

DRAGAN M. PEJIĆ¹
DRAGAN T. STOJILJKOVIĆ¹
STANIŠA T. STOJILJKOVIĆ¹
MAJA ĐUROVIĆ PETROVIĆ²
NEBOJŠA MITIĆ¹

¹Tehnološki fakultet,
Leskovac

²IHTM, Beograd,
Srbija i Crna Gora

STRUČNI RAD

662.997 + 621.039.534.25:66.012.3

GEOTERMALNI REKUPERATOR TOPLOTE SA KOAKSIJALNIM TOKOM FLUIDA

Polazeći od energetskog bilansa izmenjivača toplote sa koaksijalnim tokom i pretpostavke stacionarnog režima rada postavljen je matematički model izmenjivača. Na osnovu modela određena je izlazna temperatura sekundarnog kruga u funkciji geometrijskih dimenzija izmenjivača, koeficijenta prolaženja toplote kroz površine za razmenu toplote, srednjih masenih izobarskih specifičnih toplota fluida i masenih protoka. Kao poznate veličine usvojene su ulazna temperatura sekundarnog kruga izmenjivača i temperatura geotermalne vode na izlazu iz bušotine. Takođe, izvršena je i analiza uticaja promena vrednosti pojedinih faktora na temperaturu vode sekundarnog dela. Pri svim razmatranjima korišćeni su parametri (protok, temperatura) duboke bušotine B-4 u Sijarinskoj Banji.

Imajući u vidu rastuće potrebe savremenih društava za energijom i ograničenost konvencionalnih izvora energije razumljivo je sve veće interesovanje za obnovljivim i alternativnim izvorima. Veliki broj istraživača bavi se proučavanjem mogućnosti korišćenja geotermalne energije. Nowak i Stachel u svom radu [1] razmatraju dvo-bušotinske sisteme geotermalnih toplana; Kujawa i Nowak se u radu [2] bave toplotnim pumpama sa vertikalnim geotermalnim izmenjivačima; Zhu i Zhang su u radu [3] dali optimizaciju projektovanja pločastih izmenjivača za potrebe grejanja geotermalnom energijom; tu su još radovi Carotenuta i Casarosa [4], Chuanshana [5], Sannera, Mandisa i Saura [6] i Barbiera [7],...

U ovom radu razmatran je izmenjivač toplote sa koaksijalnim cevima u sekundarnom delu koje su postavljene direktno u bušotinu tako da geotermalna voda opstrujava oko spoljne cevi.

Na primeru geotermalne bušotine u Sijarinskoj banji, Republika Srbija, izvršena je analiza uticaja pojedinih veličina na teorijsku efikasnost (inkrustacija nije razmatrana) ovako koncipiranog izmenjivača i postavljen je odgovarajući matematički model.

MATEMATIČKI MODEL IZMENJIVAČA

Jednačina energetskog bilansa izmenjivača toplote, ako nema promene agregatnog stanja fluida, za elementarnu dužinu aparata, glasi

$$W_h \cdot c_{ph} \cdot (T_{h2} - T_{h1}) + W_c \cdot c_{pc} \cdot (T_{c2} - T_{c1}) = 0, \quad (1)$$

gde je:

c_{pc} i c_{ph} – srednja masena izobarska specifična toplota fluida u razmatranom temperaturnom intervalu,
 w – maseni protok fluida,
indeksi c i h – hladniji i topliji fluid, respektivno,
indeksi 1 i 2 – ulaz i izlaz.

*Rad je saopšten na VI Simpozijumu "Savremene tehnologije i privredni razvoj", Leskovac, oktobar 21–22, 2005

Adresa autora: D. Pejić, Tehnološki fakultet, Bulevar oslobođenja 124, 16000 Leskovac, Srbija i Crna Gora;
E-mail: gagip@ptt.yu

Rad primljen: Septembar 12, 2005

Rad prihvaćen: Oktobar 4, 2005

Pod pretpostavkom stacionarnog režima rada, na elementarnoj dužini izmenjivača dy , kojoj odgovara elementarna površina za toplotnu razmenu dA , toplotni protok je

$$\delta \dot{Q} = k \cdot (T_h - T_c) \cdot dA, \quad (2)$$

gde je k – koeficijent prolaženja toplote (termička provodnost).

