



DOI: 10.46793/CIGRE36.1802M

Ц6 01

SMANJENJE POTROŠNJE FOSILNIH GORIVA U INDUSTRIJI I POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI PRIMENOM TOPLOTNIH PUMPI I FOTO-NAPONSKIH SISTEMA

**VLADICA MIJAILOVIĆ*, ALEKSANDAR RANKOVIĆ
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
ČAČAK
SRBIJA**

Kratak sadržaj - Brojni tehnološki procesi (proizvodnja papira, kože, eksploziva, prehrambenih proizvoda) zahtevaju korišćenje visoko-temperатурне pare, za čije dobijanje se koriste ugalj i/ili prirodni gas. Ovi energenti se uvoze i njihova cena je veoma visoka. Takođe, sagorevanjem ovih goriva u atmosferu se oslobađaju gasovi za koje se, prema pravilima EU, plaćaju penali. Brojni su primeri da je supstitucija ovih goriva izvršena korišćenjem toplotnih pumpi, za čiji rad se troši električna energija. U radu je analizirana opravdanost primene toplotnih pumpi koje se tokom obdanice napajaju električnom energijom iz FN-elektrana. Analize su rađene sa tržišnim cena svim komponenti, sistema i energenata. Takođe, dat je opsežan pregled međunarodnih iskustava na datu temu.

Ključne reči - Toplotna pumpa- FN elektrana- Fosilna goriva- Smanjenje potrošnje- Energetska efikasnost- Period isplativosti

1. PRINCIP RADA TOPLOTNIH PUMPI

Toplotna pumpa je uređaj pomoću koga se toplotna energija iz jedne sredine prenosi u drugu. Za taj prenos toplotne energije troši se određena energija koja je nekoliko puta manja od prenete. Količnik prenete i potrošene energije se zove “*Coefficient of Performance*” i označava se sa *COP*.

Na primer, ako je za jednu toplotnu pumpu $COP = 4$ za utrošeni $1kWh$ električne energije na izlazu se dobija ukupna toplotna energija od $4kWh$. Za komercijalno dostupne toplotne pumpe, vrednost parametra *COP* se kreće u opsegu $COP = (3,7 \div 5,4)$.

*vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs

Električna energija se troši za pokretanje kompresora, pumpi i ventilatora. Radni fluid je mešavina vode i sredstva koje sprečava smrzavanje.

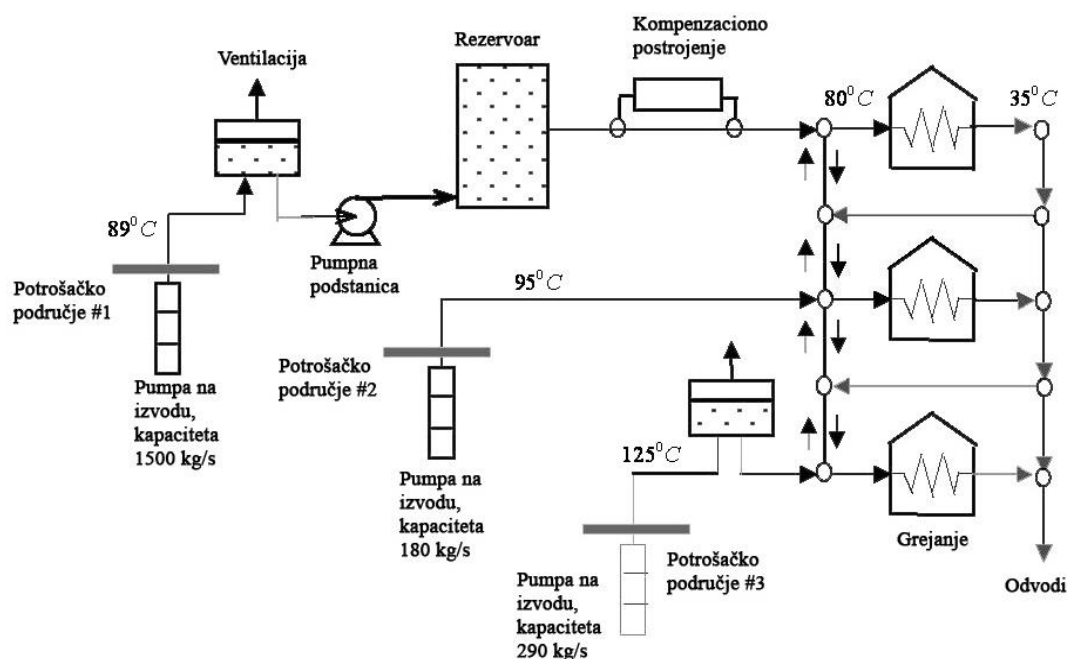
Toplotne pumpe su uređaji za grejanje i hlađenje bilo kog medijuma (tečnosti ili zatvorenog prostora) energijom iz vazduha, zemlje, podzemne ili površinske vode. Shodno tome, postoje sledeći tipovi toplotnih pumpi:

