

Tehno - ekonomski aspekti i mogućnost implementacije parnog kogeneracionog ciklusa na postojeća kotlovska postrojenja u energani "Energetika" Kragujevac

REZIME

U ovom radu predstavljena je sažeta tehnico-ekonomска analiza predložene kogeneracione proizvodnje i dat je osvrt na kapacitet rada kogenerativnog postrojenja tokom godine na matičnoj lokaciji preduzeća "Energetika d.o.o." Kragujevac. Izvođenje bi podrazumevalo instalaciju dva parna turboagregata na već postojeću infrastrukturu, odnosno implementaciju postrojenja na već postojeća parna kotlovska postrojenja. Istraživački tim je u okviru svog istraživanja koristio softverski paket "RETScreen", besplatni program za analizu projekata čiste energije. Analizi se pristupilo tako što su, na osnovu merenja koja su vršena u samom preduzeću, dobijeni polazni podaci prema kojima su kasnije dimenzionirane parne turbine kao i proizvodnja električne energije. Izlazni rezultati ovog softvera je period otplate čitavog postrojenja, a određuje ga tako što u obzir uzima troškove za energente osnovnog i predloženog slučaja, prihod od prodaje električne energije kao i samu kapitalnu investiciju za instaliranje turboagregata, odnosno izvođenje kogenerativnog postrojenja. Dat je i prikaz opterećenja turbina po mesecima, odnosno kada su, i u kojoj meri, parne turbine angažovane u proizvodnji. Proizvedena električna energija se delimično troši za potrebe preduzeća, a delimično prodaje nacionalnoj elektro korporaciji. Dobijeni period otplate je 4,2 godine, koji je oharbrujući i upućuje na detaljnija razmatranja o izgradnji ovakvog postrojenja.

Ključne reči: kogeneracija, parna turbina, kogenerativno postrojenje, energetska efikasnost, energana;

UVOD

Kogeneracija je postupak za istovremenu proizvodnju električne i korisne toplotne energije. Ona obuhvata čitav niz tehnologija, ali će uvek uključiti generator električne struje i toplotni sistem.

Kroz korišćenje toplotne energije, efikasnost postrojenja kogeneracije može dostići 90% ili više. Pored toga, električna struja proizvedena u kogeneracionom postrojenju obično se koristi lokalno, pa će samim tim gubici prenosa i distribucije biti zanemarljivi. Kogeneracija zato nudi uštete energije u rasponu između 15-40% kada se upoređi sa isporukom električne energije i toplotne energije iz konvencionalnih elektrana i kotlova [1].

Uprkos svim pozitivnim efektima koje kogenerativno postrojenje donosi, konačnu ocenu o tome da li je postrojenje adekvatno ili ne, moguće je dati tek nakon izvršene tehnico-ekonomске analize. Iz tog razloga pristup analizi troškova, održivosti, isplativosti i drugih stavki koje nosi tehnico-ekonomska analiza mora biti detaljan i precizan.

Prilikom vršenja analize od ključnog značaja su troškovi izgradnje postrojenja i ekonomski aspekti funkcionisanja postrojenja. Veliki uticaj na aspekte funkcionisanja postrojenja ima cena električne i toplotne energije i prognoze njenih kretanja u Srbiji, od čije bi prodaje direktno zavisila održivost i isplativost postrojenja. Sve tehničke i ekonomski aspekte kao i samo proračunavanje, istraživački tim je obradio u softverskom paketu „RETScreen“.

Karakteristike matične energane „ENERGETIKA“ Kragujevac

Glavna namena matične energane u preduzeću „Energetika“ d.o.o. Kragujevac je zadovoljavanje potreba grada za topotnom energijom. Ako se svi potrošači uzmu u obzir (tabela 1.) dobija se da preduzeće greje površinu od oko 1,5 miliona m². Osnovni podaci o topotnom konzumu i proizvodnji „Energetike d.o.o.“ prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Podaci o topotnom konzumu i proizvodnji „Energetike d.o.o.“ (ulazni podaci za softverski paket „RETSscreen“ za tzv. „osnovni slučaj“)

ULAZNI PODACI OSNOVNOG SLUČAJA		
Podaci	Vrednost	Jedinica
Površina koja se greje	1.523.131	m ²
Stepen efikasnosti postrojenja	61	%
Dostavljena topotna energija	201.897	MWh
Proizvedena topotna energija	331.546	MWh

Veoma je bitno znati da intezitet rada kotlova konstantno varira kao i da je, zavisno od vremenskih uslova, u pogonu određeni broj kotlova. Tako se javljaju situacije da je nekada u radu samo jedan kotao, nekada dva, dok u punom pogonu, pri najnižim spoljašnjim temperaturama, radi svih pet kotlova u postrojenju uz napomenu da kotao K5 ima ulogu da zadovolji vršna opterećenja. Osnovne tehničke karakteristike kotlova u matičnoj energani prikazane su u tabeli 2.