Treba napomenuti da modelom neće biti obuhvaćen uticaj inkrustacija na površinama za razmenu toplote.

Ako dA napišemo kao

$$dA = \pi \cdot D \cdot dy, \quad (3)$$

jednačina (2) postaje

$$\delta \dot{Q} = k \cdot \pi \cdot D \cdot (T_h - T_c) \cdot dy.$$

Posmatrajmo geotermalni rekuperator toplote sa koaksijalnim tokom fluida prikazan na slici 1. Rekuperator sa koaksijalnim tokom, prečnika spoljne cevi D i unutrašnje cevi d , postavljen je u bušotinu. Oko njega opstrujava geotermalna voda temperature T_g (w_g – maseni protok). Sve veličine vezane za strujanje u bušotini imaju indeks g , strujanje u izmenjivaču u prostoru između cevi – indeks 1 i u unutrašnjoj cevi – indeks 2 .

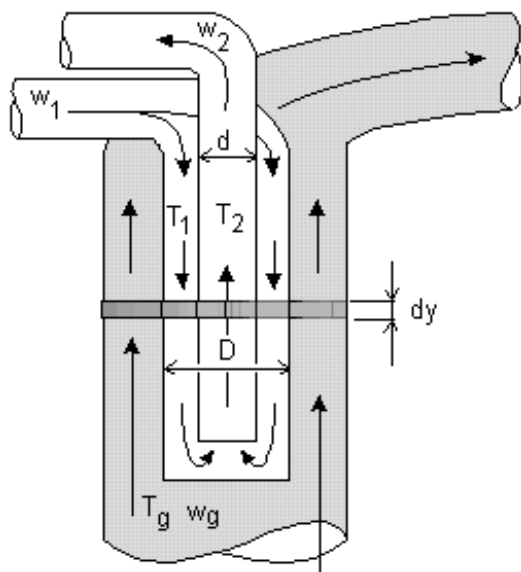
Primenimo li jednačine (1) i (2) na toplotni protok kroz spoljnu i unutrašnju cev izmenjivača na elementarnoj dužini dy , dobićemo:

$$w_g \cdot c_{pg} \cdot dT_g = k_s \cdot (T_g - T_1) \cdot dA_s$$

$$w \cdot c_p \cdot dT_2 = k_u \cdot (T_2 - T_1) \cdot dA_u$$

$$w \cdot c_p dT_1 = k_s \cdot (T_g - T_1) \cdot dA_s + k_u \cdot (T_2 - T_1) \cdot dA_u.$$

Primenom jednačine (3) na prethodni sistem, uz uvođenje toplotnog kapaciteta geotermalne vode (c_g) i vode sekundarnog kruga (c), tj. $c_g = w_g \cdot c_{pg}$ i $c = w \cdot c_p$, dobija se



Slika 1. Geotermalni rekuperator sa koaksijalnim tokom
Figure 1. Geothermal heat exchanger with coaxial flow

$$\frac{dT_s}{dy} = \frac{a_s \cdot (1-b)}{b} \cdot T_s - a_u \cdot T_u$$

$$\frac{dT_u}{dy} = -a_s \cdot T_s$$

U prethodnoj jednačini uvedene su smene:

$$\frac{k_s \cdot \pi \cdot D}{c} = a_s, \quad \frac{k_u \cdot \pi \cdot d}{c} = a_u, \quad \frac{c_g}{c} = b,$$

