim izgorevanjem,
- njihovim slabšim karakteristikam pri zmanjšanih obremenitvah,
- visoki začetni investiciji,
- občutljivosti na spreminjanje dovedenih količin deponijskega plina,
- občutljivost na spremembe temperature v okolici (SCS Engineers, 1997).

Po drugi strani pa ne zahtevajo hladilnega sistema, mazalni sistem je enostaven in emisije so drastično nižje kot pri motorjih z notranjim izgorevanjem.

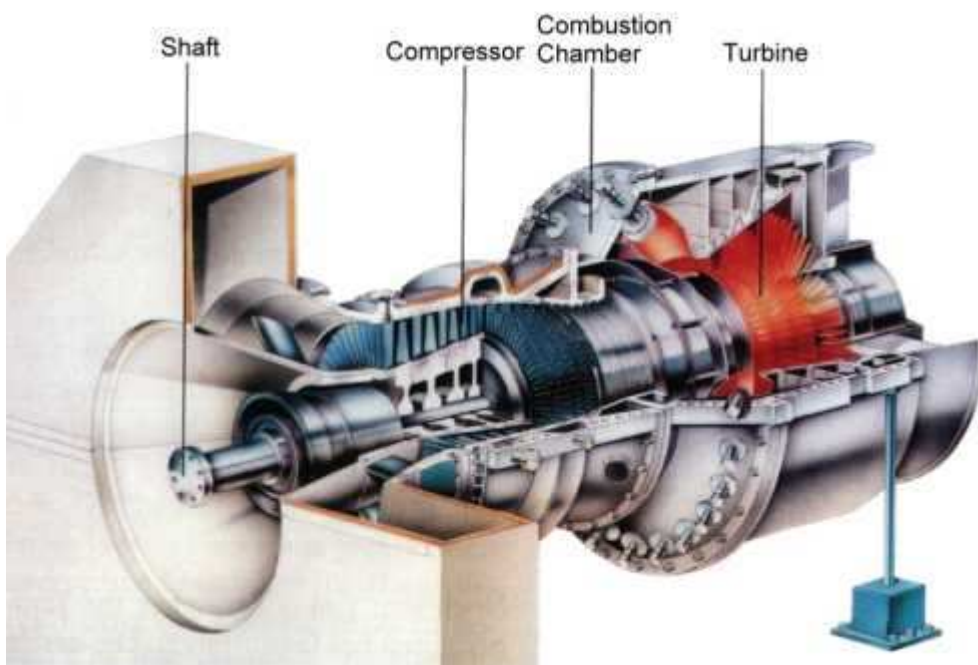
Realno gledano, plinske turbine niso najboljša izbira za pretvorbo deponijskega plina, predvsem zaradi nizkega toplotnega izkoristka, težav pri komprimiranju plina na potreben nivo (zaradi kondenzacije in korozije), in škode, ki jo povzročajo ksiloksani in korozija na lopaticah turbin. Poleg tega mora biti posamezna enota velika vsaj 3 MW moči (Deed, 2004). Kljub temu v ZDA uporabljajo veliko instaliranih mikroturbinskih enot moči 100 kW.

Pri izpustih so vrednosti relativno nizke, 15 µg/kJ dušikovih oksidov in 19 µg/kJ ogljikovega oksida. Investicijski stroški za plinsko turbino moči 0,84 MW znašajo 960000 €, letni stroški delovanja in vzdrževanja pa 76 €/kW (Bove and Lunghi, 2006).

Tabela 2: Karakteristike plinskih turbin

Električni izkoristek	28%
Toplotni izkoristek	35 - 40%
Poraba goriva (kJ/kWh)	12872
Emisije ($\mu\text{g/kJ}$):	
NO _x	15
CO	19

Vir: (Bove and Lunghi, 2006)



