

UPOTREBA GEOTERMALNE ENERGIJE U ORGANSKOM RANKINOVOM CIKLUSU (ORC)

THE USE OF GEOTHERMAL ENERGY IN ORGANIC RANKINE CYCLE

Milena OTOVIĆ¹, Mirko KOMATINA¹, Nedžad RUDONJA¹,
Uroš MILOVANČEVIĆ¹, Srđan OTOVIĆ¹, Snežana STEVANOVIĆ²

¹ Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

² Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd

U ovom radu je razmatrana mogućnost korišćenja geotermalne energije na teritoriji Republike Srbije u sistemima koji rade po organskom Rankinovom ciklusu (ORC) sa R245fa kao radnim fluidom. Iako je najčešći geotermalni resurs koji se može sresti na teritoriji RS voda umerene temperature, kao toplotni izvor za pogon ovog sistema usvojena je geotermalna voda sa lokaliteta Vranjska banja sa najvišom temperaturom od 96°C. Ovaj sistem je upoređen sa konvencionalnim sistemom za proizvodnju električne energije iste snage (Rankinov ciklus sa vodom kao radnim fluidom i kotlom na ugalj), u cilju izračunavanja smanjenja količine emisije CO₂ u atmosferu na godišnjem nivou usled sagorevanja konvencionalnog goriva, kao i ušteda u njegovoj potrošnji.

Ključne reči: organski Rankinov ciklus; geotermalna energija; potrošnja goriva; emisija CO₂

In this paper it is considered the possibility of using geothermal energy in the territory of Republic Serbia in the systems that run an organic Rankine cycle (ORC) with R245fa as the working fluid. Although the most common geothermal resources that can be encountered in the territory of RS is moderate water temperature, geothermal water from the locality Vranjska Banja with a highest temperature of 96°C was adopted as a heat source for driving this system. This system was compared with the conventional system for electricity production of the same power (Rankine cycle with water as the working fluid and coal-fired boiler), in order to calculate the annually reduction in CO₂ emission into the atmosphere from the burning of conventional fuel, as well as the savings in its consumption.

Key words: organic Rankine cycle; geothermal energy; fuel consumption; CO₂ emissions

1. Uvod

U uslovima velikog zagađenja okoline izazvanog povećanom emisijom štetnih gasova dolazi do efekta staklene bašte, oštećenja ozonskog omotača i značajnih klimatskih promena koje utiču na egzistenciju živog sveta. Otuda se čovečanstvo sve više okreće korišćenju „čistih“, tj. obnovljivih izvora energije, a sve češće je u upot-

rebi i otpadna toplota iz raznih industrijskih procesa za proizvodnju električne energije.

Tamo gde nije moguća upotreba električne energije iz elektroenergetske mreže, odnosno gde elektrifikacija još nije u potpunosti razvijena, potrebno je koristiti raspoložive toplotne izvore za pogon postrojenja koje bi proizvodilo električnu energiju. Kao logičan izbor nameće se korišćenje organskog Rankinovog ciklusa (ORC), ali sa fluidom koji ima nižu tačku ključanja od vode.

Sistem proizvodnje električne energije na ovaj način omogućava da se kao toplotni izvor u ORC koristi i otpadna topla voda, kao i izlazni gasovi gasnih turbina i motora, tj. moguća je kogeneracija ovog sa drugim sistemima, čime se značajno povećava energetska efikasnost ovakvih sistema. Sistemi sa ORC mogu da rade sa bilo kojim izvorom toplote sa minimalnom razlikom temperatura između izvora toplote i fluida u isparivaču od oko 65°C [1]. Takođe, postoje sistemi koji koriste toplotu proizvedenu od gasa nastalog na deponijama.

