

Tomislav Kurevija

ISSN 0350-350X

GOMABN 47, 5, 355-390

Prethodno priopćenje/Preliminary communication

UDK 550.367 : 621.577.003.1.001.24 : 697.1 : 697.94

## ANALIZA POTENCIJALA PLITKIH GEOTERMALNIH RESURSA U SUSTAVIMA TOPLINSKIH PUMPI NA PODRUČJU GRADA ZAGREBA

### Sažetak

Vrijednosti geotermalnog gradijenta i toplinskog toka za područje sjeverne Hrvatske više su od europskog prosjeka što je osnovni preduvjet i pokazatelj potencijala plitkih geotermalnih resursa, a koji zasad u RH nisu odgovarajuće iskorišteni niti valorizirani, dok u EU ova tehnologija ima gotovo eksponencijalni godišnji porast u instaliranim kapacitetima. Činjenica je da Hrvatska koristi dva do tri puta više energije po jedinici bruto nacionalnog proizvoda nego većina zemalja članica EU, što dovodi do prekomjernog uvoza energetske mineralne sirovine, veće proizvodne cijene, problema kompetitivnosti proizvoda i usluga na europskom i svjetskom tržištu, kao i negativnog utjecaja na okoliš. Za razvoj i implementaciju tehnologije geotermalnih toplinskih pumpi u Republici Hrvatskoj trenutno postoji nužna tehničko-tehnološka i distributivna infrastruktura, ali ne i popratna zakonska regulativa, ekološki propisi i sigurnosni zahtjevi koji se odnose na izgradnju bušotinskih izmjenjivača topline, što je najvažniji ograničavajući faktor. U ovom radu, na primjeru novoizgrađene poslovne zgrade, programskim paketom RETScreen prikazat će se tehnoeкономска analiza isplativosti ugradnje geotermalne toplinske pumpe u odnosu na konvencionalni sustav grijanja i hlađenja.

### 1. Uvod

Geotermalne toplinske pumpe (GTP) koriste se pri temperaturama geotermalnog fluida ili tla od 5–35 °C, kada izravni sustavi grijanja ili hlađenja geotermalnom energijom nisu ekonomski isplativi. Instaliranje geotermalnih toplinskih pumpi u EU ima značajan porast u zadnjem desetljeću, s 20 % godišnjim prirastom. Individualni sustavi GTP mogu biti u rasponu od 5 kW za grijanje kuća, pa sve do velikih sustava, snaga većih i od 150 MW. GTP sustavi najčešće služe za potrebe grijanja,

a faktor iskorištenja kapaciteta kreće se od 2 000 do 6 000 sati godišnje, ovisno o namjeni grijanje/hlađenje ili oboje.

Tablica 1-1: Porast instalirane snage geotermalnih toplinskih pumpi u EU zadnjih 5 godina [12]

Godina	2003.		2004.		2005.		2006.	
	Broj jedinica	Snaga MWt	Broj jedinica	Snaga MWt	Broj jedinica	Snaga MWt	Broj jedinica	Snaga MWt
Švedska	146 172	1 334,0	185 531	1 700,0	230 094	2 070,8	270 111	2 431,0
Njemačka	39 069	507,9	48 662	632,6	61 912	681,0	90 517	995,7
Francuska	38 250	420,8	49 950	549,5	63 830	702,1	83 856	922,4
Danska	6 700	80,4	6 700	80,4	43 252	821,2	43 252	821,2
Finska	27 100	271,0	30 000	300,0	29 106	624,3	33 612	721,9
Austrija	26 373	527,5	30 614	611,5	32 916	570,2	40 151	664,5
Nizozemska	1 600	253,5	1 600	253,5	1 600	253,5	1 600	253,5
Italija	6 000	120,0	6 000	120,0	6 000	120,0	7 500	150,0
Poljska	8 000	103,6	8 000	103,6	8 100	104,6	8 300	106,6
Češka	2 100	36,0	2 700	47,0	3 727	61,0	5 173	83,0
Belgija	5 000	60,0	5 000	60,0	6 000	64,5	7 000	69,0
Estonija	1 035	10,7	2 190	20,7	3 500	34,0	5 000	49,0
Irska	1 500	19,6	1 500	19,6	1 500	19,6	1 500	19,6
Mađarska	400	4,0	400	4,0	230	6,5	350	15,0
UK	550	10,2	550	10,2	550	10,2	550	10,2
Ostali	504	23	537	21,7	919	14,5	1 039	15,7
EU25	310 353	3 782,0	379 684	4 535,0	493 236	6 158,0	599 511	7 328,3
Švicarska	28 620	572,4	33 000	660,0	n/a	n/a	n/a	n/a

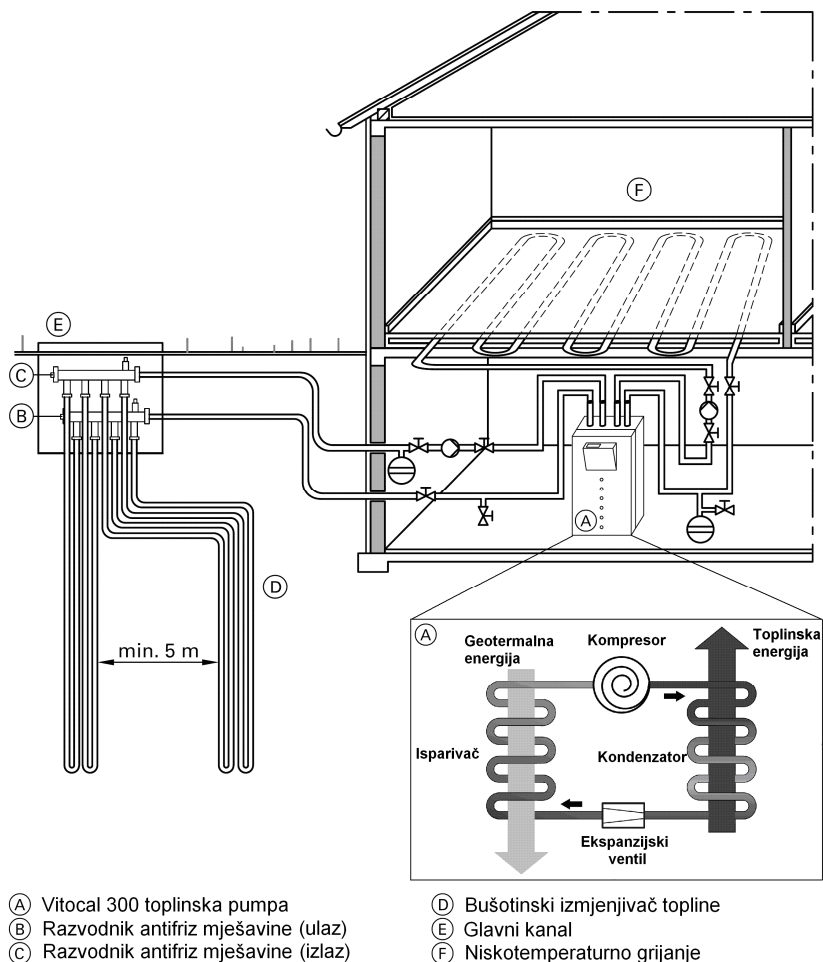
## 2. Princip rada geotermalnih toplinskih pumpi

Osnovne komponente toplinske pumpe su kompresor s elektromotorom, povratni i prigušni ventil te dva izmjenjivača topline (kondenzator i isparivač). Dodatni izmjenjivač topline (pregrijač) može se pridodati zbog grijanja potrošne tople vode. Rashladno sredstvo je obično R-407C ili R-410A, koje za razliku od prvobitno korištenog freona 12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) ne djeluje negativno na ozon.

