

PRIMENA TOPLOTNIH PUMPI ZA KORIŠĆENJE OTPADNE TOPLOTE U INDUSTRIJI

Nikola Tanasić^{*1}, Goran Jankes², Mirjana Stamenić², Vuk Adžić²

Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd¹

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet²

Abstrakt: U energetski intenzivnim industrijama kao što su livnice, čeličane, fabrike hemijske industrije, rafinerije i dr. značajne količine otpadne toplote se generišu u obliku rashladne vode čija temperatura je uobičajeno u opsegu od 25 do 40°C. U slučajevima kada se otpadni fluidni tokovi niske temperature ne mogu primeniti direktno u procesu, postoji mogućnost i tehnička rešenja da se oni iskoriste primenom toplotnih pumpi. U ovom slučaju otpadna toplota sa niskim toplotnim potencijalom (niskom eksergijom) iz raznih industrijskih procesa koristi se, posredstvom toplotne pumpe, kao toplotni izvor za zagrevanje vode za potrebe grejanja objekata, pripremu sanitarne tople vode, zagrevanje različitih procesnih voda i sl. U ovom radu prikazani su rezultati tehno-ekonomske analize koja je sprovedena za primer toplotne pumpe koja koristi otpadnu toplotu iz industrijskih procesa. U radu je razmotreno nekoliko različitih izvora otpadne toplote sa različitim karakteristikama u pogledu raspoloživog protoka fluida, temperature i vremenske raspoloživosti izvora otpadne toplote. Rezultati analize pokazali su da je primena toplotnih pumpi sa nominalnom toplotnom snagom od 295 i 2x390 kW, koje rade u režimu temperature 80/30°C i 80/35°C pri stepenu korisnosti od 3,2 i 3,3, u konkretnom slučaju opravdana, pri čemu je prost period povrata investicije u opsegu od 2,3 do 6 godina.

Ključne reči: toplotne pumpe, industrija, otpadna toplota

1. UVOD

Toplotne pumpe imaju široku primenu za potrebe grejanja stambenih i poslovnih objekata gde se kao izvor toplote koriste okolni vazduh ili geotermalni izvori u vidu podzemnih voda ili tla. U industrijskim uslovima kao izvor toplote najčešće se koristi rashladna voda ili drugi procesni fluidi, koji se karakterišu relativno niskom temperaturom i kao takvi se ne mogu direktno iskoristiti u procesu. Po definiciji toplotna pumpa je uređaj koji toplotu radnog medijuma podiže sa nižeg (toplotni izvor) na viši temperaturni nivo (toplotni ponor), vršeći pri tome određeni rad [1]. Proces se odvija u zatvorenom kružnom, tzv. levokretnom ciklusu koji je najčešće pogonjen električnim kompresorom.

* Corresponding author e-mail: ntanasic@atssb.edu.rs

Primena toplotnih pumpi u industrijskim uslovima može imati važnu ulogu u poboljšanju energetske efikasnosti industrijskih procesa, dok istovremeno prelazak sa fosilnih goriva na električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora doprinosi procesu dekarbonizacije industrije. Toplotne pumpe koje obezbeđuju zagrevanje vode do 100°C su već komercijalno u upotrebi i mogu se smatrati konvencionalnom tehnologijom [2]. Odlikuje ih pouzdan rad, visok stepen korisnosti i mogućnost automatizacije što omogućava optimalan rad sistema koji se brzo prilagođava toplotnom konzumu [2].