2. Opis rada sistema

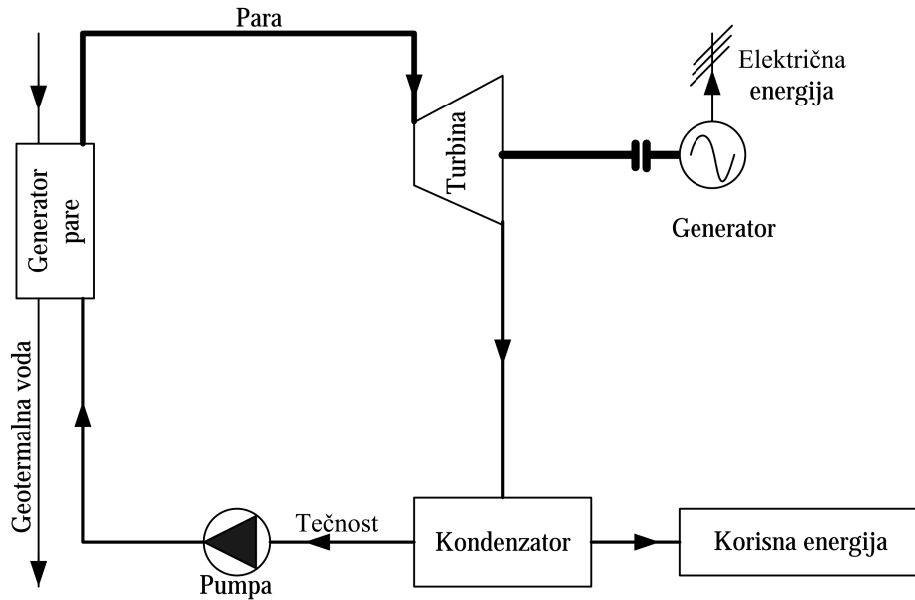
Organski Rankinov ciklus je sličan ciklusu po kome se odvija rad konvencionalnog paroturbinskog postrojenja (Rankin–Klauzijusov ciklus sa vodom kao radnim fluidom), osim fluida koji se koristi u ciklusu. Ekološki prihvatljiv organski fluid, koji na određenom pritisku ima nižu temperaturu ključanja od vode, omogućava da sistem efikasno radi na nižim temperaturama toplotnog izvora pri proizvodnji električne energije, pa je moguća upotreba biomase, industrijske otpadne toplote, geotermalne vode, solarne energije i dr. kao toplotnog izvora. Na ovaj način se niskotemperaturna toplota pretvara u koristan rad, odnosno u električnu energiju. Tipičan opseg temperatura kod sistema sa ORC je $80 - 140^{\circ}\text{C}$ [1], a neki proizvođači ovakvih sistema za komercijalnu upotrebu daju opseg $60 - 350^{\circ}\text{C}$ [2].

Organski fluid se u isparivaču (generatoru) pretvara u paru (bez pregrevanja ili sa malim pregrevanjem [2]) uz pomoć izvora toplote (slika 1). Para fluida ekspandira u turbini koja pokreće generator, a zatim se kondenzuje u razmenjivaču toplote. Kondenzat se potom pomoću pumpe vodi ka isparivaču i na taj način se ponavlja termodinamički ciklus. Toplotni izvor i ponor nisu direktno u kontaktu ni sa radnim fluidom ni sa turbinom [1, 3].

