

UPOREDNA ANALIZA SAVREMENIH SISTEMA ZA GREJANJE I PRIPREMU TOPLE POTROŠNE VODE**COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN SYSTEMS FOR HEATING AND SANITARY HOT WATER PREPARATION**Radojka Davinić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast - TERMOENERGETIKA**

Kratak sadržaj – Ovaj rad prezentuje uputstvo za rad u softveru GeoTSOL i prikazuje uporednu tehnokonomsku analizu sistema za grejanje i pripremu tople potrošne vode u sistemu sa toplotnom pumpom i solarnim kolektorima.

Ključne reči: Grejanje, sanitarna topla voda, toplotne pumpe, solarni kolektori, uporedna analiza

Abstract – This paper features a guide for working in the software GeoTSOL and displays comparative technological analysis of solar collectors and heat pump systems with different heat sources for heating and sanitary hot water preparation.

Keywords: Heating, sanitary hot water, heat pump, solar collectors, comparative analysis

1. UVOD

Variranje i rast cene konvencionalnih goriva, kao i mala količina preostalih rezervi fosilnih goriva je naterala ljude da se okrenu obnovljivim izvorima energije i pronalaženju adekvatne zamene fosilnim gorivima. Uređaji koji omogućavaju i olakšavaju korišćenje energije koja se nalazi u našem okruženju su toplotne pumpe. U skladu sa tim, cilj rada jeste predstavljanje načina na koji se različiti sistemi sa toplotnom pumpom dimenzionišu, koje su prednosti i nedostaci datih sistema i koja je njihova primenljivost u uslovima Srbije. Analiza sistema sa toplotnom pumpom vazduh - voda, voda - voda, zemlja (geokolektori) - voda i zemlja (geosonde) - voda je izvršena pomoću softvera GeoTSOL [1].

Prva celina predstavlja teorijske osnove o toplotnoj pumpi, izvorima toplote i predstavljanje softvera u kome se radi analiza.

Druga veća celina rada predstavlja unos konkretnih podataka potrebnih kako bi se sistemi definisali i uporedili. Posle unosa podataka, vrši se proces simulacije rada izabranih sistema i porede se dobijeni energetske i finansijske rezultati.

2. PODELA, PREGLED I UPOTREBA TOPLLOTNIH PUMPI RAZLIČITIH IZVORA TOPLOTE

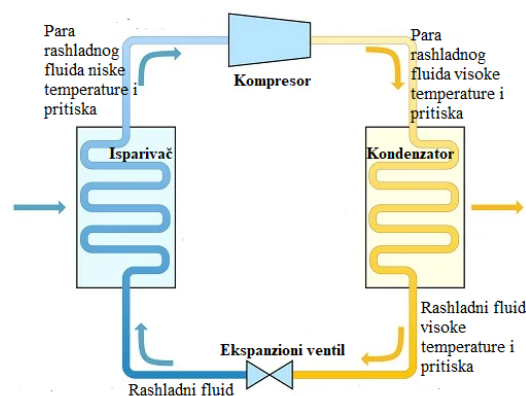
Toplotne pumpe su uređaji koji preuzimaju energiju sa jednog mesta i prebacuju je na drugo mesto na kome je potrebno obezbediti grejanje ili hlađenje.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Aleksandar Anđelković, vanr. prof.

Energija koju svojim radom generišu je nekoliko puta veća od uložene električne energije koja je potrebna za njihov rad.

Osnovni delovi toplotne pumpe su: kompresor, ekspanzioni ventil i dva razmenjivača toplote - isparivač i kondenzator. Princip rada toplotne pumpe je jednostavan i prikazan na slici 1.



Slika 1. Šema rada toplotne pumpe

2.1 Podela toplotnih pumpi prema vrsti toplotnog izvora - Vazduh

Toplotna pumpa vazduh - voda, tokom režima grejanja koristi toplotu okolnog vazduha za zagrevanje primarnog rashladnog medijuma. Ovaj tip toplotne pumpe se ne preporučuje za samostalnu upotrebu tokom hladnih zimskih dana kada je ambijentalna temperatura u minusu.

2.2 Podela toplotnih pumpi prema vrsti toplotnog izvora - Podzemna voda

Toplotna energija se dobija iz bušenih bunara, čija je temperatura vode 10 - 14 °C. Bunar iz koga se isumpava podzemna voda se naziva crpni, a bunar u koji se podzemna voda vraća se naziva upojni. Sistem toplotne pumpe može da bude sa sekundarnom petljom, što podrazumeva postojanje razmenjivača toplote između toplotnog izvora i toplotne pumpe.