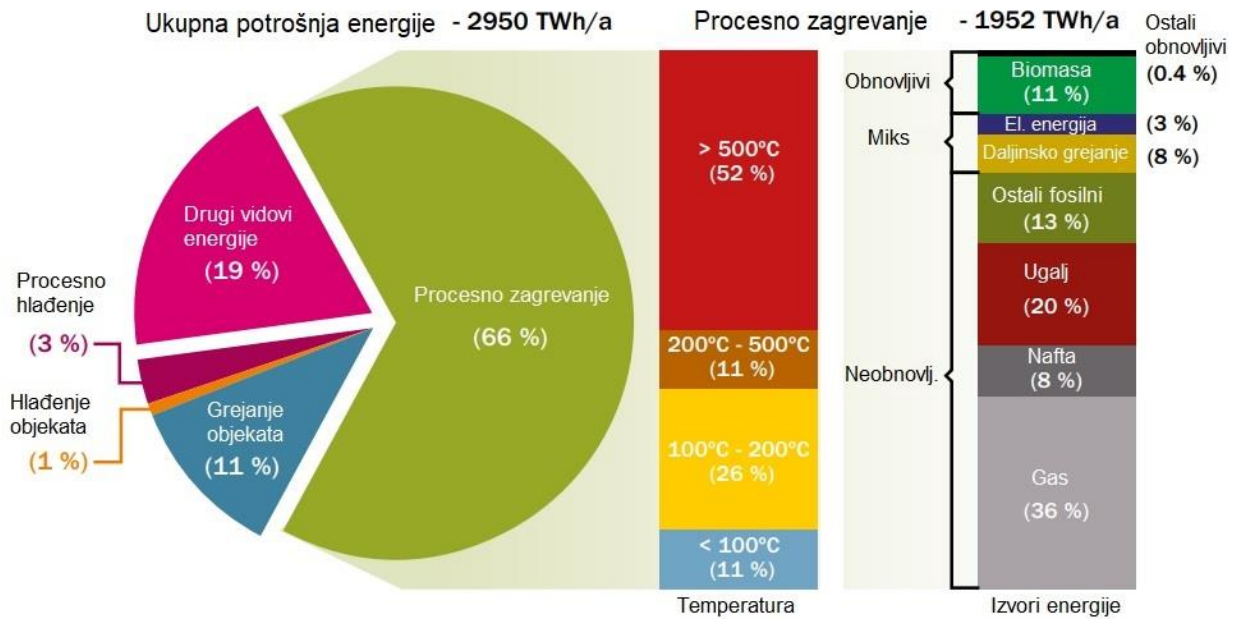
Korišćenje toplotnih pumpi u industriji je u skladu sa strateškim prioritetima EU-2050 za izgradnju konkurentne industrije EU i cirkularne ekonomije. Takođe primena toplotnih pumpi u industriji može da pomogne da se dostignu ciljevi EU da se do 2030. poveća energetska efikasnost za 32% i smanje emisije ugljen dioksida za 40%, uz podsticanje industrijske konkurentnosti, stvaranja mogućnosti za privredni rast i povećanje broja radnih mesta [2].

U ovom radu prikazani su rezultati tehno-ekonomske analize koja je sprovedena na primeru toplotnih pumpi koje koriste otpadnu toplotu iz različitih industrijskih procesa, temperature 25 do 40°C za produkciju tople vode na temperaturi 80°C. U radu je razmatrana primena toplotnih pumpi u dve varijane, u prvoj za korišćenje proizvedene toplotne energije za tehnološke potrošače tokom cele godine i u drugoj za korišćenje proizvedene toplotne energije za potrebe kaloriferskog grejanja u grejnoj sezoni.

2. PRIMENA TOPLOTNIH PUMPI U INDUSTRIJI

Na slici 1 prikazana je struktura potrošnje finalne energije u industriji u EU u 2019. godini. Najveći udeo u ukupnoj potrošnji finalne energije od 2390 TWh/god čini termička energija za zagrevanje procesnih tokova (66% ili 1950 TWh/god). Od ove vrednosti oko 11% se koristi za zagrevanje procesnih tokova na temperaturu koja je niža od 100°C, što je pogodno upravo za primenu toplotnih pumpi. Ukoliko se pogleda struktura izvora energije, može se primetiti da se termička energija dominantno proizvodi od neobnovljivih fosilnih goriva (77%) dok obnovljivi izvori energije čine svega 11,4%.

