

KASKADNA GEOTERMALNA TOPLOTNA PUMPA – TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA I EKOLOŠKI UTICAJ

CASCADE TYPE GEOTHERMAL HEAT PUMP – ECONOMIC ANALYSIS AND ENVIRONMENTAL IMPACT

D. GORIČANEC, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Maribor,
N. RUDONJA i M. KOMATINA, Mašinski fakultet, Beograd,

S. ANDREJEVIĆ, “Klima”, Smederevo,

J. KROPE, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Maribor, Slovenija, i
I. ZLATANOVIC, Poljoprivredni fakultet, Beograd

Razmotrena je ekonomska i ekološka opravdanost iskorišćenja toplote niskotemperaturne geotermalne vode za potrebe centralnog grejanja stanova uz pomoć toplotne pumpe. Uređaj se sastoji iz dve jednostepene toplotne pumpe koje rade u kaskadnoj sprezi.

Proračun prvog stepena toplotne pumpe je sproveden za rashladni fluid R407c; u drugom stepenu koristi se fluid R600a. Osnovne radne karakteristike toplotne pumpe date su u obliku dijagrama. Za eksploataciju toplote iz geotermalne vode temperature +45°C, izvršena je tehnno-ekonomska analiza investicionih troškova toplotne pumpe, korišćenjem metode neto prisutne vrednosti. U okviru istraživanja, određeni su koeficijent isplativosti i period vremena nakon kojega će investicija otplatiti samu sebe. U radu je razmotren i uticaj predloženog tehničkog rešenja na okolinu i konstatovana je opravdanost ovakve eksploatacije hidrogeotermalne energije.

Economic and environmental feasibility analysis was performed regarding the use of heat of the low-temperature geothermal water for the residential central heating by using a heat pump. The unit consists of two single-stage heat pumps operating in a cascade connection. The calculation of the heat pump's first degree was made for the refrigerant R470c; in the second stage, the R600a fluid was used. The basic operation characteristics of the heat pump were presented in the form of diagrams. As for exploitation of heat from geothermal water of 45°C, a technological and economical analysis was performed regarding the heat pump investment costs, by using the net present value. Within the research, the payback coefficient and investment payback time period were determined. The environmental impact of the proposed technical solution was discussed and the described use of hydro-geothermal energy was found justifiable.

Ključne reči: geotermalna energija; toplotna pumpa; koeficijent grejanja; rashladno sredstvo; ekonomija; životna sredina

Key words: geothermal energy; heat pump; COP; coolant; economy; environment

1. Uvod

Odluka da se otpočne sa upotrebom geotermalne energije doneta je u gradiću Lendava u Sloveniji, gde je bušenjem dobijen izvor Le-2g. Izdašnost (protok) ovog

geotermalnog izvora je 20 kg/s na pritisku vode od $3 \cdot 10^5$ Pa i temperaturi vode od 62°C. Planirano je da se geotermalna voda koristi za daljinsko grejanje zgrada u centru. Tekući plan grejanja uključuje samo korišćenje toplote geotermalne vode za daljinsko grejanje zgrada. Pomoću razmenjivača, toplota primarnog geotermalnog kola predaje se vodi sekundarnog kola daljinskog grejanja sa temperaturskim režimom 40°C/60°C.

Temperatura iskorišćene geotermalne vode je 42°C, što je još uvek dovoljno za vodu da se iskoristi za visokotemperatursko centralno grejanje uz pomoć toplotne pumpe. Cilj ovog istraživanja je određivanje isplativosti upotrebe toplotne pumpe unutar sistema daljinskog centralnog grejanja, gde je toplotni izvor niskotemperaturska geotermalna voda. Na taj način, toplotna energija geotermalne vode može se maksimalno iskoristiti pre nego što se vrati u zemlju kroz reinjekcioni bunar. Pomoću reinjekcije iskorišćena geotermalna voda se ponovo zagrejava u dubokim geološkim slojevima.

Većina zgrada u centru Lendave je stara, sa lošom toplotnom izolacijom. Za njihovo grejanje koristi se visokotemperaturski radijatorski sistem. Samo nekoliko novih zgrada ima niskotemperaturske sisteme podnog grejanja. Zbog zahtevane visoke temperature sekundarnog nosioca toplote, javlja se i potreba za dvostepenom kaskadnom toplotnom pumpom za centralno grejanje. Toplotni izvor jeste iskorišćena geotermalna voda temperature 42°C.