Tabela 2. Tehničke karakteristike kotlovnih postrojenja K1, K2, K3, K4 i K5 u matičnoj energani

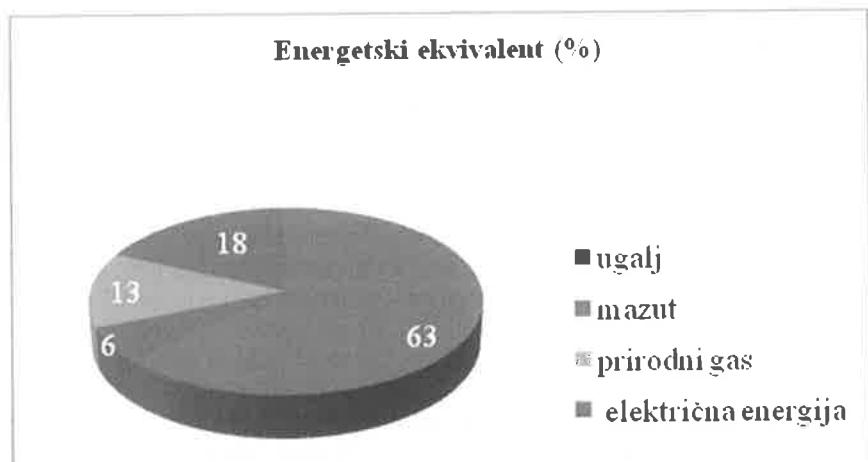
Oznaka Kotla	Pogonsko gorivo	Tip kotla	Godina proizvodnje	Topotni kapacitet [MW]	producija pare min. - nom. - max. [t/h]
K1	gas	parni	1961.	31,5	8 - 32 - 40
K2	gas		1962.	31,5	8 - 32 - 40
K3	ugalj/mazut		1970.	63	20 - 64 - 80
K4	ugalj/mazut		1971.	63	20 - 64 - 80
K5	ugalj/mazut		1980.	115	50 - 128 - 150

Po predloženom idejnom projektu za realizaciju kogenerativnog postrojenja na matičnoj lokaciji, predpostavlja se da parne turbine pogoni para proizvedena u kotlovima K1, K2, K3 i K4, dok kotao K5 nije ni povezan sa parnom turbinom i, kao što je već navedeno, služi samo za potrebe vršnog opterećenja. Naime, po podacima iz grejne sezone 2011/2012 kotao K5 je radio ukupno 82 časa [2, 3], što je zanemarljiva produkcija sa aspekta kogenerativne proizvodnje, ali veoma značajna sa aspekta peglanja vršnih opterećenja. Potrošnja svih energenata u kotlovima matične lokacije data je u tabeli 3 [4,5].

Tabela 3. Pregled potrošnje energenata (ekvivalentna energija) u kotlovima matične lokacije za period 2011/2012. godina

Energent	ugalj	Mazut	prirodni gas	električna energija	UKUPNO
Potrošnja	99.000	2.850	7.453.002	99.000	
Jedinica mere	tona (t)	tona (t)	Nm ³	MWh	
Ekvivalentna energija	GJ	1.237.500	248.000	356.400	1.956.800
	%	63	6	18	100

Nakon analiziranja podataka datih u tabeli 3., uočava (slika 1) se da je ugalj energet koji dominira u potrošnji na matičnoj lokaciji.



Slika 1. Potrošnja goriva i električne energije na matičnoj lokaciji - energetski ekvivalent

Kada je u pitanju emisija gasova staklene bašte koja nastaje sagorevanjem kotovskog goriva na matičnoj lokaciji i usled proizvodnje električne energije u elektranama EPS-a koja se za potrebe matične lokacije preuzme iz elektrodistributivne mreže i potroši, može se izračunati (tabela 4.) da iznosi 205.522 t CO₂ (za bazni slučaj uzeta je grejna sezona 2011/2012) [6,7].

