

# POREĐENJE ENERGETSKE I EKSERGETSKE EFIKASNOSTI POLIGENERACIJSKIH I KOGENERACIJSKIH SISTEMA

## ENERGY AND EXERGY EFFICIENCY COMPARISON OF POLY-GENERATION AND CO-GENERATION SYSTEMS

**BIROL KILKIS,**

**Baskent University, Ankara Turkey, i**

**Siir KILKIŞ**

**KTH Stockholm, Sweden, i TUBITAK, Ankara, Turkey**

*U radu su opisani rezultati procene eksnergije za istraživački projekat visokoeffikasnog poligeneratora sa kombinovanim ciklusom EU FP6 HEGEL. U okviru ovog istraživanja izvršeno je poređenje ukupnog učinka jednog poligeneracijskog sistema visoke efikasnosti koji ima "bottoming" ciklus sa jednim kogeneracijskim sistemom, a poređenje je izvršeno sa ekološkog, tehnološkog i ekonomskog stanovišta. Rezultati pokazuju da kad efikasnost upravljanja racionalnom eksnergijom raste pri poligeneraciji, energetska efikasnost u maloj meri opada i predstavlja zanimljiv problem za otpimizaciju. Projekat HEGEL je upoređen sa jednim standardnim kogeneracijskim sistemom i utvrđeno je da "bottoming" ciklus znatno više doprinosi smanjenju emisije ugljenika od kogeneracijskog sistema, iako njegova energetska efikasnost opada za nekoliko procenata.*

*This paper is an account of the results of an exergy based evaluation of the EU FP6 HEGEL Combined-Cycle, high efficiency poly-generation research project. In this study the overall performance of a bottoming-cycle, high efficiency poly-generation system was compared with a co-generation system for environmental, technological, and economical points of view. Results show that while the rational exergy management efficiency increases in poly-generation, the energy efficiency decreases slightly and presents an interesting optimization problem. The HEGEL project design was compared with an off-the shelf co-generation system and was determined that a bottoming cycle contributes to the carbon reductions efforts much more than a co-generation system, even though its energy efficiency drops a few percentage points.*

**Ključne reči:** poligeneracija, kogeneracija, smanjenje emisije ugljenika, eksnergija

**Key words:** polygeneration; co-generation; carbon emission reduction; exergy

## Uvod

OECD (2006) je predvideo da kogeneracijski sistemi (CHP) mogu da smanje emisiju CO<sub>2</sub> za 0,3 Gt/god. u 2050. godini. Ovo smanjenje emisije ugljenika može da dostigne količinu od 1,4 Gt/god., ukoliko u sektoru zgrada u velikoj meri počnu da se koriste distribuirani sistemi za kombinovanu proizvodnju toplote i energije, naročito u formatu poligeneracije (HEGEL, 2006). Kada se pridodaju prednosti efikasnosti racionalnog upravljanja eksergijom, stvarno smanjenje emisije ugljenika može da do 2050. dostigne 3 Gt/god. (Kılıkış-a, 2007). Međutim, neophodno je da se definiše jasna granica između postrojenja za kogeneraciju i izgrađene sredine koja ima koristi od tog postrojenja u smislu toplote i energije, zbog principa ponude i potražnje eksergije, te se tako i ekološka održivost mora meriti (Kılıkış, Ş.-a, 2008). U ovom radu prikazano je da jednostavan skup podataka o temperaturi duž granice, unutar lokacija postrojenja, i u izgrađenoj sredini, može biti dovoljan da se, pomoću modela za racionalno upravljanje eksergijom (Kılıkış, Ş.-b, 2008) izvrši opsežna analiza održivosti za zgrade vrhunskih karakteristika.

Model za racionalno upravljanje eksergijom (Rational Exergy Management Model – REMM) (Kılıkış, Ş.-b, 2007) može da omogući da Direktiva 2004/8/EC otkrije i kvantifikuje skrivene održive prednosti i pogodnosti sistema za kombinovanu proizvodnju toplote i energije sa novim algoritmima za optimizaciju. Pomoću REMM-a mogu se takođe diferencirati prednosti nekoliko vrsta sistema za kombinovanu proizvodnju toplote i energije. Takođe, REMM smešta granicu postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplote i energije i oblast korisnika u datu izgrađenu sredinu i omogućava optimalnu racionalizaciju između ponude i potražnje eksergije, to jest uspostavlja optimalan bilans eksergije u kombinaciji eksergija u izgrađenoj sredini i vodi ka zgradama sa niskom eksergijom.

## Analiza

### 1. Direktiva EU 2004/8/EC

Direktiva 2004/8/EC je odgovor na podsticaj da se pređe na postrojenja za efikasnu proizvodnju energije, uključujući sisteme za kombinovanu proizvodnju toplote i energije (EU, 2005). Odnos energije i toplote predstavlja važan parametar koji se tiče efikasnosti, emisije i algoritama koji prate potražnju.  $C$  u jednačini (1) može se pisati i u značenju efikasnosti proizvodnje energije i toplote, konkretno  $CHPH\eta$  i  $CHPE\eta$  (EU, 2004). Ukoliko se ne zna stvarni odnos energije i toplote za jedan kogeneracijski sistem, mogu se koristiti vrednosti zadate u tabeli 1.

$$E_{CHP} = C \cdot H_{CHP} \quad (1)$$

$$CHPE\eta = C \times CHPH\eta \quad (2)$$

Prema Dodatku II, kogeneracija visoke efikasnosti mora da zadovolji sledeće kriterijume:

– kogeneracija iz uređaja za kogeneraciju mora da obezbedi uštedu primarne energije proračunatu prema jednačini (3) od najmanje 10% u poređenju sa referentnim vrednostima za odvojenu proizvodnju toplotne i električne energije;

– proizvodnja iz malih i mikrokogeneracijskih uređaja koja obezbeđuje uštedu primarne energije može se kvalifikovati kao kogeneracija visoke efikasnosti.

