

Tomislav Kurevija, Maja Gregurić

ISSN 0350-350X

GOMABN 47, 1, 6-33

Izvorni znanstveni rad

UDK 550.367 : 553.7 : 536.717 : 536.77.001.24.003.1 : 697.1 (497.13-21 Lunjkovec)

EKSERGETSKA SNAGA BINARNOG RANKINE CIKLUSA NA GEOTERMALNOM LEŽIŠTU KUTNJAK-LUNJKOVEC

Sažetak

Opsežnim istražnim radovima koje je provela INA d.d. na utvrđivanju i osposobljavanju ležišta geotermalne vode za početnu proizvodnju, te angažmanu općine Legrad i Koprivničko-križevačke županije, ostvareni su preduvjeti za izgradnju prve hrvatske geotermalne elektrane na lokalitetu Kutnjak – Lunjkovec. Također, Vlada Republike Hrvatske je tijekom 2006. donijela zaključak o programu potpore projekta. Budući da u studiji Ekonomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod nazivom "Konceptija gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak", detaljna termodinamička analiza instalirane snage nije prikazana, niti su unutrašnji gubici elektrane uzeti u obzir, upitna je vrijednost od 2 MW neto instalirane snage. S obzirom na to da sveukupna ekonometrijska analiza projekta počiva upravo na toj vrijednosti, u ovom je radu energetski potencijal ležišta Kutnjak – Lunjkovec određen prema veličini proizvodnje za postojeći proizvodno-utisni par dvije bušotine: Kt-1 kao proizvodne, te Lun-1 kao utisne bušotine, u skladu s principom tehničke radne moći medija odnosno eksergije i primijenjenim prvim i drugim zakonom termodinamike.

1. UVOD

Na temelju članka 30. stavka 3. *Zakona o Vladi Republike Hrvatske* (Narodne novine, br. 101/98, 15/2000, 117/2001, 199/2003 i 30/2004), Vlada Republike Hrvatske 2006. godine donijela je zaključak kojim se podupire *Program gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak*, kao demonstracijski projekt uporabe geotermalne energije u Republici Hrvatskoj, budući da je korištenje obnovljivih izvora energije u interesu Republike Hrvatske. Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva zaduženo je da jednom godišnje izvješćuje

Vladu Republike Hrvatske o ostvarenim aktivnostima, napretku projekta i rezultatima, a uz Hrvatski fond za privatizaciju i Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost da u okviru svojih namjena i mogućnosti proračunskih sredstava osigura sufinanciranje istraživačkih studijskih i ostalih provedbenih aktivnosti glede Programa. U zaključku se također ističe kako bi INA i HEP u potpunosti financirali eksploataciju izvora geotermalne energije. Obveza INE bila bi ulaganje u bušotine (I. faza - 70 l/s iz postojeće proizvodne i utisne bušotine; II. faza – 300 l/s iz triju novih proizvodnih i triju utisnih bušotina), a obveza HEP-a ulaganje u elektranu i sustav distribucije topline (I. faza – 2 MW_e; II. faza - 4+4 MW_e na pragu elektrane) [3].

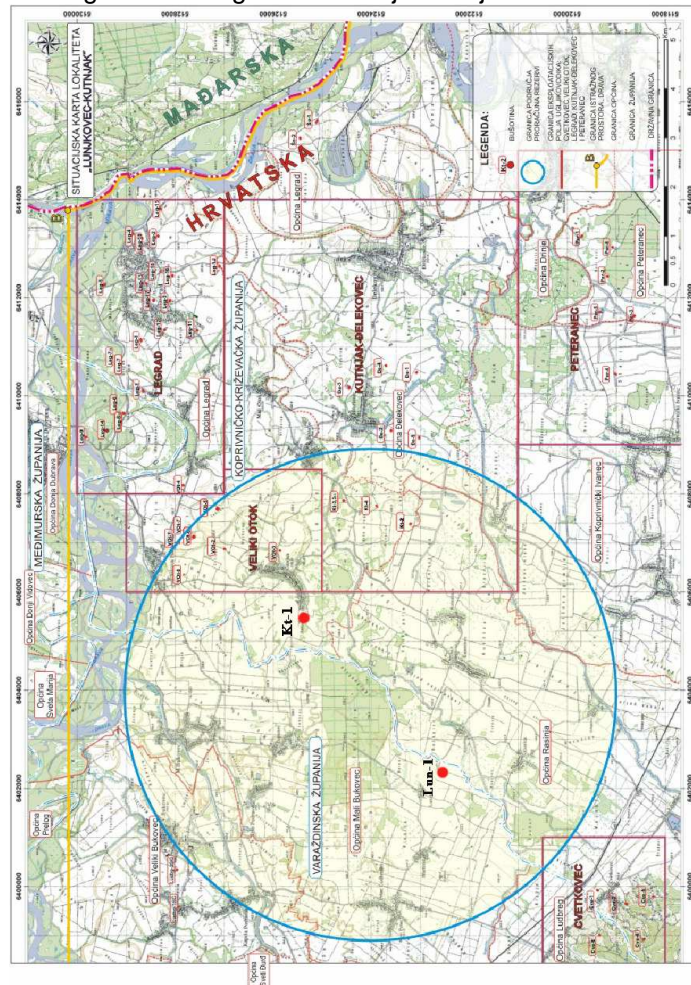
Ekonomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu dovršio je 2006. godine studiju *Koncepcija i izvodljivost programa gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec-Kutnjak* čime je predstavljen sveobuhvatni program korištenja geotermalne energije. Računskom provjerom gore navedenih podataka, te preliminarnih objavljenih podataka instalirane snage na pragu elektrane, autori ovog rada uočili su pogreške vezane uz pojmove bruto i neto električne energije koju geotermalna elektrana može isporučiti u energetska mrežu. Stoga će se u narednim poglavljima prikazati cjeloviti termodinamički proračun, koji uzima u obzir internu potrošnju samog postrojenja i energiju nužnu za utiskivanje geotermalne vode natrag u ležište, te će se tako odrediti stvarna vrijednost isporučene električne energije u mrežu.