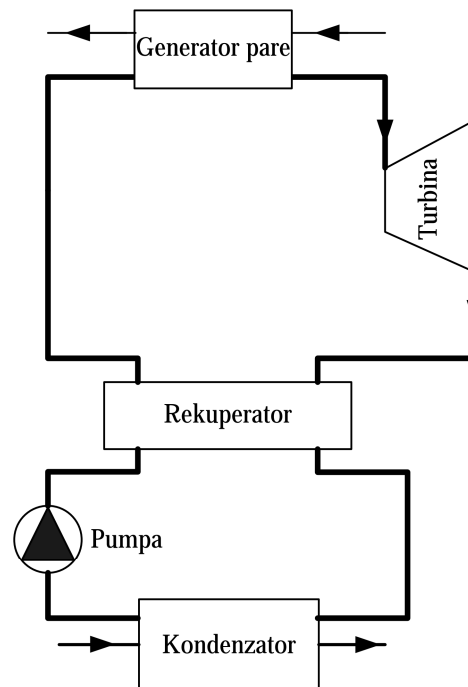
3. Izbor radnog fluida

Od ključne važnosti u ORC sistemima sa niskotemperaturnim izvorom toplote je izbor radnog fluida. Razmena toplote, zbog nižih temperatura, može biti veoma neefikasna, a zavisi od termofizičkih karakteristika fluida i radnih uslova. Da bi niskotemperaturna toplota mogla da se koristi, potrebno je da fluid ima nižu tačku ključanja od vode i nije prikladno dopustiti pregrevanje pare kao kod tradicionalnog Rankinovog ciklusa, ali je malo pregrevanje na izlazu iz isparivača ipak poželjno. U slučaju da je na kraju procesa ekspanzije fluid u stanju pregrevane pare na temperaturi višoj od temperature kondenzacije, ovaj topliji fluid se može koristiti za zagreva-

nje tečnog fluida pre ulaska u isparivač, postavljanjem razmenjivača toplote (na izlazu iz turbine, odnosno na ulazu u isparivač), što je prikazano na slici 2. Na ovaj način se smanjuje potrebna snaga toplotnog izvora, a samim tim se efikasnost ciklusa povećava [4].



Slika 1. Blok šema ORC postrojenja

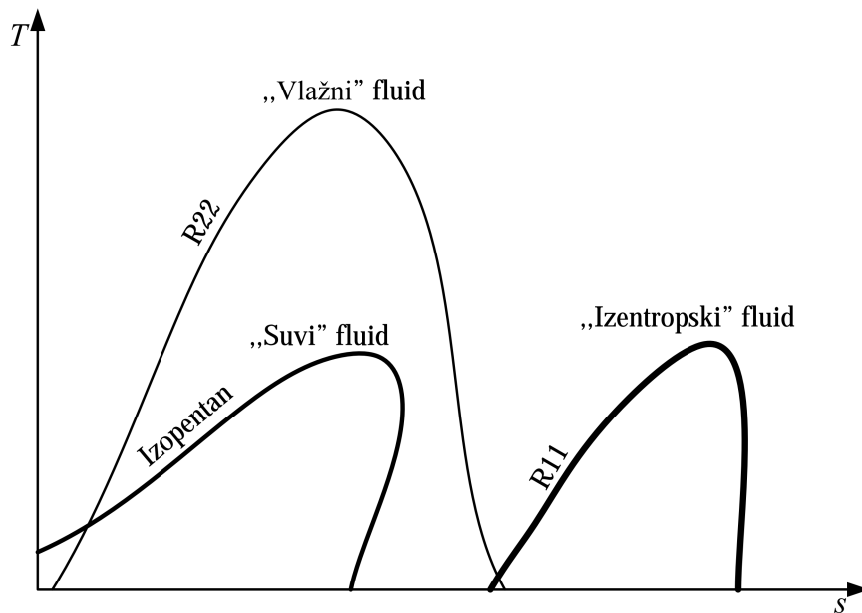


Slika 2. Šematski prikaz ORC sa rekuperatorom toplote

U cilju smanjenja potrebnog protoka fluida, veličine postrojenja, kao i snage pumpe, preporučuje se korišćenje fluida sa velikom toplotom promene faze i gustinom (apsorbuje više energije u isparivaču), pri čemu bi maksimalna temperatura korišćenog izvora toplote trebalo da je ograničena hemijskom stabilnošću radnog fluida na toj temperaturi, a potrebno je i da temperatura smrzavanja bude niža od najniže radne temperature u ciklusu. Fluid bi trebalo da je ekološki prihvatljiv (niske vrednosti ODP i GWP faktora), lako dostupan i jeftin, da ima prihvatljive radne pritiske (zbog debljine zida elemenata sistema) i ne bi trebalo da je korodivan, zapaljiv i toksičan.