Tabela 4. Emisija ugljen-dioksida

Ukupna emisija CO ₂			
Energent	Emisioni faktor	Jedinica	Emisija (t)
Ugalj	100	kg CO ₂ /GJ	123.750
Mazut	69,235	kg CO ₂ /GJ	8.093
Prirodni gas	56,1	kg CO ₂ /GJ	13.912
Električna energija	575	kg CO ₂ /MWh	57.500
			205.522

Grafički prikaza sa slike 2. daje uvid u raspodelu toplotnog i električnog konzuma po mesecima tokom bazne godine. Sa slike se vidi da u letnjim mesecima potrebe za toplotnom energijom nema, i da potrebe za električnom energijom u znatnoj meri opadaju. Na grafiku trouglasim oznakama predstavljena kriva toplotnog opterećenja (topljeni konzum), koje zavisi od spoljašnjih klimatskih uslova (temperatura, vlažnost vazduha, osunčanost, brzina vetra itd.) i gubitaka u toplotno-distributivnoj mreži; dok je, kvadratnim oznakama označena kriva koja predstavlja angažovanu električnu snagu¹ na matičnoj lokaciji.



Slika 2. Dijagram angažovanih snaga na matičnoj lokaciji „Energetika“ d.o.o.

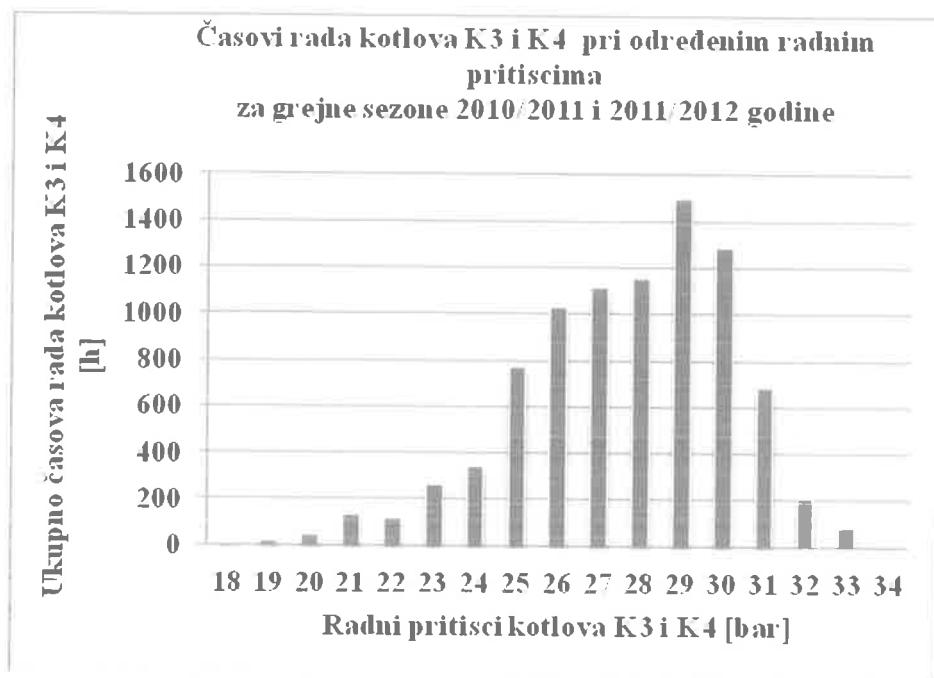
¹ -Angažovana električna snaga je suma snaga svih angažovanih elektro potrošača u datom trenutku

Tehno-ekonomска анализа

U ovom delu rada prikazani su analizirani radni režimi kotlova, da bi se utvrdili pritisci i temperature koje karakterišu te režime u toku reprezentativnih grejnih sezona.

Na slici 3. prikazana je korelacija pritisaka pare i časova rada kotlova K3 i K4 sa tim radnim pritiscima za grejne sezone 2010/2011 i 2011/2012 godina [8]. Razlog za isticanje korelacije izložene na slici 3. je u tome što je oko 66% od ukupnog broja časova rada svih kotlova matične lokacije u poslednjoj grejnoj sezoni pripadalo kotlovima K3 i K4, pri čemu su kotlovi K1 i K2 uzimali učešće od oko 32,7%. Važno je, takođe, istaći da su kotlovska postrojenja K3 i K4, kao i K1 i K2 po svojim karakteristikama ista, a uz to imaju i gotovo isti broj radnih sati. Po rečima stručnih konsultanata (inženjera „Energetike“) parametri proizvedene pare na izlazu iz kotlovske postrojenja nisu se znatno menjali unazad 10-ak godina. Naime, sva kotlovska postrojenja (K1, K2, K3, K4 i K5) najčešće rade u radnom režimu pri kome se izlazni pritisci pare kreću u granicama 29-30 bara, a temperature oko 450 °C. Međutim, sa slike 3. se vidi da su se radni pritisci pare u kotlovima u periodu 2010/2011 i 2011/2012 kretali u rasponu od minimalnih 18 bara do maksimalnih 34 bara, a da je varijacija temperature pare bila u rasponu od minimalnih 200 °C do maksimalnih 450 °C, s tim što su kotlovi radili najveći broj sati sa pritiscima oko 29 bar [8].