2. ZEMLJOPISNI POLOŽAJ LEŽIŠTA I ISTRAŽNI RADOVI

Geotermalni lokalitet Kutnjak-Lunjkovec otkriven je istraživanjima nafte i plina u sjeverozapadnom dijelu istražnog prostora Drava, a izrađene su sljedeće bušotine: Lunjkovec-1 (Lun-1), Kutnjak-1 (Kt-1), Kt-2, Veliki Otok-1 (VOt-1), VOt-2 i VOt-4, koje su nabušile stijene karbonatnog sastava, glavnog kolektora geotermalnih voda. Dosadašnje analize razrade ležišta potvrđuju postojanje uvjeta za iskorištavanje geotermalne energije kaskadnim načinom iskorištavanja, od pretvorbe u električnu energiju Rankine binarnim ciklusom, do korištenja toplinske energije za industrijske potrebe i grijanje staklenika i prostora. Lokalitet je udaljen 100 km od Zagreba i desetak kilometara od Koprivnice. Proizvodna bušotina Kt-1 nalazi se u Koprivničko-križevačkoj županiji, a bušotina Lun-1 u Varaždinskoj županiji (slika 2-1). Klima je kontinentalna, srednje minimalne temperature zraka od -1,6 °C u siječnju, srednje maksimalne 21,7 °C u srpnju, te s prosječnom godišnjom temp. zraka od 10,3 °C.

Prvi istražni radovi na ugljikovodike započeli su četrdesetih godina prošlog stoljeća, a 1968. godine izrađena je prva duboka istražna bušotina Kt-1 kojom ugljikovodici nisu otkriveni. S ciljem utvrđivanja rasprostiranja Koprivničkih pješčenjaka, njihovih kolektorskih svojstava i sadržaja fluida, tijekom sedamdesetih godina izrađene su i ostale bušotine na lokalitetu. Tijekom 2004. godine u bušotini Kt-1 obavljeni su servisni radovi i ispitivanja, pri čemu je maksimalno davanje bušotine eruptiranjem bilo 55 l/s, uz temperaturu od 140°C. Za razradu istražnog geotermalnog lokaliteta trenutačno su osposobljene dvije bušotine, proizvodna Kt-1 i utisna Lun-1.

Slika 2-1: Lokalitet geotermalnog ležišta Kutnjak-Lunjkovec



3. ENERGETSKA RASPOLOŽIVOST I INSTALIRANA EKSERGETSKA SNAGA GEOTERMALNOG LEŽIŠTA

Energetska raspoloživost je maksimalna količina reverzibilnog rada koji je moguće dobiti iz geotermalnog izvora. Prema Bošnjakoviću [1], eksergija se definira kao tehnička radna moć koja se može dobiti kada se stanje radnog medija dovede povratnim načinom u mehaničku i toplinsku ravnotežu s okolinom, odnosno eksergija je maksimalni ostvarivi rad iz struje medija. Pojam radne sposobnosti pogodan je za ocjenu valjanosti kontinuiranih procesa s obzirom na preobrazbu energije. Kada procesi teku posve reverzibilno, sačuvana eksergija odvedenih tvari,

u koju treba uračunati i dobiveni mehanički rad, mora biti jednaka eksergijama dovedenih tvari, pri čemu se ne smije zaboraviti na eksergije utrošenog mehaničkog rada te izmijenjenih toplina ili drugih vrsta energije. Kad se, naprotiv, pojavljuju ireverzibilnosti, sveukupna će se eksergija sudionika tijekom procesa umanjiti, pa je to smanjenje neposredna mjera za gubitke koji se pri zadanoj okolini više nikakvim postupcima i sredstvima ne mogu naknadno ispraviti. Maksimalno potencijalan koristan rad jednak je promjeni raspoloživosti geotermalnog fluida pri uvjetima na ušću do standardnih uvjeta okoline. Izraz za eksergetsku snagu binarnog ciklusa može se prikazati pomoću sljedećeg matematičkog proračuna [4]:

$$P_{ex} = q_g \cdot (\Delta i - T_o \cdot \Delta s) \Big|_{T_o p_o}^{T_g, p_g}$$