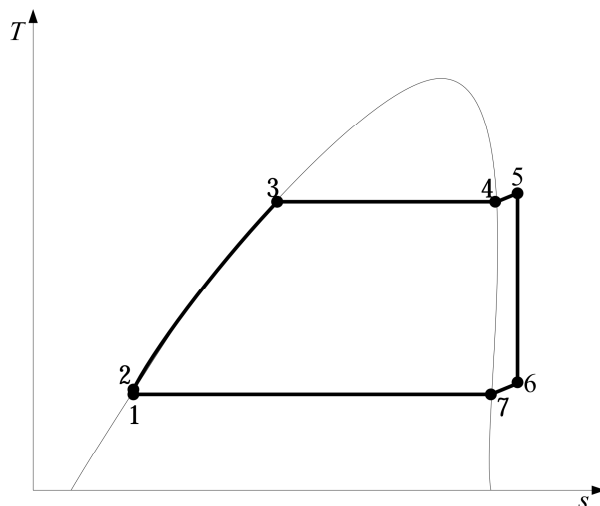
Od radnih fluida najčešće se koriste: R134a, R245fa, izobutan, pentan, propan, fluorougljenici.

Od velikog značaja za upotrebu organskih fluida je i nagib gornje granične krive radnog fluida u $T - s$ dijagramu, koji može biti pozitivan (npr. izopentan), negativan (R22) ili vertikalan (R11), pa se prema tome ovi fluidi nazivaju „suvi“, „vlažni“ i „izentropski“ fluidi respektivno (slika 3). „Vlažni“ fluidi, kao što je voda, obično moraju biti pregrevani, dok mnoge organske fluide, koji mogu biti „suvi“ ili „izentropski“, nije potrebno pregrevati [4].



Slika 3. Prikaz tri tipa fluida („vlažni“, „suvi“ i „izentropski“) u $T - s$ dijagramu

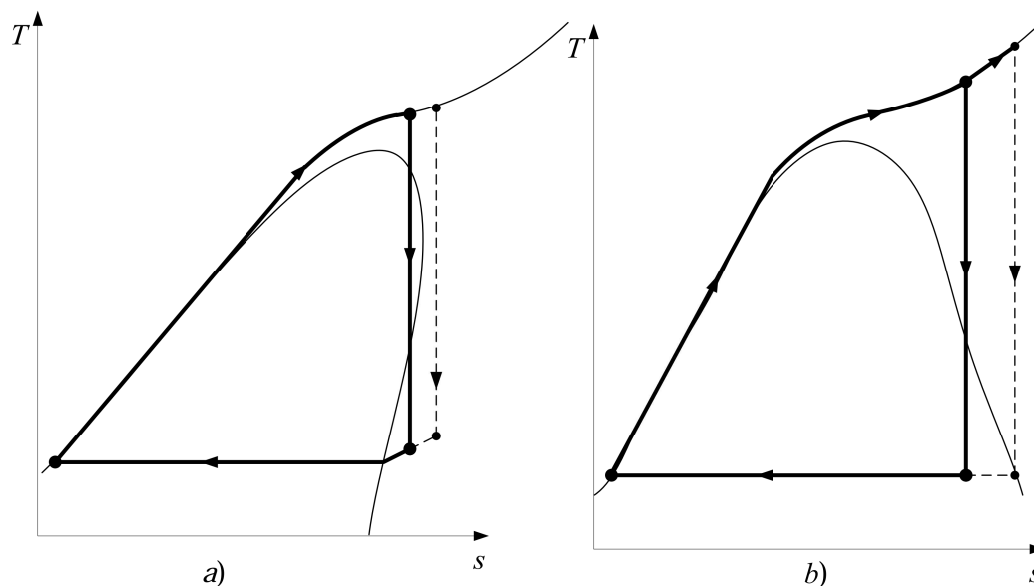
U sistemima sa ORC predlaže se upotreba „izentropskih“ ili „suvih“ fluida (slika 4), kako bi se izbeglo da tečne kapi udaraju u lopatice turbine za vreme ekspanzije. Linija zasićenja kod „izentropskih“ fluida je približno vertikalna, tako da se stanje na kraju procesa ekspanzije nalazi u oblasti suve pare, pa nije potrebno pregrevanje pare [5], a njihovo korišćenje (fluidi kao što su R236ea, R600, R600a, R227ea, R245fa) u binarnim ciklusima geotermalnih elektrana može dovesti do povećanja efikasnosti sistema [6].