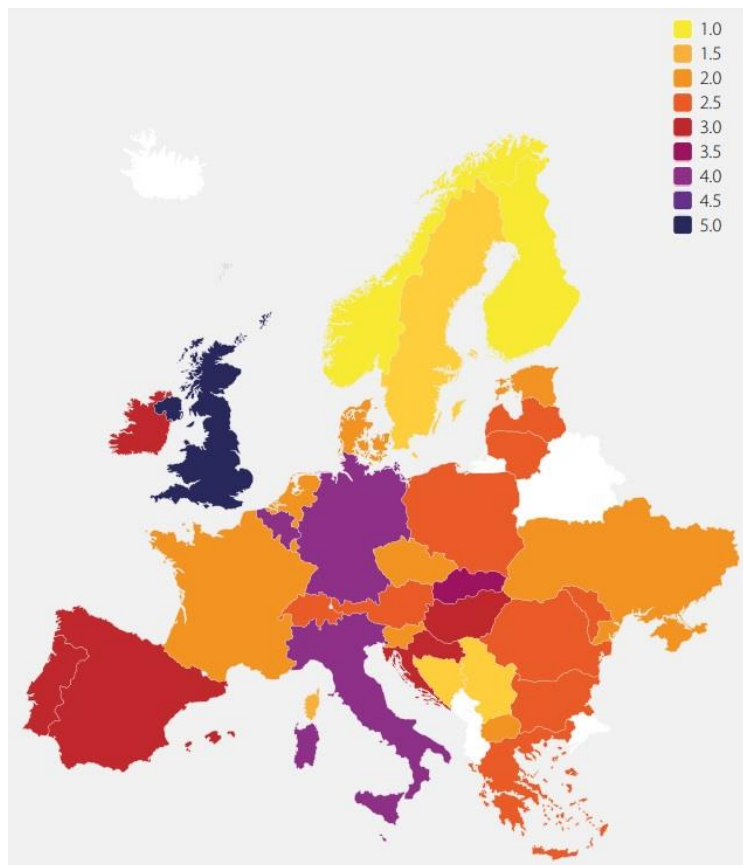
Odluka o investiranju i nabavci toplotne pumpe generalno zavisi od odnosa između investicionih troškova za nabavku i ugradnju toplotne pumpe i prateće opreme i smanjenja operativnih troškova tj. prvenstveno troškova za energente koji proizilaze iz višeg stepena korisnosti toplotnih pumpi u odnosu na druge uređaje koji generišu termičku energiju sagorevanjem fosilnih goriva.



Slika 1. Struktura potrošnje finalne energije i izvora energije u industriji u EU u 2019. godini [2]

Investicioni troškovi uključuju nabavku toplotne pumpe, troškove za pomoćnu opremu, troškove za montažu i puštanje u rad. Troškovi montaže i integracije u postojeći proces mogu biti značajni ako se radi o rekonstrukciji postojećeg sistema i zavise od velikog broja faktora kao što su jednovremenost rada raspoloživih izvora otpadne toplote sa radom potrošača, potrebna snaga zagrevanja, potrebni temperaturski režimi rada i sl. Generalno pravilo je da se specifični investicioni troškovi snižavaju sa povećanjem nominalne snage sistema.

Operativni troškovi najviše zavise od efikasnosti toplotne pumpe (tzv. koeficijent grejanja-EER) i odnosa cene toplotne energije prema ceni alternativnog energenta (npr. prirodni gas, mazut ili ugalj). Generalno, toplotne pumpe će biti isplativije na tržištima gde je cena električne energije niska u odnosu na cenu alternativnog energenta (npr. prirodni gas). Na slici 2 prikazan je odnos cene električne energije prema ceni prirodnog gasa za krajnje korisnike u industriji u Evropi u 2020. godini. Odnos cena značajno varira, npr. manji je od 2 u Norveškoj, Finskoj i Švedskoj a veći od 4 u Belgiji, Velikoj Britaniji, Italiji i Nemačkoj. Srbija takođe spada u zemlje gde je odnos cene električne energije prema ceni gasa (u ovom radu računato sa $0,06137/0,037=1,66$) povoljan za primenu toplotnih pumpi.