Promjena entalpije jednaka je:

$$i - i_o = c_{pg} \cdot (T - T_o)$$

Promjena entropije:

$$s - s_o = c_{pg} \cdot \ln(T / T_o)$$

za $p = \text{const}$

$$s = \int_{T_o}^T \frac{c_{pg}}{T} dT - R \ln \frac{p}{p_o} + s_o$$

$$P_{ex} = q_g \cdot \left[c_{pg} (T - T_o) - T_o \cdot c_{pg} \ln \frac{T}{T_o} \right] = q_g \cdot c_{pg} \left(T - T_o - T_o \ln \frac{T}{T_o} \right)$$

odnosno:

$$P_{ex} = q_g \cdot c_{pg} \left[\Delta T - T_o \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T_o} \right) \right]$$

Uvođenjem matematičkog izraza:

$$\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} = \frac{\Delta T}{T_o} - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T}{T_o} \right)^2$$

slijedi da je:

$$P_{ex} = q_g \cdot c_{pg} \left[\Delta T - T_o \left(\frac{\Delta T}{T_o} - \frac{1}{2} \frac{\Delta T^2}{T_o^2} \right) \right]$$

dobiva se konačan izraz za eksergetsku snagu binarnog ciklusa:

$$P_{ex} = q_g \cdot c_{pg} \cdot \frac{\Delta T^2}{2T_o}$$

Izraz za P_{ex} predstavlja maksimalnu teoretsku snagu za binarni Rankine ciklus prema navedenim pretpostavkama. Za realne uvjete na lokaciji, T_o odgovara izlaznoj temperaturi fluida iz izmjenjivača topline ($T_{g\ out}$). Dakle, ukupna bruto instalirana snaga jednaka je eksergetskoj snazi:

$$P_{ex} = q_g \cdot c_{pg} \cdot \frac{\Delta T^2}{2T_{g\ out}}$$

Ekvivalentno pridobivenom obrascu, moguće ga je dobiti i drugačijim načinom, preko stupnjeva iskorištenja prvog i drugog zakona termodinamike [7]:

$$P_{ex} = q_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g\ in} - T_{g\ out} - T_o \cdot \ln \left(\frac{T_{g\ in}}{T_{g\ out}} \right)) \cdot \eta_{util}$$

Ukupan stupanj iskorištenja η_{util} je direktna mjera efikasnosti iskorištavanja geotermalnog resursa, odnosno to je ukupni stupanj iskorištenja cijelog postrojenja (izmjenjivač topline, turbina i generator, kondenzator, pumpe). Za konstantnu vrijednost $T_{g\ in}$, više vrijednosti η_{util} odgovaraju nižim protočnim uvjetima za danu izlaznu snagu. Drugim riječima, preko drugog zakona termodinamike djelotvornost procesa jednaka je omjeru stvarnog i reverzibilnog rada. Stupanj iskorištenja η_{util} binarnog ciklusa, prema drugom zakonu termodinamike, te termodinamički stupanj iskorištenja ciklusa η_{cycle} na primarnoj strani izmjenjivača topline, prema prvom zakonu termodinamike, mogu biti izraženi u ovisnosti o radnim uvjetima te stanju okoline [7]:

$$\eta_{util} = \frac{\Delta T \cdot \eta_{cycle}}{\Delta T - T_o \cdot \ln \frac{T_{g\ in}}{T_o}}$$

Prema prvom zakonu, termodinamički stupanj iskorištenja je omjer između ukupne snage proizvedene u ciklusu i ukupne raspoložive toplinske energije geotermalnog izvora. To znači da je za odabranu razliku temperature u izmjenjivaču topline, koja je ovisna o pretpostavljenim vrijednostima temperature fluida za optimalnu proizvodnju, η_{cycle} jednak [7]:

$$\eta_{cycle} = \frac{P_{ex}}{Q_{tot}}$$

Prvi zakon termodinamike može se napisati i kao:

$$\eta_{cycle} = \frac{P_{ex}}{Q_{tot}} = \frac{q_w \cdot \frac{c_{pg} \cdot \Delta T^2}{2 \cdot T_{g\ out}}}{q_w \cdot c_{pg} \cdot \Delta T} = \frac{\Delta T}{2 \cdot T_{g\ out}} < \eta_{carnot} = \frac{\Delta T}{T_{max}} < 1$$

Stupanj iskorištenja η_{cycle} je mjera djelotvornosti pretvorbe geotermalne topline u mehanički rad. Drugim riječima, termodinamički stupanj iskorištenja prvog zakona termodinamike η_{cycle} definiran je kao omjer proizvedene snage i ulazne toplinske energije geotermalnog fluida. Budući da Carnotov ciklus kao reverzibilan proces ima maksimalnu moguću iskoristivost, iskorištenje nereverzibilnog ciklusa η_{cycle} , za istu razliku ulazne i izlazne temperature na primarnoj strani izmjenjivača topline ΔT mora biti manje od one Carnotovog.