Za analizu je usvojeno da će kogeneraciona parna turbina godišnje raditi 2.200 časova, odnosno $\frac{1}{4}$ godine, jer su parni kotlovi sa kojih bi se turbina napajala vodenom parom (K1, K2, K3 i K4) u grejnoj sezoni 2011/2012 radili u opsegu od 2.000 do 2.300 časova.



Slika 3. Korelacija pritisaka pare i časova rada kotlova K3 i K4 za grejne sezone 2010/2011 i 2011/2012 godine [8]

Na osnovu napred izloženog, utvrđene su vrednosti koje predstavljaju ulazne za tehno-ekonomsku analizu idejne varijante kogenerativnog postrojenja, i one su prikazane u tabeli 5.

Tabela 5. Ulazni podaci predložene varijante idejnog rešenja kogeneracijskog postrojenja na matičnoj lokaciji

ULAZNI PODACI PREDLOŽENE VARIJANTE		
Podaci	Vrednost	Jedinica
Časovi rada kotlova	2200	h
Protok pare	82,8	t/h
Pritisak pare	29	bar
Temperatura pare	350	°C
Pritisak oduzimanja	6,5	bar
Temperatura oduzimanja	250	°C
Kondenzacijski pritisak	0,7	bar

Nakon analize ulaznih podataka, softver „RETScreen“ je „predložio“ parnu turbinu snage 25,3 MW, pa je imajući u vidu podsticajne cene proizvedene električne energije i druga važna tehno-ekonomomska opravdanja usvojeno da je najpovoljnije da se na matičnoj lokaciji instaliraju 2 turbine nazivnih snaga 10 MW i 15 MW. Ovakvo rešenje omogućilo bi prodaju proizvedene električne energije po ceni od 7,6 c€/kWh [9]. Izabrane parne turbine neće zadovoljiti potrebe preduzeća za električnom energijom, tim pre što će deo energije biti prodat nacionalnoj elektro-korporaciji. Potrebe za dodatnom električnom energijom će biti zadovoljene kupovinom iz mreže, a dodatne potrebe za toplotnom energijom, tj. one potrebe koje kotlovi K1-K4 ne mogu da zadovolje, biće zadovoljavane radom kotla K5.

Nabavna cena po instaliranom kW izabranih parnih turbina kreće se oko 500 € [10]. Treba napomenuti da ova cena obuhvata sve prateće radove (instalaciju, prateću opremu, puštanje u rad), tako da se dodatni troškovi ne očekuju.

U tabeli 6. dat detaljan pregled svih troškova za nabavku i instaliranje kogeneracionih turbina, pri čemu se kapitalni deo investicije odnosi na samu turbinu.

Izdavanja za energente u baznoj i predloženoj varijanti data su u tabeli 7.

Tabela 6. Početni investicioni troškovi

POČETNI INVESTICIONI TROŠKOVI		
Vrsta troškova	Iznos [€]	
Studija izvodljivosti	6.000	
Troškovi razvoja	2.000	
Tehnički troškovi (inženjering)	2.000	
Turboagragat		
Parna turbine	12.650.125	
Podstanica	50.000	
Troškovi mere energetske efikasnosti	50.000	
Troškovi obuke radnika	9.000	
UKUPNO	12.769.125	

Tabela 7. Troškovi enerengeta predložene i bazne varijante

TROŠKOVI ENERGENETA		
Vrsta troškova	Iznos [€]	
Troškovi enerengeta (predložena varijanta)	Prirodni gas (za K1 i K2)	1.398.079
	Električna energija	3.976.769
	Lignite i mazut (za K3 i K4)	3.509.461
	Ugalj (za K5)	2.708.801
Troškovi enerengeta (bazna varijanta)	Prirodni gas (za K1 i K2)	2.712.892
	Električna energija	4.962.115
	Lignite i mazut (za K3, K4 i K5)	7.006.800

U tabelama 8 i 9. prikazani su godišnji izdaci, uštede i prihodi koji se ostvaruju na matičnoj lokaciji kada ona radi bez kogeneracije (*bazna varijanta*) i kada bi radila po predloženom *idejnom rešenju* koje podrazumeva kogeneraciju (*predložena varijanta*), iz kojih su evidentne uštede koje kogeneracija donosi.