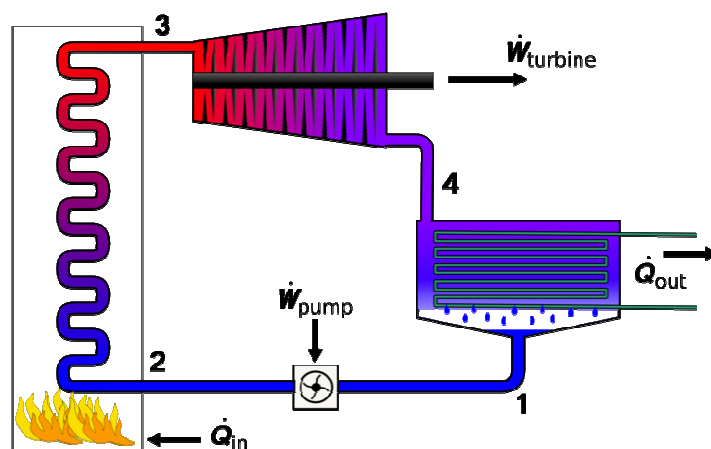
Slika 3: Prerez plinske turbine

Vir: <http://turbine-turbines.com/2011/07/28/gas-turbine-for-sale/>

5 Turbine z organskim Rankinovim procesom (ORC)

Delovanje parnih postrojev temelji na ORC krožnem procesu. Črpalka tlači vodo na visok tlak in jo poganja skozi parni kotel. V parnem kotlu se voda upari in nato ekspandira v turbini. Pri tem se toplotna energija pare pretvarja v mehansko delo. Le-to se porablja za pogon črpalke in ostalih prigradenih agregatov, preostalo neto delo pa poganja električni generator. Za turbino je kondenzator, v katerem para kondenzira. Uparjalna toplota pa se pri tem odvaja v okolico. ORC temelji na enakih termodinamičnih principih s to razliko, da je ima organska delovna tekočina nižjo točko vrelišča od vode. Toplotni vir ORC za uparjanje organskega delovnega sredstva (medija) je vroče olje, ki je lahko pregreto v kotlu na deponijski plin ali kakšno drugo gorivo. ORC sistem se večinoma uporablja za pretvorbo geotermalne energije, vendar je lahko tudi dobra tehnična rešitev za pretvorbo deponijskega plina v rangu od 1-3 MW. Glavne prednosti sistema so nizke emisije, neobčutljivost na spreminjanje količin dovedenega plina in majhno število premičnih delov. Slabosti so visoki investicijski stroški in

občutljivost na spreminjanje temperature okolja. Izkoristek je zelo nizek (18%) in tudi poraba goriva je relativno visoka vendar pa so emisije v ozračje majhne. Investicijski stroški za enoto moči 0,54 MW so 620000 €, letni stroški delovanja in vzdrževanja pa znašajo 47 €/kW (Bove and Lunghi, 2006).



Slika 4: Potek Rankinovega cikla
Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_engine

Tabela 3: Karakteristike turbin z Rankinovim ciklom

Električni izkoristek	18%
Poraba goriva (kJ/kWh)	1922
Emisije ($\mu\text{g/kJ}$):	
NOx	16
CO	18,9

Vir: (Bove and Lunghi, 2006)

6 Stirlingov motor

Začetki tega motorja segajo v 19. stoletje vendar je zanimanje zanj povsem ugasnilo, ko so se uveljavili Ottovi in dizelski motorji z boljšimi karakteristikami. Danes zopet pridobivajo na veljavi zaradi številnih prednosti, predvsem pa je to tehnologija, ki se jo da uporabiti tudi za energijsko pretvorbo deponijskega plina. Tako kot pri Rankinovih turbinah se deponijski plin uporabi kot gorivo za segrevanje delovnega medija. Proces temelji na zaprtem krogu, v katerem se delovni plin izmenično stiska v hladnem valju in razteza v vročem valju. Posebnost sistema je možnost uporabe različnih biogoriv. Glavna pomanjkljivost Stirlingovega motorja je delovanje v manjših sistemih in pomanjkanje večjih demonstracijskih projektov. Tudi vse raziskave so usmerjene predvsem v manjše sisteme velikosti od manj kot 2,5 kW pa do 100 kW. Glavna prednost sistema so nizke emisije, poleg tega notranji deli motorja ne pridejo v stik z gorivom, kar preprečuje korozijo in posledično podaljšuje življenjsko dobo. Investicijske stroške za Stirlingov motor je težko oceniti, ker je uporaba v tej obliki še v eksperimentalni fazi razvoja in predvsem za male enote moči do 200 kW. Jeffrey (2005) navaja ceno 1500 €/kW moči instalirane naprave.