Slika 2. Odnos cene električne energije prema ceni prirodnog gasa u zemljama Evrope u 2020. godini [2]

Primeri primene toplotnih pumpi u industriji mogu se naći širom Evrope. U jednoj austrijskoj pivari instalirana je toplotna pumpa snage 370 kW sa akumulatorom toplote. Primenom toplotne pumpe smanjen je utrošak fosilnih goriva u kotlarnici od 1,8 GWh/god, pri čemu je period povrata investicije bio kraći od 6 godina [2]. U austrijskoj čeličani i valjaonici u okolini Graca instalirane su dve toplotne pumpe koje mogu da isporuče toplu vodu na temperaturi do 95°C sa nominalnom snagom od 6 MW do 11 MW. Kao izvor toplote koristi se otpadna toplota rashladne vode pri temperaturi 30°C do 35°C koja bi inače bila oslobođena u okolinu. Efekti primene toplotnih pumpi rezultirali su smanjenjem utroška fosilnih goriva ekvivalentnim 46 GWh i smanjenjem emisije CO₂ od 11.700 tona [3]. U norveškoj mlekari primenjena je toplotna pumpa (nominalne snage grejanja 940 kW sa EER=5) za kombinovano grejanje i hlađenje za različite procesne potrošače. Na ovaj način potrošnja energenata je smanjena za 40% ili 5 GWh/godišnje [2]. U našem regionu, ugrađena je i puštena u rad 2015. godine toplotna pumpa tipa voda-voda, toplotne snage 550 do 880 kW u Rafineriji Modriča. Kompresor na toplotnoj pumpi je klipni, snage 169 kW, sa elektromotorom 200 kW i 1500 o /min sa frekventnim regulatorom i opsegom rada od 17/33 do 100%, upravljani PLC-om. Rashladno sredstvo u toplotnoj pumpi je amonijak (R717). Izvor toplotne energije za toplotnu

pumpu je povrati tok rashladne vode (temperature 20 do 36°C) sa postrojenja ka kuli za hlađenje. Takođe, kao alternativni izvor se može iskoristiti i bunarska voda (temperature 13 do 15°C) [1].

3. OPIS PREDLOŽENOG REŠENJA

U livnici iz sektora obojene metalurgije je nakon sprovedenog energetskog pregleda analizirano nekoliko potencijalnih izvora otpadne toplote. Kao najpovoljniji u pogledu raspoložive temperature i broja radnih sati izabrana su dva izvora otpadne toplote čije karakteristike su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Potencijali izvora otpadne toplote u livnici

Izvor otpadne toplote	Temperatura izvora otpadne toplote (°C)	Protok vode (m ³ /h)	Raspoloživa snaga (kW)	Broj sati rada godišnje (h/god)	Raspoloživa količina toplote (MWh/god)
Rashladna voda sa elektro-indukcione peć za topljenje sirovine	25-30	12	171-188	3400-3640	622-641
Rashladna voda sa livnih mašina (3 kom.)	30-40	20-30	360-570	7890	3670

Kao predlog tehničkog rešenja za korišćenje otpadne toplote predložena je ugradnja sledećih industrijskih toplotnih pumpi tipa voda-voda:

- Toplotna pumpa nominalne korisne snage **213,8 kW** na temperaturskom režimu 80/30°C, kom. 1, tip Vitocal 350-HT BW 352.AHT119, na rashladnom sistemu indukcione peći,
- Toplotne pumpe nominalne korisne snage **294,7 kW** na temperaturskom režimu 80/35°C, kom. 2, tip Vitocal 350-HT BW 353.AHT147, na rashladnom sistemu livnih mašina,

Tehničke karakteristike za izabrane toplotne pumpe tipa Vitocal 350-HT BW 352.AHT119 i 350-HT BW 353.AHT147, proizvođača Viessmann (Nemačka) prikazane su u tabeli 2. U tabelama 3 i 4 prikazane odgovarajuće karakteristike toplotnih pumpi u zavisnosti od ulazne temperature vode u primarnom krugu za izlaznu temperaturu vode u sekundarnom krugu od 80°C.

Za svaku jedinicu toplotne pumpe predviđeni su akumulacioni rezervoari zapremine po 5 m³.