U ciklusu hlađenja rashladno sredstvo ulazi u usisne otvore kompresora u obliku plina niske temperature i tlaka. Proces kompresije podiže tlak i temperaturu, a u ovom dijelu moguće je dodati pregrijač za potrošnu toplu vodu. Plin na izlasku iz kompresora preusmjeren je povratnim ventilom na izmjenjivač topline (kondenzator) u kontaktu s okolišem (bušotinski izmjenjivač topline). Kako je plin na višoj temperaturi, toplina se prenosi na rasolinu u bušotinskom izmjenjivaču topline te na okolne stijene. Snižavanje temperature plina rezultira kondenzacijom, a s obzirom

na malen pad tlaka u kondenzatoru, rashladno sredstvo ga napušta u obliku kapljevine s temperaturom neznatno višom od okoliša. Kapljevina zatim ulazi u prigušni ventil gdje se naglo snižava tlak. Nakon toga ulazi u isparivač gdje dolazi do znatnog pada temperature zbog isparavanja rashladnog sredstva uz prijelaz topline s okolnog toplog zraka. Rekuperator s prisilnom konvekcijom osigurava distribuciju hladnog zraka u unutrašnjosti prostora. Plin potom kroz povratni ventil ponovno ulazi u kompresor čime je završen jedan ciklus hlađenja.

Slika 2-1: Shema geotermalne toplinske pumpe [10]

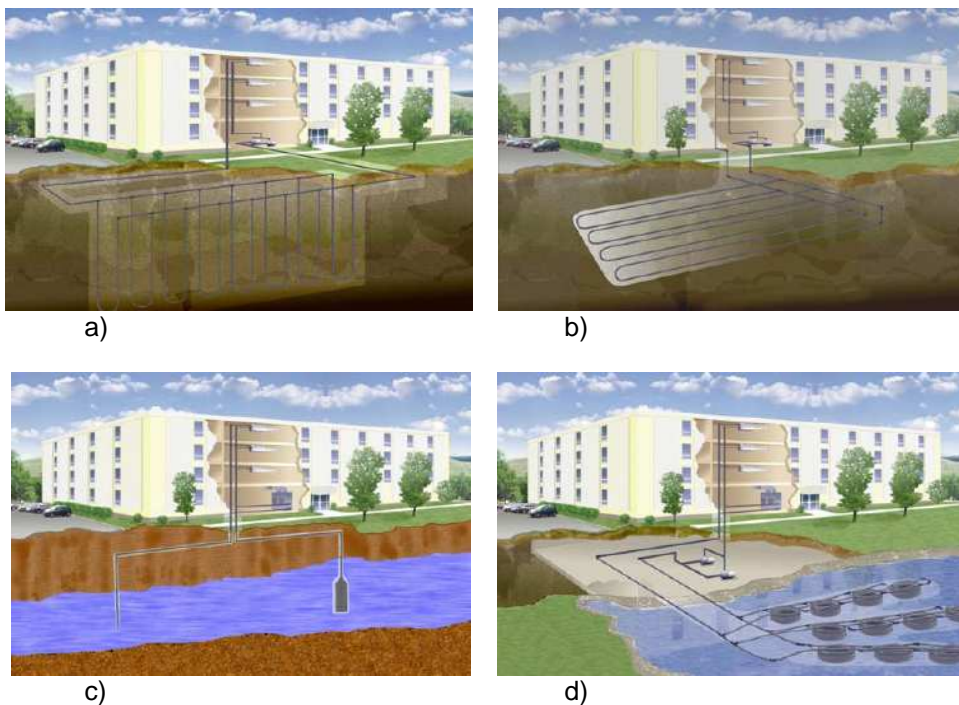


U procesu grijanja povratni ventil preusmjerava plin visoke temperature pri izlasku iz kompresora na izmjenjivač topline (kondenzator) u kontaktu s unutrašnjosti prostorije. U rekuperatoru plin prenosi toplinu na hladniji okolni zrak pri čemu dolazi do kondenzacije, a zatim kapljevina ulazi u prigušni ventil gdje se snižava tlak, a time i temperatura, te zatim ulazi u isparivač gdje se na rashladno sredstvo prenosi toplina iz bušotinskog izmjenjivača topline što dovodi do isparavanja. Plin je potom preusmjeren povratnim ventilom na usisne komore kompresora gdje mu se povisuje temperatura i tlak čime je završen ciklus grijanja.

Postoje dva osnovna tipa sustava geotermalnih toplinskih pumpi, GTP s otvorenim i zatvorenim krugom. Ova dva tipa se mogu podijeliti na sljedeće podsustave (sl. 2-3).

- 1) Sustav sa zatvorenim krugom:
  - a) vertikalan
  - b) horizontalan
  - c) zatvoreni sustav s površinskom vodom
- 2) Sustav s otvorenim krugom: d) dvije bušotine (proizvodna i utisna, ili izljev)

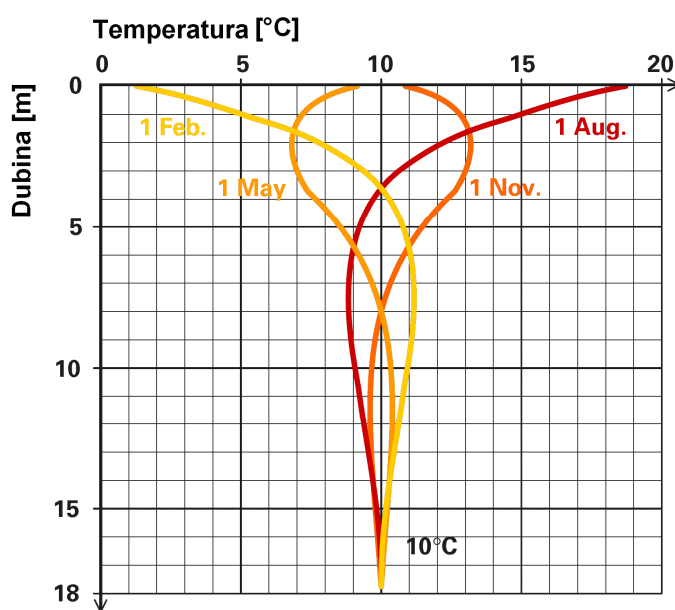
Slika 2-3: Osnovni sustavi geotermalnih toplinskih pumpi



