

ISSN br. 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 3-4 / Godina XVII / Mart 2015.
UDC 627.9

energija

■ ekonomija ■ ekologija

ENERGETIKA 2015



ENERGETIKA 2015.

XXXI međunarodno savetovanje



energija



ekonomija



ekologija

ENERGETIKA 2015.

Pokrovitelji savetovanja

Ministarstvo rudarstva i energetike,
Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja,
Ministarstvo poljoprivrede i zaštite životne sredine,
Ministarstvo privrede
PKS, JP EPS, NIS a. d., JP EMS, JP Srbijagas



SAVEZ ENERGETIČARA

Adresa: 11000 Beograd, Dečanska 5

Telefon: + 381 11 32 26 007

E-mail: savezenergeticara@eunet.rs

www.savezenergeticara.org.rs

ZBORNİK RADOVA

Zlatibor, 24.03. - 27.03.2015

energija

ekonomija ekologija

Energija/Ekonomija/Ekologija

Broj 3-4, mart 2015.

Osnivač i izdavač
Savez energetičara

Predsednik SE
Prof. dr Nikola Rajaković

Sekretar SE
Nada Negovanović

Glavni i odgovorni urednik
Prof. dr Nenad Đajić

Adresa redakcije
Savez energetičara
11000 Beograd
Dečanska 5
tel. 011/322-6007

E-mail: savezenergeticara@EUnet.rs
www.savezenergeticara.org.rs

Kompjuterski prelom EKOMARK
Dragoslav Ješić

Štampa
„Akademska izdanja“,
Beograd

Godišnja pretplata
- 10.000,00 dinara
- za inostranstvo 20.000,00
dinars

Tekući račun SE
broj 355-1006850-61

Radovi su recenzirani uz
tehničku obradu.

Nijedan deo ove publikacije
ne može biti reprodukovana,
presnimavan ili prenošen bez
prethodne saglasnosti Izdavača.

IZDAVAČKI SAVET

Alaksandar Antić,
ministar rudarstva i energetike
dr Srđan Verbić, ministar
prosvete, nauke i tehnološkog
razvoja

Željko Sertić, ministar privrede
Prof. dr Snežana

Bogosavljević - Bošković,
ministar poljoprivrede i zaštite
životne sredine

Prof. dr Branko Kovačević,
dekan ETF

Prof. dr Aleksandar Gajić,
Mašinski fakultet Beograd

Prof. dr Slobodan Stupar,
pomoćnik ministra

Prof. dr Zoran Rajić, državni
sekretar

Dušan Mrakić, ministarstvo
rudarstva i energetike

Ljubo Mačić, dir. Agencije za
energetiku Srbije

Dragan Jovanović, izv. dir.
EPS

dr Kiril Kravčenko, gen.dir.
NIS ad

Aleksandar Obradović,
direktor JP EPS

Aleksej Belov, dir. Bloka
„Energetika“ NIS

Čedomir Ponoćko, dir.
TENT, d.o.o.

Nikola Petrović, gen.dir.
JP EMS

dr Aca Marković, JP EPS
Dušan Bajatović, dir.
JP Srbijagas

Milorad Grčić, dir.
RB Kolubara d.o.o.

Goran Knežević, dir. HE
Đerdap, d.o.o.

Slobodanka Krčevinac,
dir. EDB

Goran Horvat, dir. TE-KO
Kolubara

mr Bogdan Laban, dir.
Elektrovojvodina, d.o.o.

Tomislav Basta, v.d. dir. JP
Transnafta

Srđan Đurović, dir.
Elektrosrbija, d.o.o.

Aleksandar Vlajić, dir.
Obnovljivi izvori EPS

dr Miroslav Malobabić, dir.
JP Srbijagas

Darko Bulatović, dir.
„Jugoistok“ d.o.o.

Sanja Tucaković, dir.
„Centar“, d.o.o.

Dobrosav Arsović, dir.
JKP Novosadska toplana

Zoran Ivančević, dir.
Panonske TE-TO

Vuk Hamović, EFT Group
dr Nenad Popović,
ABS Holding

dr Dragan Kovačević, dir.
Elektrotehnički institut
„Nikola Tesla“

Prof. dr Sanja Vraneš, dir.
Instituta „Mihajlo Pupin“

Borislav Grubor, Instituta za
nuklearne nauke „Vinča“

Prof. dr Milorad Milovančević,
dekan Mašinskog fakulteta
u Beogradu

Prof. dr Dejan Filipović, dekan
Geografskog fakulteta

Prof. dr Šćepan Miljanić, dekan
Fakulteta za fizičku hemiju

Prof. dr Rade Dobroslovački,
dekan Fakulteta tehničkih
nauka u NS

Prof. dr Ivan Obradović, dekan
Rudarsko-geološkog fakulteta
u Beogradu

Prof. dr Jeroslav Živanić,
dekan Tehnički fakultet u
Čačku

Prof. dr Milun Babić, Fakultet
inženjerskih nauka u
Kragujevcu

Dejan Popović, N.O. EPS
Slobodan Babić, Rudnap
Group

Dr Vladimir Živanović, SE

REDAKCIONI ODBOR

Prof. dr Ozren Očić

Slobodan Petrović, sekretar
Odbora za energetiku PKS

Radiša Kostić, dir.
Elektroistok-izgradnja

dr Tomislav Simović, dir.
Montinvest ad

Milorad Marković, predsednik
HK Minel

Milan Lončarević, NIS a. d.

Prof. dr Petar Đukić, TMF

Dragan Nedeljković, novinar

Dr Branislava Lepotić, dir.
JP Transnafta

Jelena Vujović, dir. za odnose
s javnošću EPS

Roman Mulić, SE

Simo Bobić, PK Beograda

Nikola Petrović, dir. Energetika
Kragujevac

Ružica Vranjković, novinar

Jelica Putniković, novinar

ees energija

■ ekonomija ■ ekologija

ORGANIZACIONO - PROGRAMSKI ODBOR

Predsednik: Prof.dr Milun Babić, Mašinski fakultet u Kragujevcu

Sekretar: Nada Negovanović, sekretar Saveza energetičara

Članovi:

Prof.dr Беляков Алексей Васильевич, Научно-исследовательский институт» ОАО «ВТИ») – Российская Федерация