Tabela 2. Tehničke karakteristike toplotnih pumpi [4]

Temperaturski režim primar/sekundar, $t_{ul}/t_{iz}=50/90^{\circ}\text{C}$, $\Delta t=5/10^{\circ}\text{C}$	350-HT BW 352.AHT119	350-HT BW 353.AHT147
Broj stepeni sabijanja, -	2	3
Nominalna toplotna snaga, kW	294,3	390
Nominalna rashladna snaga, kW	205,9	272,4
Električna snaga, kW	88,4	117,6
Jačina struje, A	165,8	203,1
Napon, V	3/PE 400 V/50 Hz	3/PE 400 V/50 Hz
Stepen korisnosti COP, -	3,3	3,3
Vrsta rashladnog fluida	R1234ze	R1234ze
Radni pritisak kondenzacije, bar	32	32
Radni pritisak isparavanja, bar	19	19
Radni pritisak primar/sekundar, bar	10/10	10/10
Dimenzije LxBxH, mm	2153x911x1650	2819x911x1650
Nivo buke, dB(A)	65	65
Masa, kg	1426	1865

Tabela 3. Tehničke karakteristike za tip 350-HT BW 352.AHT119 pri različitim temperaturama ulazne vode u primarni krug [4]

Sekundarni krug izlazna temperatura, °C	80			
Primarni krug ulazna temperatura, °C	25	30	35	40
Nominalna toplotna snaga, kW	180,8	213,8	224,6	262,3
Električna snaga, kW	61,4	66,2	68,8	73,1
Jačina struje, A	135,0	140,8	143,9	148,9
Stepen korisnosti COP, -	2,9	3,2	3,3	3,6

Tabela 4. Tehničke karakteristike za tip 350-HT BW 353.AHT147 pri i različitim temperaturama ulazne vode u primarni krug [4]

Sekundarni krug izlazna temperatura, °C	80			
Primarni krug ulazna temperatura, °C	20	25	30	35
Nominalna toplotna snaga, kW	197,7	236,1	280,2	294,7
Električna snaga, kW	73,2	80,1	87,0	90,6
Jačina struje, A	143,1	152,1	160,8	165,5
Stepen korisnosti COP, -	2,7	2,9	3,2	3,3

4. TEHNOEKONOMSKA ANALIZA PREDLOŽENOG REŠENJA

Predviđeno je da toplotne pumpe rade u temperaturskom režimu 80/30°C u slučaju indukcione peći, odnosno u režimu 80/35°C kod livnih mašine. Koeficijent efikasnosti (COP) ovog tipa toplotnih pumpi u temperaturskom režimu 80/30°C iznosi 3,2 a u temperaturskom režimu 80/35°C iznosi 3,3.

Ostali ulazni podaci su prikazani u nastavku:

Broj dana grejanja: 201 dan/god

Cena električne energije: 0,06137 EUR/kWh

Cena prirodnog gasa: 0,35 EUR/m³ = 0,037 EUR/kWh

Toplotna moć prirodnog gasa: 34000 kJ/m³ = 9,44 kWh/m³

Stepen korisnosti gasnog kotla i vrelovodnog sistema: 85%

Proračun i rezultati efekata primene toplotnih pumpi prikazani su u tabelama 5 i 6, pri čemu su razmatrane dve varijante: A - toplotne pumpe se koriste potrebe zagrevanja tehnoloških potrošače tokom cele godine, i B - toplotne pumpe se koriste samo za potrebe kaloriferskog grejanja u grejnoj sezoni.

Tabela 5. Efekti primene toplotne pumpe na elektro-indukcionoj peći

	Varijanta A	Varijanta B
Nominalna toplotna snaga, kW	213,8	213,8
Električna snaga, kW	66,2	66,2
Br. radnih sati, h/god	3640	204
Isporučena toplotna energija, MWh/god	213,8·3640=778,2	213,8·2004= 428,6
Ekvivalentno primarnoj energiji prirodnog gasa, MWh/god	778,2/0,85=915,6	428,6/0,85=504,2
Ušteda u potrošnji prirodnog gasa, m ³ /god	(915,6·3600)/34=96942	(504,2·3600)/34=53385
Ušteda u troškovima za prirodni gas, EUR/god	96942·0,35=33930	53385·0,35=18685
Utrošena električna energija, MWh/god	66,2·3640=241	66,2·2004=132,7
Troškovi za električnu energiju, EUR/god	241·61,37=14788	132,7·61,37=8144
Neto uštede, EUR/god	33930-14788=19142	18685-8144=10541