### 2.1 Geotermalne toplinske pumpe sa sustavom zatvorenog kruga

Sustav GTP sa zatvorenim krugom ne iskorištava toplinu geotermalnih fluida već koristi plitku geotermalnu energiju okolnih stijena za zagrijavanje ukopanih cijevi (najčešće od plastičnih masa) u kojima protječe radni fluid ili rasolina. Najčešće se koriste kapljevine nižih ledišta kao, na primjer, antifriz mješavine ili metanol. Pod plitkim geotermalnim resursima podrazumijevaju se dubine od 15-200 m gdje ne postoje oscilacije u temperaturi uzrokovane sunčevom radijacijom, a porast temperature s dubinom u funkciji je temperaturnog gradijenta i karakteristikama stijena. Potrebna duljina položenih cijevi ovisi o klimatskim uvjetima, karakteristikama tla te toplinskim zahtjevima.

Slika 2-4: Porast temperature s dubinom i utjecaj sunčeve radijacije na temperaturu tla za područje Zagreba [9]



### 3. Tehnoekonomska analiza grijanja poslovne zgrade geotermalnom toplinskom pumpom

Novosagrađena poslovna zgrada u Zagrebu, primjera radi, ima ukupnu površinu uredskog prostora od 2000 m<sup>2</sup> uz dnevni režim rada. Nasuprot konvencionalnom sustavu grijanja plinskim kotlom i hlađenja klima uređajem instalirat će se sustav bušotinskih izmjenjivača topline odnosno monovalentna geotermalna toplinska pumpa (100 % dimenzionirana za grijanje). Zgrada će, zbog najveće

termodinamičke iskoristivosti, imati sustav podnog grijanja (niskotemperaturno grijanje) te sustav prisilne konvekcije za potrebe hlađenja.

Na temelju odabrane opreme, klimatoloških prilika Zagreba i energetske potreba zgrade usporedit će se GTP sustav s konvencionalnim sustavom, a tehnoekonomskom analizom dokazati moguća isplativost ugradnje. Za ugrađenu opremu i komparaciju različitih sustava grijanja izabrana je tvrtka Viessmann zbog višegodišnje prisutnosti na domaćem tržištu, razgranate dobavne mreže te servisnih i montažnih usluga. Cijene su izražene u eurima radi lakše usporedbe hrvatskog i inozemnog tržišta toplinskim pumpama. Na temelju tehničko-tehnoloških podataka proizvođača opreme, za toplinsku pumpu Vitocal BW226 sustava rasolina-voda, obaviti će se i termodinamički proračun u skladu sa stvarnim režimom rada.

Za kompletni tehnoekonomski proračun odabran je programski paket RETScreen kanadske institucije *National Resources of Canada* koji sadrži sveobuhvatnu svjetsku bazu podataka proizvođača toplinskih pumpi i klimatoloških parametara. Programski paket se sastoji od dva dijela: tehnološkog dijela u kojem se dimenzionira bušotinski izmjenjivač topline u ovisnosti o karakteristikama lokacije, odabrane opreme te toplinskih potreba, kao i proračun ušteda GHG emisija; te ekonomskog dijela u kojem je moguće utjecajem na veliki dio ulaznih parametara postaviti najekonomičniji model ugradnje i iskorištavanja plitkih geotermalnih resursa toplinskim pumpama.

### **3.1. Termodinamički proračun rada toplinske pumpe u krugu sa sustavom bušotinskog izmjenjivača topline**

#### Potrebna toplinska snaga za grijanje

Za odabranu poslovnu zgradu od 2000 m<sup>2</sup> s 4 kata potrebna instalirana toplinska snaga grijanja pri vršnoj potrošnji iznosi  $f_{og} = 35,3 \text{ W/m}^2$  ili 70,6 kW<sub>t</sub> (srednje dobra toplinska izolacija). Za odabranu srednje dobru izolaciju zgrade vrijede sljedeće vrijednosti koeficijenta prolaza topline: za zidove = 0,29 W/m<sup>2</sup> °C, za krov = 0,20 W/m<sup>2</sup> °C, za podrum = 0,33 W/m<sup>2</sup> °C, broj izmjene zraka po satu = 0,25. Površina prozora na zgradi u proračunu je uzeta kao standardna vrijednost (15 % površine), a kao tip prozora uzeti su nezasjenčani dvostrukog stakla s koeficijentom prigušivanja svjetlosti od 0,81 i koeficijentom prolaza topline od 3 W/m<sup>2</sup> °C.