Tabela 1. Zadati odnos energije i toplote,  $C$  (EU, 2004).

Vrsta sistema za kombinovanju proizvodnju toplote i energije	Zadato $C$
Kombinovani ciklus sa rekuperacijom toplote	0,95
Protivpritisna parna turbina	0,45
Kondenzaciona parna turbina	0,45
Gasna turbina sa rekuperacijom toplote	0,55
Motor sa unutrašnjim sagorevanjem	0,75

Procentat uštede primarne energije  $PES$  izračunava se pomoću jednačine (3), koja se može pojednostaviti uvođenjem  $C$  iz jednačine (2). Rezultat je prikazan u jednačini (4).

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{CHPH\eta}{Re fH\eta} + \frac{CHPE\eta}{Re fE\eta}} \right] \times 100 \quad (3)$$

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{CHPH\eta \left( \frac{1}{Re fH\eta} + \frac{C}{Re fE\eta} \right)} \right] \times 100 \quad (4)$$

Na jednačine (3) i (4) primenjuje se sledeći uslov:

$$CHPH\eta + CHPE\eta < 1.$$

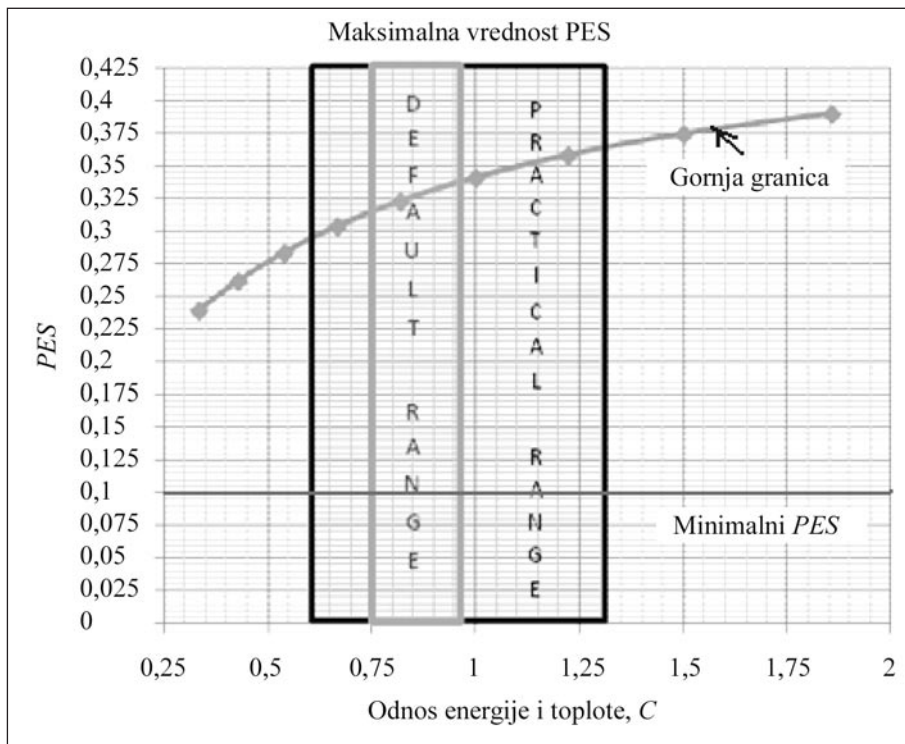
Komisija je utvrdila zadatak da se ustanove usklađene referentne vrednosti za efikasnost pre 21. februara 2006. Međutim, u toku su debate bez konačnog konsenzusa i usklađivanje nije potpuno, iako je tokom 2006. godine postignut određeni napredak, kada je izrađena sveobuhvatna tabela za usklađene referentne vrednosti efikasnosti (DG TREN, 2006: Table 7.1). Usklađene vrednosti su neophodne da bi se uzeli u obzir faktori kao što su godina izgradnje postrojenja, vrsta goriva, kombinacija goriva, klimatski uslovi i realni podaci koji su neophodni za ocenjivanje i klasifikaciju uređaja koji proizvode toplotu i energiju, bilo kombinovano ili odvojeno. Tabela je izrađena nakon pregleda stvarnih podataka sa terena koji su dostupni u literaturi (OECD, 2006, Badami i dr., 2006, IEA, 2006). Iako jednačina 4 uključuje  $C$ , Direktiva 2004/8/EC ne može da optimizuje  $C$  za maksimalnu uštedu primarne energije.