$$T_g - T_1 = T_s \quad T_2 - T_1 = T_u.$$

Obeležavajući razliku temperatura na početku izmenjivača ($y=0$) sa $T_u = \Delta t$, $T_s = \Delta T$ i znajući da je na maksimalnoj dubini L izmenjivača u bušotini $T_u = 0$, uz smene

$$p = \frac{r_2 \cdot b - a_s \cdot (1-b)}{r_1 \cdot b - a_s \cdot (1-b)} \cdot e^{(r_2-r_1)L}$$

i

$$r_1 = \frac{a_s \cdot (1-b)}{2 \cdot b} + \frac{a_2}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1-b}{b}\right)^2 + 4 \cdot \frac{a_u}{a_s}},$$

$$r_2 = \frac{a_s \cdot (1-b)}{2 \cdot b} - \frac{a_2}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1-b}{b}\right)^2 + 4 \cdot \frac{a_u}{a_s}},$$

dobija se

$$T_s = (-p \cdot e^{r_1 y} + e^{r_2 y}) \cdot \frac{\Delta T}{1-p}$$

$$T_u = \left[\frac{a_s \cdot (1-b)}{b} \cdot (-p \cdot e^{r_1 y} + e^{r_2 y}) + p \cdot r_1 \cdot e^{r_1 y} - r_2 \cdot e^{r_2 y} \right] \cdot$$

$$\frac{\Delta T}{a_u \cdot (1-p)}$$

odnosno

$$\frac{\Delta t}{\Delta T} = \frac{a_s \cdot (1-b)}{a_u \cdot b} + \frac{r_1 \cdot \frac{r_2 \cdot b - a_s \cdot (1-b)}{r_1 \cdot b - a_s \cdot (1-b)} \cdot e^{(r_2-r_1)L} - r_2}{a_u \cdot \left(1 - \frac{r_2 \cdot b - a_s \cdot (1-b)}{r_1 \cdot b - a_s \cdot (1-b)} \cdot e^{(r_2-r_1)L}\right)}.$$

Interesantno je primetiti da je $T_s - T_u = T_g - T_2$ tako da poznajući temperaturu geovode na izlazu iz bušotine možemo da izračunamo i temperaturu vode na izlazu iz izmenjivača.

DISKUSIJA MODELA

Ovim modelom moguće je odrediti izlaznu temperaturu sekundarnog kruga u funkciji geometrijskih dimenzija izmenjivača, koeficijenata prolaženja toplote kroz površine za razmenu toplote, srednjih masenih izobarskih specifičnih toplota fluida i masenih protoka, a na osnovu poznate ulazne temperature sekundarnog kruga izmenjivača i temperature geotermalne vode na izlazu iz bušotine. Takođe, moguće je vršiti i analizu uticaja promene vrednosti pojedinih faktora na temperaturu vode sekundarnog dela.

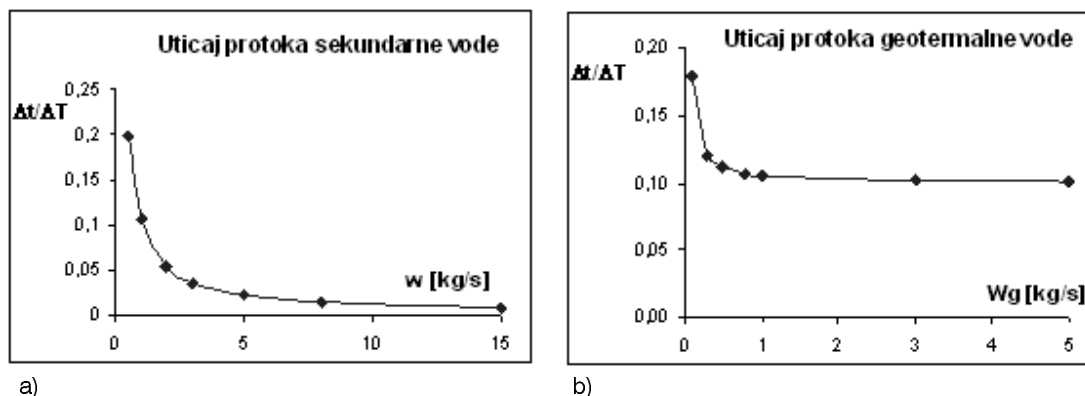
Ograničenje ovog modela jeste da on ne razmatra uticaje zaprljanja površina za razmenu toplote usled korozije i/ili taloženja mineralnih naslaga iz geotermalne vode. Imajući u vidu hemijski sastav geotermalnih voda sa našeg podneblja realno je očekivati u praksi inkrustacije na cevima.