Slika 4. ORC u podkritičnom području sa izentropskim fluidom u $T - s$ dijagramu

Pri korišćenju fluida u nadkritičnom području, ukoliko bi fluid bio „previše suv“, para na kraju procesa ekspanzije bila bi sa znatnim pregrevanjem (slika 5a), što predstavlja dodatno toplotno opterećenje u kondenzatoru. Takođe, postavlja se uslov da temperatura pare u nadkritičnoj oblasti bude dovoljno visoka da pri ekspanziji pare u turbini ne dođe do ulaska u vlažno područje. Kod fluida sa negativnim nagibom suvozasicene pare potrebno je pregrevanje pare fluida [4] kako bi se izbegla vlažnost pare na kraju ekspanzije u turbini (slika 5b).

Mnoge studije pokazuju da je sistem sa ORC koji radi na podkritičnim pritiscima najefikasniji kada se koriste radni fluidi sa kritičnim temperaturama, malo nižim ($10 - 40^{\circ}\text{C}$) od ulazne temperature izvora toplote [7].



Slika 5. ORC u nadkritičnom području sa suvim (a) i vlažnim fluidom (b) u $T - s$ dijagramu

U literaturi [8] je dat pregled radova sa određenim ORC (nad- ili podkritično područje), kao i razmatranim temperaturama geotermalnog izvora toplote.

4 Matematički model i rezultati proračuna

S obzirom da temperatura tla veoma varira, termin „geotermalna energija“ se koristi za širok opseg temperatura, od sobne temperature do preko 150°C [3]. Da bi se upotreba ove energije komercijalizovala, neophodan je geotermalni rezervoar koji može da obezbedi toplu vodu ili paru na potrebnom pritisku. Voda umerene temperature je najčešći geotermalni resurs koji se može sresti, a pretpostavlja se da će većina geotermalnih elektrana u budućnosti biti upravo elektrane sa binarnim ciklusom.

U nastavku rada će se razmatrati mogućnost korišćenja geotermalne vode na teritoriji Republike Srbije u sistemima sa ORC. Na osnovu literature [9] može se primetiti da je geotermalna voda sa lokaliteta Vranjska banja sa najvišom temperaturom od 96°C, pa će ova voda biti korišćena kao toplotni izvor za pogon ovih sistema. Maseni protok geotermalne vode na lokalitetu iznosi 77 kg/s, a s obzirom da se ova voda upotrebljava u industriji, poljoprivredi i balneologiji, kao i za grejanje stanova, razmotriće se maseni protok od 20 kg/s za potrebe sistema sa ORC. Geotermalna voda, predajući toplotu radnom fluidu u ORC, ohladi se do temperature od 80°C na izlazu iz isparivača. Ova voda se potom koristi za predgrevanje radnog fluida, a dalje se može koristiti u poljoprivredi i balneologiji.