Tabela 2. Preliminarne referentne vrednosti iz Direktive EU

Sistem	RefH $\eta$	RefE $\eta$
Para	0,90	0,52
Toplota procesa	0,85	0,52

je  $PES$  za date primene i ostale uslove održivosti: jednostavna diferencijacija jednačine (4) kojom se traži optimalni  $C$  donosi trivijalno rešenje  $C \rightarrow \infty$ , a koje je slično praktičnom uslovu  $C \gg 1$ , predstavlja beskonačnu energetska efikasnost, što nije prihvatljivo. Ako sistem za kombinovanu proizvodnju toplote i energije radi sa toplotnom efikasnošću  $CHPH\eta$  od 0,55, i  $C$  iznosi 0,6, onda po jednačini (2),  $CHPE\eta$  iznosi 0,33. Prema jednačini (3) ili jednačini (4),  $PES$  jeste blizu 20%, pod pretpostavkom da se prvo proizvodi para:

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{0,55}{0,90} + \frac{0,33}{0,52}} \right] \times 100 = 19,7 \% \quad \{\eta = 0,55 + 0,33 = 0,88\}$$



Slika 1. Gornja i donja granica PES prema odnosu energije i toplote,  $C$

Prema jednačini (3), postoji gornja granica za  $PES$ . Na primer, ako se koriste iste referentne vrednosti date u gornjem primeru, onda slika 1 pokazuje da  $PES$  ne može biti veći od otprilike 36% u praktičnom rasponu kogeneracije, što iznosi  $0,6 \leq C \leq 1,25$ . Maksimalna vrednost  $PES$  ograničena je na 33% u zadatom rasponu datom u Direktivi, što iznosi  $0,75 \leq C \leq 0,95$ . Prema Direktivi, minimalni  $PES$  od 10% predstavlja donju granicu. Još važnije, slika 1 jasno pokazuje da se  $C$  mora maksimizirati ako treba uštedeti više goriva. To nas vodi do zaključka da su za zelenije sisteme koji

smanjuju emisiju štetnih gasova potrebne veće vrednosti  $C$ , kao i do činjenice da je bolja poligeneracija, odnosno proizvodnja energije u više od jednog koraka.

Prema Direktivi, gornji primeri se u praktičnom rasponu svi kvalifikuju za kombinovanu proizvodnju toplote i energije, zbog toga što je u svim slučajevima vrednost  $PES$  veća od 10%. Međutim, jednačina (4) ne pokazuje kako se sistem može poboljšati korišćenjem eksergije ulaznog goriva, niti zahteva određenu vrstu goriva. Drugim rečima, neki drugi uređaj za kombinovanu proizvodnju toplote i energije koji ima iste efikasnosti kao u gornjem primeru, ali koji koristi drugu vrstu goriva sa drugačijim eksergetskim resursom, ne može se razlikovati od gornjeg primera. Prema tome, temperatura otpadne toplote koja se isporuči potrošačima i minimalna eksergija potrebna da se zadovolje ti potrošači prema jednačinama (3) i (4) ne predstavljaju nikakvu razliku. Zbog toga je toliko važno da se poznaju, podese i optimiziraju sve temperature u procesu, radi bolje efikasnosti racionalnog upravljanja eksergijom i principa korišćenja energetske resursa radi postizanja održivosti.

Drugi problem je neosetljivost jednačine (3) na kvalitet obezbeđenih usluga. Na primer, možemo da razmotrimo drugi uređaj za kombinovanu proizvodnju sa toplotnom efikasnošću  $CHP\eta$  od 0,40, koji proizvodi električnu energiju  $CHPE\eta$  od 0,42, koristeći jedan deo otpadne toplote za proizvodnju dodatne električne energije. Ovaj uređaj obezbeđuje veću eksergiju i štedi više goriva u energetskom fondu, ali prema jednačini (3), ima sličnu vrednost  $PES$  (20,1%). Prema tome, očigledno je da Direktiva EU ne prepoznaje kvalitet energije koja se proizvodi u sistemu za kombinovanu proizvodnju i njegove eksergetske prednosti. Način na koji se mogu iskoristiti ove izgubljene šanse postaje očigledan analizom racionalne eksergije, koju Direktiva svakako treba da obuhvati.