U diskusiji koja sledi usvojene su sledeće vrednosti parametara:

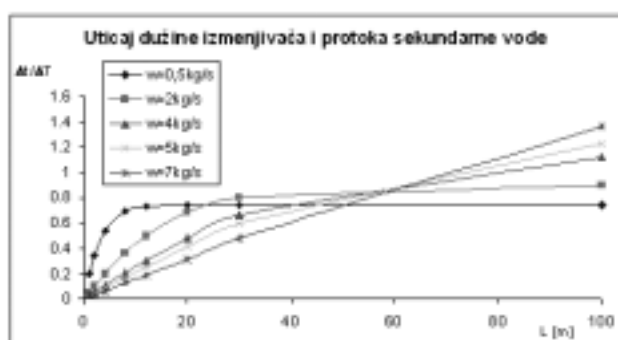
- srednja masena izobarska specifična toplota geotermalne vode, $c_{pg} = 4010 \text{ J/kgK}$,
- srednja masena izobarska specifična toplota vode sekundarnog kruga $c_{pv} = 4180 \text{ J/kgK}$,
- hipotetički koeficijenti prolaženja toplote $k_u = k_s = 700 \text{ W/m K}$ i
- temperatura geotermalne vode bušotine B4 u Sijarinskoj banji $T_g = 343 \text{ K}$.

Uticaj promene veličine masenog protoka grejane (sekundarne) vode na izlaznu temperaturu grejane vode dat je na slici 2.a), a uticaj promene masenog protoka geotermalne vode na slici 2.b). Uočljivo je da sa povećanjem protoka sekundarne vode, pri konstantnom protoku geotermalne vode, opada odnos temperatura $\Delta t/\Delta T$. Variranje protoka geotermalne vode, za ostale konstantne parametre, ima isti uticaj na odnos $\Delta t/\Delta T$. Pri ovim analizama vodjeno je računa o ograničenjima bušotine (maksimalna izdašnost od 30 l/s). S obzirom na karakter uticaja protoka geotermalne vode slikom je obuhvaćen opseg protoka geotermalne vode do 5 kg/s.

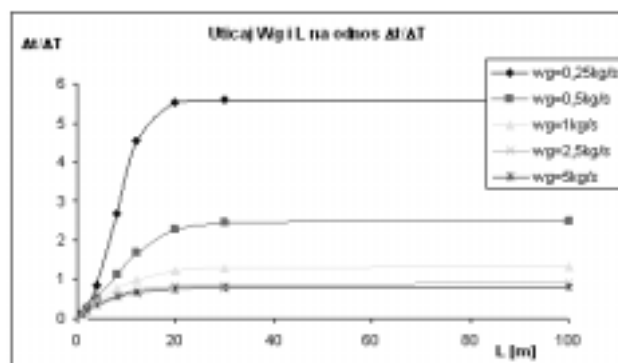
Uticaj dužine izmenjivača i protoka vode u sekundarnom delu dat je na slici 3. Za različite vrednosti masenog protoka sekundarne vode, od $w = 0,5 \text{ kg/s}$ do $w = 7 \text{ kg/s}$, uz protok geotermalne vode od 1 kg/s i prečnike cevi sekundarnog dela $d/D = 0,12/0,2 \text{ m}$ (ovakav izmenjivač je moguće postaviti u bušotinu), dobijena je familija krivih zavisnosti odnosa $\Delta t/\Delta T$ od dužine izmenjivača. Pri malim vrednostima w (reda do veličine protoka