Šematski prikaz ovog sistema dat je na slici 6, prema kojoj je toplota predata od strane geotermalnog izvora radnom fluidu u ORC jednaka

$$Q = m \cdot (h_1 - h_5) \quad (1)$$

dok snaga dobijena iz turbine iznosi

$$P_{tur} = m \cdot (h_1 - h_2) = m \cdot \eta_{tur} \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (2)$$

Snaga potrebna za pogon pumpe se može izračunati na osnovu izraza

$$P_{pum} = m \cdot (h_5 - h_4) = \frac{m \cdot (h_{5s} - h_4)}{\eta_{pum}} \quad (3)$$

a maseni protok radnog fluida iznosi

$$m = \frac{m_g \cdot c_p \cdot (t_{g,in} - t_{g,out})}{h_1 - h_6} \quad (4)$$

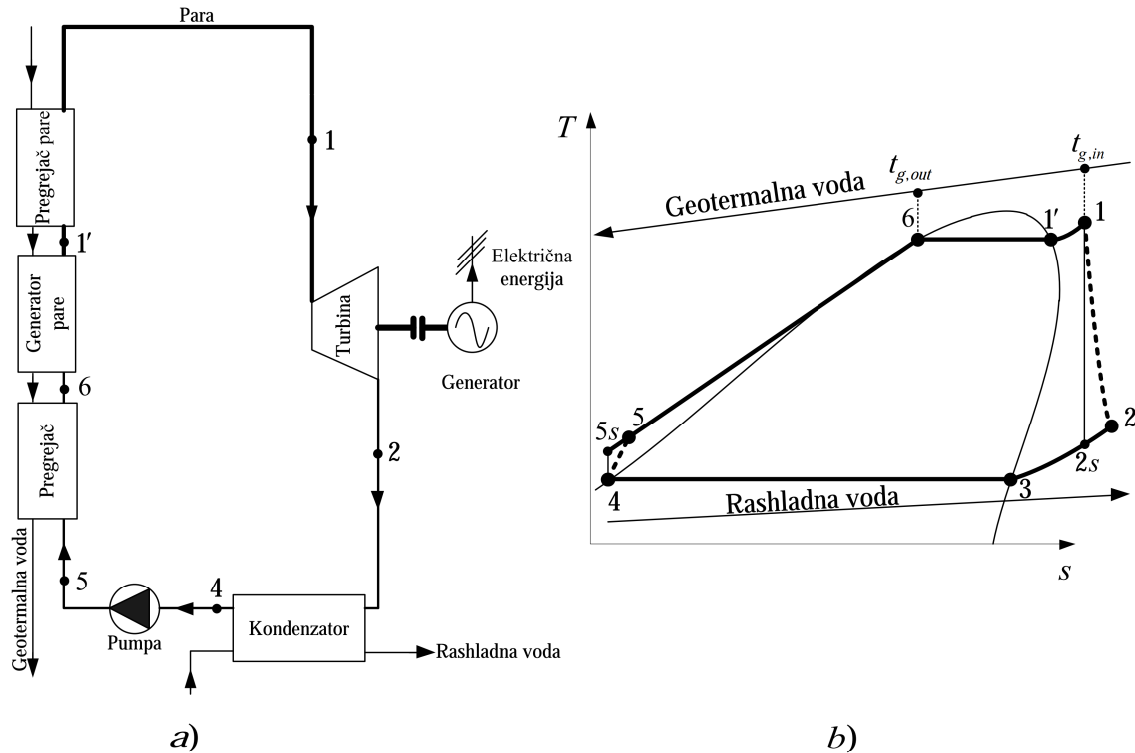
Za potrebe proračuna usvojene su iskustvene vrednosti stepena dobrote (izenropske efikasnosti) za turbinu η_{tur} i pumpu η_{pum} koje iznose 0,85 i 0,75, respektivno. Na osnovu ovoga mogu se naći vrednosti entalpija stanja 2 i 5 pomoću izraza:

$$h_2 = h_1 + \eta_{tur} \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (5)$$

$$h_5 = h_4 + \frac{(h_{5s} - h_4)}{\eta_{pum}} \quad (6)$$

Prema prethodno rečenom može se izračunati termodinamički stepen korisnosti ORC sistema [6]:

$$\eta_{td} = \frac{P_{tur} - P_{pum}}{Q} \quad (7)$$



Slika 6. Šematski prikaz ORC sistema (a) i u T - s koordinatnom sistemu sa R245fa kao radnim fluidom (b)

U prethodnim jednačinama upotrebene su sledeće oznake: m [kg/s] – maseni protok radnog fluida, h [kJ/kg] – entalpija fluida u određenom stanju, m_g [kg/s] – maseni protok geotermalnog fluida, c_p [kJ/kg·K] – specifični toplotni kapacitet geotermalnog fluida, $t_{g,in}$ i $t_{g,out}$ [°C] – temperature geotermalnog fluida na ulazu u pregrejača pare i izlazu iz isparivača, respektivno.