Procenjena vrednost investicije za toplotnu pumpu (tip Vitocal 350-HT BW 352.AHT119) - 65.000 EUR, rezervoar za toplu vodu 5m³ – 2500 EUR, cirkulacione pumpe – 4000 EUR, kaloriferi - 4000 EUR, ekspanzione posude – 300 EUR, ukupno za kapitalnu opremu 75.800 EUR, sa ostalom opremom, projektnom dokumentacijom i montažom 115.000 EUR.

Tabela 6. Efekti primene toplotnih pumpi na livnim mašinama

	Varijanta A	Varijanta B
Nominalna toplotna snaga, kW	2x294,7= 589,4	2x294,7= 589,4
Električna snaga, kW	2x90,6= 181,2	2x90,6= 181,2
Br. radnih sati, h/god	7890	4345
Isporučena toplotna energija, MWh/god	589,4·7890= 4650,4	589,4·4345= 2560,9
Ekvivalentno primarnoj energiji prirodnog gasa, MWh/god	4650,4/0,85=5471	2560,9/0,85=3012,8
Ušteda u potrošnji prirodnog gasa, m ³ /god	(5471·3600)/34=579284	(3012,8·3600)/34=319003
Ušteda u troškovima za prirodni gas, EUR/god	579284·0,35=202750	319003·0,35=111651
Utrošena električna energija, MWh/god	181,2 ·7890=1429,7	181,2·4345=787,3
Troškovi za električnu energiju, EUR/god	1429,7·61,37=87739	787,3·61,37=48316
Neto uštede, EUR/god	202750-87739=115011	111651-48316=63335

Procenjena vrednost investicije za toplotnu pumpu (tip Vitocal 350-HT BW 353.AHT147) - 2x81.000=162.000 EUR, rezervoar za toplu vodu 2x5m³ – 5000 EUR, cirkulacione pumpe – 8000 EUR, ekspanzione posude – 1000 EUR, ukupno za značajniju opremu 176.000 EUR, sa ostalom opremom, projektnom dokumentacijom i montažom 265.000 EUR.

Rezultati tehno-ekonomske analize prikazani su u tabeli 7.

Tabela 7. Rezultati tehno-ekonomske analiza predloženog tehničkog rešenja

Izvor otpadne toplote	Varijanta*	Vrednost investicije (EUR)	Utrošak za električnu energiju (EUR/god)	Ušteda u potrošnji prirodnog gasa (EUR/god)	Neto uštede (EUR/god)	Period povrata investicije (god)
Toplotna pumpa na elektro-indukcionoj peći	A	115.000	14.788	33.930	19.142	6,0
	B	115.000	8.144	18.685	10.541	10,9
Toplotne pumpe na livnim mašinama, 2 kom	A	265.000	87.739	202.750	115.011	2,3
	B	265.000	48.316	11.1651	63.335	4,2

*Napomena:

Varijanta A: Toplotne pumpe su vezane za grejni krug 1, moguće korišćenje toplotne enrgije za tehnološke potrošače tokom cele godine

Varijanta B: Toplotne pumpe se koriste samo za potrebe kaloriferskog grejanja u grejnoj sezoni

Iz rezultata prikazanih u tabeli 7. može se zaključiti da je primena toplotnih pumpi na livnim mašinama u varijanti A sa najbržim povratom investicije od 2,3 godine. U varijanti B, kada se toplota proizvedena na toplotnim pumpama koristi samo za potrebe grejanja u toku grejne sezone, prost period povrata investicije se povećava na 4,2 godine što se može smatrati opravdanom

investicijom. Primena toplotne pumpe na elektro-indukcijskoj peći pri trenutnim cenama energenata je manje opravdana s obzirom da su prosti periodi povrata investicije 6 godina kod varijante A i 10,9 godina kod varijante B.

