Primena toplotnih pumpi voda–voda za korišćenje otpadne procesne toplote kao alternativa gasnim kotlovima u industrijskom grejanju

GORAN N. IVANOV, Univerzitet u Novom Sadu,
Poljoprivredni fakultet, Novi Sad
ORCID: 0009-0001-2004-4567
STEVICA M. JANKOV, Univerzitet u Novom Sadu,
Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin
ORCID: 0009-0000-6503-8200
BORIVOJ Z. NOVAKOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,
Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin
ORCID: 0000-0003-2816-3584
LUKA R. ĐORĐEVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,
Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin
ORCID: 0000-0003-4578-9060

Originalni naučni rad
UDC: 621.577.4(497.113)
620.97:502.131.1(497.113)
DOI: 10.5937/tehnika26054631

Ovaj naučni rad istražuje samo jedan potencijalni izvor toplotne energije, sa posebnim fokusom na tehnologije toplotnih pumpi, s naglaskom na sisteme voda–voda. Eksperimentalni deo rada obuhvata projekat primene toplotnih pumpi voda-voda u Fabrici za proizvodnju bakarnih žica Essex Furukawa d.o.o. u Zrenjaninu, gde je korišćena voda iz procesa hlađenja mašina umesto konvencionalnih geotermalnih voda (bunara). Analizirani su finansijski efekti, koeficijent učinka (COP), potrošnja električne energije i gasa i zagađenje vazduha ugljen-dioksidom. Rezultati pokazuju da pumpe voda-voda, implementirane u okviru projekta koji ne koristi geotermalnu vodu, ostvaruju stabilan koeficijent učinka kako je proizvođač i naveo u tehničkoj dokumentaciji i projektu, zahvaljujući konstantnoj temperaturi vode koja se dobija tokom procesa hlađenja mašina. Procene emisije CO_2 u vazduh ukazuju na smanjenje zagađenja u odnosu na kotlove na prirodni gas, što je i dokumentovano u radu. Dobijeni rezultati su u skladu sa relevantnim studijama i standardima (npr. EN 14511, EN 14825, IEA, EHPA). Ovi nalazi doprinose razumevanju i unapređenju strategije održivog razvoja u oblasti energetike.

Ključne reči: *obnovljivi izvori energije, toplotne pumpe, COP, energetska efikasnost, kotlovi na prirodni gas, rekuperacija otpadne toplote*

1. UVOD

Ovaj naučni rad će istražiti efekat ugradnje toplotnih pumpi tipa voda-voda u Fabrici za proizvodnju bakarne žice Essex Furukawa d.o.o. u Zrenjaninu u zatvorenom sistemu. Projekat predstavlja konkretan i važan primer primene ove inovativne tehnologije u industrijskom sektor [1–4]. Razvoj i primena toplotnih pumpi u značajnoj meri su obrađeni kroz eksperimentalne i pregledne studije koje potvrđuju njihovu primenljivost u različitim energetskim sistemima, uključujući industrijske i hibridne konfiguracije [5, 6]. Sistem će koristiti vodu kojom se hlade mašine kao izvor toplote za grejanje upravne zgrade, umesto korišćenja kotlova na prirodni gas koji su kako se pokazalo predimenzionisani za grejanje pomenute upravne zgrade, što će dovesti do značajnog smanjenja upotrebe energije i potrošnje energenata u fabrici [7, 8]. Istraživanje i analiza sistema toplotnih pumpi voda-voda biće usmereni na nekoliko ključnih aspekata:

- proučavaće se uticaj instalacije toplotne pumpe na ukupnu energetsku efikasnost u Fabrici Essex Furukawa d.o.o. u Zrenjaninu [9];
- analiziraće se ekonomska isplativost projekta [10]
- istraživaće se i uticaj na zaštitu životne sredine [7, 8].