## 2. Efikasnost racionalnog upravljanja eksergijom unapređuje Direktivu EU

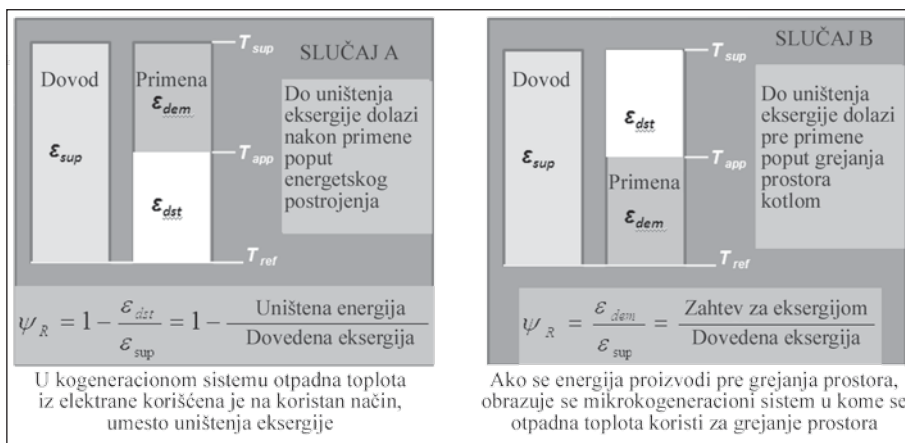
Sada kada su održivost, emisija ugljenika i globalno zagrevanje postali problemi od velikog značaja, ključnu važnost ima ravnoteža između *kvaliteta*, energije u smislu korisnog radnog potencijala u svim tačkama ponude i potražnje. Metriku za racionalizaciju energetskog bilansa obezbeđuje *Rational Exergy Management Efficiency*,  $\psi_R$ , koja zavisi od međusobnog odnosa potrebe za eksergijom ( $\epsilon_{dem}$ ), obezbeđene eksergije ( $\epsilon_{sup}$ ), i uništene eksergije ( $\epsilon_{dst}$ ) na temperaturnoj skali (Kılkiş, Ş-b, 2007). Na slici 2, slučaj A odgovara toplani gde se uništava eksergija nakon proizvodnje energije. Slučaj B obično odgovara kotlu koji proizvodi toplotu za grejanje prostora, gde se eksergija uništava pre grejanja. U tom tipičnom slučaju  $\psi_R$  iznosi samo oko 4%. Jednačine 5a i 5b predstavljaju meru toga koliko je racionalna ravnoteža između eksergetske ponude i potražnje (Kılkiş-a, b, 2007).

$$\psi_R = \frac{\epsilon_{min}}{\epsilon_{max}} = 1 - \frac{\text{uništena eksergija}}{\text{odvedena energija}} \quad (5a)$$

$$\psi_R = \frac{\epsilon_{min}}{\epsilon_{max}} = 1 - \frac{\text{uništena eksergija}}{\text{dovedena energija}} \quad (5b)$$

U jednačini 5a,  $\epsilon_{max}$  predstavlja maksimalnu eksergiju ulaznog goriva za jediničnu količinu energije u datoj primeni.  $\epsilon_{max}$  je funkcija temperature plamena  $T_f$  goriva

i temperature sredine sa kojom sistem može da bude u toplotnoj ravnoteži,  $T_{ref}$   $\varepsilon_{min}$  predstavlja minimalnu količinu eksergije koja bi mogla da obavi isti zadatak. Kod hemijskih ili mehaničkih sistema, može se definisati ekvivalentna temperatura plamena (Kılıkış, Ş. -a, b 2007). Zatim, prema konvenciji da eksergija mora da bude pozitivna i u procesu grejanja i u procesu hlađenja, dva slučaja se razlikuju po opterećenju jedinične energije.



Slika 2. Efikasnost racionalnog upravljanja eksergijom u različitim uslovima uništenja eksergije

$$\psi_R = \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_{app}} \right) \{T_{app} > T_{ref}\} \quad (6a)$$

$$\left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_f} \right)$$

$$\psi_R = \left( 1 - \frac{T_{app}}{T_{ref}} \right) \{T_{app} < T_{ref}\} \quad (6b)$$

$$\left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_f} \right)$$

Za poseban slučaj  $T_{app} = T_{ref}$ ,  $T_{ref}$  se može izabrati kako bi se zadovoljio jedan od uslova nejednakosti. Ovaj na prvi pogled proizvoljan izbor ne utiče na ukupnu racionalnost eksergetskog bilansa, budući da sve temperature imaju istu referentnu vrednost  $T_{ref}$  (vidi sliku 2).  $\psi_R$  takođe zavisi od vrste primene – uređaja koji koristi toplotnu energiju koju obezbeđuje sistem pri temperaturi  $T_{app}$ .

#### Studija slučaja: projekat poligeneracije EU FP6 HEGEL

Na osnovu prednosti koje pruža poligeneracija u pogledu energije i eksergije, Tehnički univerzitet srednjeg istoka je započeo projekat HEGEL i prvi uređaj će biti

testiran u kampusu METU u Ankari. Ovaj sistem će obezbeđivati toplotu i energiju za zgradu MATPUM Sekretarijata za poljoprivredu (slika 3). Predviđene karakteristike ovog sistema prikazane su na slici 4, i biće realizovane u dve faze. Prva faza će pokrivati sistem za proizvodnju primarne energije i toplote, a u drugoj fazi će biti završen koncept sa “bottoming” jedinicom sa Rankinovim ciklusom.



Slika 3. Zgrada MATPUM, METU, Ankara, Turska

Tokom prve faze projekta HEGEL bez Rankinovog ciklusa,  $96 \text{ kW} - 7 \text{ kW} = 89 \text{ kW}$  otpadna toplota recikliraće se samo u obliku korisne toplote. U tom slučaju, energetska efikasnost će iznositi:

$$\eta = \frac{103 + 89 + 120}{364} = 86\%$$

pri čemu  $\text{CHPH}\eta: 103/364 = 0,527$  i  $\text{CHPE}\eta: 120/364 = 0.329$ . Zajedno iznose oko 86%. U prvoj fazi,  $C$  (odnos energije i toplote) iznosi  $120/(103+89) = 0,625$ . Ova vrednost je ispod zadate vrednosti EU prikazane na slici 1 i u tabeli 1 za motor sa unutrašnjim sagorevanjem.