- toplotne pumpe vazduh- voda (izvor energije je vazduh, a medijum kome se energija predaje je voda),
- toplotne pumpe zemlja- voda (izvor energije je tlo na dubini od $(1,5 \div 2)m$, a medijum kome se energija predaje je voda) i
- toplotne pumpe voda- voda (izvor energije je podzemna ili površinska (stajaća ili tekuća) voda, a medijum kome se energija predaje je voda).

Princip rada toplotne pumpe je sledeći:

Energija iz obnovljivog izvora (zemlja, voda, vazduh, izduvni gasovi) ulazi u isparivač pumpe. Zatim, kroz sistem cevi, gas koji je preuzeo energiju se uvodi u kompresor gde rastu pritisak i temperatura. Sledeći korak se odvija u zatvorenom sistemu izmenjivača u kome toplota gasa prelazi na sistem za grejanje/hlađenje. Nakon što preda toplotu, gas se vraća na svoju prvobitnu temperaturu i ponovo ide u isparivač, kako bi proces počeo ponovo.

Školski primer održive primene toplotnih pumpi je sistem daljinskog grejanja u Reykjaviku, gde je snaga instalisanih toplotnih pumpi $800 MW$, slika 1.



Sl.1 Principijelna šema daljinskog grejanja upotrebom geotermalne energije u Reykjaviku

2. INOSTRANA PRAKSA I CENE

Iz razloga sigurnosti, analize koje slede biće urađene za slučaj toplotne pumpe „voda-voda“, za koju je $COP = 4$, koja može izlaznu vodu da zagreje do temperature od $90^{\circ}C$. Ovde je važno dati neka objašnjenja: Neka želimo da dobijemo toplotnu energiju W_t tokom perioda

T . Količnik $\frac{W_t}{T}$ se naziva termička snaga i označava sa P_t . Da bi se pomenuta toplotna

energija dobila primenom toplotne pumpe za koju znamo COP potrebno je potrošiti količinu električne energije $W_e = \frac{W_t}{COP}$. Pri tome, električna snaga P_e iznosi $P_e = \frac{P_t}{COP}$.

Zavisno od snage, toplotna pumpa može da bude jednostepena ili višestepena. Na primer, ako je potrebna toplotna pumpa električne snage od 200 kW_e ona se izvodi kao jednostepena. Ako je potrebna toplotna pumpa električne snage od 500 kW_e ona može da se izvede kao jednostepena ili kao dvostepena, sa dve jedinice od po 250 kW_e . Slično, ako je potrebna toplotna pumpa električne snage od 1000 kW_e ona može da se izvede kao dvostepena, sa dve jedinice od po 500 kW_e , ili kao četvorostepena sa četiri jedinice od po 250 kW_e .

Realizacija sistema sa toplotnim pumpama košta od $(800 \div 2500) \frac{\text{EUR}}{\text{kW}_e}$, zavisno od veličine

postrojenja. Generalno, cena zavisi od više činilaca, pri čemu su najvažniji sledeći:

- vrsta primarnog izvora toplote (vazduh, voda, izduvni gasovi, višak pare u tehnološkom procesu),
- udaljenost primarnog izvora toplote od mesta instalacije toplotne pumpe i obim neophodnih radova (priprema izvora, građevinski radovi, postrojenje za pripremu vode (gasa), dužina cevovoda),
- obezbeđenje uslova za priključak na električnu mrežu (rekonstrukcija postojeće mreže, dozvole, izgradnja novih postrojenja),
- izrada projekta i konsalting,...