Adresa autora: Goran Ivanov, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Trg D. Obradovića 8
e-mail: ivanovgoran78@gmail.com
Rad primljen: 29.05.2026.
Rad prihvaćen: 03.09.2026.

U ovom radu je ispitivana mogućnost i opravdanost primene sistema toplotnih pumpi voda–voda za grejanje upravne zgrade industrijskog postrojenja korišćenjem otpadne toplote iz procesa hlađenja proizvodnih mašina [9,10].

Istraživanje je usmereno na utvrđivanje uticaja implementiranog sistema na energetsku efikasnost, potrošnju energenata, troškove eksploatacije i emisiju ugljen-dioksida, kao i na procenu ukupne tehničke, ekonomske i ekološke opravdanosti ovakvog rešenja u industrijskim uslovima rada [7, 8].

U okviru rada potrebno je:

- analizirati postojeći sistem grejanja upravne zgrade zasnovan na korišćenju prirodnog gasa;
- prikazati tehničke karakteristike i princip rada implementiranog sistema toplotnih pumpi voda–voda
- izvršiti analizu raspoloživosti i energetskog potencijala otpadne toplote iz sistema za hlađenje proiz vodnih mašina [9];
- prikupiti i obraditi eksploatacione podatke o radu sistema tokom posmatranih grejnih sezona;
- odrediti energetske pokazatelje rada sistema, sa posebnim osvrtom na koeficijent učinka (COP), potrošnju energije i toplotni konzum [11, 12];
- izvršiti uporednu analizu rada sistema pre i nakon ugradnje toplotnih pumpi;
- analizirati finansijske efekte primene novog sistema kroz procenu ostvarenih ušteda i perioda povraćaja investicije [10];
- proceniti uticaj sistema na smanjenje emisije CO_2 i unapređenje zaštite životne sredine [7, 8];
- na osnovu dobijenih rezultata oceniti energetsku, ekonomsku i ekološku opravdanost primene sistema toplotnih pumpi voda–voda u industrijskim objektima [9,10].

2. MATERIJAL I METODE RADA

Istraživanje je sprovedeno u Fabrici Essex Furukawa Magnet Wire Balkan d.o.o. u Zrenjaninu, koja se nalazi u Industrijskoj zoni Jugoistok–Ečka, na adresi Ognjeslava Kostovića bb. Proizvodno postrojenje u Zrenjaninu predstavlja greenfield investiciju vrednu oko 30 miliona evra, puštenu u rad 2018. godine, sa proizvodnim programom usmerenim pre svega na proizvodnju okrugle emajlirane bakarne žice, odnosno magnetne žice, za primenu u automobilskoj, energetskoj i industrijskoj oblasti.

Prema zvaničnim podacima kompanije, postrojenje je projektovano kao jedno od energetski efikasnijih Essex proizvodnih pogona u Evropi i opremljeno je savremenom digitalnom tehnologijom u skladu sa principima Industry 4.0 [9, 10].

Sa stanovišta privredne delatnosti, Fabrika je registrovana za proizvodnju ostalih elektronskih i električnih provodnika i kablova, a njen tehnološki proces zasniva se na proizvodnji emajlirane bakarne žice, koja se koristi u izradi elektromotora, transformatora, namotaja i drugih komponenti u elektroindustriji. U analiziranom postrojenju proizvodni proces obuhvata termičku obradu, emajliranje, izvlačenje, namotavanje i hlađenje žice, pri čemu je za ovaj rad od posebnog značaja činjenica da se u procesu koriste mašine koje rade na visokim temperaturama i zahtevaju kontinualno hlađenje tehničkom vodom. Upravo je ta voda, nakon što preuzme toplotu iz proizvodnog procesa, razmatrana kao sekundarni energetski resurs za sistem toplotnih pumpi voda–voda [9, 13].