U drugoj fazi projekta, otpadna toplota ICE prvo se koristi za proizvodnju pare kako bi se pokrenuo električni generator sa Rankinovim ciklusom koji proizvodi 25 kW energije ukupne efikasnosti 28%. Nizvodno u procesu, reciklira se 55 kW toplote za izlaznu vrednost toplote poligeneracije. Tada energetska efikasnost postaje otprilike:

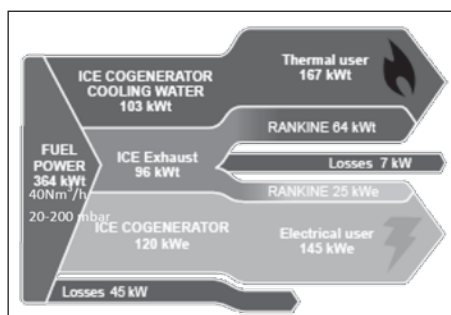
$$\eta = \frac{103 + 55 + 145}{364} = 83\%$$

U ovoj fazi, vrednost  $C$  će se povećati sa 0,625 na 0,92, što predstavlja mnogo bolji odnos. Pojedinačne efikasnosti će se takođe promeniti u korist proizvodnje energije:

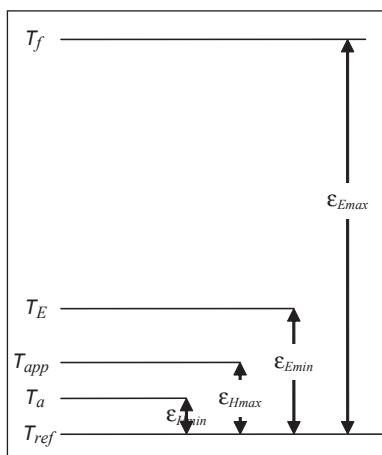
$$\text{CHPH}\eta: 158/364 = 0,434 \text{ i}$$

$$\text{CHPE}\eta: 145/364 = 0,398.$$

One zajedno čine oko 83%. Tako sistem sada proizvodi više energije na račun smanjene proizvodnje toplote i



Slika 4. Projekat sistema HEGEL sa Rankinovim ciklusom



Slika 5. Temperature u sistemu KGH u okviru poligeneracije

efikasnosti prema prvom zakonu. Eksergija energije je veća nego toplota pri temperaturi od recimo 95°C. Ipak, ovaj primer pokazuje da efikasnost prema prvom zakonu ne ide u prilog konceptu kogeneracije. Ovaj rezultat je u konfliktu sa slikom 1, koja pokazuje da je povećanje odnosa energije i toplote poželjno za uštedu energije i smanjenje emisije.

Imajući ovu kontroverzu na umu, a i za potrebe boljeg razlikovanja poligeneracijskog sistema od jednostavnog sistema za kombinovanu proizvodnju toplote i energije, jednačina (5) je napisana u sledećem formatu, gde su vrednosti eksergije za jedinicu energije date u jednačinama 8–11, i  $\psi_R$  je označeno kao  $\psi_{RCHP}$ . Tako je parametar  $\psi_R$  napisan u obliku koji je dat u jednačini (10).

$$\psi_{RCHP} = \frac{\epsilon_{Hmin} + C \times (1 - \epsilon_{Emin})}{\epsilon_{Hmax} + C \times \epsilon_{Emax}} \quad (7)$$

$$\epsilon_{Emax} = \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_f} \right) \quad (8)$$

$$\epsilon_{Emin} = \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_E} \right) \quad (9)$$

$$\epsilon_{Hmax} = \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_{app}} \right) \quad (10)$$

$$\epsilon_{Hmin} = \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_a} \right) \quad \text{ili} \quad \epsilon_{Hmin} = \left( 1 - \frac{T_a}{T_{ref}} \right) \quad \{T_a < T_{ref}\} \quad (11)$$

Kao poseban slučaj, izvedena je nova jednačina  $PES_{RCHP}$  da bi se napravila razlika između sistema za kogeneraciju i poligeneraciju, što naročito postaje važno u projektu poligeneracije EU FP6 HEGEL. Zato je parametar  $\psi_R$  napisan u formatu datom u jednačini (10).

$$PES_{RCHP} = \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{CHPH\eta}{Re fH\eta} + \frac{CHPE\eta}{Re fE\eta} \right) \times \frac{(2 - Re f\psi_{RCHP})}{(2 - \psi_{RCHP})}} \right] \times 100 \quad (12)$$

$$PES_{RCHP} = \left[ 1 - \frac{1}{CHPH\eta \left( \frac{1}{Re fH\eta} + \frac{C}{Re fE\eta} \right) \times \frac{(2 - Re f\psi_{RCHP})}{(2 - \psi_{RCHP})}} \right] \times 100 \quad (13)$$

Ako je  $\psi_{RCHP}$  jednako  $Ref\psi_R$  (bez poboljšanja racionalne eksergije), onda se jednačina  $PES_R$  vraća na jednačinu  $PES$ . Zbog toga se  $\psi_{RCHP}$  i  $Ref\psi_{RCHP}$  izračunavaju pomoću jednačina (14) i (15).