Udeo pojedinih komponenti i aktivnosti u ukupnoj ceni projekta je dat u Tabeli 1. Zavisno od konkretne situacije, neke od stavki mogu da izostanu, čime se ukupna cena projekta snižava.

Tabela 1 Udeo pojedinih komponenti i aktivnosti u ukupnoj ceni realizacije projekta primene toplotnih pumpi

Komponenta/aktivnost	Tip primarnog izvora toplote		
	Izduvni gasovi	Višak pare u tehnološkom procesu	Voda (iz reke, jezera ili potoka)
	Udeo u ukupnoj ceni projekta		
Toplotna pumpa	45%	40%	38%
Priprema izvora	12%	15%	35%
Postavljanje opreme	15%	13%	12%
Priprema priključenja na električnu mrežu	28%	19%	7%
Izrada projekta i konsalting	0%	13%	8%

Prema podacima iz 2018. jedinična cena realizacije sistema sa toplotnim pumpama za primenu u industriji je bila $(0,8 \div 1) \frac{10^6 \text{ EUR}}{\text{MW}_e}$. Prema podacima za 12 projekata realizovanih u

Evropi, izrada projekta i konsultacije su koštali $(0,1 \div 0,32) 10^6 \text{ EUR}$ po projektu, sa prosečnom cenom $0,15 \cdot 10^6 \text{ EUR}$.

Interesantno je naglasiti da, za postojeće toplotne sisteme, izrada projekta za korišćenje izduvnih gasova kao primarnog izvora energija ne košta ništa korisnika (to plaća država kao

podsticajnu meru za zaštitu životne sredine).

Nadležna tela iz Danske su 2019. saopštila da je realizacija postrojenja sa toplotnom pumpom „voda-voda“ instalisane električne snage od $1MW_e$ koštala $1,18 \cdot 10^6 EUR$.

Realizacija postrojenja sa toplotnom pumpom „izduvni gasovi-voda“ instalisane električne snage od $1MW_e$ koštala je $0,53 \cdot 10^6 EUR$.

Realizacija postrojenja sa toplotnom pumpom „višak pare-voda“ instalisane električne snage od $1MW_e$ koštala je $0,97 \cdot 10^6 EUR$.

3. PODACI ZA ANALIZE

U ovom delu izvršena je analiza ekonomske opravdanosti primene toplotnih pumpi i FN-elektrana kod velikih industrijskih potrošača, a radi smanjena potrošnje fosilnih goriva. Fosilna goriva se koriste za dobijanje tehnološke pare. Svi ulazni parametri su realni, a u analizama nisu uzete u obzir takse koje se plaćaju zbog emitovanja štetnih gasova u atmosferu, tako da su dobijeni rezultati o periodu isplativosti donekle pesimistički.

Analize su urađene za slučaj korišćenja uglja koji ima isti energetska sadržaj kao i ugalj „Sušena Kolubara“ i za slučaj korišćenja prirodnog gasa, za prosečne velikoprodajne berzanske cene:

$$\text{- cena uglja } 300 \frac{EUR}{t} = 35,20 \frac{din.}{kg},$$

$$\text{- cena prirodnog gasa } 0,65 \frac{EUR}{m^3} = 76,27 \frac{din.}{m^3},$$

$$\text{- cena električne energije } 0,12 \frac{EUR}{kWh} = 14,08 \frac{din.}{kWh}.$$

(Na navedene cene treba dodati i PDV od 20%.)