4. PRORAČUN EKSERGETSKE SNAGE I PROIZVEDENE ENERGIJE ZA LOKALITET KUTNJAK-LUNJKOVEC

Prema fizikalnim karakteristikama stijena, ležište Kutnjak – Lunjkovec pripada srednje temperaturnim ležištima. Proizvodni interval nalazi se na 2 167 m dubine sa statičkim tlakom od 225,6 bar i statičkom temperaturom od 145 °C. Proizvodnja geotermalne vode projektirana je kroz prstenasti prostor, između tubinga i zaštitnih cijevi, uz tlak ušća od 6 bar. Ukupno proizvedena energija iz bilančnih zaliha geotermalne vode može biti pridobivena kroz dva ciklusa izmjene topline prikazanih na sl. 6-1. Geotermalna voda temperature 140°C i protoka od 70 l/s (6050 m³/d) ulazi u prvi izmjenjivač topline elektrane gdje se temperatura smanjuje na 70°C, a nakon toga ulazi u drugi izmjenjivač topline gdje izlazna temperatura arbitrarno iznosi 30 °C. U ovom cirkulacijskom krugu toplina geotermalne vode koristi se direktnim načinom u svrhu grijanja rekreativno-hotelskog kompleksa i plastenika. S obzirom na utvrđenu količinu proizvodnje od 6050 m³/d (70 l/s) i izlaznu temperaturu od 70°C u prvom i 30 °C u drugom cirkulacijskom krugu, bit će prikazan proračun instalirane električne i toplinske snage za bušotinu Kt-1.

4.1. Prvi cirkulacijski krug-proizvodnja el. energije Rankine binarnim procesom

Teoretska eksergetska snaga Rankine binarnog ciklusa, prema izrazu za maksimalni koristan rad [4]:

$$P_{ex} = \frac{q_w \cdot c_{pg} \cdot \Delta T^2}{2 \cdot T_{g\ out}} = \frac{q_w \cdot c_{pg} \cdot (T_{g\ in} - T_{g\ out})^2}{2 \cdot T_{g\ out}}$$

$$P_{ex} = \frac{70 \cdot 4,25 \cdot (413,15 - 343,15)^2}{2 \cdot 343,15} = 2\ 124\ kW_e$$

Termodinamički stupanj iskorištenja binarnog ciklusa (dio raspoložive toplinske energije pretvorene u električnu energiju – prvi zakon termodinamike):

$$\eta_{cycle} = \frac{T_{g\ in} - T_{g\ out}}{2 \cdot T_{g\ out}} = \frac{P_{ex}}{Q_{total}}$$

$$\eta_{cycle} = \frac{413,15 - 343,15}{2 \cdot 343,15} = \frac{2124}{70 \cdot 4,25 \cdot 70} = 0,102 = 10,2\ %$$

Ukupan stupanj iskorištenja postrojenja (drugi zakon termodinamike):

$$\eta_{util} = \frac{\Delta T \cdot \eta_{cycle}}{\Delta T - T_o \cdot \ln \frac{T_{g\ in}}{T_o}}$$

$$\eta_{util} = \frac{(413,15 - 343,15) \cdot 0,102}{(413,15 - 343,15) - 283,45 \cdot \ln \left(\frac{413,15}{283,45} \right)} = 0,418 = 41,8\%$$

Prema tome, određivanje bruto instalirane snage binarnog ciklusa preko I. i II. zakona termodinamike također iznosi [7]:

$$P_{ex} = q_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g\ in} - T_{g\ out} - T_o \cdot \ln \left(\frac{T_{g\ in}}{T_{g\ out}} \right)) \cdot \eta_{util}$$