$$\psi_{RCHP} = \frac{\varepsilon_{Hmin} + C \times (1 - \varepsilon_{Emin})}{\varepsilon_{Hmax} + C \times \varepsilon_{Emin}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Ref\psi_{RCHP} &= \frac{H_{CHP} \times Ref\psi_{RH} + E_{CHP} \times Ref\psi_{RE}}{H_{CHP} + E_{CHP}} = \\ &= \frac{Ref\psi_{RH} + C \times Ref\psi_{RE}}{1 + C} \end{aligned} \quad (15)$$

Ako se ovo, na primer, primeni na grejanje prostora, kao referentna efikasnost racionalne eksergije može se izabrati 0,10 za sistem za grejanje sa toplotnom pumpom koja koristi zemlju kao izvor toplote (GSHP) i koja koristi električnu energiju sa mreže (API, 1975), a za postrojenje za kombinovanu proizvodnju toplote i energije, tipična vrednost eksergije 0,3 (Sugimoto, Fujii and Ohta, 2006). Ako  $C$  iznosi 1,05 i  $\eta_T$  iznosi 1, onda u jednačini 15  $Ref\psi_R$  iznosi 0,2024:

$$Ref\psi_{RCHP} = \frac{0,1 + 1,05 \times 0,3}{1 + 1,05} = 0,2024$$

Ako temperatura sagorevanja ulaznog goriva, prirodnog gasa,  $T_f$  iznosi 2000 K, temperatura izgubljene toplote  $T_{app}$  iznosi 300 K kod podnog grejanja niske eksergije, i ako bi se električna energija mogla proizvoditi u Rankinovom ciklusu sa izgubljenom toplotom pri minimalnoj temperaturi za proizvodnju električne energije  $T_E$  od 400 K, i za grejanje prostora  $T_a$  iznosi 293 K, onda za referentnu temperaturu  $T_{ref}$  od 283 K, jednačine (8) do (11) daju jediničnu eksergiju za jednačinu 7:  $\varepsilon_{Emin} = (1 - 283/400) = 0,2925$ ,  $\varepsilon_{Emin} = (1 - 283/2000) = 0,858$ ,  $\varepsilon_{Hmin} = (1 - 283/293) = 0,034$ ,  $\varepsilon_{Hmax} = (1 - 283/300) = 0,057$ . Birajući odnos energije i toplote od 0,92 za poligeneraciju, onda iz jednačine 7 sledi:

$$\psi_{RCHP} = \frac{0,034 + 0,92 \times (1 - 0,2925)}{0,057 + 0,92 \times 0,858} = 0,80$$

Kada su  $CHPH\eta = 0,434$  i  $CHPE\eta = 0,398$ , onda  $PES_R$  iz jednačine (15) i tabele 2 za referentne vrednosti za proizvodnju pare iznosi:

$$PES_{RCHP} = \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{0,434}{0,90} + \frac{0,398}{0,52} \right) \times \left( \frac{2 - 0,2024}{2 - 0,80} \right)} \right] \times 100 = 46\%$$

Ako se gornji proračuni ponove za prvu fazu projekta:

$$\psi_{RCHP} = \frac{0,034 + 0,625 \times (1 - 0,528)}{0,3711 + 0,625 \times 0,858} = 0,36$$

$$PES_{RCHP} = \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{0,527}{0,90} + \frac{0,329}{0,52} \right) \times \left( \frac{2 - 0,2024}{2 - 0,36} \right)} \right] \times 100 = 25\%$$

Relativne prednosti faza kogeneracije i poligeneracije projekta HEGEL takođe se mogu porediti prema komponentni emisije ugljenika iz jednačine za ukupnu emisiju ugljenika koju daje REMM (Kılıkış, Ş-b, 2007):

$$\Delta CO_2 = \frac{c_i}{\eta} (1 - \psi_{RCHP}) \quad (16)$$

Jednačina (17) se može ponoviti za prvu fazu (faza kombinovane proizvodnje toplote i energije projekta HEGEL) i drugu fazu (poligeneracija projekta HEGEL), a zatim se mogu uporediti:

$$\frac{(\Delta CO_2)_1}{(\Delta CO_2)_2} = \frac{\left( \frac{1}{\eta} \right)_1 (1 - \psi_{RCHP})_1}{\left( \frac{1}{\eta} \right)_2 (1 - \psi_{RCHP})_2} \quad (17)$$

Ovde indeksi (1) i (2) predstavljaju i prvu i drugu fazu. Pretpostavka je da se u obe faze koristi isto gorivo, tako da se  $c_i$  ukida. U prvoj fazi, ukupna toplotna efikasnost iznosi 0,88. U drugoj fazi ova efikasnost pada na 0,86 (HEGEL, 2006). Ipak, efikasnost racionalno upravljanja eksergijom povećava se sa referentne vrednosti od 0,2024 na 0,61 (vidi 1. deo Studije slučaja). Onda jednačina 17 otkriva da je jednostavna kombinovana proizvodnja toplote i energije odgovorna za tri puta veću emisiju CO<sub>2</sub> koja se može izbeći u poređenju sa sistemom za poligeneraciju.