Dr Matthias Jochem Mitsubishi Hitachi Power System Europe GmbH, Nemačka

Dr Jean Rizzon, Mitsubishi Hitachi Power System Europe GmbH

Dr Patrick Weckes, Mitsubishi Hitachi Power System Europe GmbH

Prof. dr Miloš Nedeljković, Mašinski fakultet Beograd

Prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica-University of Timisoara, Romania

dr Ivan Souček, Ph. D., Prague Institute of Chemical Technology, Czech Republic

Prof.dr Zoran Rajić, državni sekretar

Prof.dr Slobodan Stupar, pomoćnik ministra

Prof. dr Miloš Banjac, pomoćnik ministra

Prof.dr Branko Kovačević, dekan ETF u Beograd

Prof.dr Aleksandar Gajić, Mašinski fakultet Beograd

Prof.dr Dečan Ivanović, Mašinski fakultet Podgorica

Prof.dr Zdravko N.Milovanović, Mašinski fakultet Banja Luka

Prof.dr Valentino Stojkovski, Mašinski fakultet Skopje

Prof.dr Predrag Popovski, Mašinski fakultet Skopje

Prof.dr Aleksandar Nospal, Mašinski fakultet Skopje

dr Igor Krčmar, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Prof.dr Rade Biočanin, Univerzitet Aperiion Banja Luka

dr Tatjana Luppova, Rusija

dr. D. Seibt, Vattenfall - Nemačka

Prof.dr Nikolaj Ostrovski, Ukrajina

Mihail Cvetkov, Silovije mašini, Rusija

Prof. Daniela Marasova, CSc. Technical university of Kosice Faculty of Mining, Ecology

Prof.dr Dejan Filipović, dekan Geografskog fakulteta

Prof.dr Jeroslav Živanić, dekan Tehničkog fakulteta u Čačku

Prof.dr Slobodan Vukosavić, Elektrotehnički fakultet Beograd

Prof.dr Milan Medarević, dekan Šumarskog fakulteta u Beogradu

Dr Radoslav Raković, Energoprojekt-Entel a.d.

Prof.dr Mirko Komatina, Mašinski fakultet u Beogradu

Ljubo Mačić, Predsednik Agencije za energetiku Srbije

Prof. dr Gordana Dražić, dekan Fakulteta za primenjenu ekologiju - Futura

Prof.dr Ozren Očić, Faculty of International Engineering Management

dr Tomislav Simović, član UO SE

Dr Miodrag Arsić, IMS Beograd

Prof.dr Željko Despotović, IMP

dr Miroslav N.Malobabić, izvršni direktor JP Srbijagas

Prof.dr Nenad Đajić, glavni i odgovorni urednik časopisa ENERGIJA

Prof.dr Vladimir Živanović, Savez energetičara

Dušan Canović, Nebojša Jovičić, Milan Popović, Mladen Josijević,
Nikola Rakić, Nebojša Jurišević, Milun Babić
Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

UDC:628.472.004 (497.11)

Istraživanje tehno-ekonomskih preduslova, mogućnosti i opravdanosti za iskorišćenje deponijskog gasa sa deponije komunalnog otpada u Kragujevcu

REZIME

Cilj ovog rada je da na osnovu rezultata istraživanja sprovedenih u radu, u što većoj meri, dokaže da je korišćenje deponijskog gasa u energetske svrhe najprihvatljivije rešenje za kompleksnu problematiku deponije u Kragujevcu. Gradska deponija je najveći ekološki problem ali istovremeno i izuzetno značajan a neiskorišćen energetske resurs grada, koji se ogleda u visokoj koncentraciji metana u telu deponije. Rad je baziran na ideji da se postrojenjem za iskorišćenje deponijskog gasa, sa gasnim motorom kao osnovnom komponentom, istovremeno ostvari proizvodnja električne energije i reši štetan ekološki uticaj deponije. Korišćenjem softvera za analizu projekata čiste energije "Retscreen", procenjena je produkcija deponijskog gasa u telu deponije i predložena optimalna radna strategija idejnog postrojenja. Nakon toga je izvršena tehno-ekonomska analiza postrojenja koje bi u potpunosti odgovaralo procenjenoj produkciji deponijskog gasa. Na osnovu dobijenih rezultata došlo se do zaključka da bi korišćenje deponijskog gasa za proizvodnju električne energije uz znatne energetske i ekonomske dobiti sa sobom donelo i dragocenu ekološku korist kako za grad Kragujevac tako i za ceo Šumadijski region.

Ključne reči: deponija, deponijski gas, gasni motor, kogeneracija;

SUMMARY

The main goal of this paper was to verify that utilization of the landfill gas for energy requirements is optimal solution for complex technical and environmental issues of Kragujevac landfill. The city landfill represents major ecological problem and one of most important unemployed energy resources referring to methane capacity of the landfill body. Proposed solution was to utilize available methane potential of landfill body for combined heat and electricity production using energy facility with reciprocating engine. By using "RETScreen" software for analyzing clean energy projects, production of landfill gas in the body of landfill is estimated and the optimum operating strategy of conceptual installation is suggested. Afterwards the techno-economic analysis of the plant is done. Plant would fully correspond to the estimated production of landfill gas. Based on these results it was concluded that the use of landfill gas for producing of electricity with considerable energy and economic benefits would bring valuable environmental benefit to the city of Kragujevac and the entire region of Šumadija.

Key words: landfill, landfill gas, gas engine, cogeneration;

1. UVOD

Zbog sve većih količina i štetnosti po okolinu, otpad se smatra jednim od najznačajnijih ekoloških problema savremenog sveta. Istovremeno, potrebe za što većim količinama energije i smanjenje zaliha fosilnih izvora energije postaju svakodnevni-

ca, pa su energetske krize sve češća pojava u svetu. Takođe, poslednjih decenija društvo je postalo svesno svog neracionalnog trošenja prirodnih resursa i negativnih uticaja emisije štetnih gasova koji uvećavaju efekat staklene bašte. Rešenje se vidi u većem korišćenju novih i obnovljivih izvora energije, u koje spada i korišćenje otpada kao energenta. Upotreba ot-

pada u energetske svrhe garancija je za istovremenu energetska, ekološka i ekonomsku dobit. Upravo je ova činjenica izvanredna prilika za Srbiju da kao zemlja u tranziciji i razvoju reši više državnih strateških ciljeva.

Naime, Srbija je potpisala "Memorandum o integraciji u energetska tržišta EU", i na taj način prihvatila obavezu da sledi politiku i programe EU [1]. Da bi se to ostvarilo, neophodno je podsticanje proizvodnje električne energije iz otpada, odnosno da se definisanjem nacionalne strategije podrži ulaganje u ovu oblast. Pored ove već jasno definisane državne obaveze, cilj je da se proširi proizvodnja električne energije korišćenjem vlastitih materijalnih resursa, smanji zavisnost od uvoza i poveća zapošljavanje stanovništva, pa je sasvim jasno da korišćenje otpada u energetske svrhe može biti od izuzetnog značaja.