Grad Zrenjanin, u kome je istraživanje sprovedeno, nalazi se na zapadnoj ivici banatskog lesnog platoa, na mestu gde se kanalisani Begej uliva u nekadašnje korito Tise. Geografski položaj grada određen je koordinatama 20 ° 23’ istočne geografske dužine i 45 ° 23’ severne geografske širine, dok je nadmorska visina grada oko 80 m, sa rasponom od 77 do 97 m na teritoriji grada. Zrenjanin je udaljen oko 75 km od Beograda i oko 50 km od Novog Sada, što ga čini značajnim privrednim i saobraćajnim čvorištem u središtu srpskog dela Banata. Ukupna površina administrativne teritorije iznosi 1.326 km², a više od 82,5% te površine čini poljoprivredno zemljište.

Klimatske karakteristike Zrenjanina imaju neposredan značaj za analizu rada sistema grejanja. Prema zvaničnim podacima Grada Zrenjanina, klima ovog područja je stepsko-kontinentalna, prelazna od slabo vlažnog ka suvom tipu, sa srednjom godišnjom temperaturom vazduha od oko 11,2°C i prosečnom godišnjom količinom padavina od oko 6 mm. Klimatski izvori pokazuju da su zime hladne, a leta topla do vrela, pri čemu se prosečne januarske minimalne temperature kreću oko −1,4°C, a prosečne maksimalne oko 3,6°C, dok se u avgustu prosečne maksimalne temperature kreću oko 30,7°C. Ovakvi klimatski uslovi ukazuju na jasno izraženu potrebu za grejanjem tokom zimskog perioda i predstavljaju relevantan okvir za analizu energetske efikasnosti sistema toplotnih pumpi u realnim uslovima rada [11, 12].

U predmetnom postrojenju proizvodni proces je visoko automatizovan i praćen preko HMI (Human–Machine Interface, interfejs čovek–mašina) i SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), sistem za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka) platformi [6]. Ovi sistemi omogućavaju vizuelizaciju procesa [14], praćenje temperature, nadzor nad radom opreme i prikupljanje podataka u realnom vremenu, što je bilo od posebnog značaja za analizu raspoložive otpadne toplote i za utvrđivanje temperaturnog režima tehničke vode u sistemu hlađenja. Unutar istraživanja, HMI i

SCADA nisu korišćeni samo kao operativni alati, već i kao izvor relevantnih eksploatacionih podataka na osnovu kojih je procenjena pogodnost procesne vode za primenu u sistemu voda–voda.

S obzirom na to da mašine koje se koriste u fabrici za proizvodnju emajlirane bakarne žice rade na temperaturama oko 680°C, za njihov normalan rad neophodno je kontinualno hlađenje vodom koja cirkuliše kroz cevi postavljene uz same mašine. Praćenjem parametara preko softvera za nadzor rada mašina utvrđeno je da temperatura vode nakon hlađenja mašina, kada dospe u rezervoar tehničke vode, iznosi oko 18°C, što je predstavljalo polaznu osnovu za istraživanje mogućnosti instalacije toplotnih pumpi voda–voda u zatvorenom sistemu [9, 13, 15, 16].

Slika 1 prikazuje HMI displej za praćenje parametara temperature na mašinama za proizvodnju bakarne žice. Ovaj prikaz ima značaj jer potvrđuje da je u postrojenju obezbeđen kontinualan nadzor nad temperaturnim režimima u tehnološkom procesu, što je preduslov za pouzdanu analizu raspoložive otpadne toplote.



Slika 1 - HMI displej za praćenje parametara temperature na mašinama za proizvodnju bakarne žice; originalna fotografija

Slika 2 prikazuje Siemens HMI displej za praćenje parametara temperature u rezervoaru tehničke vode.