Tabela 8. Godišnji troškovi i izdaci po osnovu primene predložene varijante kogeneracije na matičnoj lokaciji

GODIŠNJI TROŠKOVI I IZDACI		
Vrsta troškova	Iznos [€]	
Održavanje i prateći radovi	50.000	
Troškovi goriva – predloženi slučaj	11.593.137	
UKUPNO	11.643.137	

Tabela 9. Godišnje uštede i prihod po osnovu primene predložene varijante kogeneracije na matičnoj lokaciji

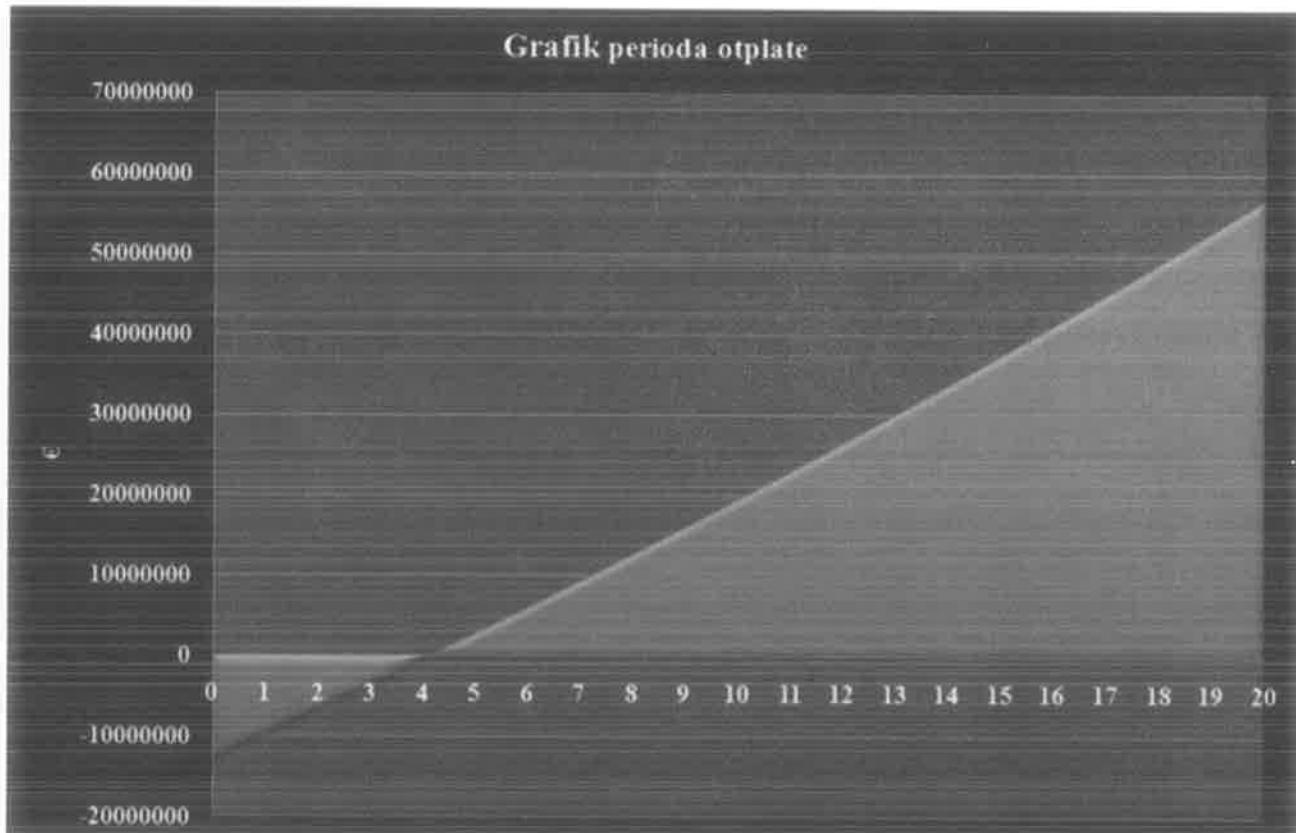
GODIŠNJE UŠTEDE I PRIHOD	
Vrsta troškova	Iznos [€]
Troškovi goriva – bazni slučaj	14.681.807
Prihod od prodaje električne energije	641.233
UKUPNO	15.323.040

U tabeli 10. Prikazan je priliv novca koji bi se ostvarivao primenom predložene varijante kogeneracije na matičnoj lokaciji.