2. Toplotna pumpa

Za potrebe centralnog grejanja koristi se jedna od tri osnovne kombinacije toplotnih pumpi:

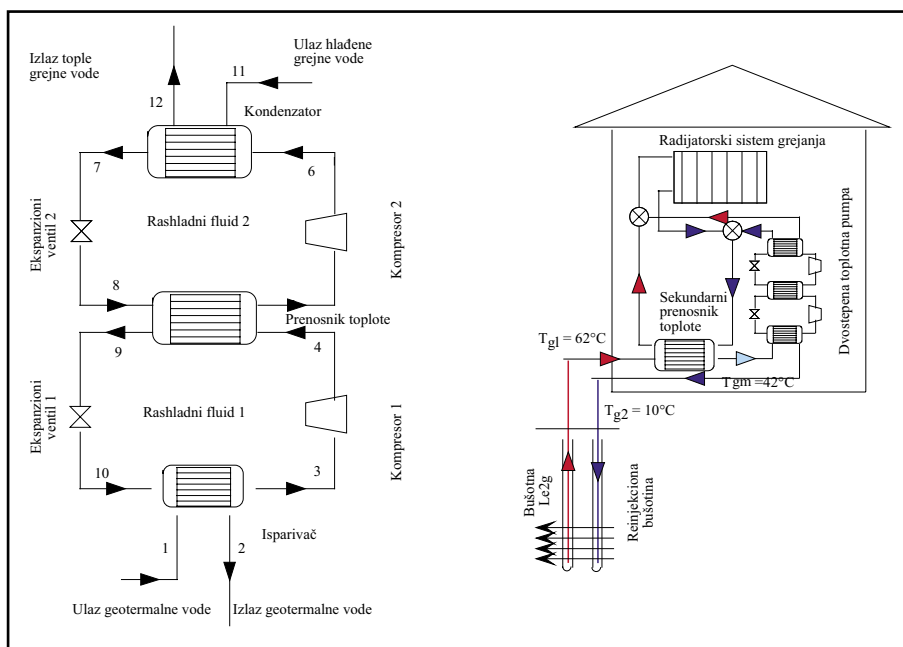
- jednostepena toplotna pumpa,
- dvostepena TP sa odvajačem kondenzata, i
- dvostepena TP sa prenosnikom toplote.

Ako se u sistemu centralnog grejanja iskoristi jednostepena toplotna pumpa, temperatura sekundarnog nosioca može dostići najviše 55°C, što je prenisko za potrebe centralnog grejanja. Zato se jednostepene toplotne pumpe prvenstveno koriste za niskotemperaturske sisteme grejanja, i to sa temperaturom sekundarnog nosioca do 45°C. U visokotemperaturnim sistemima centralnog radijatorskog grejanja, temperaturni nivo sekundarnog nosioca mora biti viši od 60°C.

Dvostepena kaskadna toplotna pumpa sa odvajačem kondenzata mogla bi – zajedno sa odgovarajućim rashladnim fluidom – da se koristi u sistemu visokotemperaturskog grejanja. Problem je u činjenici da je teško naći rashladni fluid pomoću kojeg bi se koristila toplota geotermalne vode hladeći je do 10°C i simultano doseći visoku temperaturu u kondenzatoru višeg stupnja toplotne pumpe.

Zbog tog ograničenja preduzeto je istraživanje bazirano na dvostepenoj kaskadnoj toplotnoj pumpi sa prenosnikom toplote, šematski prikazanoj na slici 1. Ovaj uređaj se sastoji od dve jednostepene toplotne pumpe TP spojene prenosnikom toplote. Prenosnik toplote između dvaju stupnjeva predstavlja kondenzator za viši stupanj i isparivač za niži stupanj kaskade.

Korišćenje dvostepenih TP sa prenosnikom toplote preporučuje se u okviru postojećeg sistema daljinskog centralnog grejanja. Toplotni izvor za toplotne pumpe biće geotermalna voda ($T_{gm} = 42^\circ\text{C}$). Princip je prikazan na slici 1. Takav sistem omogućuje korišćenje toplote geotermalne vode do temperature 10°C [5, 6].