Razlike između temperature isparavanja radnog fluida i temperature toplotnog izvora Δt_{isp} , odnosno kondenzacije i vode za hlađenje kondenzatora (rashladne vode) Δt_{kd} , imaju veliki uticaj na termodinamičke i ekonomske performanse sistema. Iako je pogodno da ova razlika bude što manja (uobičajeno u literaturi iznosi 5°C [6]), u ovom radu će se razmatrati temperaturna razlika $\Delta t_{isp} = 6^\circ\text{C}$, odnosno $\Delta t_{kd} = 8^\circ\text{C}$. Usvaja se da je rashladna voda kojom se hladi kondenzator temperature 20°C, tako da temperature isparavanja i kondenzacije iznose $t_{isp} = 74^\circ\text{C}$ i $t_{kd} = 28^\circ\text{C}$.

S obzirom da se korišćenjem pregrejača pare može povećati predata toplota od strane geotermalnog izvora, uobičajeno se usvaja da pregrevanje pare iznosi 10°C [6], tako da je temperatura radnog fluida na izlazu iz pregrejača pare jednaka $t_{pr} = 84^{\circ}\text{C}$.

Kao radni fluid korišćen je R245fa.

Prikaz merodavnih veličina stanja, koje su dobijene na osnovu programskog paketa REFPROP [10], dat je u tabeli 1.

Tabela 1 Veličine stanja radnog fluida R245fa

	$t [^{\circ}\text{C}]$	$p [\text{bar}]$	$h [\text{kJ/kg}]$	$s [\text{kJ}/(\text{kgK})]$
1	84	6,7738	470,52	1,8129
2s	47,006	1,6670	443,61	1,8129
2	51,301	1,6670	447,65	1,8254
3	28	1,6670	425,99	1,7562
4	28	1,6670	236,91	1,1283
5s	28,179	6,7738	237,29	1,1283
5	28,275	6,7738	237,42	1,1287
6	74	6,7738	301,59	1,3267
1'	74	6,7738	459,66	1,7820

Prema jednačinama (1–4) i vrednostima iz tabele 1 dobijeno je sledeće:

maseni protok radnog fluida R245fa	$m = 7,929 \text{ kg/s}$
ukupna toplota predata radnom fluidu	$Q = 1848,378 \text{ kW}$
snaga turbine	$P_{tur} = 181,374 \text{ kW}$
snaga pumpe	$P_{pum} = 4,018 \text{ kW}$

Na osnovu ovih vrednosti i jednačine (7) termodinamički stepen korisnosti usvojenog ORC sistema jednak je $\eta_{td} = 0,096$.

5. Poređenje ORC sa konvencionalnim sistemom proizvodnje električne energije

Ukoliko bi se ovaj sistem sa ORC uporedio sa konvencionalnim sistemom za proizvodnju električne energije iste snage, može se izračunati koliko bi se smanjila količina CO_2 ispuštenog u atmosferu usled sagorevanja goriva na godišnjem nivou. Može se kao primer uzeti TEKO B Drmno (Kostolac), čija je projektna snaga 340 MW pri potrošnji lignita od 106,5 kg/s donje toplotne moći 8373,6 kJ/kg, sa sadržajem ugljenika u gorivu $C=25,38\%$. Smatra se da gubitak u kotlu iznosi 2,8%, tj. u

kotlu sagori 103,5 kg/s lignita. Oslobođena količina CO₂ po sagorelom kilogramu lignita jednaka je

$$V_{CO_2} = 1,866 \cdot \frac{C}{100} \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (8)$$