Tabela 10. Godišnji priliv novca predloženog slučaja koji bi se ostvarivao primenom predložene varijante kogeneracije na matičnoj lokaciji

GODIŠNJI PRILIVA NOVCA			
Godine	Pre poreza [€]	Posle poreza [€]	UKUPNO [€]
0	-12.769.125	-12.769.125	-12.769.125
1	3.738.872	2.991.097	-9.778.028
2	3.797.585	3.038.068	-6.739.960
3	3.857.212	3.085.770	-3.654.190
4	3.917.753	3.134.202	-519.988
5	3.979.202	3.183.361	2.663.374
...			
20	4.999.528	3.999.622	56.774.914

Indikativno je da dijagram (slika 4.) koji nastaje kao posledica analize primene idejnog rešenja kogeneracije na matičnoj lokaciji, koji se dobija uz pomoć programskog paketa „RETScreen“ pokazuje da bi perioda otplate iznosio 4,2 godine.

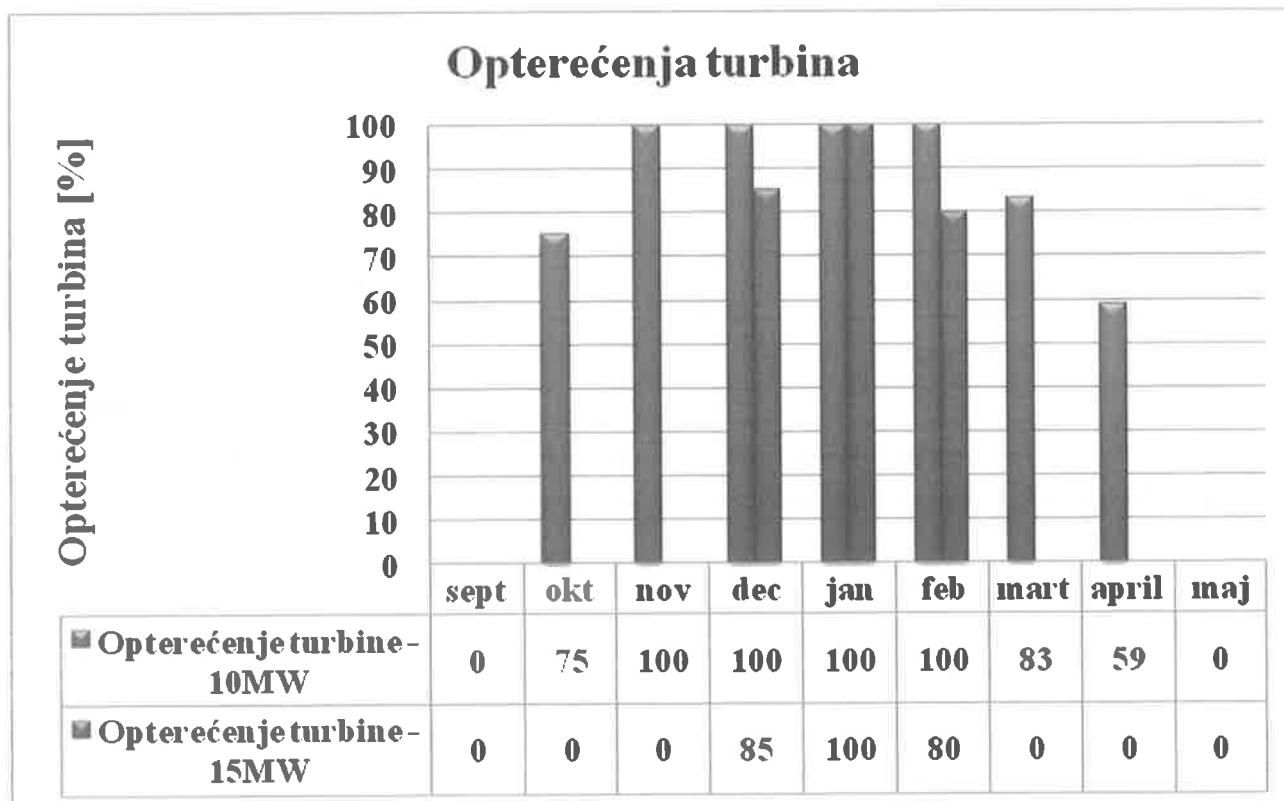
**Slika 4.** Finansijski efekti primene predloženog idejnog rešenja kogeneracije na matičnoj lokaciji