Slika 1. Centralno grejanje koje koristi dvostepenu toplotnu pumpu

3. Proračun dvostepene toplotne pumpe

Isprobavanjem kombinacija rashladnih fluida u prvom i drugom stepenu toplotne pumpe, najbolje radne karakteristike su postignute – kombinacijom rashladnog fluida R407c u prvom stepenu kaskade i rashladnog fluida R600a – u drugom. Pri izboru rashladnog fluida dosta pažnje je bilo posvećeno fizičko-hemijskim svojstvima rashladnog fluida, ekološkoj prihvatljivosti i trendovima korišćenja rashladnih fluida poznatih proizvođača toplotnih pumpi. R407c je smeša sledećih rashladnih fluida: 23% R32, 25% R125 i 52% R134a [1, 3].

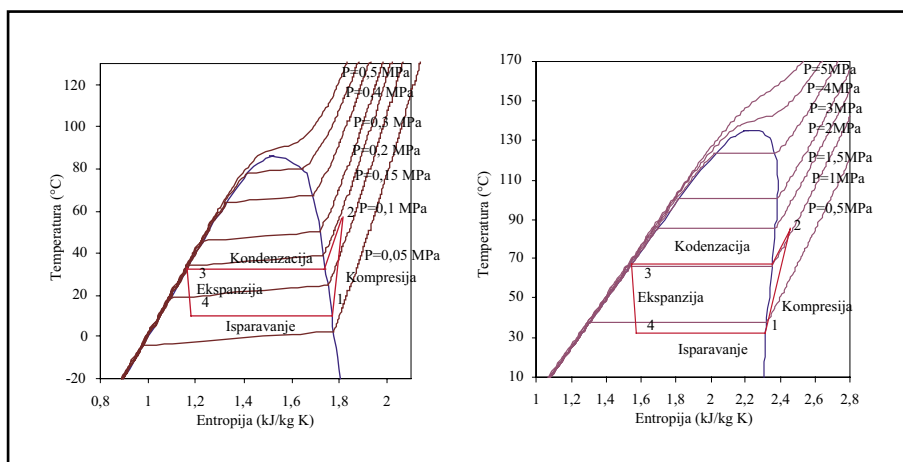
Termodinamički kružni proces za svaki stepen toplotne pumpe je pokazan u T-s koordinatama na slici 2. Rezultati proračuna toplotne pumpe su dati u obliku dijagrama na slici 3, gde je data zavisnost toplotnog fluksa koji se dovodi/odvodi (u isparivaču/kondenzatoru) i snaga kompresora oba stepena, od izlazne temperature geotermalne vode.

Zavisnost faktora grejanja je prikazana na slici 3. Kada je izlazna temperatura geotermalne vode 10°C i kad temperatura vode za potrebe grejanja iznosi 77°C, faktor grejanja ima vrednost 3,5.

4. Tehno-ekonomska analiza

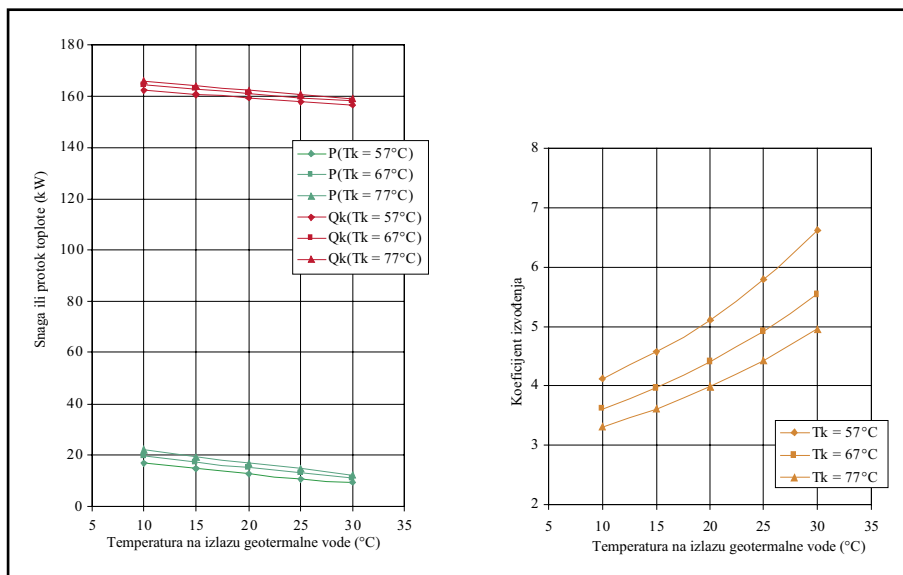
Svaka ekonomska analiza računa razmatra dve osnovne materijalne (finansijske) veličine:

- investicione troškove koji predstavljaju novac potreban za realizaciju projekta, i
- profit (razlika između prihoda i eksploatacionih troškova).