Usvojimo da satna proizvodnja pare za tehnološke potrebe iznosi $20 \frac{t \text{ pare}}{h}$, temperature

$200^\circ C$. Za generisanje pare navedene temperature troši se:

$$\text{- ugalj } 250 \frac{kg}{t \text{ pare}}, \text{ ili}$$

$$\text{- prirodni gas: } 80 \frac{m^3}{t \text{ pare}}.$$

Ako usvojimo podatak na stranu sigurnosti da je temperatura napojne vode tokom godine $10^\circ C$ možemo da zaključimo sledeće: Pre korišćenja toplotne pumpe trebalo je razviti toplotu da bi se ostvarila temperaturna razlika od $\Delta T_1 = 200^\circ C - 10^\circ C = 190^\circ C$. Nakon primene toplotne pumpe potrebno je ostvariti temperaturnu razliku od $\Delta T_2 = 200^\circ C - 90^\circ C = 110^\circ C$, za šta je potrebno $\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{110}{190} = 57,9\%$ goriva (uglja ili gasa) koje se trošilo pre upotrebe toplotne pumpe (znači za 42,1% manje uglja ili gasa).

Broj sati sa Sunčevim zračenjem je $2000 \frac{h}{god}$. Cena izgradnje FN-elektrane po principu

$$\text{„ključ u ruke“ iznosi } 540 \frac{EUR}{kW_p} + pdv.$$

4. REZULTATI

4.1 Smanjenje potrošnje uglja korišćenjem toplotne pumpe

Donja toplotna moć uglja je $15,4 \frac{MJ}{kg}$. Sagorevanjem $1kg$ uglja oslobađa se toplota koja je ekvivalentna sa $\frac{15,4}{3,6} kWh = 4,27 kWh$. Sa stanovišta potrošnje goriva, proizvodna cena toplotne energije iznosi: $\frac{35,20 \text{ din.}}{4,27 kWh} = 8,24 \frac{\text{din}}{kWh}$.

Ako optimistički pretpostavimo toplotni ciklus čiji je stepen iskorišćenja 0,4 sagorevanjem $1kg$ uglja može se proizvesti $4,27 kWh \cdot 0,4 = 1,7 kWh$ električne energije.

Dakle, sa stanovišta potrošnje goriva, proizvodna cena električne energije iznosi:

$$\frac{35,2 \text{ din.}}{1,7 kWh} = 20,70 \frac{\text{din}}{kWh}.$$

Ako bismo hteli da toplotu dobijenu sagorevanjem uglja zamenimo toplotom dobijenom korišćenjem toplotne pumpe finansijski efekat je sledeći: Ukoliko toplotna pumpa ima

$COP = 4$ potrebno je da se potroši $\frac{4,27}{4} kWh = 1,0675 kWh$ električne energije da bi se dobila količina toplotne energije koja je ekvivalentna energiji koja se dobija sagorevanjem $1kg$ uglja. Ako potrošimo $1,0675 kWh$ to košta: $1,0675 kWh \cdot 14,08 = 15,030 \text{ din.}$

Primenom toplotne pumpe po toni generisane pare potrošnja uglja će biti manja za $250 kg \cdot 0,4 = 100 kg$, što predstavlja uštedu od $100 kg \cdot 35,2 \frac{\text{din.}}{kg} = 3520 \frac{\text{din.}}{t \text{ pare}}$. Sa druge

strane, umesto sagorevanja $100 kg$ uglja, za generisanje jedne tone pare biće potrošena električna energija $100 \cdot 1,0675 kWh = 106,75 kWh$ koja košta $1503 \frac{\text{din.}}{t \text{ pare}}$. Na godišnjem

nivou, ušteda ΔC_{uglja} po osnovu smanjenja potrošnje uglja primenom toplotne pumpe iznosi:

$$\begin{aligned} \Delta C_{uglja} &= 2000 h \cdot 20 \frac{t}{h} \cdot (3520 - 1503) \frac{\text{din.}}{t} + pdv = \\ &= 80680000 \text{ din.} + pdv = 687600 \text{ EUR} + pdv \end{aligned}$$

Razmotrimo sada visinu potrebne investicije za nabavku toplotne pumpe i izgradnju FN-elektrane:

Satna potrošnja električne energije za rad toplotne pumpe iznosi:

$$20 t \cdot 106,75 \frac{kWh}{t} = 2135 \frac{kWh}{h}, \text{ što znači da potrebna snaga toplotne pumpe iznosi } 2135 kW_{el}.$$

Iz razloga sigurnosti usvajamo snagu od $2,5 MW_{el}$, čija nabavna cena iznosi oko 3000000 EUR .