Da Srbija razmišlja u ovom pravcu svedoče i brojne studije čiji je predmet istraživanja fokusiran na upravljanje otpadom i korišćenje otpada kao energenta sa posebnim osvrtom na smanjenje emisije gasova štetnih po atmosferu. Rezultati studija predočavaju da je, u ovom trenutku od svih raspoloživih tehnologija, za Srbiju najpovoljnije korišćenje deponijskog gasa [1]. U prilog ovoj tvrdnji idu i činjenice da su deponije najveći antropogeni izvori metana, gde je oko 40% ukupnih emisija metana poreklom sa deponija [1] i da je u Srbiji deponovanje gotovo jedini vid tretiranja otpada, koje se vrši na oko 200 zvanično registrovanih i oko 4.500 divljih deponija, koje nažalost, u najvećem broju slučajeva nisu adekvatno rešenje već postojećeg problema [2].

Razvoj postrojenja za iskorišćavanje deponijskog gasa počeo je još 1975. godine u Kaliforniji [1]. Ubrzo nakon toga, počeo je razvoj u Evropi. Danas je u Evropi sakupljanje deponijskog gasa obavezno, po direktivi o deponijama 99/31/EC, pa je tako deponijski gas svrstan u kategoriju obnovljivih izvora energije od izuzetnog značaja, iz razloga što se njegovim korišćenjem dopunski rešava i problem negativnih efekata sa deponija. S toga i ne čudi činjenica da je najveći broj postrojenja za iskorišćavanje deponijskog gasa instaliran upravo u Evropi (tabela 1).

Postrojenja za iskorišćavanje deponijskog gasa predstavljaju najjeftiniju tehnologiju, ne zahtevaju mnogo vremena za svoju izgradnju i visoko kvalifiko-

vano osoblje, pa je potpuno jasno da bi implementacija jednog ovakvog postrojenja mogla da predstavlja brz i adekvatan odgovor na problem koji postoji u Kragujevcu. Upravo se u tome i ogleda doprinos ovog rada, koji konkretnim rezultatima istraživanja dokazuje da bi izgradnja postrojenja ovakvog tipa bila potpuno opravdana a njegovo funkcionisanje ekonomski isplativo. Takođe, uz navedene dobiti omogućilo bi se i otvaranje novih radnih mesta i izuzetno značajna redukcija štetnog ekološkog uticaja deponije.

2. PROBLEM UPRAVLJANJA OTPADOM U KRAGUJEVCU

Danas, preventivno razmišljanje o smanjenju produkcije otpada nije dovoljno, s obzirom da su iza nas već nagomilane znatne zalihe otpada. Iz tog razloga postavlja se pitanje, šta preduzeti kako bi se postojeće zalihe otpada pravilno istretirale, smanjio njihov štetan uticaj na životnu sredinu i iz njih izvukla što veća energetska odnosno ekonomska dobit.

Količina otpada po stanovniku dnevno, po opštinama u Srbiji kreće se od 0,28 kg u Topoli do 1,53 kg u Beogradu, što govori da otpada ima znatno više što je grad razvijeniji [2]. U Kragujevcu ona iznosi 0,79 kg po stanovniku dnevno [2]. Analogno tome, na nivou celog grada dnevno se sakupi preko 150 tona odnosno u toku jedne godine preko 55.000 tona otpada [3]. Sav taj otpad deponuje se na gradsku deponiju koja nema karakteristike sanitarne deponije a u funkciji je skoro 50 godina. Takođe, deponija je na svega par kilometara od centra grada, blizu prekoračenja projektovanih kapaciteta i izuzetno je bogata metanom (na dubini od 14 metara koncentracija metana iznosi od 60 do 67 % [4]) i kao takva predstavljala pravu „ekološka bombu“ u srcu Šumadije. Kako je poznato, da je metan više od 20 puta štetniji po klimu i ozonski omotač nego ugljendioksid, što praktično znači da 1 tona metana oštećuje ozonski omotač kao 21 tona ugljen dioksida [5] i da je uz to veoma eksplozivan gas (kada je prisutan u vazduhu sa koncentracijom od 5-15% [6]), sasvim je razumljiva briga o potrazi za što adekvatnijim odgovorom na alarmantno stanje u gradu. Bitno je napomenuti i da je toplotna moć deponijskog gasa oko 16 MJ/Nm³ [7] i da je pogodan za proizvodnju električne energije u gasnim motorima [7]. Ova činjenica uz vest koja je tokom 2010. godine ulila nadu Kragujevcanima da bi njihov grad mogao da bude prvi grad u Srbiji koji koristi deponijski gas u energetske svrhe [8], doprinose na značaju istraživanjima sprovedenim u radu.

3. METODOLOGIJA REŠAVANJA PROBLEMA DEPONIJE U KG-U

U ovom odeljku rada, predstavljena je metodologija rešavanja problema deponije u Kragujevcu koja vodi ka idejnom rešenju postrojenja za proizvodnju električne energije iz deponijskog gasa.

Tabela 1. - Postrojenja za iskorišćenje deponijskog gasa u Svetu, 2008 [1]

Continents	Number of plants	Power plants[MW]
Evropa	734	1275
SAD	354	2378
Azija	19	72
Australija	18	76
Kanada	15	106
Južna Amerika	8	18
Afrika	4	4

3.1 Revizija stanja i tehnički opis deponije

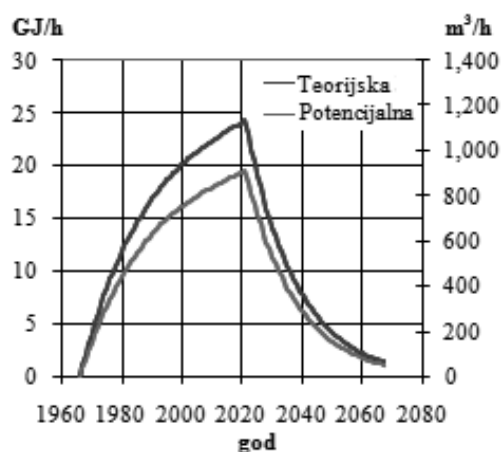
Revizija stanja gradske deponije prvi je od koraka u rešavanju problema deponije u Kragujevcu. Ona je veoma bitna jer pouzdane informacije o stanju na deponiji predstavljaju osnovu za uspešno pronalaženje adekvatnog rešenja. Gradska deponija u Kragujevcu otvorena je 1966. godine [9], a danas predstavlja najveći ekološki problem grada. Udaljenost deponije od naselja je 1,2 km, od centra grada oko 3 km, dok je udaljenost od magistralnog puta oko 1,5 km [9]. Na severnoj strani, deponija se prostire duž reke Uglješnice. Na deponiji se svakodnevno vrši kontrola količine otpada koji se odlaže (kolskom vagom) i prekrivanje otpada inertnim materijalom (zemlja, šut). Površina deponije je 15 ha, dok je pod otpadom 14,8 ha. Visina sloja otpada prelazi 15 m, čime je prekoračena i projektovana kota (178 mnv) [9]. Usled dugogodišnjeg odlaganja otpada na deponiju bez sabijanja dolazi do velikog sleganja otpada (10-50%) [9]. Do ulaza u deponiju, gde je smešten plato sa upravnim objektom, vodi asfaltirana gradska saobraćajnica, čime su obezbeđene komunalna i saobraćajna infrastruktura. Ovo može biti značajna prednost u pogledu smanjenja početnih ulaganja pri izgradnji postrojenja za energestko iskorišćenje deponijskog gasa. Unutrašnja mreža puteva sastoji se od glavne saobraćajnice koja vodi do gornjeg platoa ili radnog čela na kome je veliki manipulativni prostor, kako bi kamioni mogli da se okreću (to je ujedno i dodatni način sabijanja [9]). Sa gornjeg platoa vodi 5 internih sekundarnih saobraćajnica u različitim pravcima (bivši pravci odlaganja otpada [9]), koji se potencijalno mogu koristiti u slučaju požara.