5. ZAKLJUČAK

Primena toplotnih pumpi u industrijskim uslovima može imati važnu ulogu u poboljšanju energetske efikasnosti industrijskih procesa, dok istovremeno prelazak sa fosilnih goriva na električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora doprinosi procesu dekarbonizacije industrije.

U ovom radu prikazani su rezultati tehno-ekonomske analize koja je sprovedena na primeru primene toplotnih pumpi u livnici obojene metalurgije. Predviđeno je da toplotne pumpe rade u temperaturnom režimu 80/30°C u slučaju indukcione peći, odnosno u režimu 80/35°C kod livnih mašina. Analiza je sprovedena za dve varijante, u varijanti (A) za korišćenje proizvedene toplotne energije za tehnološke potrošače tokom cele godine i u varijanti (B) za korišćenje proizvedene toplotne energije za potrebe kaloriferskog grejanja u grejnoj sezoni.

Rezultati su pokazali da je primena toplotnih pumpi na livnim mašinama u varijanti A sa najbržim povratom investicije od 2,3 godine. U varijanti B, kada se toplota proizvedena na toplotnim pumpama koristi samo za potrebe grejanja u toku grejne sezone, prost period povrata investicije se povećava na 4,2 godine što se može smatrati opravdanom investicijom. Primena toplotne pumpe na elektro-indukcijskoj peći pri trenutnim cenama energenata je manje opravdana s obzirom da su prosti periodi povrata investicije 6 godina kod varijante A i 10,9 godina kod varijante B. Treba napomenuti da opravdanost investicije u velikoj meri zavisi od cene električne energije i drugih energenata pa je pri sprovođenju ekonomskih analiza potrebno oceniti osetljivost investicije u odnosu na dugoročnu projekciju kretanja cena energenata na tržištu.

6. LITERATURA

1. Simić, S., Džudželija, Ž., Ganilović, D., Iskorišćenje otpadne toplote pomoću toplotne pumpe u rafineriji ulja Modriča, *Zbornik radova sa međunarodnog kongresa o procesnoj industriji*, Procesing 2015.
2. Arnitz A, Rieberer R, Wilk V, Unger H, Schlemmer P. Waste Heat Recovery at the Steel and Rolling Mill “Marienhütte”, Graz (Austria). *Heat Pumping Technologies Magazine*, 2019; 2.
3. Robert de Boer et al., White paper: Strengthening Industrial Heat Pump Innovation - Decarbonizing Industrial Heat, Sintef, 2020. <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/industrial-heat-pump-whitepaper/2020-07-10-whitepaper-ihp-a4.pdf>
4. Katalog proizvođača Viessmann

APPLICATION OF HEAT PUMPS FOR UTILIZATION OF WASTE HEAT IN INDUSTRY

Nikola Tanasić^{*1}, Goran Jankes², Mirjana Stamenić², Vuk Adžić²

*The Academy of Applied Technical Studies Belgrade*¹

*University of Belgrade, Faculty of Mechanical engineering*²

Abstract: In energy-intensive industries such as foundries, ironworks, chemical plants, refineries, etc. significant amounts of waste heat are generated in the form of cooling water, with the temperature usually in the range of 25 to 40°C. In cases where the waste heat is of a low temperature, insufficient for direct use, it can be used rationally by applying a heat pump that uses low-potential waste heat from the industrial process as a heat source, for the preparation of hot water for heating, sanitary hot water, technological hot water consumers or some other purpose. This paper presents the results of techno-economic analysis on the example of the application of heat pumps for the utilization of waste heat in industry. In the paper several different sources of waste heat with different characteristics in terms of flow rate, water temperature and operation mode are analyzed. The results of the analysis showed that the application of heat pumps with a nominal heat output of 295 and 2x390 kW, at a temperature regime of 80/30°C and 80/35°C and with COP of 3.2 and 3.3, respectively is justified, with a simple payback period of the investment in range of 2.3 to 6 years.

Key words: heat pumps, industry, waste heat