2.3 Podela toplotnih pumpi prema vrsti toplotnog izvora - Zemlja

Sistemi toplotnih pumpi koji koriste energiju zemlje postoje u dve izvedbe - sa vertikalnim cevima (sondama) i sa horizontalnim cevima (kolektorima). Sistem sa geokolektorima se postavlja u zemlju na dubinu do 3 m, dok se vertikalne sonde postavljaju u bušotine koje se nalaze na dubini 40 do 100 m. Bušotina se ispunjava najčešće smešom bentonit gline, peska i vode [2].

Temperatura zemljišta u koje se postavljaju geokolektori varira tokom godine od 2 °C do 20 °C, dok je temperatura na dubini bušotina gotova konstanta oko 10 °C.

3. PROJEKTOVANJE KOMBINOVANOG SISTEMA TOPLOTNE PUMPE I SOLARNIH KOLEKTORA U SOFTVERU GEOTSOL

3.1 Koncept rada softvera GeoTSOL

GeoTSOL je programski alat koji se koristi za planiranje i projektovanje sistema sa toplotnom pumpom. Takođe, simulira godišnji rad sistema sa toplotnom pumpom koji može da koristi i solarne kolektore i konvencionalne kotlove.

3.2 Izbor sistema i parametara neophodnih za simulaciju

- *Izbor lokacije objekta.*
- *Izbor varijante sistema:* od kojih komponenti se sastoji sistem.
- *Parametri sistema za grejanje:* potrebno je definisati temperaturski režim grejanja, toplotno opterećenje objekta, grejnu površinu, temperaturu grejanja i granične temperature.
- *Parametri sistema za pripremu tople potrošne vode (TPV):* unose se podaci o prosečnoj dnevnoj potrošnji tople vode u objektu ili podaci o broju članova i potrošnji tople vode po članu, podatak o temperaturi tople vode i da li postoji recirkulaciona petlja tople vode.
- *Izbor toplotnog generatora:* izbor toplotne pumpe iz baze softvera i ukoliko postoji, definiše se i kotao koji se koristi kao pomoćni sistem u petlji grejanja.
- *Izvor toplote:* kartica izvor toplote je različita za svaki izvor toplote. Za sistem sa toplotnom pumpom vazduh - voda podaci o nominalnoj snazi ventilatora se automatski preuzimaju iz podataka o izabranoj toplotnoj pumpi. Za sistema sa toplotnom pumpom voda - voda potrebno je uneti temperature podzemne vode, kao i podatke o pumpi za podzemnu vodu i cirkulacionu pumpu ukoliko je sistem sa sekundarnom petljom. Za sistem sa geotermalnim kolektorima unose se podaci o površini koju zauzimaju, tipu zemljišta u koje se postavljaju i na koju dubinu.. Zbog mogućeg uticaja podzemnih vode na kolektore, definiše se i dubina njihovog nalaženja i temperatura. Kroz sistem kolektora protiče rastvor glikola i vode i potrebno je definisati snagu cirkulacione pumpe koja pokreće rastvor. Za sistem sa geosondama koje se postavljaju u bušotine, potrebno je definisati njihov tip, zatim prečnik, broj i ispunu bušotina, kao i maksimalnu dubinu bušenja. Cirkulaciona pumpa pokreće rastvor u sondama i potrebno je definisati njenu snagu. Za dubinu na koju se postavljaju geosonde, definiše se i temperatura zemlje. Softver izračunava potrebnu dubinu geosondi. Postoji razlika između dubine geosondi koju softver predlaže (l_{sonde}) i dubine geosondi ($l_{uk,buš}$) koja se dobija kao proizvod broja iskopanih bušotina i dubine jedne bušotine. Zbog toga se uvodi faktor relativnog odstupanja, f:

$$f = \frac{|l_{sonde} - l_{uk,buš}|}{l_{sonde}} \quad (1)$$

Ukoliko je vrednost faktora f manje od 1, sistem geosondi je optimalno dimenzionisan.

- *Načini rada sistema grejanja:*

1. Monovalentni - sistem samo sa toplotnom pumpom.
2. Alternativni - sistem sa toplotnom pumpom i pomoćnim sistemom grejanja (električnim grejačem ili kotlom). Definiše se granična temperatura do koje radi toplotna pumpa, nakon koje se uključuje kotao i radi samostalno.
3. Paralelan - takođe sistem sa toplotnom pumpom i pomoćnim uređajem. Definiše se temperatura uključivanja pomoćnog sistema, ali se toplotna pumpa ne isključuje i radi zajedno sa pomoćnim sistemom na niskim temperaturama.
4. Delimično paralelan - Pored temperature uključivanja pomoćnog sistema, definiše se i temperatura isključivanja toplotne pumpe. Dakle, sistem toplotne pumpe i pomoćnog uređaja radi uporedo tokom jednog temperaturskog opsega, nakon koga pomoćni sistem radi samostalno.