Mehanizacija kojom se raspolaže na deponiji je nedovoljna i neispravna, tj. nepouzdana (povremeno radi, povremeno ne) [10]. Početkom 2006. godine u telo deponije ugrađeno je 17 gasnih sonde za otplinjavanje [9]. Danas je u funkciji samo 4 (zbog fermentacije smeća ugrađene metalne cevi su istrulile, trebalo je da budu postavljene PVC cevi [10]). Obzirom da deponija nema još mnogo kapaciteta za prihvatanje otpada, predviđa se da će funkcionisati još maksimalno par godina.

3.2 Procena produkcije deponijskog gasa u telu deponije

Procena produkcije deponijskog gasa deponije predstavlja veoma bitan korak s obzirom da u znatnoj meri utiče na izbor karakteristika postrojenja. Za deponiju u Kragujevcu, procena produkcije deponijskog gasa izvršena je korišćenjem softvera „Retscreen“, koji na osnovu tehničkih informacija o deponiji, kao rezultat, daje grafik sa krivama koje pokazuju trend promene brzine produkcije deponijskog gasa kroz vreme.

Sa *grafika 1* se može očitati vrednost produkcije deponijskog gasa izražena u protoku deponijskog gasa u m³/h (desna strana grafika) i u protoku energije iz



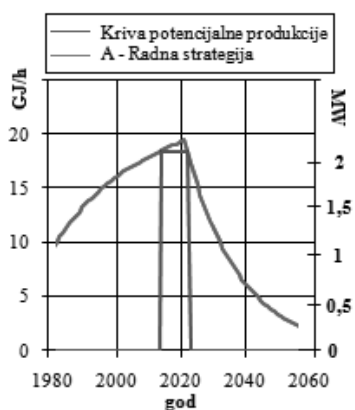
Grafik 1. - Trend promene brzine produkcije deponijskog gasa, deponija Kragujevac

deponijskog gasa u GJ/h (leva strana grafika). Takođe, na grafiku su uočljive dve krive, plava i crvena. Plava, tzv. kriva teorijske produkcije deponijskog gasa, pokazuje promenu brzine produkcije deponijskog u telu deponije. Međutim, kolika će produkcija deponijskog gasa iz tela deponije zaista biti na raspolaganju za proizvodnju električne energije, pokazuje nam crvena kriva tzv. kriva potencijalne produkcije deponijskog gasa. Naime, potencijalna produkcija deponijskog gasa zavisi od stepena efikasnosti sistema za sakupljanje deponijskog gasa. Prema USEPA (United States Environment Protection Agency) efikasnost sistema kreće se u opsegu od 50-90%, a najčešće, uz primenu dobre tehnologije, 75-85% [11]. Prilikom određivanja potencijalne produkcije deponijskog gasa deponije u Kragujevcu uzeta je vrednost od 80% i na osnovu toga dobijena je crvena kriva.

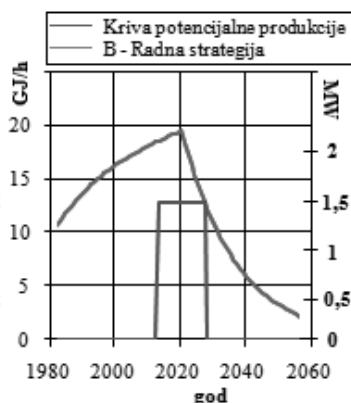
Za slučaj deponije u Kragujevcu pretpostavljeno je da će deponija biti u funkciji 54 godine tj. do 2020. godine. Krive pokazuju da produkcija deponijskog gasa svoj maksimum dostiže dve godina nakon zatvaranja deponije. Kriva teorijske produkcije deponijskog gasa (plava) svoj maksimum dostiže u tački gde produkcija deponijskog gasa iznosi oko 1.100 m³/h ili izraženo preko protoka energije iz deponijskog gasa oko 24 GJ/h. Sa druge strane, kriva potencijalne produkcije deponijskog gasa (crvena - uzima u obzir efikasnost sakupljanja) svoj maksimum dostiže u tački gde produkcija deponijskog gasa iznosi oko 950 m³/h ili izraženo preko protoka energije iz deponijskog gasa oko 19 GJ/h. Važno je istaći da je ova kriva reprezentativna pri odabiru karakteristika postrojenja.

3.3 Optimizacija radne strategije

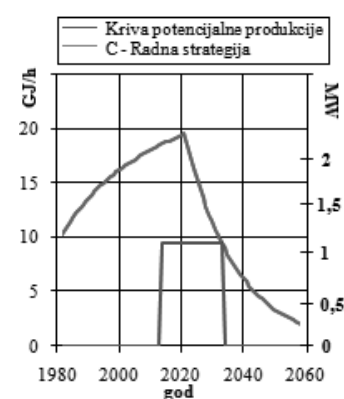
Pre samog predloga najadekvatnijeg idejnog rešenja postrojenja i vršenja njegove tehnno-ekonomske analize veoma je važno predvideti najbolju radnu strategiju osnovne komponente postrojenja, gasnog motora. Radna strategija na grafiku je predstavljena kroz zavisnost snage i radnog veka gasnog motora, koja je određena krivom potencijalne produkcije