Slika 5: Stirlingov motor

Vir: <http://www.peterlynnkites.com/news/0410news.htm>

Tabela 4: Karakteristike Stirlingovega motorja

Električni izkoristek	38%
Toplotni izkoristek	15-30%
Poraba goriva (kJ/kWh)	9390
Emisije ($\mu\text{g/kJ}$):	
NO _x	3,11
CO	15

Vir: (Bove and Lunghi, 2006)

7 Gorivne celice

Gorivne celice si lahko zamislimo kot velike električne baterije, ki pretvarjajo kemično energijo goriva neposredno v električno. Razlika je v tem, da moramo gorivni celici za njeno delovanje stalno dovajati sveže količine goriva. Med različnimi tipi gorivnih celic so za stacionarne aplikacije moči od 250 kW – 1 MW najbolj primerne gorivne celice s fosforno kislino (PAFC) in z raztopljenim karbonatom (MCFC). Med delovanjem celice ne prihaja do emisij NO_x in CO pač pa je teh več med pripravo goriva. Velika prednost gorivnih celic je visok izkoristek, ki znaša 40–50%, glavna slabost pa so visoki investicijski stroški in dejstvo, da tehnologija kljub vsemu še ni dovolj razvita in zato zahteva zapleten sistem za predpripravo deponijskega plina kot goriva. Gorivne celice s fosforno kislino so trenutno najbolj primerne za izrabo deponijskega plina. Celice z raztopljenim karbonatom pa obetajo največ v bližnji prihodnosti, ker delujejo pri relativno visoki temperaturi (650°C), kar posledično pomeni, da ne potrebujejo dragih kovin za katalizatorje in hkrati delujejo pri višjih koncentracijah nečistoč v gorivu.

Izpusti so enaki 416 kg CO₂ ekvivalenta na tona odpadkov (Lombardi et al., 2006). Investicijski stroški za enoto moči 1,5 MW so pri karbonatnih gorivnih celicah 3,2 milijona evrov, letni stroški delovanja in vzdrževanja pa 73 €/kW (Bove and Lunghi, 2006).



Slika 6: Stacionarna gorivna celica z raztopljenim karbonatom
Vir: <http://climatetechwiki.org/technology/stationary-fuel-cells>

Tabela 5: Karakteristike karbonatne gorivne celice

Električni izkoristek	50%
Poraba goriva (kJ/kWh)	7174
Delovna temperatura (°C)	650
Emisije (µg/kJ):	
NO _x	v sledovih
CO	1,4

Vir: (Bove and Lunghi, 2006)

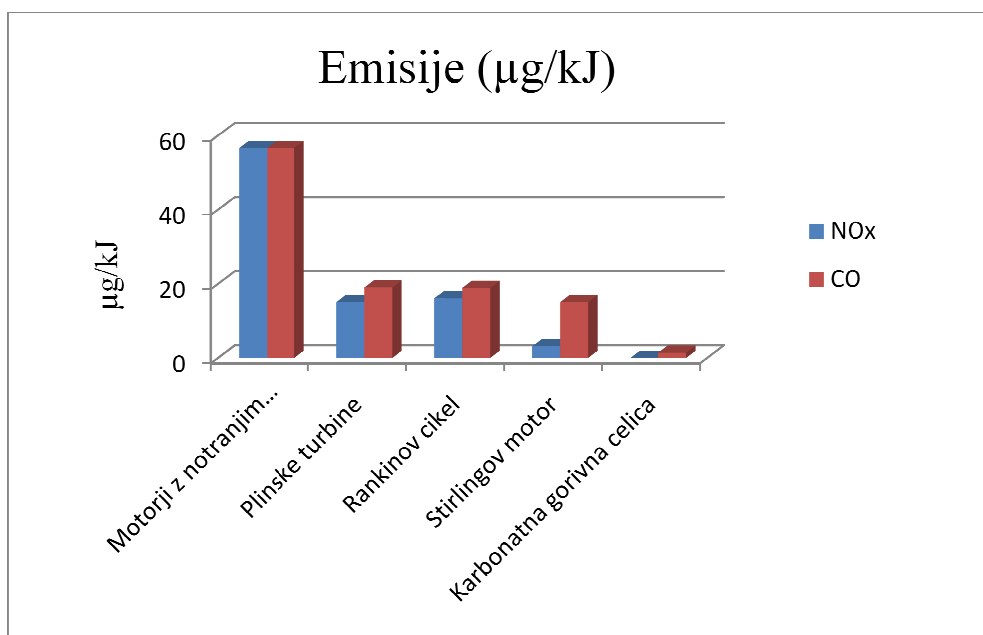
Tabela 6: Primerjava investicij in izkoristkov za posamezno tehnologijo