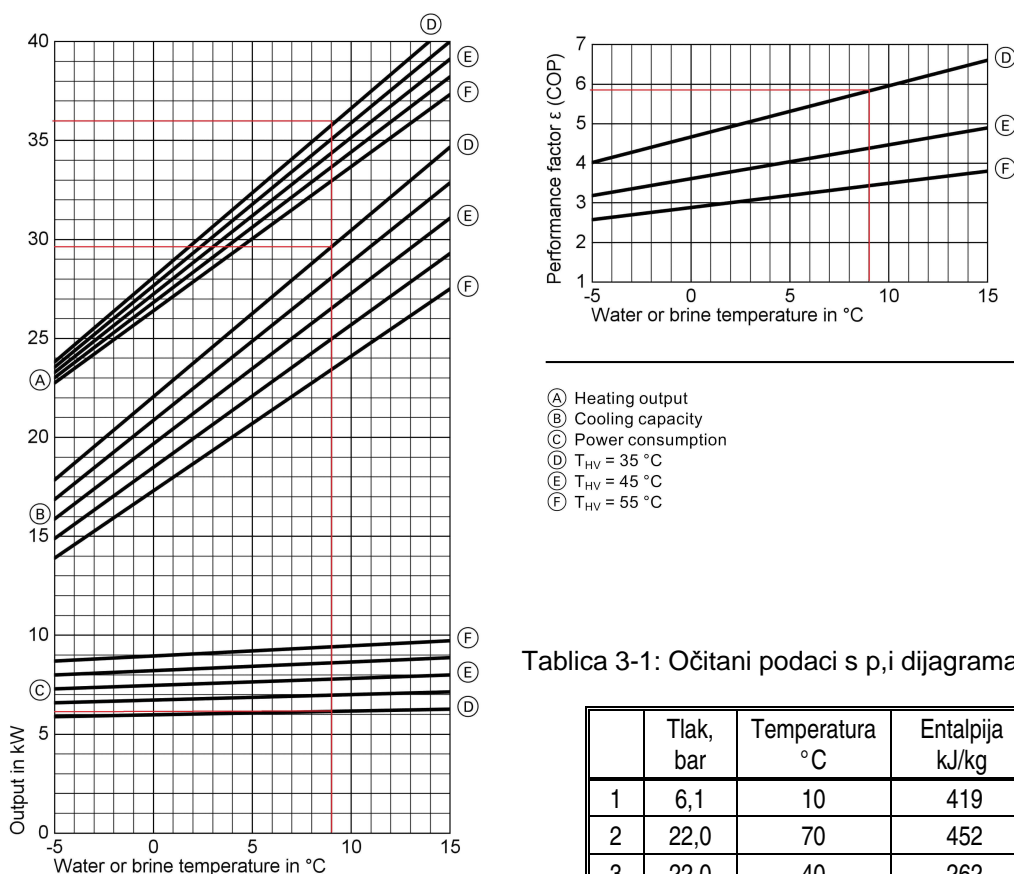
#### Potrebna snaga za hlađenje

Poslovne zgrade okarakterizirane su s mnogo većim unutarnjim toplinskim dobitcima nego zgrade za stanovanje. Izvori ovakvih toplinskih dobitaka u najvećoj su mjeri rasvjeta i uredska tehnička oprema, a u energetske modelu korišteni su, uz namjenu i vrstu samog prostora, kao nepohodan faktor za procjenu vršne potrošnje hlađenja i dimenzioniranje sustava. Potrebna rashladna toplinska snaga za vršnu potrošnju izračunata je u vrijednosti od  $f_{oh} = 49,1 \text{ W/m}^2$  ili 98,2 kW pri vršnoj potrošnji uz srednje dobru toplinsku izolaciju zgrade. Ova vrijednost uključuje procjenu toplinskih dobitaka unutar zgrade zbog rasvjete, tehničke opreme (npr. ~ 200 W/osobnom računaru) i broju zaposlenika (~140 W/osobi) [11].

Zbog uzimanja u obzir svih toplinskih dobitaka unutar zgrade te toplinskih gubitaka kroz zidove i krov, proračun vršne potrošnje, odnosno potrebna instalirana snaga za hlađenje izračunata je programskim paketom RHVAC 8.01, uzimajući u obzir projektiranu unutarnju temperaturu od 20 °C za grijanje i 26 °C za hlađenje, kao i srednju vlažnost zraka od 70 % u ljetnim mjesecima za lokalitet.

Slika 3-2: Tehnički podaci za toplinsku pumpu Viessmann Vitocal 300- BW226 u ovisnosti o temperaturi rasoline (izlaz iz izmjenjivača topline) i grijanja [9]

Vitocal 300, type BW 226 and WW 226 (two-stage)



Tablica 3-1: Očitani podaci s p,i dijagrama

	Tlak, bar	Temperatura °C	Entalpija kJ/kg
1	6,1	10	419
2	22,0	70	452
3	22,0	40	262
4	6,1	4	262

Ulazni podaci nužni za termodinamički proračun:

- efektivna površina prostora zgrade za grijanje i hlađenje: 2000 m<sup>2</sup>
- ulazna temperatura rasoline u izmjenjivač topline toplinske pumpe (izlaz iz bušotinskog izmjenjivača topline):  $t_{gu} \sim 12^{\circ}\text{C}$
- temperatura rasoline na izlazu iz toplinske pumpe (ulaz u bušotinski izmjenjivač topline):  $t_{gi} = 5^{\circ}\text{C}$
- ulazna temperatura rashladnog sredstva R407C u kompresor :  $t_1 = 9^{\circ}\text{C}$
- temperatura nakon kompresije:  $t_2 = 70^{\circ}\text{C}$
- temperatura kondenzacije:  $t_3 = 40^{\circ}\text{C}$
- temperatura isparivača:  $t_4 = 4^{\circ}\text{C}$
- temperatura podnog grijanja (ulaz):  $t_{ru} = 35^{\circ}\text{C}$
- temperatura podnog grijanja (izlaz):  $t_{ri} = 20^{\circ}\text{C}$

### Ciklus rada geotermalne toplinske pumpe Vitocal300 BW226

#### (A) Ogrjevni učinak

1) Površina poslovne zgrade  $A_z = 2\,000\text{ m}^2$  (dvije toplinske pumpe u sustavu, jedinična površina 1000 m<sup>2</sup>)

2) Potrebni ogrjevni učinak:

$$Q^* = f_o \cdot A_z = 0,0353 \cdot 1000 = 35,3\text{ kW}_t = 127,08\text{ MJ/h}$$

#### (B) Jedinične veličine

3) Toplina isparivača (razlika entalpija 1-4):

$$q_o = i_4 - i_1 = 419 - 262 = 157\text{ kJ/kg}$$

4) Rad kompresora (razlika entalpija 1-2):

$$e = i_2 - i_1 = 452 - 419 = 33\text{ kJ/kg}$$

5) Kondenzator (razlika entalpija 2-3):

$$q_* = i_2 - i_3 = 452 - 262 = 190\text{ kJ/kg}$$

#### (C) Ukupne veličine

6) Potrebna dobava freona R407-C:

$$D_{407C} = \frac{Q^*}{q_*} = \frac{127,08 \times 10^3}{190} = 668,8\text{ kg/h}$$

7) Dobava vode u sustavu podnog grijanja:

$$D_{H_2O} = \frac{Q^*}{c_p \cdot \Delta t_{pod}} = \frac{127,08 \times 10^3}{4,187 \cdot 15} = 2023,4\text{ kg/h}$$

8) Toplina isparavanja, ekvivalentno rashladnom učinku u ciklusu hlađenja:

$$Q_o = D_{407C} \cdot q_o = 668 \cdot 157 = 104,88\text{ MJ/h} = 29,1\text{ kW}_f$$



9) Dobava antifriz mješavine/rasolina (50% voda/50% etilenglikol):

$$D_{ras} = \frac{Q_o}{c_p \cdot \Delta t_{ras}} = \frac{104,88 \times 10^3}{3,284 \cdot 7} = 4\,562,4 \text{ kg/h}$$