- *Izbor rezervoara tople vode:* u zavisnosti od varijante sistema koji je izabran potrebno je definisati rezervoar tople potrošne vode, bafer rezervoar za sistem grejanja ili kombinovani rezervoar.

- *Definisanje solarnog sistema:* ukoliko je izabrana varijanta sistema sa solarnih kolektorima, iz baze softvera se bira vrsta solarnih kolektora (pločasti ili vakuumski), njihov broj i položaj na krovu. Definiše se i dužina cevi i snaga solarne cirkulacione pumpe.

- *Finansijska analiza:* da bi softver izvršio finansijsku analizu potrebno je uneti - životni vek sistema, kamatnu stopu (ukoliko se novac pozajmljuje od banke), reinvesticioni povrat (RI), stopu inflacije, cenu investicije i ukoliko postoje, subvencije, troškovi održavanja sistema, porast cene energije na godišnjem nivou. Na osnovu datih podataka softver generiše podatke o tome kolika je cena proizvodnje toplotne energije po kWh, vrednost faktora MIRR i neto sadašnju vrednost. Investicija je isplativa ukoliko je $RI < MIRR$ i ukoliko je neto sadašnja vrednost pozitivna.

- *Rezultati simulacije.*

4. OPIS HIBRIDNIH SISTEMA SA RAZLIČITIM TOPLOTNIM PUMPAMA

U radu su analizirani sistemi za grejanje objekta i pripremu tople potrošne vode sa toplotnom pumpom. Biće analizirana četiri različita slučaja:

1. sistem toplotne pumpe koja koristi energiju vazduha i solarnih kolektora,
2. sistem toplotne pumpe koja koristi energiju podzemne vode i solarnih kolektora,
3. sistem toplotne pumpe sa geotermalnim kolektorima i solarnim kolektorima,
4. sistem toplotne pumpe sa geosondama i solarnim kolektorima.

Ulazni podaci koji su za sva četiri sistema ista su sledeći:

- Lokacija: Novi Sad
- Način grejanja: podno grejanje
- Temperatura petlje grejanja: 45 °C / 33,4 °C
- Toplotno opterećenje: 4,9 kW
- Grejna površina: 102 m²
- Temperatura u objektu: 20 °C
- Limit grejanja: 12 °C
- Proračunska grejna temperatura: -15 °C
- Br. članova domaćinstva: 5
- Dnevna potrošnja vode po članu: 40 l
- Temperatura TPV: 50 °C
- Solarni kolektori: 2 kolektora, ukupne površine 5,1m², proizvođača Bosch.

4.1 Prikaz sistema sa toplotnom pumpom vazduh - voda

Izabrana je varijanta 4 sistema sa toplotnom pumpom vazduh - voda proizvođača Daikin nominalne snage 3,5 kW. Sistem pored toplotne pumpe i solarnih kolektora sadrži i električni grejač snage 5 kW koji se uključuje na temperaturi od -8 °C. Toplotna pumpa i električni grejač rade u alternativnom režimu rada. Rezervoar u sistemu je kombinovan, zapremine 750 l, Vitocell 340 - M.

4.2 Prikaz sistema sa toplotnom pumpom voda - voda

Izabrana varijanta sistema je 7.1 sa toplotnom pumpom Nilan Compact P Geo 3 nominalne snage 3 kW. Sistem toplotne pumpe je sa sekundarnom petljom, snage cirkulacione pumpe za rastvor od 87 W, a snaga pumpe za podzemnu vodu je 150W. Maksimalna temperatura podzemne vode je u septembru 12 °C, a minimalna u martu 8 °C. Pomoćni sistem grejanja je gasni kotao Bosch snage 7 kW i uključuje se na spoljašnjoj temperature od -5 °C. Toplotna pumpa i gasni kotao rade u paralelnom režimu rada. Deo sistema su i dva rezervoara tople vode - rezervoar za toplu potrošnu vodu Ivar Prestige Den 500, zapremine 500 l i bafer rezervoar od 300 l, SWD P1 90.300.