Analiza režima rada predloženih kogeneracionih turbina

Kako novo, predloženo, kogenerativno postrojenje na matičnoj lokaciji svoj rad zasniva na sprezi kotlovnih postrojenja i turbina, veoma je bitno da se poznaju režimi rada kotlova. Naime, „izlaz“ iz kotlova, tj. para, predstavlja „ulaz“ u turbine, pa samim tim rad turbine direktno zavisi od režima rada kotlovnih postrojenja. Kotlovska postrojenja, zavisno od vremenskih uslova proizvode paru određenih parametara koji variraju tokom grejnih sezona. Parametri pare koji se prate su pritisak i temperatura. Analizom pritisaka kojom su obuhvaćeni podaci polednjih 10-ak grejnih sezona zaključeno je da se vrednost pritiska kreće u rasponu od 18 do 34 bar. Takođe, temperatura pare znatno varira, u vrednostima od 200°C do 450°C.

Pored ovih parametara (p , T), bitno je napomenuti da još dva parametra imaju značajnu ulogu u radu turbine. Reč je o produkciji pare (Q) i broju časova rada. Na matičnoj lokaciji nema merenja te produkcije, iako je to od izuzetnog značaja. Stoga je u toku studijskog rada o primeni kogeneracije na matičnoj lokaciji, analiza režima rada predloženih turbine vršena na osnovu pretpostavljenih vrednosti parametra produkcije pare. Prepostavka je vršena uz konsultovanje sa inženjerima „Energetika“ d.o.o. – S druge strane, broj časova rada kotlova se konstantno prati i o njima postoje veodostoni podaci.

U nastavku su prikazani rezultati analize [11] režima rada kotlovnih postrojenja na matičnoj lokaciji, koji pokazuju kako će izabrani turboagregati i pod kojim opterećenjem raditi u toku eksploatacije. Napominje se da je analiza vršena na osnovu podataka iz poslednje dve grejene sezone (grejne sezone 2010/2011 i 2011/2012) i predstavljena u tabeli 11. i na slici 5.



Slika 5. Grafik opterećenja turbine u kogeneracionim režimima rada na matičnoj lokaciji

REŽIMI RADA TURBINA				
Mesec	Parametri i opterećenja	Entalpije, protoci i turbine	Vrednost	Jedinica
Oktobar	Parametri pare	Entalpija – ulaz / izlaz	3.010/2.475	KJ/kg
		Protok pare	50,5 (14)	t/h (kg/s)
	Opterećenje trubine	Turbina 10MW	7,5 (75%)	MW
		Turbina 15MW	0 (0%)	MW
Novembar	Parametri pare	Entalpija – ulaz / izlaz	3.010/2.475	KJ/kg
		Protok pare	84,8 (23,5)	t/h (kg/s)
	Opterećenje trubine	Turbina 10MW	10 (100%)	MW
		Turbina 15MW	0 (0%)	MW
Decembar	Parametri pare	Entalpija – ulaz / izlaz	3.310/2.410	KJ/kg
		Protok pare	117,3 (32,6)	t/h (kg/s)
	Opterećenje trubine	Turbina 10MW	10 (100%)	MW
		Turbina 15MW	12,8 (85%)	MW
Januar	Parametri pare	Entalpija – ulaz / izlaz	3.310/2.410	KJ/kg
		Protok pare	128,5 (35,7)	t/h (kg/s)
	Opterećenje trubine	Turbina 10MW	10 (100%)	MW
		Turbina 15MW	15 (100%)	MW
Februar	Parametri pare	Entalpija – ulaz / izlaz	3.310/2.410	KJ/kg
		Protok pare	113,1 (31,4)	t/h (kg/s)
	Opterećenje trubine	Turbina 10MW	10 (100%)	MW
		Turbina 15MW	12 (80%)	MW
Mart	Parametri pare	Entalpija – ulaz / izlaz	3.050/2.450	KJ/kg
		Protok pare	49,8 (13,8)	t/h (kg/s)
	Opterećenje trubine	Turbina 10MW	8,3 (83%)	MW
		Turbina 15MW	0 (0%)	MW
April	Parametri pare	Entalpija – ulaz / izlaz	3.050/2.450	KJ/kg
		Protok pare	35,4 (9,8)	t/h (kg/s)
	Opterećenje trubine	Turbina 10MW	5,9 (59%)	MW
		Turbina 15MW	0 (0%)	MW