Na godišnjem nivou, potrebno je obezbediti električnu energiju iz FN-elektrane od:

$$2000 h \cdot 2135 \frac{kWh}{h} = 4270000 kWh. \text{ Ako usvojimo da prosečna proizvodnja energije u FN-}$$

elektranama na području Srbije iznosi oko $1150 \frac{kWh}{kW_p}$ zaključujemo da potrebna instalisana

snaga FN-elektreane iznosi: $\frac{4270000}{1150 \cdot 0,9} = 4125 kW_p$, a nabavna cena:

$$4125 kW_p \cdot 540 \frac{ER}{kW_p} + pdv = 2681250 EUR.$$

Ukupna investicija, dakle iznosi: $3000000 EUR + 2681250 EUR = 5681250 EUR$, a prost period otplate:

$$\frac{5681250 EUR}{687600 \frac{EUR}{god} + pdv} = \frac{5681250 EUR}{825120 \frac{EUR}{god}} = 6,88 god.$$

4.2 Smanjenje potrošnje gasa korišćenjem toplotne pumpe

Toplotna moć standardnog kubnog metra prirodnog gasa je $33,34 \frac{MJ}{m^3} \left(9,26 \frac{kWh}{m^3} \right)$, trenutna

cena je $76,27 \frac{din.}{m^3} + pdv = 91,52 \frac{din.}{m^3}$.

Sa stanovišta potrošnje goriva, proizvodna cena toplotne energije iznosi: $\frac{91,52 din.}{9,26 kWh} = 9,88 \frac{din.}{kWh}$.

Razmotrimo mogućnost da se deo toplote dobijene sagorevanjem gasa nadomesti korišćenjem toplotne pumpe.

Ako toplotna pumpa ima $COP = 4$ potrebno je da se potroši $\frac{9,26}{4} = 2,315 kWh$ električne energije da bi se dobila količina toplotne energije koja je ekvivalentna energiji koja se dobija sagorevanjem $1 m^3$ gasa.

Ako potrošimo $2,315 kWh$ to košta: $2,315 kWh \cdot 14,08 + pdv = 39,11 din.$ Dakle, visina specifične uštede je $91,52 - 39,11 = 52,41 \frac{din.}{m^3 gasa}$.

Potrošnja gasa u kotlu na gas iznosi $80 \frac{m^3 gasa}{tona pare}$. Tokom perioda kada FN-elektrana generiše električnu energiju za generisanje pare se potroši:

$$2000 h \cdot 20 \frac{t}{h} \cdot 80 \frac{m^3 gasa}{tona pare} = 3200000 m^3 gasa.$$

Od ukupne količine potrošenog gasa može se uštedeti 40%, odnosno: $3200000 m^3 \cdot 0,4 = 1280000 m^3$. Ova količina gasa trenutno košta:

$$1280000 m^3 \cdot 91,52 \frac{din.}{m^3} = 117,14 \cdot 10^6 din. \approx 10^6 EUR$$

Električna snaga P_e toplotne pumpe biće određena na osnovu satne uštede koja iznosi:

$0,4 \cdot 20 \frac{t}{h} \cdot 80 \frac{m^3 \text{ gasa}}{\text{tona pare}} = 640 \frac{m^3 \text{ gasa}}{h}$. Energetski sadržaj koji treba „nadomestiti“ iznosi:

$W_t = 640 m^3 \cdot 9,26 \frac{kWh}{m^3} = 5926,4 kWh$, tako da za snagu pumpe usvajamo vrednost

$P_e = \frac{5926,4 kWh}{(COP = 4) \cdot 1h} = 1481,6 kW \Rightarrow P_e = 1500 kW$ čija nabavka sa ugradnjom košta oko $2 \cdot 10^6 EUR$.