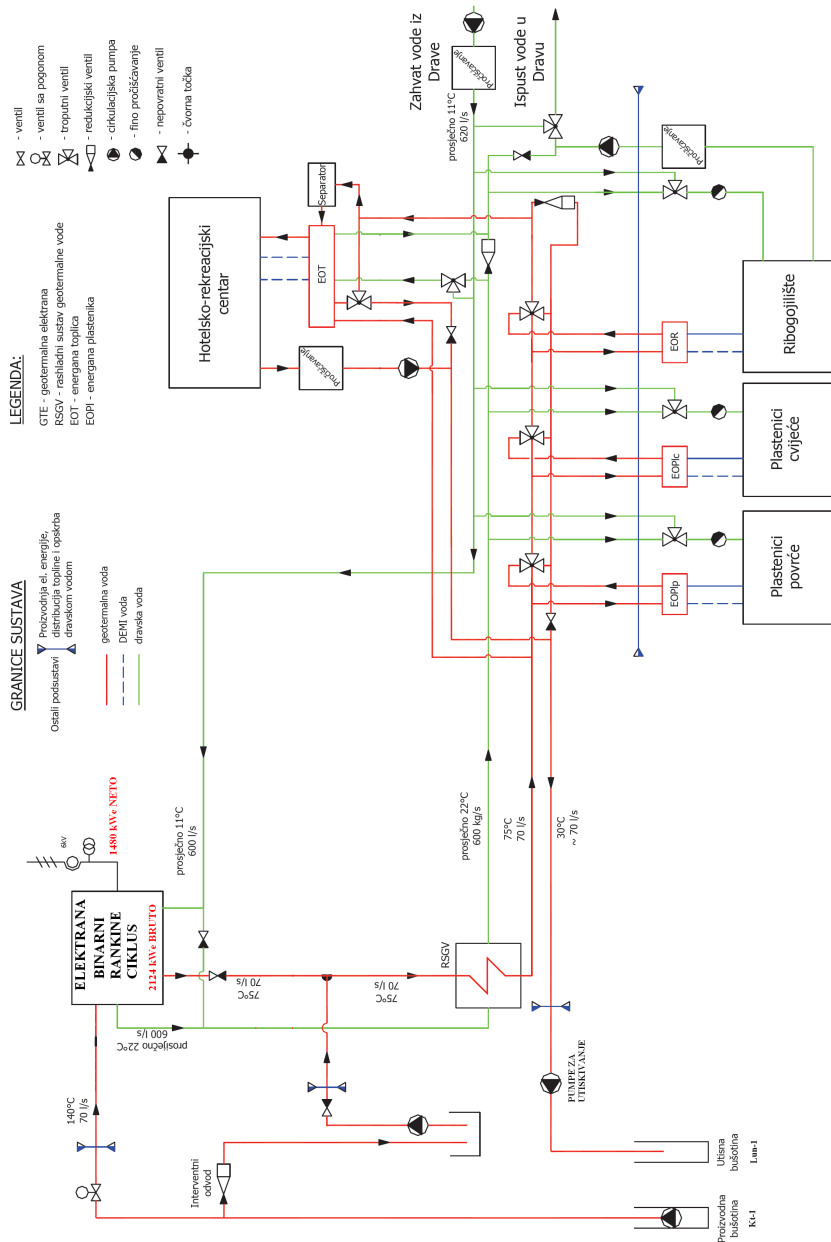
$$P_{ex} = 70 \cdot 4,25 \cdot (413,15 - 343,15 - 283,45 \cdot \ln \left(\frac{413,15}{343,15} \right)) \cdot 0,418 = 2\ 124\ kW_e$$

S obzirom na internu potrošnju električne energije binarnog postrojenja, potrošnju energije postrojenja za utiskivanje geotermalne vode u ležište, pumpnih stanica i ostalih gubitaka u ciklusu, potrebno je izraziti stvarnu instaliranu neto snagu. Prema predinvesticijskoj studiji kompanije Virkir Orkint Consulting Group Ltd, iz Reykjavika, Island, za naručitelja INA Naftaplina, obavljenoj za ležišta Kutnjak-Lunjkovec i Velika Ciglena 1995. godine, u ovisnosti o karakteristikama ležišta, lokacije i elektrane procijenjeni su sljedeći udjeli interne potrošnje, a u tablici 4-1 izračunate su vrijednosti u kW_e.

Tablica 4-1: Interna potrošnja binarnog ciklusa

	%	kW _e
	ukupne instalirane snage	
Binarni ciklus	13,16	279,5
Pumpe za utiskivanje	12,11	257,2
Bušotinske pumpe	2,76	58,6
Pumpe za toplu vodu	0,79	16,8
Ostalo	1,58	33,6
Ukupno	30,40	645,7

Slika 4-1: Tehnološka shema kaskadnog korištenja toplinske energije na lokalitetu Kutnjak-Lunjkovec



Gotovo jedna trećina instalirane snage elektrane mora se utrošiti za potrebe injektiranja geotermalne vode natrag u ležište i rad postrojenja (za isporuku u mrežu ostaje ~1480 kW_e). Ako pretpostavimo godišnji stupanj korištenja elektrane od 95%, odnosno 8320 sati rada godišnje, ukupna godišnja proizvedena električna energija iznosila bi:

$$E_{net1} = P_{ex\ net} \cdot \beta = 2124 \cdot (1 - 0,304) \cdot 8320$$

$$E_{net1} = 12\,300\,000\text{ kWh}_e$$

Ekvivalentna količina prirodnog plina koja bi se godišnje mogla uštedjeti proizvodnjom geotermalne energije jednaka je:

$$G_{gas} = E_{net} \cdot D_{sp\ gas}$$

$$G_{gas} = E_{net} \cdot \frac{1}{Q_{en\ gas} \cdot \eta_o} = \frac{E_{net}}{\frac{Q_{gas}}{3600} \cdot \eta_{oe}}$$

$$G_{gas} = \frac{12,3 \cdot 10^6}{\frac{33300}{3600} \cdot 0,33} \approx 4\,029\,000\text{ m}^3$$