Slika 2. T-s dijagram rada drugog stepena toplotne pumpe sa rashladnim fluidom R600a

Metoda neto sadašnje vrednosti se veoma često koristi u toku pripreme investicionih projekata u kasnijim fazama razvoja projekta, kada posedujemo dovoljno podataka. NSV predstavlja zbir sadašnjih vrednosti svih gotovinskih tokova. Pravilo koje važi prilikom odlučivanja o svakoj pojedinoj investiciji na bazi NSV glasi – investicija je prihvatljiva kada je NSV veće od nule, a neprihvatljiva kada je NSV manje od nule (ima negativnu vrednost).



Slika 3. Toplotni fluks, snaga kompresora i faktor grejanja dvostepene toplotne pumpe

Investicioni troškovi se mogu pokriti iz sopstvenih sredstava, bankarskim kreditima, ili njihovom kombinacijom. Sadašnja vrednost investicionih troškova C_{INV} određuje se diskontovanjem godišnjih instalacionih troškova prema jednačini:

$$C_{INV} = C_0 + \sum_{j=0}^N \frac{a_n \cdot C_{TC}}{(1+r)^j} \quad (1)$$

Godišnji instalacioni faktor a_n određuje se kao:

$$a_n = \frac{r_a \cdot (1+r_a)^n}{(1+r_a)^n - 1} \quad (2)$$

Troškovi održavanja toplotne pumpe, odnosno C_S , procenjuju se na 2% nabavne cene. NSV ovih troškova, uzimajući u obzir inflaciju, određuje se iz:

$$C_S = \sum_{j=0}^N \frac{0,02 \cdot C_{TC} \cdot (1+r_j)^j}{(1+r_j+r)^j} \quad (3)$$

NSV troškova električne struje odnosno električne energije (za pogon kompresora) C_{PS} određuje se uz pomoć jednačine:

$$C_{PS} = \sum_{j=0}^N \frac{C_E \cdot P_E \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot (1+r_j)^j}{(1+r_j+r)^j} \quad (4)$$

NSV prihoda od toplote “preuzete” od okoline C_P , uzimajući u obzir inflaciju i diskontnu stopu godišnjih instalacionih troškova, određuju se kao:

$$C_P = \sum_{j=0}^N \frac{Q_k \cdot C_T \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot (1+r_j)^j}{(1+r_j+r)^j} \quad (5)$$

NSV prihoda od toplote “preuzete” od okoline, uzevši u obzir troškove – investicione, održavanja, i električne energije za pogon kompresora, računa se prema:

$$C = C_P - (C_{INV} + C_S + C_{PS}) \quad (7)$$

Uspešnost investicije meri se koeficijentom profitabilnosti:

$$K = \frac{C_P}{C_{INV} + C_S + C_{PS}} \quad (8)$$

Koeficijent profitabilnosti K je količnik NSV prihoda od prodaje toplote i zbra troškova NSV. Drugi kriterijum uspešnosti investicije je dužina perioda za koji će se investicija otplatiti [7, 8].

Uzet je primer procene isplativosti dvostepene kaskadne toplotne pumpe za centralno grejanje. Rezultati računa neto sadašnje vrednosti (NSV) toplotne pumpe koja se koristi da geotermalnu vodu ohladi do 10°C, prikazani su u tabeli 1.

Na bazi neto sadašnjih vrednosti sračunali smo koeficijent profitabilnosti i broj godina za koje će se investicija otplatiti. Dobijene su sledeće vrednosti: koeficijent profitabilnosti = 1,19 – a investicija će se vratiti za 3,2 godine. Slika 9 prikazuje odnos NSV izlazne temperature iskorišćene geotermalne vode.