$$\frac{(\Delta CO_2)_1}{(\Delta CO_2)_2} = \frac{\left( \frac{1}{0,86} \right)_1 (1 - 0,36)_1}{\left( \frac{1}{0,83} \right)_2 (1 - 0,80)_2} = 3$$

U tabeli 3 su upoređene dodatne prednosti sistema HEGEL sa klasičnim sistemima za kombinovanu proizvodnju toplote i energije, na osnovu modela REMM. Eksergetska efikasnost današnjih zgrada je manja od 0,1. Ova studija otkriva da sistem za poligeneraciju u kombinaciji sa sistemima KGH koji racionalno troše eksergiju, kao što je podno grejanje niske eksergije, može da poveća efikasnost do 0,8 i više. To je vrlo značajno da bi se postigle zaista zelene zgrade i zgrade visokih karakteristika.

Tabela 3. Poređenje poligeneratora HEGEL sa ostalim slučajevima

SISTEM		Sadašnja Direktiva	Ažurirana Direktiva
		<i>PES</i>	<i>PESR<sub>CHP</sub></i>
1	Jednostavan CHP	19,7%	26,6%
2	Poligenerator HEGEL	20,1%	46%
3	GSHP+ HEGEL	30%	55%

### Zaključak

Ovaj rad uvodi ekološki bolju definiciju uštede goriva za ocenu i procenu sistema za kombinovanu proizvodnju toplote i energije u pogledu energije i eksergije. Pokazano je da je eksergija važna mera za otkrivanje i shvatanje stvarnih prednosti sistema za kombinovanu proizvodnju toplote i energije, za njihovo optimiziranje u cilju smanjenja opterećenja životne sredine i štetnih emisija, maksimiziranje uštede goriva, te za postizanje optimalne održivosti životne sredine, energije, ljudskih potreba i ekonomije, kao faktora koji su u međusobnom konfliktu.

Eksergija možda može još bolje da razlikuje nekoliko vrsta sistema za kogeneraciju i pokazuje da je sistem za poligeneraciju bolji od jednostavnog sistema za kombinovanu proizvodnju toplote i energije u pogledu uštede energije i smanjenja štetne emisije. Održiva kombinovana proizvodnja toplote i energije može da se odnosi na integraciju nekoliko zelenih komponenti, koje se mogu optimizirati korišćenjem REMM-a. S druge strane, alternativne vrste komponenti za konverziju i korišćenje energije moraju se uporediti i optimizirati, ne samo s ekonomskog, već i ekološkog stanovišta. Na primer, uticaj korišćenja prirodnog gasa u motoru sa spoljašnjim sagorevanjem, kao što je kotao na paru, pre nego u motoru sa unutrašnjim sagorevanjem, kao što je modifikovani dizel motor u poligeneratoru HEGEL, mora se razmotriti i sa stanovišta eksergije i sa stanovišta energije, sa kumulativnim uticajem na emisiju, kao komponentu koja se može izbeći, a koja se može utvrditi pažljivim pristupom zasnovanim na eksergiji datim u jednačini (16). Sistem za kombinovanu proizvodnju toplote i energije sa motorom sa unutrašnjim sagorevanjem imaće malu emisiju ugljenika ako se koristi trokraki katalizator (Badami i dr., 2006, IEA, 2006). U stvari, katalizator pretvara ugljen-monoksid u CO<sub>2</sub>, što je od velikog značaja za globalno zagrevanje.

### Nomenklatura

- $C$  – odnos energije i toplote [–]
- $C_{min}$  – minimalni prihvatljiv odnos energije i toplote za status CHP [–]
- $CHPE\eta$  – električna efikanost CHP definisana kao godišnja električna energija dobijena iz CHP podeljena sa ulaznom količinom goriva korišćenom za proizvodnju zbirne korisne izlazne toplote i električne energije iz CHP [–]
- $CHPH\eta$  – toplotna efikanost CHP definisana kao godišnja korisna izlazna toplota podeljena sa ulaznom količinom goriva korišćenom za proizvodnju zbirne korisne izlazne toplote i el. energije iz CHP [–]
- $E$  – električna energija, kWh ili kW
- $E_{CHP}$  – korisna izlazna el. energija iz sistema CHP koja ide do potrošača, kWh ili kW

$H$	– toplotna energija (toplota), kWh ili kW
$H_{CHP}$	– izlazna toplota iz CHP koja ide do potrošača, kWh ili kW
$PES$	– procenat uštede primarne energije (prema Direktivi 2004/8/EC) [–]
$PES_{RCHP}$	– procenat uštede primarne energije CHP [–]
$RefH\eta$	– referentna vrednost efikasnosti za posebnu proizvodnju toplote [–]
$RefE\eta$	– referentna vrednost efikasnosti za posebnu proizvodnju el. energije [–]
$Ref\psi_R$	– referentna efikasnost racionalne eksergije [–]
$T$	– temperatura [K]
$T_a$	– unutrašnja temperatura vazduha po suvom termometru [K]
$T_{app}$	– temperatura na ulazu u aplikaciju [K]
$T_E$	– minimalna temperatura izvora kojom se može proizvesti električna energija [K]
$T_f$	– temperatura plamena potrošenog goriva [K]
$T_{ref}$	– referentna temperatura sredine sa kojom svaki proces teži da postigne ravnotežu [K]