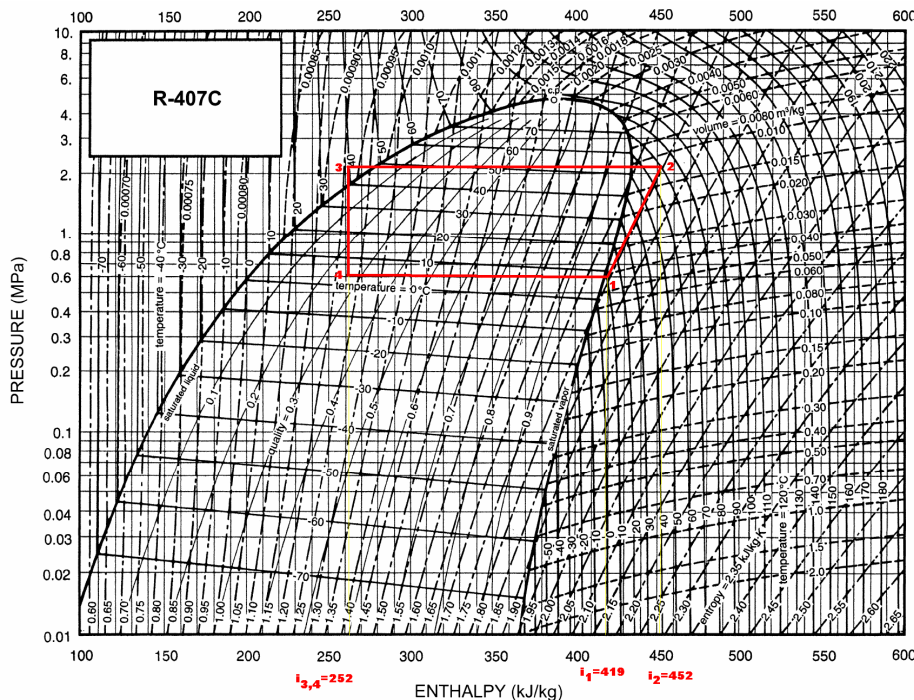
10) Rad i snaga kompresora:

$$E = e \cdot D_{407C} = 33 \cdot 668,8 = 22\,070 \text{ kJ/h} = 6,1 \text{ kW}_e$$

12) Ukupni termodinamički stupanj djelovanja toplinske pumpe:

$$\eta_{COP} = \frac{q_*}{e} = \frac{190}{33} = 5,76$$

Slika 3-4: Ciklus rada toplinske pumpe Vitocal300 BW226 prikazan na p,i dijagramu R407C



Za utrošenih 1kW električne energije mehaničkog rada kompresora ostvari se 5,76 kW korisne toplinske energije. Ova računski dobivena vrijednost odgovara nazivnoj vrijednosti stupnja iskorištenja toplinske pumpe Vitocal300 BW226 iz tehničke dokumentacije proizvođača, za karakteristične ulazne podatke. Ovako visok COP moguć je samo kada se koristi niskotemperaturno podno grijanje zbog male temperaturne razlike između izvora (temperatura rasoline na ulazu u toplinsku pumpu) i temperature grijanja (podno grijanje).

### 3.2. Rezultati tehnološkog proračuna GTP projekta u komparaciji s konvencionalnim plinskim sustavom

Za klimatološke prilike grada Zagreba izračunate su veličine stupanj dana grijanja i hlađenja (pri nominalnoj vrijednosti temperature od 16°C) te na temelju podataka o tipu i termalnim karakteristikama tla, geotermalnom gradijentu, te ukupno potrebnoj instaliranoj snazi za pokrivanje vršne potrošnje u ciklusu grijanja, izračunata je potrebna dubina bušotinskog izmjenjivača topline.

Tablica 3-2: Zemljopisne i klimatološke karakteristike lokacije

Zagreb	Jedinica	Klimatološki podaci
Geografska širina	°N	45,8
Geografska dužina	°E	16,0
Nadmorska visina	m	123
Projektirana vanjska temperatura (grijanje)	°C	-13,7
Projektirana vanjska temperatura (hlađenje)	°C	26,7
Godišnja amplituda temperature tla	°C	24,3
Toplinski tok kompaktnog vodonosnika	W/m	-60
Stupanj dani grijanja (< 15°C)	°C-d	2138
Stupanj dani hlađenja (> 15°C)	°C-d	420
Specifična toplina kompaktnog tla vodonosnika (glina, pješčenjak, ilovača)	kJ/kg °C	0,96
Toplinska vodljivost kompaktnog tla vodonosnika (glina, pješčenjak, ilovača)	W/m °C	1,3

Tablica 3-4: Prikaz tehnoloških i ekonomskih parametara za zadani projekt grijanja i hlađenja poslovne zgrade konvencionalnim sustavom (prirodni plin + klima uređaj)

Konvencionalni sustav grijanja (prirodni plin)	Poslovna zgrada - projekt grijanja	
Efektivna grijana površina zgrade	m <sup>2</sup>	2 000
Tip goriva	m <sup>3</sup>	Prirodni plin
Godišnja efikasnost plinskog kotla	%	75
Potrebna jedinična toplinska snaga za grijanje	W/m <sup>2</sup>	35,3
Vršna potrošnja/instalirana snaga	kW <sub>t</sub>	70,6
Energetski udjel grijanja potrošne tople vode	%	10
<b>Ukupno godišnje iskorištena energija za grijanje</b>	<b>MWh<sub>t</sub></b>	<b>104,0</b>
Godišnja potrošnja prirodnog plina	m <sup>3</sup>	14 682
Jedinična cijena goriva (pretpostavka buduće cijene)	€/m <sup>3</sup>	0,345 (2,50 kn/m <sup>3</sup> )
<b>Ukupna godišnja cijena goriva (prirodni plin)</b>	<b>€</b>	<b>5 065</b>

Konvencionalni sustav hlađenja (klima uređaj)	Poslovna zgrada - projekt hlađenja	
Tip goriva	kWh <sub>e</sub>	Električna energija
Godišnja efikasnost	%	250
Potrebna jedinična toplinska snaga za hlađenje	W/m <sup>2</sup>	49,1
Potrebna instalirana toplinska snaga za vršnu potrošnju	kW <sub>t</sub>	98,2
Ukupno godišnje iskorištena energija za hlađenje	MWh <sub>t</sub>	86
<b>Godišnja potrošnja električne energije</b>	<b>MWh<sub>e</sub></b>	<b>37</b>
Jedinična cijena goriva HEP Narančasta tarifa poduzetništvo	€/kWh <sub>e</sub>	0,141 (1,02 kn/kWh <sub>e</sub> )
<b>Ukupna godišnja cijena goriva</b>	<b>€</b>	<b>5 166</b>

Tablica 3-6: Prikaz tehnoloških i ekonomskih parametara za zadani projekt grijanja i hlađenja poslovne zgrade geotermalnom toplinskom pumpom