4.3 Prikaz sistema sa toplotnom pumpom sa geotermalnim kolektorima

Izabrana je varijanta sistema 7.1. Toplotna pumpa, gasni kolektor i rezervoari tople vode su isti kao u slučaju sistema sa toplotnom pumpom voda - voda. Toplotna pumpa i gasni kotao rade u paralelnom režimu rada i kotao se uključuje na -5 °C. Sistem se geotermalnih kolektora se postavlja u vlažno peskovito zemljište na dubini od 1,2 m i zauzima površinu od 200 m². Unutar kolektora se nalazi 30 % rastvor glikola koji pokreće cirkulaciona pumpa snage 87 W. Podzemne vode se nalaze na 10 m dubine i imaju temperaturu od 10 °C.

4.4 Prikaz sistema sa toplotnom pumpom sa geotermalnim sondama

I u ovom slučaju izabrana je varijanta sistema 7.1 i iste komponente kao u slučaju sistema sa podzemnom vodom i geotermalnim kolektorima. Razlika u ovom sistemu jeste dimenzionisanje geosondi. Softver definiše potrebnu dužinu sonde koja iznosi 118 m, a maksimalna dubina bušenja je 99 m. U skladu sa potrebnom dužinom sonde i maksimalnom dubinom bušenja, izabrane su dve bušotine na dubini od 58,9 m. Prečnik bušotine iznosi 150 mm, a temperature zemlje na toj dubini je 10 °C. Izabrana je pojedinačna U - sonda u kojoj se nalazi 30% rastvor glikola. Snaga cirkulacione pumpe je 87 W. Faktor relativnog odstupanja je manji od 1 i sistem je optimalno dimenzionisan:

$$f = \frac{|l_{sonde} - l_{uk,buš}|}{l_{sonde}} = \frac{|118 - 117,8|}{118} = 0,002 \quad (1)$$

5. REZULTATI SIMULACIJE

U tabeli 1, prikazani su energetske rezultati simulacije za period od godinu dana. Očekivano, najveći sezonski faktor performanse ima toplotna pumpa sa geosondama 4,33. Ovo se može objasniti kroz tip samog toplotnog izvora koji se koristi. Od svih tipova toplotnih izvora koji se koriste u ovom rada, zemlja sa geosondama predstavlja najstabilniji toplotni izvor i razlika između temperature zemljišta na dubini geosonde i temperature prostora koja treba da se postigne je uvek pogodna za postizanje dobre efikasnosti toplotne pumpe. Sezonski faktor performanse (SPF) sistema toplotne pumpe i solarnih kolektora je veći od SPF-a samo toplotne pumpe (TP) što nam govori o tome da je kombinacija toplotne pumpe i solarnih kolektora odličan izbor.

Tabela 1: Energetske rezultati simulacije

Sistem	4.1	4.2	4.3	4.4
SPF TP	3,05	4,20	4,15	4,33
SPF TP + solarni sistem	3,51	4,46	5,30	5,44
Količina energije koju generiše toplotna pumpa	6035 kWh	4865 kWh	4738 kWh	4835 kWh
Količina energije koju generiše solarni kolektori	2581 kWh	2720 kWh	2816 kWh	2757 kWh
Količina energije koju obezbede solarni kolektori	3140 kWh	3308 kWh	3381 kWh	3338 kWh
Solarna frakcija TPV	51,2 %	42,7 %	43,9 %	43,2 %

Iz tabela 2 se može videti da je količina generisane energije u slučaju toplotnih pumpi koje koriste vodu i energiju zemlje kao toplotne izvore vrlo slična, a da se količina energije koju generiše toplotna pumpa vazduh - voda, značajnije razlikuje. Razlog tome je u načinu povezivanja rada toplotne pumpe sa pomoćnim sistemom grejanja (paralelni i alternativni način). Može se uočiti da je količina energije koju generišu solarni kolektori manja od količine energije koju obezbede kolektori. Razlika između ove dve vrednosti je u gubicima koji postoje u solarnoj petlji - gubici solarne cirkulacione pumpe, gubici solarnog rezervoara, gubici u cevima. Udeo solarne frakcije za pripremu TPV je jedan od važnijih parametara za proveru da li je sistem dobro dimenzionisan. Njegova vrednost treba da je između 50 - 70%.

Finansijska analiza je urađena za životni vek sistema od 22 godine, investicija se finansira iz sopstvenih sredstava - kamatna stopa i RI su nula, cena električne energije je 0,06 \$/kWh i stopa inflacije je 4 %. Za svoj rad toplotna pumpa koristi električnu energiju više tarife 0,06 \$/kWh i niže tarife 0,015 \$/kWh. Cena goriva sistema sa kojim se poredi toplotna pumpa je 0,036 \$/kWh i to je sistem koji koristi gas.