4.1.1. Mogućnost proizvodnje električne energije iz plinske komponente u geotermalnoj vodi

Geotermalna voda ležišta Kutnjak-Lunjkovec sadrži također i plinsku fazu, a pri uvjetima ušća GWR (Gas-Water Ratio) iznosi 4,5 m³/m³. Najveći udio plinske smjese čine ugljični dioksid, dušik te metan/etan (12,9 %). Predinvesticijskom studijom predlažu se dva načina utiskivanja geotermalne vode natrag u ležište: a) plin i geotermalna voda se ne odvajaju, već od proizvodne do utisne bušotine kontinuirano protječe mjehuričasta faza unutar cjevovoda; b) plin se odvaja iz geotermalne vode na proizvodnoj bušotini te se na utisnoj bušotini ponovno injektira u cjevovod pomoću kompresorske stanice. Projektiranje sustava sa separiranjem plina poboljšalo bi prijelaz toplinske energije u izmjenjivačima topline, a metanska komponenta plina mogla bi se iskoristiti za proizvodnju električne energije u plinskoj turbini i pokrivanje dijela interne potrošnje postrojenja. Proizvodnja metan/etan plinske faze, uz proizvodnju vode od 6050 m³/d, iznosila bi 27225 m³/d, odnosno 0,04065 m³/s. Uz poznatu donju ogrjevnu vrijednost metana od 33,34 MJ/m³ moguće je izračunati proizvedenu električnu energiju u plinskoj turbini standardiziranog stupnja iskorištenja od 37 %.

$$P_{gas} = 33,34 \cdot q_{CH_4} \cdot \eta_{oe} = 33,34 \cdot 0,04065 \cdot 0,37$$

$$P_{gas} = 0,5014\text{ MJ/s} = 0,5014\text{ MW}_e = 501\text{ kW}_e$$

4.2. Drugi cirkulacijski krug – proizvodnja toplinske energije kaskadnim načinom korištenja

Toplinska snaga u drugom cirkulacijskom krugu može se izraziti kao:

$$P_{heat} = q_g \cdot c_{pg} \cdot (\Delta T)_2 \cdot \eta_{he} \text{ (kW}_t\text{)}$$

Uvrštenjem vrijednosti izlazne temperature na prvom izmjenjivaču topline od 70°C i temperaturnog pada do 30°C, instalirana toplinska snaga drugog cirkulacijskog kruga iznosila bi:

$$P_{heat2} = 70 \cdot 4,20 \cdot (343,15 - 303,15)_2 \cdot 0,95 = 11\,170 \text{ kWh}_t$$

Uz predviđeni godišnji stupanj korištenja ležišta od $\beta = 3\,950$ h godišnje ($\beta=45\%$), moguće je osigurati godišnju proizvodnju toplinske energije od:

$$E_{net2} = P_{heat2} \cdot \beta$$

$$E_{net2} = 11\,170 \cdot 3\,950 = 44\,121\,500 \text{ kWh}_e$$

Ušteda prirodnog plina, ekvivalentno proračunu prikazanom pri proizvodnji električne energije, uz stupanj iskorištenja plinskog kotla η_{oh} od 0,9 iznosila bi:

$$G_{gas} = \frac{44,12 \cdot 10^6}{\frac{33\,300}{3600} \cdot 0,90} \approx 5\,300\,000 \text{ m}^3$$

U slučaju korištenja električne i toplinske energije u kaskadnom nizu do temperature od 30 °C za dva cirkulacijska kruga, ukupno uštedeđena količina prirodnog plina iznosila bi 9329000 m³, odnosno oko 0,3 % godišnje ukupno utrošene količine prirodnog plina u Republici Hrvatskoj.

4.2.1. Grijanje prostora u hotelsko-rekreacijskom centru

U slučaju izgradnje zdravstveno rekreacijskog centra ili za potrebe grijanja industrijskih kompleksa, uz vremenske uvjete na lokaciji, srednje dobru toplinsku izolaciju, prilikom dimenzioniranja grijanja prostora potrebno je uzeti u obzir srednji ogrjevni faktor:

$$f = 50 \text{ W / m}^2$$

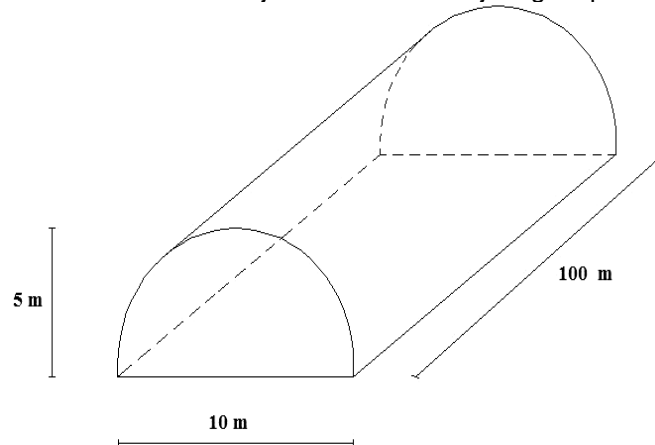
Uz proračunatu snagu drugog cirkulacijskog kruga od 11,17 MW_t, pojednostavljenim proračunom bi se mogla odrediti ukupna površina prostora koja bi se mogla grijati geotermalnom energijom na lokaciji:

$$A_{sp} = \frac{P_{heat2}}{f} = \frac{11\,170\,000}{50} \approx 223\,400 \text{ m}^2$$

4.2.2. Grijanje staklenika

U slučaju gospodarske uporabe toplinske energije u staklenicima, moguće je s obzirom na dostupnu toplinsku energiju proračunati moguću površinu staklenika na lokalitetu. Proračun staklenika zahtijeva određivanje vršne potrošnje toplinske energije u funkciji unutrašnje temperature staklenika, klimatskih uvjeta te karakteristike geotermalnog izvora. Standardni oblik i dimenzije tipskog staklenika napravljenog od dvoslojnih plastičnih masa prikazane su na slici 4-2.