Grafik 2. - Radna strategija – A



Grafik 3. - Radna strategija – B



Grafik 4. - Radna strategija – C

deponijskog gasa. Dakle, kako je radna strategija ograničena krivom potencijalne produkcije deponijskog gasa, u okvirima te krive se vrši izbor i optimizacija odgovarajuće radne strategije, zavisno od zahteva potencijalnog vlasnika postrojenja. Izborom odgovarajuće radne strategije određuje se vremenski period rada gasnog motora određene snage ili obrnuto. Na narednim graficima, koje prati *tabela 2.*, prikazano je nekoliko karakterističnih radnih strategija (A, B i C) koje su optimizovane za različite zahteve potencijalnog vlasnika postrojenja. Izbor i optimizacija radne strategije izvršeni su pomoću softvera “Retscreen”, koji radnu strategiju prikazuje uz uslov da gasni motor konstantno radi punim kapacitetom. Kako je tipična vrednost minimalnog kapaciteta gasnih motora 25% [12], njihov radni vek bi u praksi bio nešto duži od radnog veka koji nam računa i prikazuje softver, ali bi u tom periodu rada i stepen efikasnosti gasnog motora konstantno opadao. Za svaku od predstavljenih radnih strategija važi da bi postrojenje počelo sa radom tokom 2014. godine.

Na *grafiku 2* prikazana je A radna strategija. Ona predstavlja radnu strategiju koja je optimizovana za potencijalnog vlasnika koji bi zahtevao da mu period otplate postrojenja bude najkraći mogući. Grafik radne strategije A pokazuje da bi se odgovor na ovaj zahtev dobio tako što bi se tražila maksimalna snaga gasnog motora odmah po izgradnji postrojenja. Sa grafika se vidi da ta snaga može dostići vrednost oko 2,1 MW i da gasni motor u takvom režimu rada može da radi oko 9 godina. Period otplate celog postrojenja uz ovakvu radnu strategiju iznosio bi oko 3,4 godine uz početne investicione troškove oko 4 miliona evra. Postrojenje bi za svoj radni vek proizvelo 161.000 MWh električne energije.

Tabela 2. - Osnovne karakteristike radnih strategija A, B i C

Radna strategija	A	B	C
Snaga [MW]	2,1	1,5	1,1
Radni vek [god.]	9	15	20
Period otplate [god.]	3,4	4,4	6,1
Početna investicija [milijon €]	4	3,2	2,8
Energetska dobit [GWh]	161	125	185

Zatim, na *grafiku 3* prikazana je radna strategija B. Ova radna strategija optimizovana je za zahtev vlasnika u pogledu vrednosti snage gasnog motora. Kao primer, na *grafiku 2*, predstavljena je radna strategija u kojoj bi zahtev potencijalnog vlasnika bio da snaga gasnog motora iznosi 1,5MW. Grafik pokazuje da bi gasni motor snage od 1,5MW mogao da radi 15 godina punim kapacitetom. U ovom slučaju period otplate celog postrojenja iznosio bi oko 4,4 godina, uz početne investicione troškove od oko 3,2 miliona evra. Postrojenje bi za svoj radni vek proizvelo 125.000 MWh električne energije.

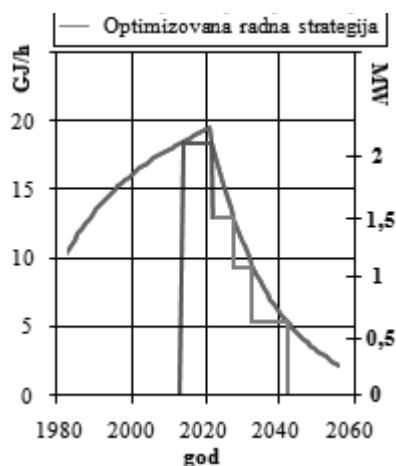
Grafik 4 prikazuje radnu strategiju C. Ova radna strategija optimizovana je za korisnika koji bi svoj zahtev usmerio u pogledu rednog veka postrojenja. Kao primer, na *grafiku 3*, predstavljena je radna strategija u kojoj bi zahtev potencijalnog vlasnika bio da postrojenje radi 20 godina. Grafik nam pokazuje da bi u tom slučaju maksimalna snaga gasnog motora iznosila oko 1,1 MW. Ovo postrojenje bi za svoj radni vek proizvelo 185.000 MWh električne energije, a za njega bi bilo potrebno izdvojiti investiciju od oko 2,8 miliona evra. Nasuprot najvećoj količini proizvedene električne energije, u poređenju sa postrojenjima iz predhodne dve radne strategije (A i B), stoji duži period otplate od oko 6,1 godina.

Važno je definisati da bi idealna radna strategija zapravo bila kombinacija beskonačno mnogo različitih radnih strategija odnosno kombinacija beskonačno mnogo gasnih motora različitih snaga koje bi se postepeno smanjivale i pratile krivu potencijalne produkcije deponijskog gasa. Međutim, iako nije moguće ostvariti idealnu radnu strategiju i iskoristiti svu raspoloživu snagu deponijskog gasa, vodeći se činjenicom da proizvođači u svojim ponudama nude gasne motore sastavljene od jedinica različitih snaga, moguće je njihovom primenom uz pravilnu optimizaciju dobiti takvu radnu strategiju koja bi odgovarajućom kombinacijom snaga jedinica gasnog motora istovremeno zadovoljila više zahteva potencijalnog vlasnika. U tom slučaju važno je napomenuti da se ukupna snaga gasnog motora dobija sabiranjem snaga jedinica gasnog

motora i da sa smanjenjem snage raste cena jedinice gasnog motora po instalisanom kW.

Uzimajući sve ovo u obzir, za slučaj deponije u Kragujevcu, na grafiku 4 predložena je optimalna radna strategija. Ona u praksi predstavlja realizaciju postrojenja sa gasnim motorom sastavljenim od tri jedinice. Dve jedinice snage od 0,5MW i jedne jedinice snage od 1,1MW.

Grafik 5 uz koga ide i tabela 3, pokazuju da bi optimalna radna strategija, bazirana na kombinaciji tri jedinice gasnog motora, povećala početne investicije a samim tim i period otplate (poređenje sa A - radnom strategijom). Međutim, prednosti ove strategije ogledaju se u njenoj fleksibilnosti koja se odražava na radni vek postrojenja koji se produžuje i ukupnu energetska dobit koja je u poređenju sa ostalim prikazanim strategijama (A, B i C) znatno veća. Kako produkcija deponijskog gasa vremenom postepeno opada, sa grafika se vidi, da bi primenom optimalne radne strategije rad postrojenja bio podeljen na četiri radne faze.



Grafik 5. - Optimalna radna strategija

U prvoj fazi, postrojenje bi radilo oko 9 godina sa kapacitetom od 2,1MW odnosno u funkciji bi bile sve tri jedinice gasnog motora.