Troškovi održavanja za sisteme sa TP su 50 \$/god, a za sistem sa gasnim kotlom 200 \$/god. Investicioni troškovi

su najveći za sistem sa geosondama 12.000 \$, zatim za sistem sa geokolektorima 11000 \$, 10000 \$ je investicija u sistem sa podzemnom vodom i 6000 \$ je za sistem sa toplotnom pumpom vazduh - voda.

Analiza isplativosti sistema sa toplotnim pumpama je urađena za dva slučaja - postojanje subvencija i ukoliko subvencije ne postoje. Država Srbija tokom 2021. godine dodeljuje subvencije za povećanje energetske efikasnosti, između ostalog za kupovinu toplotnih pumpi tako da je u ovom slučaju, iznos investicije snižen za 50 %. Usporedni prikaz finansijske analize u ovom slučaju prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2: Usporedni prikaz rezultata finansijske analize

Sistem	4.1	4.2	4.3	4.4
Cena proizvodnje toplotne energije iz sistema	TP: 0,046 \$/kWh	TP: 0,065 \$/kWh	TP: 0,065 \$/kWh	TP: 0,070 \$/kWh
	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh
MIRR	9,83 %	5,80 %	5,43 %	4,68 %
Neto sadašnja vrednost	13 737 \$	9837 \$	9891 \$	8684 \$

Cena proizvodnje energije iz sistema sa toplotnom pumpom je najniža u slučaju toplotne pumpe vazduh - voda. Ovo je očekivano, s obzirom da je sistem sa toplotnom pumpom vazduh - voda značajnije jeftiniji od ostalih.

Ipak, sa svakim sistemom toplotne pumpe se vrši ušteda na godišnjem nivou u odnosu na sistem sa kojim se poredi. Modifikovana interna stopa rentabilnosti je najveća u slučaju sistema sa vazduhom 9,83 %, a najmanja u slučaju korišćenja geosondi. Razlog ovome je velika razlika u trošku investicije. Neto sadašnja vrednost, odnosno preostala količina novca na kraju životnog veka je pozitivna za sve toplotne izvore. Ukoliko se analizira slučaj bez subvencija, krajnji finansijski rezultati bi bili nepovoljniji (tabela 3). Međutim, čak i u ovom slučaju gledajući parametre MIRR i neto sadašnju vrednosti, ulaganje u ove sisteme je isplativo.

Tabela 3: Finansijska analiza u slučaju da ne postoji subvencija

Sistem	4.1	4.2	4.3	4.4
Cena proizvodnje toplotne energije iz sistema	TP: 0,061 \$/kWh	TP: 0,088 \$/kWh	TP: 0,091 \$/kWh	TP: 0,095 \$/kWh
	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh	Usporedeni sistem: 0,111 \$/kWh
MIRR	5,35 %	1,97 %	1,67 %	1,25 %
Neto sadašnja vrednost	10 737 \$	4837 \$	4391 \$	3460 \$

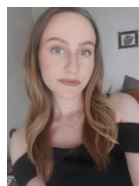
6. ZAKLJUČAK

Softver GeoTSOL predstavlja odličnu prvu stanicu u analizi sistema sa toplotnom pumpom, zato što je jednostavan za upotrebu i sadrži sve neophodne delove za dimenzionisanje sistema. Sistemi sa toplotnim pumpama su se pokazali kao dobro i isplativo rešenje u našim uslovima, bez obzira na visoka početna ulaganja. Njihovo održavanje nije skupo, efikasni su i imaju dugi životni vek. Treba obratiti pažnju na to da svake godine postoje subvencije između ostalog i za kupovinu toplotnih pumpi, što od države ili od kompanija koje se bave prodajom ovih uređaja. Na osnovu toga se može zaključiti da se sistem sa toplotnom pumpom retko kupuje bez posredstva subvencija. Na treba zaboraviti da smo svedoci sve većeg problema sa snabdevanjem konvencionalnim energentima. Čini se da je povećanje energetske efikasnosti, korišćenje obnovljivih izvora energije kroz sisteme sa toplotnim pumpama jedino pravo rešenje.

7. LITERATURA

- [1] <https://valentin-software.com/en/downloads/> Datum pristupa: 30.07.2021.
 [2] <https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump/ground-source-heat-pumps-in-the-uk/ground-source-heat-pump-borehole> Datum pristupa: 07.09.2021.

Kratka biografija:



Radojka Davinić rođena je u Zrenjaninu 1996. god. Osnovne studije Čistih energetske tehnologije na Fakultetu tehničkih nauka završila je 2019. god. Nakon toga upisuje master studije Energetike i procesne tehnike - Termoeenergetika koje završava 2021. kontakt: radojkad96@gmail.com