Slika 4-2: Standardni oblik i dimenzije staklenika načinjenog od plastičnih masa



Proračunate maksimalne toplinske potrebe za održavanje projektirane temperature unutrašnjosti staklenika [5][6], uz vremenske uvjete na lokaciji, ovise o:

- gubicima zbog odvođenja topline kroz zidove i krov
- gubicima zbog prodora vanjskog zraka u staklenik

$$Q_{grh} = Q_{hl} + Q_{ai}$$

Toplinski gubici zbog odvođenja topline kroz stijenske staklenika Q_{ot} jednaki su zbroju toplinskih gubitaka kroz krov staklenika te prednji i stražnji zid, uzevši u obzir materijal od kojeg je staklenik napravljen (staklo, pleksiglas ili plastične mase) i brzinu vjetra:

$$Q_{hl} = (A_{roof} \cdot \Delta t_{grh} \cdot k_m) + (A_{wall} \cdot \Delta t_{grh} \cdot k_m) (W_t)$$

S obzirom na dimenzije staklenika sa slike 4-2, odabranu projektiranu unutrašnju temperaturu od 26°C (uzgoj povrća), prosječnu najnižu temperaturu sjeverozapadnog djela RH tijekom zimskog razdoblja od približno -12°C, prosječnu brzinu vjetra od 4,17 m/s te koeficijent prolaza topline za dvoslojnu plastiku od 3,80 W/m²°C, ukupni toplinski gubici kroz stijenske staklenika iznose:

$$Q_{hl} = (1\,570 \cdot 38 \cdot 3,80) + (78,5 \cdot 38 \cdot 3,80) = 238\,043\, W_t = 238\, kW_t$$

Toplinski gubici zbog prodora vanjskog zraka (Q_{ai}) ovise o broju izmjene volumena zraka po satu, zbog prodora vanjskog, hladnijeg, zraka. Broj izmjene zraka funkcija je brzine vjetra, volumena staklenika i temperaturne razlike. Za odabrani staklenik ta vrijednost iznosi 0,25 [5]:

$$Q_{ai} = Q_{ai} / h \cdot V_{grh} \cdot \Delta t_{grh} \cdot 0,102 \quad (W_t)$$

$$Q_{ai} = 0,25 \cdot 3925 \cdot 38 \cdot 0,102 = 3\,803 \, W_t = 3,8 \, kW_t$$

Dakle, ukupne toplinske potrebe tipskog staklenika jednake su:

$$Q_{grh} = Q_{hl} + Q_{ai}$$

$$Q_{grh} = 238 + 3,8 = 241,8 \, kW_t$$

Za odabrani primjer tipskog staklenika na tržištu potrebna je toplinska snaga od 241,8 kW_t , a uz dostupnu toplinsku snagu drugoga cirkulacijskog kruga od 11,17 MW_t , broj mogućih tipskih staklenika na lokaciji, dimenzija prikazanih na slici 6-2, iznosio bi:

$$n_{grh} = \frac{P_{heat2}}{Q_{grh}} = \frac{11\,170}{241,8} = 46 \text{ staklenika}$$

Izraženo u jedinicama površine, instalirana toplinska snaga drugog cirkulacijskog kruga bila bi dostatna za grijanje staklenika površine od 46 000 m^2 .

5. ZAKLJUČAK

Strategija Vlade RH je povećati udio iz novih obnovljivih izvora energije u ukupnoj energetskej bilanci na 5,8 % do 2010. godine. Između ostalog, traži se da rast potrošnje energije ne utječe na povećanje emisije štetnih plinova uz što veću primjenu obnovljivih izvora energije, što ide u prilog geotermalnoj energiji. U *Strategiji gospodarenja mineralnim sirovinama* izrađenoj za Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva RH (Izvođač: Rudarsko-geološko-naftni fakultet), načelo održivog razvitka znači međusobnu funkcionalnu povezanost varijabli koje trebaju udovoljiti tehnološkim, ekološkim, gospodarskim i sociološkim zahtjevima, a koje prvenstveno angažiraju lokalne resurse. Budući da je program gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Kutnjak – Lunjkovec u skladu s nacionalnim razvojnim prioritetima (korištenje obnovljivih izvora energije, proizvodnja hrane, zapošljavanje), Vlada Republike Hrvatske podupire razvoj ovog programa kao demonstracijskog projekta geotermalne energije u Hrvatskoj, koji bi trebao započeti tijekom 2008. godine. Proračunom instalirane snage elektrane preko termodinamičkih zakonitosti i principom kaskadnog korištenja toplinske energije prikazano je pravilno energetske projektiranje geotlačno-hidrotermalnog ležišta, čija se metoda može primijeniti i na ostala potencijalna ležišta za proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj.