#### Grčki simboli

$\eta$	– energetska efikasnost [–]
$\eta_T$	– gubici u prenošenju energije u postrojenju i mreži [–]
$\psi_R$	– efikasnost racionalne eksergije [–]
$\psi_{RE}$	– efikasnost racionalne eksergije proizvodnje električne energije u CHP [–]
$\psi_{RH}$	– efikasnost racionalne eksergije proizvodnje toplotne energije u CHP [–]
$\psi_{RCHP}$	– ukupna efikasnost racionalne eksergije sistema CHP [–]
$\varepsilon$	– koristan rad (eksergija) koji postiže tok toplotne energije (goriva) bez dimenzija
$\varepsilon_{max}$	– eksergija ulaznog goriva ( $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{Emax} + \varepsilon_{Hmax}$ ) u CHP [–]
$\varepsilon_{min}$	– minimalna eksergija koja može da zadovolji dati zadatak (primenu) koja zahteva jediničnu energiju [–]
$\varepsilon_{Emax}$	– jedinična eksergija potrošena u obezbeđivanju el. energije iz CHP [–]
$\varepsilon_{Hmax}$	– jedinična eksergija potrošena u obezbeđivanju toplote u CHP [–]
$\varepsilon_{Emin}$	– minimalna jedinična eksergija koja može da obezbedi istu el. energiju [–]
$\varepsilon_{Hmin}$	– minimalna jedinična eksergija koja može da obezbedi istu toplotu za datu primenu (to jest, grejanje zgrade) [–]

#### Akronimi

API	– Američki institut za fiziku
CEN	– Evropski komitet za standardizaciju
CENELEC	– Evropski komitet za elektrotehničku standardizaciju
CHP	– kombinovana proizvodnja toplote i energije
CWA	– CEN/CENELEC ugovor o radionicama
EC	– Savet EU
EU	– Evropska unija
FP6	– Šesti okvirni program EU (za istraživanje i razvoj tehnologije)
GSHP	– toplotna pumpa sa zemljom kao izvorom toplote
HEGEL	– visoko efikasni gasni poligenerator sa kombinovanim ciklusom za ekološku lokalnu proizvodnju
ICE	– motor sa unutrašnjim sagorevanjem

IEA	– Međunarodno udruženje za energiju
METU	– Tehnički univerzitet Srednjeg istoka
OECD	– Organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj
REMM	– model racionalnog upravljanja eksergijom

### Literatura

- [1] \*\*\* API (1975), American Institute of Physics. Efficient Use of Energy, New York: American Institute of Physics, pp. 49–50.
- [2] **Badami, M., A. Casetti, P. Campanile, and F. Anzioso** (2005), *Performance of an Innovative 120 kWe Natural Gas Cogeneration System*, Energy, Elsevier Science Direct.
- [3] \*\*\* CEN/CENELEC. (2005), Workshop Agreement. Manual for Determination of Combined Heat and Power (CHP), CWA 45547.
- [4] \*\*\* DG TREN (2006), Guidelines for the Implementation of the CHP Directive 2004/8/EC. Guidelines for Implementation of Annex II and Annex III, Draft, EC: Brussels.
- [5] \*\*\* EU (2005), Green Paper, Energy Efficiency or Doing More with Less, Brussels.
- [6] \*\*\* EU Directive 2004/8/EC (2004), on the Promotion of Cogeneration based on Useful Heat Demand in the Internal Energy Market and Amending Directive 92/42/EEC.
- [7] \*\*\* HEGEL (2006), HEGEL Project Responds to Universal Need for Sustainability When integrated with Building HVAC, Executive Committee Meeting Report, October 20, Brussels, Belgium.
- [8] \*\*\* IEA (2006). World Energy Outlook 2006, OECD/IEA, Paris.
- [9] **Kılıç, Ş.-a** (2007), *Development of a Rational Exergy Management Model to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions with Global Exergy Matches*, Honors Thesis, Georgetown University.
- [10] **Kılıç, Ş.-b** (2007), *A Rational Exergy Management Model for Curbing CO<sub>2</sub> Emissions*, ASHRAE Transactions, Vol. 113, Part 2, pp. 113–123, ASHRAE: Atlanta.
- [11] **Kılıç, Ş.-a** (2008), *Rational Exergy Management Rating for Net-Zero-Energy Buildings*, Seminar 31, ASHRAE Winter Meeting, NY.
- [12] **Kılıç, Ş.-b** (2008), *Exergy Guidance for Sustainability with a New Analysis Tool*, Seminar 31, ASHRAE Winter Meeting, NY.
- [13] **Kılıç, B.** (2008), *Exergetic Determination of the Optimum Interface Between a Cogeneration Plant and the District*, Seminar 37, ASHRAE Winter Meeting, NY.
- [14] \*\*\* OECD (2008), *Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050: in Support of the G8 Plan of Action*, International Energy Agency, Paris: OECD/IEA, 479 pages.
- [15] **Sugimoto, S., T. Fujii, and J. Ohta**, (2006), *An Appraisal Method of Exergy Cost Minimization for Co-generation Systems*, Int. J. Exergy, Vol. 3, No. 3, pp. 255–271.

kgH