	MOČ NAPRAVE	INVESTICIJA (MIO €)	OBRATOVANJE IN VZDRŽEVANJE (€/kW/leto)	IZKORISTEK
Motorji z notranjim izgorevanjem	1	0,912	88	33%
Plinske turbine	0,84	0,96	76	28%
Rankinov organski cikel	0,54	0,62	47	18%
Karbonatna gorivna celica	1,5	3,2	73	50%
Gorivna celica s trdnim oksidom	1,5	4	64	36%

Vir: (Bove and Lunghi, 2006)

8 Povzetek

Pretvorba deponijskega plina v električno energijo na konvencionalen način preko motorjev z notranjim izgorevanjem je kljub visokim emisijam plinov še vedno najbolj razširjena tehnologija.



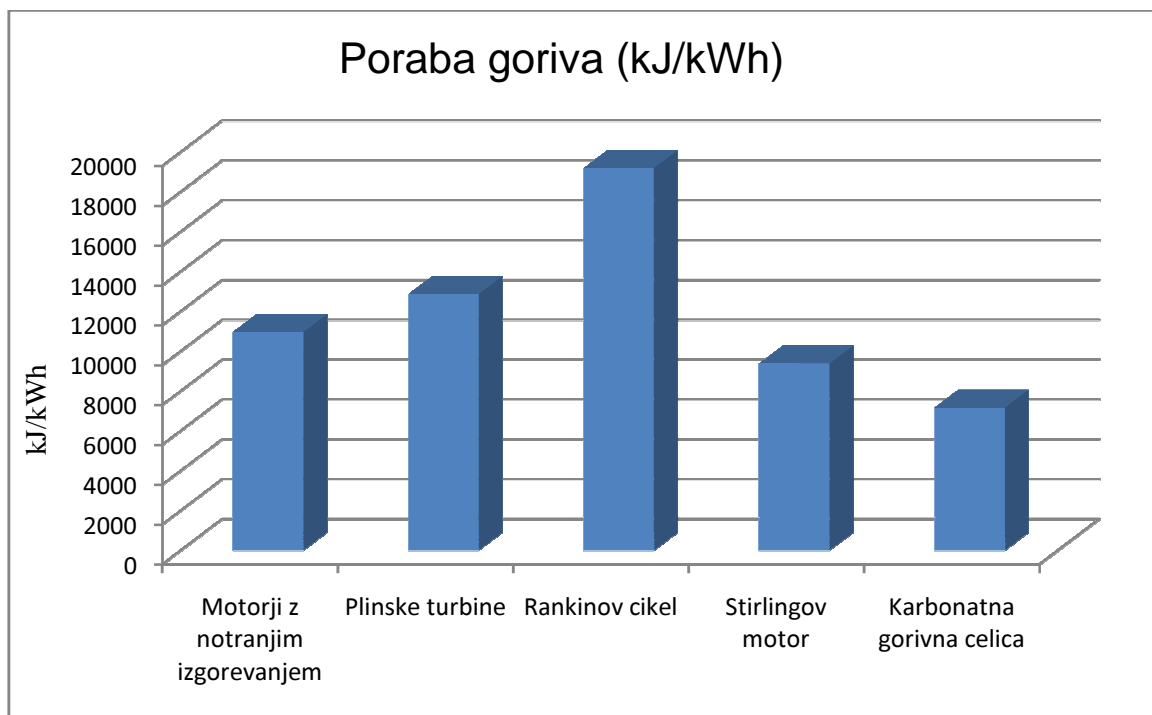
Slika 7: Primerjava emisij plinov
Vir: (povzeto po Bove and Lunghi, 2006)