Predloženi sustav grijanja toplinske pumpe s bušotinskim izmjenjivačem topline			
Potrebna zemljišna površina oko zgrade	m <sup>2</sup>	292	
Ukupno potrebna dubina izmjenjivača topline	m	1 098 (6 bušotina×183 m)	
Snaga cirkulacijske pumpe	kW <sub>e</sub>	1,8	
Volumen rasoline u izmjenjivaču topline	m <sup>3</sup>	0,19	
Potreba duljina polietilenskih cijevi izmjenjivača topline	m	2 196	
Proizvođač i model	Viessmann Gmbh, Vitocal300 BW226 (2 jedinice)		
Kapacitet grijanja odabranog modela toplinskih pumpi	kW <sub>t</sub>	72,0	102 % vršne potrošnje
Ukupna ostvarena godišnja energija grijanja	MWh <sub>t</sub>	104	100 % godišnje potrebne energije
<b>Utrošena godišnja električna energija kompresora</b>	<b>MWh<sub>e</sub></b>	<b>18,0</b>	
Stupanj iskorištenja toplinske pumpe	5,8		
Predloženi sustav hlađenja toplinske pumpe s bušotinskim izmjenjivačem topline			
Kapacitet hlađenja odabranog modela toplinskih pumpi	kW <sub>t</sub>	59,6	60,7 % vršne potrošnje
Stupanj iskorištenja toplinske pumpe/hlađenje	4,80		
Ukupna ostvarena godišnja energija hlađenja	MWh <sub>t</sub>	86	94,0 % godišnje potrebne energije
<b>Utrošena godišnja električna energija kompresora</b>	<b>MWh<sub>e</sub></b>	<b>18,0</b>	
Back-up sustav: Toplinska pumpa /zrak, COP=3,0 kapaciteta 39,6 kW (39,3 % vršne potrošnje)	MWh <sub>t</sub>	6,0	6,0 % godišnje potrebne energije
Utrošena električna energija back-up sustava	<b>MWh<sub>e</sub></b>	<b>2,0</b>	

### 3.3. Ekonomski parametri projekta grijanja i hlađenja geotermalnom toplinskom pumpom

Prilikom izvođenja ekonomske analize projekta zbog specifičnosti svake lokacije potrebno je sagledati širok raspon mogućih troškova. U narednoj tablici 3-8 prikazana je ekonomska analiza najčešćih troškova, neophodnih za izvođenje samog projekta, a obrađene su različite stavke troškova koje se mogu pojaviti u bilo kojoj fazi projekta. Ovi dodatni troškovi ponajprije ovise o specifičnosti svake lokacije, zakonodavstvu, subvencijama i sl. Izvršena je usporedba s konvencionalnim sustavom grijanja prirodnim plinom i hlađenja klima uređajem. Troškovi ulaganja izraženi su kao razlika u odnosu na ulaganja u konvencionalni sustav. Razdoblje povrata investicija nije izraženo kao povrat kapitalnih investicija projekta, već kao povrat razlike ulaganja u sustav geotermalne toplinske pumpe.

Financijska struktura razlike između ova dva sustava zatvorena je podizanjem komercijalnog kredita. Vrijednosti izražene kurzivom u tablici oduzimaju se od ukupnog troška jer su ti troškovi neizbježni i u konvencionalnom sustavu grijanja i hlađenja. Zbog višegodišnjeg trajanja projekta odabrana je početna cijena prirodnog plina u vrijednosti od 2,50 kn (neophodan i neizbježan rast cijene krajem 2008. u odnosu na trenutačnih 2,08 kn). Trajanje projekta predviđeno je na 30 godina (trajnost PE cijevi položenih u tlo), a za to vrijeme u proračunu su uzeti u obzir i vrijednost inflacije i porasta cijene energije. Također, izračunato je smanjenje emisija stakleničkih plinova korištenjem novog sustava te moguće subvencioniranje od strane lokalnih vlasti ili države u vidu povrata poreza (po uzoru na neke zemlje EU), u skladu s promoviranjem korištenja obnovljivih izvora energije.

Tablica 3-8: Proračun kapitalnih i godišnjih troškova za pojedine faze razvoja projekta grijanja i hlađenja geotermalnom toplinskom pumpom (razlika u odnosu na plinski sustav)

KAPITALNI TROŠKOVI	KOLIČINA/ JEDINICA	JEDINIČNA CIJENA	UKUPNA CIJENA	POSTOTNI UDIO
<i>Razvoj projekta</i>				
Dozvole i suglasnosti	15h	65 €/h	975 €	
Ispitivanje lokacije i vlasništva zemljišta	15h	65 €/h	975 €	
<b>Medusuma</b>			<b>1 950 €</b>	<b>3,2%</b>
<i>Strojarski dio</i>				
Dizajniranje sustava	20h	50 €/h	1 000 €	
Ponuda za izvođenje radova i ugovaranje	20h	50 €/h	1 000 €	
Nadgledanje izgradnje	20h	50 €/h	1 000 €	
Konto za plinsku tehniku			(-3 000 €)	
<b>Medusuma</b>			-	<b>0,0 %</b>
<i>Sustav grijanja</i>				
Vršno opterećenje toplinska pumpa BW226	72 kW <sub>t</sub>	359 €/kW <sub>t</sub>	25 848 €	

Plinski kotao Vitogas 100/Vitotronic300GW2	75 kW <sub>f</sub>		(-5 088 €)	
<b>Medusuma</b>			<b>20 760 €</b>	<b>34,0 %</b>
<b>Sustav hlađenja</b>				
Bazno opterećenje toplinska pumpa BW226	59,6 kW <sub>f</sub>		-	
Vršno opterećenje AC Climate Master	38,6 kW <sub>f</sub>	130 €/kW <sub>f</sub>	5 018 €	
Konto za AC Climate Master	98,2 kW <sub>f</sub>	130 €/kW <sub>f</sub>	(-12 740 €)	
<b>Medusuma</b>			<b>(-7 722 €)</b>	<b>-12,6 %</b>
<b>Optimiziranje sustava i ostali troškovi izgradnje</b>				
Specifični troškovi projekta		Bušotinski izmjenjivač topline		
Cirkulacijske pumpe	1,8 kW	850 €/kW	1 535 €	
Cirkulacijski fluid	0,19 m <sup>3</sup>	2 600 €/m <sup>3</sup>	505 €	
Bušenje i cementiranje	1 098 m	35 €/m	38 432 €	
Cijevi U-izmjenjivača topline	2 196 m	2 €/m	4 392 €	
Spojnice i ventili	98,2 kW	15 €/kW	1 470 €	
Radovi unutar zgrade i dijelovi			12 000 €	
Konto za radove unutar zgrade i dijelovi za plinsku tehniku			(-12 000 €)	
<b>Medusuma</b>			<b>46 334 €</b>	<b>75,6 %</b>
<b>UKUPNI KAPITALNI TROŠKOVI</b>			<b>61 322 €</b>	<b>100,0 %</b>
<b>GODIŠNJI TROŠKOVI</b>				
<b>Troškovi rada i održavanja O&amp;M</b>				
Dijelovi i radna snaga	196 MWh	1 €/MWh	196 €	
Dijelovi i radna snaga za plinsku tehniku	196 MWh	3 €/MWh	(- 588€)	
<b>Medusuma</b>			<b>(- 392 €)</b>	
<b>Cijena goriva - predloženi projekt geotermalne toplinske pumpe</b>				
Električna energija HEP narančasti poduzet.	38 MWh	140,7 €/MWh	5 361 €	
<b>Medusuma</b>			<b>5 361 €</b>	
<b>Cijena goriva - konvencionalni sustav</b>				
Prirodni plin GP Zagreb (+20% povećanje)	14 682 m <sup>3</sup>	0,345 €/m <sup>3</sup>	5 065 €	
Električna energija, hlađenje, HEP narančasti	37 MWh	140,7 €/MWh	5 166 €	
<b>Medusuma</b>			<b>12 560 €</b>	
<b>PERIODIČNI TROŠKOVI</b>				
Zamjena plinskog kotla	15 god.		(- 5 088 €)	
Zamjena klima uređaja	20 god.		(-12 740 €)	
Zamjena kompresora toplinske pumpe	20 god.		12 740 €	