Tabela 1. Neto sadašnje vrednosti (NSV)

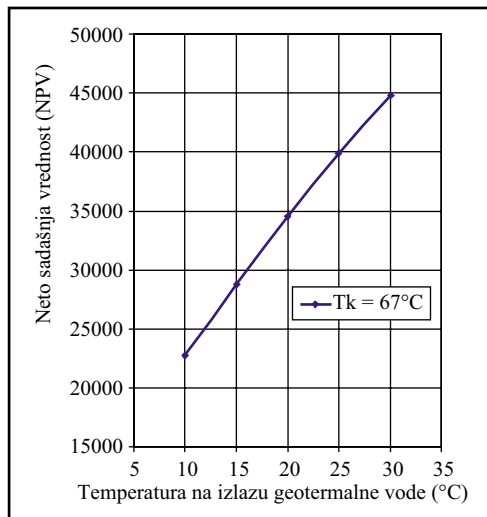
N (god.)	Cinv evro/god.	Cps evro/god.	Cp evro/god.	NSV evro/god.
0	8000,0	0,0	0,0	-8000,0
1	2661,0	7324,0	12300,0	1791,2
2	2487,0	6850,0	11500,0	1673,1
3	2324,0	6407,0	10760,0	1570,8
4	2172,0	5993,0	10060,0	1466,5
5	2030,0	5605,0	9411,0	1375,2
10	1448,0	4012,0	6736,0	989,1
15	0,0	2871,0	4821,0	1744,7
20	0,0	2055,0	3451,0	1249,0
NSV	27998,0	83494	140197,0	22733,9

5. Zaključak

Tehno-ekonomski proračun pokazuje da je opravdano iskorišćavanje niske temperature geotermalne energije za daljinsko centralno grejanje. Korišćenje toplotne pumpe je opravdano u svakom pojedinačnom slučaju gde je toplotna energija geotermalne vode već jednim delom prebačena u sekundarni nosilac.

Visokotemperaturno radijatorsko grejanje u većini zgrada zahteva da temperatura nosioca toplote bude dovoljno visoka. To nije moguće postići koristeći jednostepenu toplotnu pumpu, pa se mora koristiti dvostepena toplotna pumpa sa predajnikom toplote, koja omogućava korišćenje različitih rashladnih fluida višeg i nižeg stepena kaskade odnosno kompresije.

Proračuni različitih kombinacija toplotne pumpe su pokazali da se najbolji rezultati postižu sa kombinacijom rashladnog fluida R407c



Slika 4. Odnos između NSV i T_{izlaz}

u prvom stepenu i rashladnog fluida R600a u drugom. Faktor grejanja je između 3,5 i 4,4, pri izlaznoj temperaturi geotermalne vode od 10°C.

Izvršena je tehno-ekonomska analiza potencijalnih investicija. Korišćena je metoda neto sadašnje vrednosti (NSV). Tehno-ekonomski proračun pokazuje da je investiranje u toplotnu pumpu opravdano, pošto se investicija vraća za samo nekoliko godina.

Zahvalnost

Ovo istraživanje je delimično finansirano od strane projekta EUREKA!4117 i – ministarstava nauke Slovenije i Srbije. Autori su zahvalni prof. Miodragu Mesaroviću i prof. Đorđu Koziću, za savete i podršku koju nam permanentno i nesebično pružaju.

Literatura

- [1] **Dincer, Ibrahim**, *Refrigeration Systems and Applications*, John Wiley & Sons, London, 2003.
- [2] **Stoecker, W. F.**, *Industrial refrigeration handbook*, Updated and revised edition of: Industrial refrigeration. McGraw-Hill Co., 1998.
- [3] **Hirrschberg, H. G.**, *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau*, Springer Verlag, 1999.
- [4] www.viessman.de
- [5] **Vasić, V., J. Krobe, D. Goričanec**, *An analysis of energy flows in absorption chiller*, *Strojarski vestnik*, 2000, Vol. 46, iss. 8, pp. 517–524.
- [6] **Torhac, E., L. Crepinski, J. Krobe, D. Goričanec, A. Saljnikov, R. Stipić, Đ. Kozić**, *Profitability evaluation of the heating system using borehole heat exchanger and heat pump*, *IASME Transactions*, 2005, vol. 2, iss. 8, pp 1381–1388.
- [7] **Kozić D., J. Krobe, D. Goričanec**, *Optimization of Large Heat Pumps in Long Distance Transit Heat Transportation*, *International Journal of Power & Energy Systems*, Vol. 14. No.1, 1994.
- [8] **Kurtz, R.**, *Handbook of engineering economics*, Guide for engineers, technicians, scientists, and managers, McGraw-Hill Company, 1984.

kgH