Nakon toga, u drugoj fazi predviđen je rad postrojenja sa dve jedinice gasnog motora čija bi ukupna snaga iznosila oko 1,6 MW odnosno u funkciji bi bila po jedna jedinica snage 1,1 MW i 0,5 MW. Ovim kapacitetom postrojenje bi radilo još 5 godina.

Zatim, u trećoj fazi postrojenje bi prešlo u rad sa jednom jedinicom gasnog motora snage 1,1 MW gde bi postrojenje sa ovim kapacitetom radilo još 6 godina.

Tabela 3. - Osnovne karakteristike optimalne radne strategije

Radna strategija	Optimized
Snaga [MW]	2,1
Radni vek [god.]	33
Početna investicija [milion €]	4,4
Period otplate [god.]	3,8
Energetska dobit [GWh]	315

I za kraj, predviđena je četvrta faza u kojoj bi postrojenje u narednih 13 godina radilo sa jednom jedinicom gasnog motora, snage 0,5MW. Ovom fazom završio bi se radni vek postrojenja.

Postrojenje bi sa svojim ukupnim radnim vekom od 30 godina uz predstavljenu radnu strategiju proizvelo oko 315.000 MWh električne energije. Za njegovu izgradnju bilo bi neophodno izdvojiti oko 4,4 miliona evra uz period otplate od 3,8 godine. Detaljnija analiza ovakvog tipa postrojenja predstoji u nastavku rada.

Važno je još napomenuti, da s obzirom na činjenicu da su jedinice gasnog motora mobilne tj. prenosive, četvrta faza može ali nemora biti realizovana. Naime, kako je u drugoj fazi van pogona jedna jedinica gasnog motora snage 0,5 MW, pa u trećoj fazi obe jedinice gasnog motora snaga 0,5 MW, kao alternativna opcija predviđeno je njihovo premeštanje na novu Kragujevačku deponiju, takođe, u svrhu korišćenja deponijskog gasa za proizvodnju električne energije. "Lokalnim planom upravljanja otpadom grada Kragujevca" predviđa se skorije otvaranje nove deponije, koja bi mogla da predstavlja novi energetska izvor, pa bi se u tom slučaju sprovela računica isplativosti, koja bi odredila budućnost odnosno eventualno premeštanje jedinica gasnih motora snaga 0,5 MW. Za kraj radnog veka u svakom slučaju predviđeno je premeštanje svih gasnih jedinica na novu deponiju.

4. REZULTATI I DISKUSIJA TEHNO-EKONOMSKE ANALIZE

Rezultati koji su predstavljeni u ovom odeljku rada takođe su dobijeni korišćenjem softvera „Retscreen”.

U tehničko-tehnološkom pogledu idejno postrojenje je zamišljeno kao većina postrojenja za iskorišćenje deponijskog gasa. U njegov sastav ulaze dva sistema:

- 1) sistem za ekstrakciju deponijskog gasa,
- 2) sistem za iskorišćenje deponijskog gasa.

Sistem za ekstrakciju, takođe, je sastavljen od dva sistema:

- a) sistem za sakupljanje deponijskog gasa,
- b) sistem za evakuaciju deponijskog gasa.

Za slučaj deponije u Kragujevcu, predviđeno je idejno postrojenje sa aktivnim sistemom za ekstrakciju deponijskog gasa, što podrazumeva prinudno izvlačenje (ispumpavanje) gasa. U okviru ovog sistema predviđeno je da sistem za sakupljanje deponijskog gasa bude izveden sa oko 60 vertikalnih gasnih sondi. Svaka gasna sonda postavlja se u predhodno izbušeni bunar (bušotinu). Bunari se buše po celom telu deponije do oko 90% dubine deponije i ravnomerno se raspoređuju. Gasna sonda se sastoji od betonske perforirane cevi napunjene peskom, kroz čiju sredinu prolazu plastična perforirana cev za izvlačenje gasa, čiji je prečnik obično oko 100 mm. Takođe, u okviru sistema za ekstrakciju predviđeno je da se sistem za evakuaciju deponijskog gasa izvede pomoću vakuum-

Tabela 4. - Prosečni investicioni troškovi karakterističnih sistema postrojenja [1]

Sistem	Cena [€/kW _e]
za sakupljanje	150 - 400
za evakuaciju	150 - 300
za iskorišćenje	750 - 1150

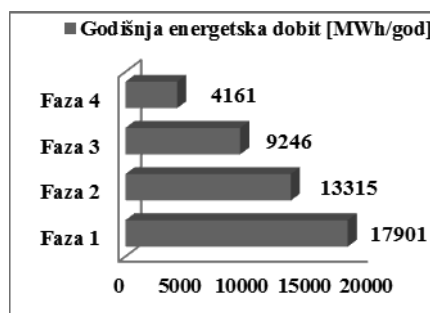
skih pumpi. U sastav ovog sistema ulazu još oprema za kontrolu i upravljanje, kao i cevi koje povezuju sve gasne sonde sa sabirnom sondom u koju se smešta sakupljen deponijski gas.

Deponijski gas koji se sakupi transportuje se gasnim cevovodnom do sistema za iskorišćenje deponijskog gasa odnosno do gasnog motora. Ideja je da se ovaj deo postrojenja smesti na postojeći prijemni plato na ulazu u deponiju. Kako je do ovog platoa dovedena komunalna infrastruktura plan je da se uz ovo postrojenje izgradi i trafo-stanica kojom bi se ostvario odgovarajući priključak na nacionalnu elekro-distributivnu mrežu. Nivo početnih investicija uglavnom zavisi od količine generisane energije, pa se i formiranje cena upravo vrši po instalisanom kW_e (elektro-snage postrojenja) (tabela 4).

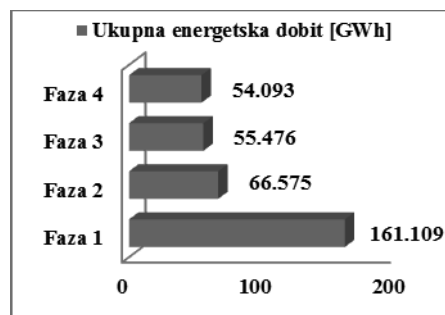
Funkcionisanje postrojenje u Kragujevcu zasni-va se na ideji da se proizvedena električna energija prodaje nacionalnoj elekro-distributivnoj kompaniji. Uredbom Vlade Republike Srbije „O merama podsticaja proizvodnje električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije“, definisana je subvencionisana otkupna cena električne energije proizvedene iz otpada u iznosu od 85 €/MWh [14].