Razlog je predvsem v uveljavljeni in utečeni tehnologiji, kar posredno pomeni manjšo začetno investicijo in nižje stroške vzdrževanja. Ravno nasprotno pa so gorivne celice glede emisij daleč najbolj okolju prijazne vendar je ta tehnologija za izrabo deponijskega plina še premalo razširjena in so zato stroški investicije in priprave goriva visoki. Tudi življenjska doba gorivnih celic, ki znaša do 7 let, je njihova velika slabost. Kljub temu se vendarle vedno hitreje uveljavljajo, kar gre pripisati predvsem njihovem visokemu izkoristku, ki v precejšnji meri kompenzira visoke stroške začetne investicije. Poleg tega prihaja do vedno novih tehnoloških izboljšav, ki napovedujejo množično uporabo gorivnih celic v bližnji prihodnosti.



Slika 8: Višina investicije za posamezen tip naprave
Vir: (povzeto po Bove and Lunghi, 2006)

Plinske turbine so predvsem zaradi nizkih emisij dokaj uveljavljene, predvsem v ZDA, čeprav je njihov izkoristek nizek, poraba goriva dokaj visoka in tudi investicijski stroški so višji kot na primer pri motorjih z notranjim izgorevanjem. Deponijski plin je zaradi spreminjajoče sestave in količine zelo problematično gorivo za plinske turbine, ki morajo imeti za popoln izkoristek zagotovljen konsistenten dovod goriva s stalno sestavo.



Slika 9: Primerjava porabe goriva posameznih naprav
Vir: (povzeto po Bove and Lunghi, 2006)

Boljša rešitev so morda mikroturbine, ki delujejo z višjimi tlaki, kar pomeni bolj popolno zgorevanje in večje izkoristke. Žal je ta tehnologija premalo raziskana in uveljavljena na področju izrabe deponijskega plina. Še slabše se godi Stirlingovemu motorju, ki bi po svojih karakteristikah sodil ob bok ostalim tehnologijam, vendar je premalo raziskan za področje deponijskega plina. Poleg tega so poskusi usmerjeni predvsem v enote majhnih moči in komercialno na trgu še ni prisoten. Izraba Rankinovega organskega cikla na deponijski plin še ni bila uporabljena in verjetno ne pride v poštev zaradi specifičnih lastnosti deponijskega plina kot goriva. Tudi investicijski stroški so glede na izkoristek, v primerjavi z ostalimi tehnologijami, relativno visoki.

Literatura in viri

Bove, R., Lunghi, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47, 1391–1401.

Carnevalea, E., Corti, A., Lombardia, L., Andrea, E. Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill. *Energy* 2006, 31, 3208–3219.

Deed, C., Cronow, J., Rosevear, A., Braithwaite, P., Smith, R., Stanley, P. Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines, R&D Technical Report 2004, Environment Agency, Bristol, UK, 1-330.

Eden, R.D. and Smith, R. Guidance on best practice flaring of landfill gas in the UK, *Proc. Int. Conf., Seventh ILS*, 1999, Vol. 2, 499-506.

Jeffrey, L., Pierce, P.E. Designing a landfill gas to energy project rules of thumb and questions to ask. Intermountain CHP Application Center Workshop, 2005, Salt Lake City, Utah.

Lombardi, L., Carnevalea, E., Corti, A. Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill. *Energy* 2006, 31, 3208–3219

SCS Engineers. Comparative analysis of landfill gas utilization technologies (online). CONEG Policy Research Center, 1997, (citirano 10.2.2012). Dostopno na naslovu: <http://www.nrbp.org/pdfs/pub07.pdf>.

Tsatsarelis, T., Karagiannidis, A., Moussiopoulos, N., Perkoulidis, G. Technologies of landfill gas management and utilization. Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University, Thessaloniki, Greece.