Prema tome dobijaju se sledeće vrednosti:

potrošnja lignita za 181,374 kW	0,0568 kg/s
potrošnja lignita na godišnjem nivou	1791,647 t/god
oslobođena zapremina CO ₂	0,0261 Nm ³ /s
oslobođena količina CO ₂	0,052 kg/s
oslobođena količina CO ₂ po kilogramu lignita	0,936 kg CO ₂ /kg
oslobođena zapremina CO ₂ na godišnjem nivou	824606 Nm ³ /god
oslobođena količina CO ₂ na godišnjem nivou	1630,245 t CO ₂ /god

Trebalo bi imati u vidu da gustina CO₂ pri normalnim uslovima (pritisak jednak 1 atm i temperatura od 0°C) iznosi 1,977 kg/Nm³.

6. Zaključak

Električna energija proizvedena pomoću ogranskog Rankinovog ciklusa nastaje korišćenjem decentralizovanih toplotnih izvora, što predstavlja bitnu prednost u odnosu na konvencionalne načine proizvodnje električne energije. Korišćenjem sistema sa ORC smanjuje se emisija CO₂, kao i potrošnja fosilnih goriva za proizvodnju električne energije, jer je sistem pogonjen otpadnom toplotom ili toplotom dobijenom iz obnovljivih izvora toplote. Korišćenjem geotermalnog izvora za proizvodnju električne energije od 180 kW uštedelo bi se približno 1800 tona lignita godišnje, odnosno sa aspekta zagađenja okoline u atmosferu ne bi bilo ispušteno oko 1650 tona CO₂. Naravno, ukoliko bi se radilo o većim sistemima sa ORC, ove uštede bi bile značajnije. Takođe, poželjno je da temperature geotermalnog izvora toplote budu što je moguće više, a njihova izdašnost što veća, jer će se na taj način povećati i termodinamički stepen korisnosti ciklusa.

7. Literatura

- [1] *** <http://www.infinityturbine.com/general-info.html>
- [2] *** <http://www.honeywell-orc.com/about-orc-systems/#orc-overview>
- [3] *** <http://www.renewableenergyworld.com/rea/tech/geothermal-energy/geoelectricity>
- [4] **Chen, H., D. Y. Goswami, E. K. Stefanakos**, A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14 (2010), issue 9, pp. 3059–3067

- [5] **Hettiarachchi, H. D. M., M. Golubovic, W. M. Worek, Y. Ikegami**, Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy, Volume 32* (2007), issue 9, pp. 1698–1706
- [6] **Wang, X., X. Liu, C. Zhang**, Parametric optimization and range analysis of Organic Rankine Cycle for binary-cycle geothermal plant, *Energy Conversion and Management, Volume 80* (2014), pp. 256–265
- [7] **Toffolo, A., A. Lazzaretto, G. Manente, M. Paci**, A multi-criteria approach for the optimal selection of working fluid and design parameters in Organic Rankine Cycle systems, *Applied Energy, Volume 121* (2014), pp. 219–232
- [8] **Astolfi, M., M. C. Romano, P. Bombarda, E. Macchi**, Binary ORC (organic Rankine cycles) power plants for the exploitation of medium-low temperature geothermal sources – Part A: Thermodynamic optimization, *Energy, Volume 66* (2014), pp. 423–434
- [9] **Martinović, M., S. Andrejević, A. Saljnikov, M. Komatina, N. Rudonja, Z. Stevanović**, Hidrogeotermalni resursi i toplotne pumpe – toplifikaciona alternativa Srbije, *Zbornik radova sa 39. Kongresa o KGH*, SMEITS, Beograd, Srbija, 2008, strana 314–320
- [10] ***REFPROP, NIST Standard Reference Database 23, Version 7.0, Beta version 7/30/02