Radnom strategijom je predviđeno da gasni motor bude ukupne snage 2,1 MW izveden sa tri jedinice od kojih jedna snage 1,1 MW i dve od po 0,5 MW. Projektovani radni vek je 33 godina, i sprovodi se kroz četiri faze. Postrojenje bi na godišnjem nivou radilo 95% vremena. Svaku od faza karakteriše rad postrojenja određenom snagom određeni vremenski period, pa samim tim i svaka faza donosi određene energetske, finansijske i ekološke dobiti.

Na grafiku 6 je prikazana godišnja energetska dobit svake od faza. On pokazuje da je proizvodnja električne energije na godišnjem nivou najveća u prvoj fazi i da zatim u narednim fazama stepenasto opada. U toku jedne godine, faza 1 bi obezbedila proizvodnju električne enrgije u iznosu od 17.901 MWh, faza 2 u iznosu od 13.315 MWh, faza 3 u iznosu od 9.246 MWh i faza 4 iznos od 4.161 MWh. Grafik 7 uzima u obzir i predviđeni vremenski period rada svake od faza, pa prikazuje njihovu ukupnu energetska dobit. Najveću dobit, ukupno gledano, donosi faza 1 (161.109 MWh), dok ostale tri faze donose približno istu količinu električne energija koja je znatno manja nego kod prve faze. Ova približno jednaka količina ukupne proizvedene električne energije u fazama 2, 3 i 4, koja je u suprotnosti sa njihovom godišnjom količinom proizvedene električne energije (koja stepenasto opada), objašnjava se činjenicom da su faze



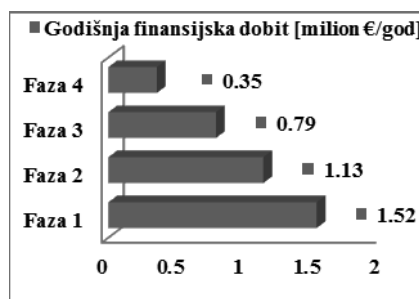
Grafik 6. - Godišnja energetska dobit po fazama radne strategije [MWh/god]



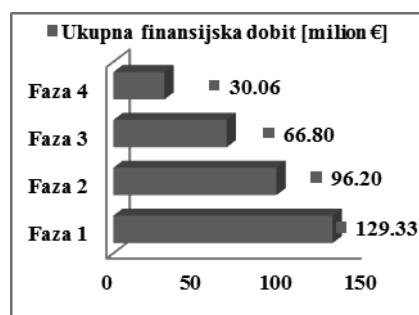
Grafik 7. - Ukupna energetska dobit po fazama radne strategije [GWh]

sa manjom godišnjom produkcijom električne energije duže aktivne. Naime, faza 2 je aktivna 5 godina, zatim faza 3 narednih 6 godina i na kraju faza 4 koja je aktivna 13 godina.

Analogno energetske dobiti (u vidu električne energije) dobijeni su i grafici finansijske dobiti, kod kojih je u obzir uzeta subvencionisana otkupna cena električne energije proizvedena iz otpada.



Grafik 8. - Godišnja finansijska dobit po fazama radne strategije [milijona €/god]



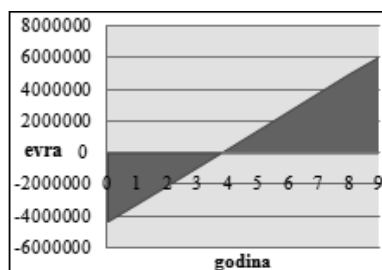
Grafik 9. - Ukupna finansijska dobit po fazama radne strategije [milijona €]

Tabela 5. - Početni investicioni troškovi

Vrsta troškova	Cena troškova [€]
Projektna dokumentacija	250.000
Dozvole	40.000
Transport	50.000
Inženjering	15.000
Sistem za sakupljanje	630.000
Sistem za evakuaciju	420.000
Gasni motor	2.415.000
Podstanica	50.000
Puštanje u rad	10.000
Rezervni delovi	100.000
Edukacija osoblja	20.000
Nepredviđeni	400.000
UKUPNO	4.400.000

Finansijski aspekti u najvećoj meri utiču na krajnju ocenu o isplativosti izgradnje predloženog postrojenja. Iako postrojenja za iskorišćenje deponijskog gasa predstavljaju jeftinu tehnologiju u poređenju sa ostalim dostupnim tehnologijama i za izgradnju jednog ovakvog postrojenja potrebne su značajne početne investicije. U cilju određivanja visine početne investicije korišćena je tabela 4 sa vrednostima početnih investicionih troškova svakog od sistema postrojenja. Usvojeno je da je cena sistema za sakupljanje 300 €/kWe, zatim cena sistema za evakuaciju 200 €/kWe i cena sistema za iskorišćenje (gasni motor) 1150 €/kWe. Za gasni motor usvojena je najviša cena iz razloga što je izveden iz više jedinica. Početni troškovi izgradnje postrojenja za iskorišćenje deponijskog gasa prikazani su u narednoj tabeli, gde se vidi da najviše sredstava odlazi na sistem za iskorišćenje odnosno proizvodnju električne energije (gasni motor).

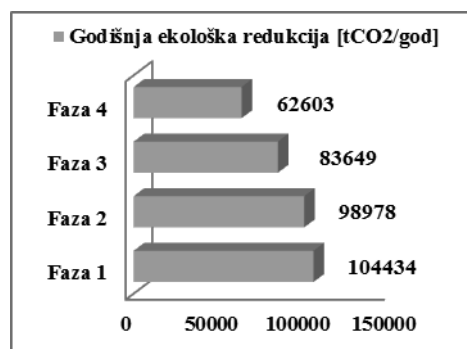
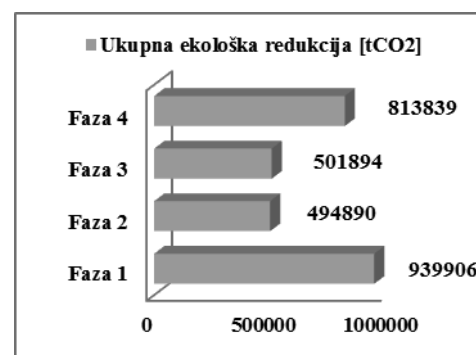
Pored investicionih troškova na krajnju ocenu o isplativosti izgradnje predloženog postrojenja utiču i troškovi neophodni za normalno funkcionisanje postrojenja. Ovi troškovi na godišnjem nivou iznose 250.000 €. Uz ove troškove potrebno je predvideti i



Grafik 10. - Period otplate postrojenja

Tabela 6. - Godišnje i ukupne uštede

Ušteda	Godišnja [tCO ₂ /god]	Ukupna[hiljada tCO ₂]
Faza 1	104.434	934 (za 9 god.)
Faza 2	98.978	495 (za 5 god.)
Faza 3	83.649	502 (za 6 god.)
Faza 4	62.603	814 (za 13 god.)