Literatura

- 1) Bošnjaković, F. : *Nauka o toplini*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1962.
- 2) DiPippo, R.: *Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids*, Geothermics 33(2004), p. 565-586
- 3) Ekonomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu: *Koncepcija i izvodljivost programa gospodarske upotrebe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec-Kutnjak*, Zagreb, 2006, pp.571
- 4) Golub, M.; Kurevija, T.; Pravica, Z.: *Maximum Energy Output of Geopressured Geothermal Reservoirs in Croatia*, International Congress Energy and Environment 2006 Vol II, Opatija, Croatia, 25-27. October 2006, p.121-130
- 5) Kurevija, T.; Kos R.: *Possibility of Energy Utilization in Greenhouses at the Velika Ciglena Reservoir Field*, International Congress Energy and Environment 2004., Opatija, Croatia, 27-29. October 2004., Vol II, p. 39-46
- 6) Lund, J.W.; Lienau, P.J.; Lunis, B.C.: *Geothermal Direct-Use Engineering and Design Guidebook*, U.S. Department of Energy, Idaho Operation Office, Idaho Falls, 1998, pp.454
- 7) Milora, S. L.; Tester, J. W.: *Geothermal energy as a source of electric power*, The MIT Press, New York, 1976.

Popis korištenih oznaka

A_{roof}	- površina krova staklenika, m ²
A_{wall}	- ukupna površina prednjeg i stražnjeg zida, m ²
c_{pg}	- specifična toplina geotermalnog fluida pri zadanim uvjetima, kJ/kg K
$D_{sp\ gas}$	- specifična potrošnja prirodnog plina, kg/kWh _e
E_{net1}	- ukupna godišnje proizvedena električna energija, kWh _e
k_m	- koeficijent prolaza topline materijala u ovisnosti o brzini vjetra, W/m ² K
n_{grh}	- broj staklenika na lokalitetu
p_{gu}	- tlak geotermalne vode pri uvjetima na ušću, Pa
p_o	- tlak geotermalnog fluida pri standardnim uvjetima, Pa
P_{ex}	- eksergetska snaga geotermalnog fluida pri uvjetima na ušću, kW _e
P_{heat}	- instalirana toplinska snaga geotermalne vode, kW _t
$T_{g\ in}$	- temperatura geotermalnog fluida na ulazu u izmjenjivač topline, K
$T_{g\ out}$	- temperatura geotermalnog fluida na izlazu iz izmjenjivača topline, K
T_{gu}	- temperatura geotermalne vode pri uvjetima na ušću, K
T_o	- minimalna utisna temperatura geotermalnog fluida koja odgovara stanju okoline, odnosno srednja godišnja temperatura na lokalitetu od 10,3 °C
V_{grh}	- volumen staklenika, m ³
q_g	- maseni protok geotermalne vode, l/s
Q_{air}/h	- broj izmjena zraka po satu u stakleniku
$Q_{en\ gas}$	- energetska moć prirodnog plina, kWh/kg
Q_{gas}	- ogrjevna moć prirodnog plina, kJ/m ³
Q_{hl}	- toplinski gubici zbog odvođenja topline kroz stijenke staklenika, kW _t
Q_{tot}	- ukupna toplina geotermalnog fluida pri ulaznoj temperaturi $T_{g\ in}$, kW _t
Q_{ai}	- toplinski gubici zbog prodora vanjskog zraka, kW _t

Δi	- promjena entalpije, kJ/kg
Δs	- promjena entropije, kJ/kg K
Δt_{grh}	- razlika unutarnje temperature staklenika u odnosu na vanjsku, °C
ΔT	- razlika ulazne i izlazne temperature na primarnoj strani izmjenjivača topline binarnog ciklusa, K
$(\Delta T)_2$	- razlika temperature drugog cirkulacijskog kruga, K
$(\Delta T)_3$	- razlika temperature trećeg cirkulacijskog kruga, K
β	- godišnji stupanj korištenja energije, h/god
η_{carnot}	- stupanj iskoristivosti Carnotovog ciklusa
η_{cycle}	- termodinamički stupanj iskorištenja, prema prvom zakonu termodinamike
η_{oe}	- pretvorbeni faktor toplinske u električnu energiju
η_{oh}	- stupanj iskorištenja djelovanja plinskog kotla
η_{he}	- stupanj djelovanja izmjenjivača topline na primarnoj strani
η_{util}	- ukupan stupanj iskorištenja postrojenja, prema drugom zakonu termodinamike

UDK	ključne riječi	key words
550.367	geotermalni izvori energije	geothermal power resources
553.7	geotermalno ležište	geothermal reservoir
536.717	kružni proces	circular process
536.77	slobodna energija	free energy
.001.24	gledište tehničkog proračuna	technical calculation
.003.1	gledište ostvarivosti	feasibility viewpoint
697.1	grijanje zgrada	house heating
(497.13-21 Lunjkovec)	Hrvatska, Lunjkovec-Kutnjak	Croatia, Lunjkovec-Kutnjak

Autori

mr. sc. Tomislav Kurevija, Rudarsko geološko naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Pierottijeva 6, Zagreb

mr. sc. Maja Gregurić, ² INA d.d. SD Naftaplin, Šubićeva 29, 10000 Zagreb

Primljeno

06.12.2007.