Slika 2. Uticaj veličina protoka geotermalne i grejne vode na odnos $\Delta t/\Delta T$
Figure 2. Influence of the flow of geothermal and warmed water on the ratio $\Delta t/\Delta T$



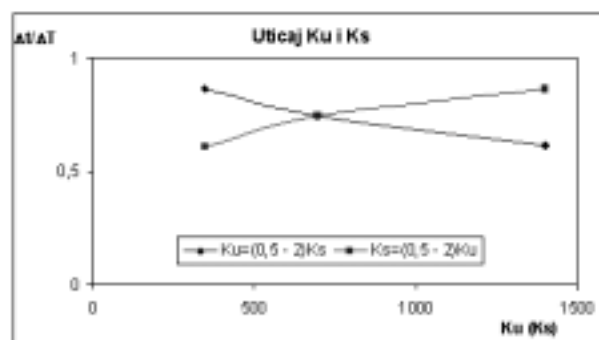
Slika 3. Uticaj dužine izmenjivača i protoka sekundarne vode na odnos $\Delta t/\Delta T$
Figure 3. Influence of the length of the heat exchanger and the flow of secondary water on the ratio $\Delta t/\Delta T$



Slika 4. Uticaj dužine izmenjivača i protoka primarne (geotermalne) vode na odnos $\Delta t/\Delta T$
Figure 4. Influence of the length of the heat exchanger and the flow of primary water on the ratio $\Delta t/\Delta T$

geotermalne vode) toplotno "zasićenje" grejane vode nastupa na dužinama od 10 m. Što je vrednost protoka sekundarne vode veća to je uticaj dužine izmenjivača znatniji.

Karakter uticaja protoka geotermalne vode i dužine izmenjivača na izlaznu temperaturu sekundarnog kruga, dat na slici 4, na prvi pogled ukazuje na to da sa povećanjem dužine izmenjivača raste i odnos $\Delta t/\Delta T$. Ovaj



Slika 5. Uticaj odnosa vrednosti veličina k_s i k_u na odnos $\Delta t/\Delta T$
Figure 5. Influence of the values of k_s and k_u on the ratio $\Delta t/\Delta T$

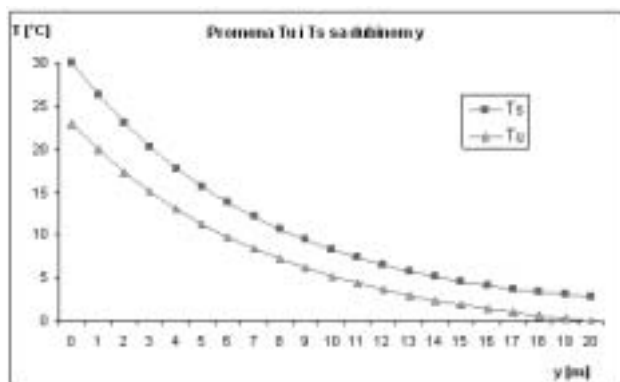
trend porasta prisutan je samo do neke određene dužine izmenjivača, koja za ranije pomenute parametre modelovanog izmenjivača, iznosi od 20 do 30 metara. Već na dužinama većim od 30 metara sve linije zavisnosti su praktično horizontalne.

Sa slike 5 jasno se vidi da model dobro prati i mogućnost izrade izmenjivača od materijala sa različitim koeficijentima prolaza toplote. Uočljivo je da je po odnos $\Delta t/\Delta T$ i efikasnost izmenjivača znatno povoljnija varijanta većih vrednosti k_s/k_u .