Tabela 11. Analiza rada kotlovnih i turbinskih postrojenja u kogenerativnim režimima rada na matičnoj lokaciji

Zaključak

U ovom radu je ispitana mogućnost proizvodnje električne energije putem kogeneracije sa proizvodnjom toplotne energije na matičnoj lokaciji „Energetika“ d.o.o. u Kragujevcu sa postojećim parnim kotlovima u slučaju da se primeni idejno rešenje koje podrazumeva ugradnju 2 parna turboagregata snaga 10MW i 15 MW, koji su birani tako da manji od ova dva zadovolji kriterijume Uredbe o merama podsticaja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije, tj. da električnu energiju proizvedenu manjim turboagregatom prodajemo elektro-distributivnom preduzeću po beneficiranoj stopi.

Turbine bi pogonili kotlovi K1, K2, K3 i K4 dok bi kotao K5 služio za vršna opterećenja i dopunu toplotne energije. Mešavina pogonskih goriva odnosno energenata bi, u skladu sa politikom preduzeća, ostala ista.

Značajnu investiciju, tačnije oko 13 miliona evra, je potrebno uložiti u ovaj vid proizvodnje, međutim period otplate od 4,2 godine ohrabruje i navodi na isplativost ovog kapitalnog ulaganja. Istina, cena po kojoj bi se električna energija prodavala distributivnoj mreži ne bi bila za oba parna turboagregata beneficirana, ali bi se ostvarila značajna ušteda u električnoj energiji koju treba kupiti, kao i u troškovima za energente. Sve ovo govori da bi, uz pravilnu primenu mera za poboljšanje energetske efikasnosti postrojenja i racionalno gazdovanje energijom, kogenerativni vid proizvodnje bio isplativa opcija i da bi kogenerativna postrojenja sama sebe isplatila za relativno kratko vreme, posle čega bi počela da daju čistu dobit.

Zahvalnost

Autori veoma zahvaljuju inženjerima energane „Energetika“ d.o.o. Kragujevac na svim savetima, instrukcijama kao i omogućavanju da se pristupi svim neophodnim podacima za izradu ovog rada.

Literatura

- 1 The European Association for the Promotion of Cogeneration, "A guide to cogeneration"
- 2 Babić M., Rakić N., Popović M., Canović D., „*Studija izvodljivosti za proizvodnju električne energije putem kogeneracije sa proizvodnjom topotne energije na matičnoj lokaciji „Energetika“ d.o.o. sa postojećim parnim kotlovima*“, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2012
- 3 Babić M., Popović M., Canović D., Rakić N., „*Studija izvodljivosti za proizvodnju električne energije putem kogeneracije sa proizvodnjom topotne energije na matičnoj lokaciji „Energetika“ d.o.o. sa izgradnjom potpuno novog kogenerativnog postrojenja*“, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2012
- 4 „Baze podataka o satnim i povremenim merenjima na postrojenjima - matična lokacija, u periodu 2010 – 5 Tehničko-tehnološke dokumentacione osnove energane „Energetika“ d.o.o. - matična lokacija, Arhiva „Energetika“ d.o.o., Kragujevac
- 5 V. Milisavljević, V. Čokorilo , D. Zlatanović, J. Milenković, “*Potrošnja uglja u Srbiji i emisija CO₂ nastala njegovim sagorevanjem*”, Rudarko – geološki fakultet, Beograd
- 6 „*Ekologija sagorevanja*”, Tehnološko – metalruški fakultet, Beograd
- 7 Babić M., Končalović D., Jelić D., Pavlović N., „*Studija izvodljivosti kogenerativne proizvodnje topotne i električne energije na matičnoj lokaciji „Energetike“ d.o.o. Kragujevac*“, Mašinski fakultet Kragujevac, januar 2010
- 9 Vlada Republike Srbije, “*Uredba o merama podsticanja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije i kombinovanom proizvodnjom električne i topotne energije*”, Beograd, 2010
- 10 RETScreen® Software Online User Manual, RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre, Catalogue no.: M39-108/2004E-PDF
- 11 Prof. dr. sc. Z. Prelec, “*Energetska postrojenja (Parne turbine)*”, poglavlje 5