Tablica 3-9: Proračun smanjenja emisija stakleničkih plinova korištenjem GTP sustava u odnosu na konvencionalni sustav s prirodnim plinom i el. energijom

GHG EMISIJSKI FAKTOR PRI PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA REPUBLIKU HRVATSKU									
Hrvatska	Udio goriva	CO2 emisijski faktor	CH4 emisijski faktor	N2O emisijski faktor	Efikasnost proizvodnje električne energije	Gubici transporta i distribucije	GHG emisijski faktor		
	%	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	%	%	tCO2/MWh		
<b>Tip goriva</b>									
Prirodni plin	15,0%	54,5	0,0040	0,0010	45,0%	17,0%	0,529		
Ugljen	5,0%	95,8	0,0150	0,0030	35,0%	17,0%	1,203		
Vodne snage	52,0%	0,0	0,0000	0,0000	100,0%	17,0%	0,000		
Nuklearna energija	8,0%	0,0	0,0000	0,0000	30,0%	17,0%	0,000		
Loživo ulje	20,0%	73,3	0,0020	0,0020	35,0%	17,0%	0,917		
<b>Električna energija miks</b>	<b>100,0%</b>	<b>88,9</b>	<b>0,0056</b>	<b>0,0023</b>		<b>17,0%</b>	<b>0,323</b>		
KONVENCIONALNI SUSTAV GRJANJA I HLADENJA (PRIRODNI PLIN+AC) - GHG EMISIJE									
	Udio goriva	CO2 emisijski faktor	CH4 emisijski faktor	N2O emisijski faktor	Potrošnja goriva	GHG emisijski faktor	GHG emisije		
	%	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	MWh	tCO2/MWh	tCO2		
<b>Tip goriva</b>									
Prirodni plin	79,1	54,5	0,0040	0,0010	139	0,197	27		
Električna energija	20,9	88,9	0,0056	0,0023	37	0,323	12		
<b>Ukupno</b>	<b>100,0</b>	<b>58,3</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,0011</b>	<b>175</b>	<b>0,224</b>	<b>39</b>		
PREDLOŽENI SUSTAV GRJANJA I HLADENJA S GEOTERMALNOM TOPLINSKOM PUMPOM - GHG EMISIJE									
	Udio goriva	CO2 emisijski faktor	CH4 emisijski faktor	N2O emisijski faktor	Potrošnja goriva	GHG emisijski faktor	GHG emisije		
	%	kg/GJ	kg/GJ	kg/GJ	MWh	tCO2/MWh	tCO2		
<b>Tip goriva</b>									
Električna energija	100,0%	88,9	0,0056	0,0023	38	0,323	12		
<b>Ukupno</b>	<b>100,0%</b>	<b>88,9</b>	<b>0,0056</b>	<b>0,0023</b>	<b>38</b>	<b>0,323</b>	<b>12</b>		
REDUKCIJE GHG EMISIJA KORIŠTENJEM GTP SUSTAVA									
Kombinirani sustav grijanja i hlađenja	Emisije konvencionalnog sustava	Emisije predložene GTP sustava	Godišnja redukcija GHG emisija						
	tCO2	tCO2	tCO2						
	39	12	27	Godišnja redukcija od 27 tCO2 odgovara: potrošnji 10 938 litara motornog benzina ili uštedeni 55 barela sirove nafte ili 9,3 hektara šuma za apsorpciju ugljika					

Tablica 3-10: Sažeti pregled financijske strukture projekta grijanja i hlađenja s GTP sustavom

<b>FINANCIJSKA STRUKTURA PROJEKTA</b>		
<b>Osnovni makroekonomski pokazatelji i uvjeti financiranja</b>		
Porast cijene goriva	%/god	3,5
Inflacija	%/god	4,0
Diskontna stopa	%	8,0
Trajanje projekta	god	30
Dotacije i subvencije	€	0
Iznos kredita	€	61 322
Iznos vlastitih sredstava	€	0
Kamata	%	8,00
Razdoblje otplate	god	30
Godišnja otplata kredita	€/god	5 447
<b>TROŠKOVI I UŠTEDE/PRINOSI PROJEKTA - SAŽETI PREGLED</b>		
<b>Kapitalni troškovi</b>		
Razvoj projekta (1,9%)	€	1 950
Sustav za grijanje (34,4%)	€	20 760
Sustav za hlađenje (-13,8%)	€	(-7 722)
Optimiziranje sustava i izgradnja (77,5%)	€	46 334
Ukupna razlika kapitalnih troškova u odnosu na konvencionalni sustav	€	61 322
<b>Godišnji troškovi i otplata kredita</b>		
Troškovi rada i održavanja	€	(-392)
Godišnja cijena energije - predloženi GTP sustav	€	5 361
Otplata kredita - 30 godina	€	5 447
<b>Ukupni godišnji izdaci</b>	<b>€</b>	<b>10 416</b>
<b>Periodični troškovi</b>		
Zamjena plinskog kotla (10 god)	€	(-5 088)
Zamjena klima uređaja (20 god) investicijski približno jednaka zamjeni kompresora toplinske pumpe (20 god)		0
<b>Godišnja ušteda i primici</b>		
Godišnja cijena goriva - konvencionalni sustav (plinski kotao + AC)	€	10 231
<b>Ukupna godišnja ušteda i primici</b>	<b>€</b>	<b>10 231</b>

Slike 3-5: Pregled bušćih radova pri instaliranju U-izmjenjivača topline i ugrađena toplinska pumpa