Da bi se godišnje uštedelo $1280000 m^3$ gasa treba potrošiti $1280000 m^3 \cdot 2,315 \frac{kWh}{m^3} = 2963200 kWh$. Ovu količinu električne energije može da proizvede

FN-elektrana instalisane snage: $\frac{2963200 kWh}{1150 \frac{kWh}{kW_p} \cdot 0,9} = 2863 kW_p$. Izgradnja ove elektrane košta

$2863 kW_p \cdot 650 \frac{EUR}{kW_p} = 1860950 EUR$.

Prost period tokom koga će se isplatiti nabavka toplotne pumpe i FN-elektrane iznosi:

$\frac{2 \cdot 10^6 + 1,86095 \cdot 10^6}{10^6} = 3,87 \text{ god.}$

5. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena analiza ekonomske opravdanosti primene industrijskih sistema koji se baziraju na toplotnim pumpama i FN-elektranama a radi smanjenja korišćenja uglja i prirodnog gasa.

Analizirana je primena toplotnih pumpi tipa „voda-voda“, mada se čini da ima osnova, u daljim istraživanjima, proveriti opravdanost primene pumpi koje kao primarni izvor energije koriste izduvne gasove.

Analize su rađene sa realnim nabavnim cenama i opreme i energenata. Isplativost analiziranih rešenja je neosporna.

Osim izloženih ekonomskih efekata analiziranog rešenja treba imati u vidu i sledeće: Ugalj po jedinici oslobođene toplote emituje u atmosferu dvostruko više gasa CO_2 nego prirodni gas.

Sa druge strane, prirodni gas sagorevanjem oslobađa znatno veću količinu metana (CH_4) nego ugalj. Naučnici kažu da su ugljen-dioksid i metan „braća blizanci“, pri čemu je metan „onaj koji nije dobar“. U EU je odavno uvedena taksa na prekomerno emitovanu količinu CO_2 u atmosferu.

Prema trenutno važećim tarifama, na svaku tonu uglja koji je u rangi „Sušene Kolubare“ plaća se taksa od 80 EUR, dok je na svakih $1000 m^3$ potrošenog prirodnog gasa taksa 102,8 EUR.

ZAHVALNICA

Rad je rezultat istraživanja na projektu No. 451-03-47/2023-01/200132 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije. Autori se najiskrenije zahvaljuju na podršci.

LITERATURA

1. *Heat Pumps in Renovation*, EHPA, 2022.
2. *The Heat Pump Award (HPA) Winning projects of 2021*, EHPA (European Heat Pump Association), 2021.
3. *Large scale heat pumps in Europe*, EHPA, 2017.
4. *Heat Pumps*, EHPA, 2015.
5. *Application of Industrial Heat Pumps*, IEA Industrial Energy, Final Report, 2014.
6. *Heat Pump Implementation Scenarios until 2030*, ECOFYS, 2013.
7. V.Mijailović, "Distribuirani izvori energije-principi rada i eksploatacioni aspekti", Akademska misao, Beograd, 2011.

REDUCING OF FOSSIL FUEL CONSUMPTION IN INDUSTRY AND INCREASING OF ENERGY EFFICIENCY USING GEOTHERMAL HEAT PUMPS AND PHOTO-VOLTAIC SYSTEMS

VLADICA MIJAILOVIĆ, ALEKSANDAR RANKOVIĆ
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

ČAČAK

SERBIA

Abstract— Numerous technological processes (production of paper, leather, explosives, food products) require the use of high-temperature steam, for which coal and/or natural gas are used. These fuels are mainly imported and their prices are very high. Also, the burning of these fuels releases gases into the atmosphere for which, according to the EU rules, penalties are paid. There are numerous examples of the substitution of these fuels using geothermal heat pumps, the operation of which consumes electricity. The paper analyzed the justification of the use of geothermal heat pumps that are supplied with electricity from the PV-power plant during the nursery. Analyzes were made with the market prices of all components, systems and energy sources. Also, an extensive overview of international experiences on the given topic is given.

Key words- Geothermal heat pump - PV power plant - Fossil fuels - Consumption reduction - Energy efficiency - Payback period