Kako je dijagramom na slici 6 prikazano, model se može koristiti i za praćenje zavisnosti temperatura T_s i T_u od tekuće koordinate y i to za vrednosti od $y=0$ (izlaz nivo bušotine) do $y=L$ koje odgovara maksimalnoj dužini izmenjivača (na slici je to $L_{max} = 20$ m).

ZAKLJUČAK

Predloženim matematičkim modelom moguće je analizirati uticaje svakog od uticajnih faktora – masenih protoka fluida u primarnom i sekundarnom krugu, dužine i prečnika cevi izmenjivača, materijala cevi (preko koeficijenta prolaza toplote) na odnos razlika temperatura $\Delta t/\Delta T$, gde Δt predstavlja razliku temperature sekundarnog fluida – vode na izlazu iz i na ulazu u izmenjivač, a ΔT – razliku temperature geotermalne vode na izlazu iz bušotine i temperature sekundarne vode na ulazu u



Slika 6. Uticaj dubine y na razlike temperatura T_s i T_u

Figure 6. Influence of the depth y on the temperature difference between T_s and T_u

izmenjivač. Takođe, moguće je pratiti i promenu pomenutih razlika temperatura na dužini izmenjivača, odnosno sa porastom dubine u bušotini.

Modelom nisu obuhvaćeni uticaji zaprljanja izmenjivača usled korozije i/ili taloženja mineralnih naslaga iz geotermalne vode.

LITERATURA

- [1] Nowak W., Stachel A.A., Systems of simultaneous operation of low- and high-temperature heating installations and the effect on the degree of geothermal energy utilization in a geothermal heating plant, International Geothermal Conference, Reykjavik, (2003) S03 Paper039
- [2] Kujawa T., Nowak W., Shallow and deep vertical geothermal heat exchangers as low temperature sources for heat pumps, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, 3477–3482
- [3] Zhu J., Zhang W., Optimization design of plate heat exchangers (PHE) for geothermal district heating systems, Geothermics **33** (2004) 337–347
- [4] Caretonuto A., Casarosa C., A lumped parameter model of the operating limits of one-well geothermal plant with down hole heat exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer **43** (2000) 2931–2948
- [5] Chuanshan D., Thermal analysis of indirect geothermal district heating systems, Geothermics Vol 26 No 3 (1997) 351–364
- [6] Sanner B., Mands E., Sauer M.K., Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany, Geothermics **32** (2003) 589–602
- [7] Barbier E., Geothermal energy technology and current status: an overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews **6** (2002) 3–65

SUMMARY

GEOTHERMAL HEAT EXCHANGER WITH COAXIAL FLOW OF FLUIDS

(Professional paper)

Dragan M. Pejić¹, Dragan T. Stojiljković¹, Staniša T. Stojiljković¹, Maja Đurović Petrović², Nebojša Mitić¹

¹Faculty of Technology, Leskovac

²ICTM, Belgrad, Serbia and Montenegro

The paper deals with a heat exchanger with coaxial flow. Two coaxial pipes of the secondary part were placed directly into a geothermal boring in such a way that geothermal water flows around the outer pipe.

Starting from the energy balance of the exchanger formed in this way and the assumption of a steady-state operating regime, a mathematical model was formulated. On the basis of the model, the secondary circle output temperature was determined as a function of the exchanger geometry, the coefficient of heat passing through the heat exchange areas, the average mass isobaric specific heats of fluid and mass flows. The input temperature of the exchanger secondary circle and the temperature of the geothermal water at the exit of the boring were taken as known values. Also, an analysis of changes in certain factors influencing the secondary water temperature was carried out.

The parameters (flow, temperature) of the deep boring B-4 in Sijarinska Spa, Serbia were used. The theoretical results obtained indicate the great potential of this boring and the possible application of such an exchanger.

Key words: Geothermal energy • Heat exchanger • Coaxial Flow •

Ključne reči: Geotermalna energija • Rekuperator • Koaksijalni tok •