Tablica 3-11: Godišnji priljev novca za vrijeme trajanja projekta

GODIŠNJI TOK NOVCA					
Godina	Nakon poreza	Kumulativno	Godina	Nakon poreza	Kumulativno
	€	€		€	€
0	0	0	16	3 732	36 621
1	2	2	17	4 057	40 679
2	194	196	18	4 394	45 072
3	394	590	19	4 742	49 815
4	600	1 190	20	5 103	54 918
5	814	2 005	21	5 477	60 394
6	1 036	3 041	22	5 863	66 258
7	1 265	4 306	23	6 264	72 522
8	1 503	5 809	24	6 679	79 200
9	1 749	7 558	25	7 108	86 308
10	2 003	9 561	26	7 553	93 861
11	2 267	11 828	27	8 013	101 874
12	2 540	14 368	28	8 490	110 364
13	2 823	17 191	29	8 984	119 348
14	3 116	20 307	30	25 997	145 345
15	12 582	32 889			



Ekonomskim proračunom pokazana je isplativost ugradnje sustava geotermalne toplinske pumpe u novosagrađenoj zgradi, ukoliko se koristi niskotemperaturno podno grijanje kojim se postiže najviša termodinamička učinkovitost sustava. Financiranjem razlike troška između konvencionalnog sustava prirodnog plina + klima uređaj i skupljeg sustava toplinske pumpe podizanjem kredita, moguće je već u prvoj godini imati pozitivan tok novca s obzirom da su godišnje uštede u energiji veće nego godišnji anuitet kredita (tablica 3-11). Također, moguće je uračunati i subvencije na temelju smanjenja CO<sub>2</sub> po uzoru na neke europske države te porezne olakšice i subvencije na korištenje visoko učinkovite tehnologije, koje nisu uzete u obzir jer u RH još uvijek ne postoji sustav poticaja, no u budućnosti će svakako i ovaj faktor ubrzati daljnji razvoj i implementaciju.

#### 4. Zaključak

Tehnologija grijanja i hlađenja toplinskim pumpama s plitkim geotermalnim resursima kao izvorom topline, u Republici Hrvatskoj još nije znatnije primijenjena, niti u komercijalnom niti u privatnom sektoru. S obzirom da u Europskoj uniji porast korištenja geotermalnih toplinskih pumpi ima kontinuirani rast od približno 20% tijekom ovog desetljeća, nužno je u skladu s ciljem povećanja korištenja obnovljivih izvora energije pokrenuti pilot projekt koji će financirati država ili lokalne zajednice. Prije svega, potrebno je donijeti zakon, po uzoru na njemački ili švedski model, o dopuštenoj dubini bušenja i aspektima sigurnosti pri izvođenju radova, što je trenutno najveći problem i prepreka u znatnom razvoju ove tehnologije. Na području RH postoji niz tvrtki koje se bave rudarskim i geotehničkim radovima, koje su iskazale namjeru da kao jednu od svojih osnovnih djelatnosti obavljaju bušenja s ciljem polaganja izmjenjivača topline.

U ovom radu obavljena je tehnoeekonomska analiza mogućeg projekta grijanja i hlađenja poslovne zgrade. Sagledan je čitav niz troškova koji se mogu pojaviti prilikom izvođenja radova te je konzultirana strana literatura i pilot projekti kako bi se došlo do što ujednačenijih i točnijih podataka o specifičnim troškovima, kao što je primjerice bušenje i ugradnja. Proračun isplativosti izračunat je za specifičnosti područja Zagreba, te na osnovi supstitucije prirodnog plina, kao primarnog energenta, geotermalnim toplinskim pumpama. Modeliranjem trenutnog i budućeg omjera cijene energenata, makroekonomskim pokazateljima, kapitalnih i operativnih troškova, kao i predloženom financijskom strukturom kreditiranja projekta, pokazalo se da je ovakav projekt ekonomski konkurentan trenutnim konvencionalnim tehnologijama tek ukoliko kreditiranje iznosi 30 godina što nije realno, s obzirom da banke poslovne projekte financiraju do maksimalno 15 godina (Hrvatska banka za obnovu i razvoj - HBOR). Ukoliko se razdoblje kreditiranja smanji na navedenu vrijednost, projekt postaje neisplativ zbog visokih kapitalnih investicija (prvenstveno toplinske pumpe) te male razlike u cijeni električne energije i plina, čak i ukoliko se u proračun uzima buduća vrijednost od 2,50 kn (2009. god.). U EU cijena plina je na prosječno višim razinama u odnosu na električnu energiju, a razvijen je i sustav državnih potpora i povrata poreza na ulaganje u ovu tehnologiju, što u ovom

proračunu za prilike u RH nije uzeto u obzir. Stoga, budući razvoj može biti uvelike potaknut jedino uvođenjem državnih subvencija i naknada za smanjenje emisije ugljikovog dioksida.

### Literatura

1. Air Conditioning and Refrigeration Institute - ARI: *Ground Source Closedloop Heat Pumps Standard 330*, 1998, Arlington, SAD, p.p.11
2. Climate Master Inc.: *Ghp Engineering Design Guide*, Oklahoma City, SAD, 2005, p.p.64
3. Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvatske - interni podaci
4. Institute de recherche Laboratoire des technologies de l'énergie (LTE): *North American Test Procedures and Calculations for Residential Heat Pumps with Combined Space and Domestic Hot Water Heating*, IEA HPP Annex 28 N 62, Quebec, Canada, p.p.52
5. McQuay International: *Geothermal Heat Pump Design Manual*, AG 31-008, Staunton, SAD, p.p. 70
6. Swedish Heat pump Association SVEP: *Heat Pumps Technology And Environmental Impact*, Mid-Sweden -University, 2005, p.p.120
7. Turner, W.; Doty, S.: *Energy Management Handbook Sixth Edition*, ISBN 0-88173-542-6, The Fairmont Press, Lilburn, SAD, p.p. 924
8. Krieder, J: *Handbook of Heating, Ventilation, and Air Conditioning*, ISBN 0-8493-9584-4, CRC Press, 2001, New York, SAD
9. Viessmann Gmbh.: *Datasheet Vitocal 300 WW-BW*, tehnička dokumentacija preuzeta s [www.viessmann.com](http://www.viessmann.com), p.p.12
10. Viessmann Gmbh.: *Installation Service Vitocal 300WW-BW*, tehnička dokumentacija preuzeta s [www.viessmann.com](http://www.viessmann.com), p.p. 95
11. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: *ASHRAE 1997-00 Handbook*, Englewood, Colorado, USA
12. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> European Commission - Eurostat Home page

UDK	ključne riječi	key words
550.367	geotermalni izvori energije	geothermal power resources
621.577	toplinska pumpa	heat pump
.003.1	gledište ostvarivosti	feasibility viewpoint
.001.24	gledište tehničkog proračuna	technical calculation viewpoint
697.1	grijanje zgrada	house heating
697.94	klimatizacija zgrada	house aiconditioning

### Autor

Tomislav Kurevija; dipl.ing.; e-mail: [tomislav.kurevija@rgn.hr](mailto:tomislav.kurevija@rgn.hr)  
 Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

### Primljeno

25.8.2008.