Grafik 11. - Godišnja ekološka ušteda po fazama radne strategije [tCO₂/god]Grafik 12. - Ukupna ekološka ušteda po fazama radne strategije [tCO₂]

troškove na kraju radnog veka postrojenja. Ovi troškovi namenjeni su u svrhu zatvaranja odnosno rekultivacije deponije i premeštanja sistema za iskorišćavanje na novu deponiju, u iznosu od 50.000 €.

Kao konkretan dokaz, kojim se opravdava ulaganje za izgradnju predloženog postrojenja, prikazan je grafik perioda otplate. Pri izračunavanju perioda otplate uračunat je porez na dobit budućem vlasniku postrojenja u iznosu od od 10%.

Period otplate od oko 3,8 godina je svakako odličan argument koji ide u prilog tvrdnji da je ovo postrojenje i tek kako isplativa investicija. Međutim, daleko od toga da samo finansijski aspekti potvrđuju značaj ovakvog poduhvata. Naime, u ekološkom pogledu, postrojenje u Kragujevcu donelo bi dragocene uštede u emisijama štetnih gasova (metana) u atmosferu čime bi se i definitivno zaključilo da bi realizacija izgradnje jednog ovakvog postrojenja bilo najprihvatljivije rešenje za problem deponije u Kragujevcu. Ako u obzir uzmemo već pomenutu činjenicu da deponije predstavljaju najveće antropogene izvore metana, gde je oko 40% ukupnih emisija metana poreklom sa deponija [1], ideja ovakvog rešavanja problema samo

Tabela 7. - Godišnja ušteda - ekvivalent

Faza 1	19.127	9.605	36.012
Faza 2	18.128	9.103	34.130
Faza 3	15.320	7.694	28.844
Faza 4	11.466	5.758	21.587

X - Ušteda emisije prikazana kroz broj automobila i lakih kamiona koji bi se eliminisao iz saobraćaja
 Y - Ušteda emisije izražena kroz površinu novih šuma (ha) koje asporbuju C
 Z - Ušteda emisije izražena kroz tone recikliranog otpada

dobija na značaju. U nastavku rada predstavljena je tabela ekoloških ušteda emisije metana u atmosferu svake od faza izražena kroz uštedu u ekvivalentnim tonama CO₂. Uz ovu tabelu prikazani su grafici sa uštedama na godišnjem nivou i ukupne uštede odnosno uštede u toku celokupnog radnog veka svake faze.

U pogledu ekološke uštede na godišnjem nivou dominira faza 1. U svakoj narednoj fazi ušteda stepenasto opada. Međutim, što se tiče ukupne ekološke uštede, primat su zauzele faza 1 i 4. Ovakva raspodela ukupnih ušteda nastaje iz razloga što su faza 1 i 4 duži vremenski period aktivne u poređenju sa fazama 2 i 3. Kao dodatak priložena je i tabela 6. U njoj su kroz zanimljiva ekvivalentna poređenja prikazane ostvarene godišnje uštede.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu razmatranja iznetih rezultata evidentno je da ovakav poduhvat sa sobom nosi mnogobojne koristi. Osim što je ideja izgradnje postrojenja za iskorišćenje deponijskog gasa za proizvodnju električne energije potpuno opravdana i ekonomski održiva, nedvosmisleno se može zaključiti da bi realizacija ovakvog poduhvata predstavljala siguran i neizbežan put kojim bi se ekološki problem deponije u Kragujevcu pretvorio u značajan energetske resurs grada.

Napomena:

Rad nastao kao rezultat istraživanja na projektu III 42013 -ISTRAŽIVANJE KOGENERACIONIH POTENCIJALA U KOMUNALNIM I INDUSTRIJSKIM ENEREGANAMA REPUBLIKE SRBIJE I MOGUĆNOSTI ZA REVITALIZACIJU POSTOJEĆIH I GRADNJU NOVIH KOGENERACIONIH POSTROJENJA, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

LITERATURA:

[1] Vujić G., i dr., „Studija mogućnosti korišćenja komunalnog otpada u energetske svrhe na teritoriji AP Vojvodine i Republike Srbije“, studija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008

[2] Đurđević J., Rajković D., Đorđević S., „Upravljanje otpadom u Srbiji kroz akciju „Očistimo Srbiju“, Nacionalna konferencija o kvalitetu života, Kragujevac, 2011

[3] Veljković V., Jovičić N., Babić M., „Kvantitativna i kvalitativna analiza komunalnog otpada u gradu

Kragujevcu, Izveštaj sa projekta Ekološki sistem Grada Kragujevca, Fakultet inženjerskih nauka Kragujevac, 2007

[4] “Baze podataka o merenjima koncentracije metana u telu deponije”, Arhiva, JKP “Čistoća”, Kragujevac, 2010

[5] Ugrinov D., i dr., “Mogućnosti eksploatacije deponijskog gasa i biogasa kao obnovljivog izvora energije u Srbije”, Zaštita materijala 53 - broj 4, Beograd, 2012

[6] Jovičić N., “Upravljanje čvrstim otpadom”, skripta sa materijalom za kurs - Tehnologije i oprema za deponovanje otpada, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2005

[7] Vujić G., “Upravljanje čvrstim otpadom”, skripta iz predmeta - Upravljanje čvrstim otpadom, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009

[8] Medijska kompanija B92, internet portal: B92.net, Naslov članka: “Preko deponijskog gasa do struje”, Beograd 2010, link članka:“http://www.b92.net/info/vesti/index.php?yyyy=2010&mm=01&dd=30&nav_category=12&nav_id=407652#”

[9] Plansko tehnička dokumentacija Lokalni plan upravljanja otpadom grada Kragujevca, Knjiga 1 - „Lokalni plan upravljanja otpadom grada Kragujevca“, Kragujevac, 2012. godine

[10] “Privatni intervju sa stručnim konsultantima JKP “Čistoća” Kragujevac - Služba deponije”, Kragujevac, 2012

[11] U.S. EPA., Volume 1, Chapter 2, Section 2.4: “Municipal Solid Waste Landfills”, In AP42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Fifth Edition, 1998

[12] RETScreen® Software Online User Manual, RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre, Catalogue no.: M39-108 /2004E-PDF

[13] Pejaković S., Živanović V., “Povećanje energetske efikasnosti toplotnih pumpi primenom gasnog motora za pogon rashladnih kompresora - primeri iz prakse”, Filter Frigo d.o.o., Beograd, Termotehnika XXXVII, 3, 2011

[14] Vlada Republike Srbije, “Uredba o merama podsticanja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije”, Beograd, 2010