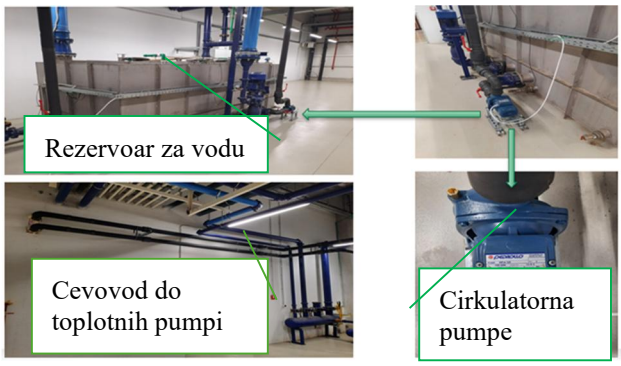
Slika 2 - Siemens HMI displej za praćenje parametara temperature na rezervoaru za tehničku vodu; originalna fotografija

Ovaj prikaz ima metodološki značaj jer dokumentuje mesto na kome je praćena temperatura vode nakon preuzimanja toplote iz proizvodnog procesa, odnosno temperatura vode koja je korišćena kao ulazni parametar za analizu rada toplotnih pumpi.

Siemens SIMATIC HMI paneli, koji su korišćeni u predmetnom postrojenju, predstavljaju industrijske dodirne displeje namenjene radu u zahtevnim proizvodnim uslovima [9]. Njihova uloga nije izvršavanje upravljačke logike, već vizuelizacija procesa i omogućavanje operatorskog unosa komandi, dok se sama logika upravljanja izvršava na PLC nivou. Konfiguracija ovih sistema vrši se u okviru TIA Portal okruženja, što omogućava direktno povezivanje HMI objekata sa PLC promenljivama i praćenje procesnih veličina u realnom vremenu. U kontekstu ovog istraživanja, ovakav sistem obezbedio je pouzdanu osnovu za praćenje temperature, pritiska, nivoa i režima rada pratećih elemenata u sistemu hlađenja i grejanja.

Sistem koji je ugrađen sastoji se od tri toplotne pumpe u seriji i omogućava relativno brzo zagrevanje povratne vode iz sistema hlađenja mašina sa približno 18°C na 40–42°C u vremenskom intervalu od oko 20 minuta [13, 16]. Tako zagrejana voda se zatim preko cirkulacione pumpe uvodi u sekundarni sistem grejanja upravne zgrade. Na ovaj način je uspostavljena direktna energetska veza između proizvodnog procesa i sistema grejanja, čime je otpadna toplota iz proizvodnje uključena u ukupni energetski bilans fabrike [9, 10].

Za rad toplotnih pumpi potrebna je električna energija, pri čemu apsorbovana električna snaga iznosi približno 6,89 kW po pumpi, odnosno ukupno 20,67 kW za sve tri jedinice. Ova potrošnja je, prema analiziranim podacima, znatno niža u odnosu na prethodnu potrošnju prirodnog gasa potrebnu za zagrevanje upravne zgrade, što je predstavljalo jedan od ključnih argumenata za dalju energetsku i ekonomsku analizu sistema [10].



Slika 3 - Rezervoar za vodu sa cirkulacionom pumpom; originalne fotografije

Jedna od dodatnih prednosti analiziranog sistema ogleda se u tome što se povratna voda iz toplotnih

pumpi vraća u rezervoar tehničke vode, slika 3, odakle se ponovo distribuira u sistem cevi za hlađenje mašina. Na taj način je formiran zatvoreni tehnički krug, čime je eliminisana potreba za korišćenjem podzemnih voda, što sa stanovišta zaštite životne sredine i upravljanja resursima predstavlja povoljno rešenje [7, 8].

Upravna zgrada Fabrike, slika 4, predstavlja potrošački deo sekundarnog sistema grejanja, na koji je priključen sistem toplotnih pumpi voda–voda. Administrativno-kancelarijski deo kompleksa upravne zgrade iznosi 2.000 m² u koje spadaju: kancelarije, hodnici, kantina, toaleti, svlačionice, kancelarije za sastanke, priručne kuhinje, laboratorija kvaliteta.



Slika 4 - Upravna zgrada „Essex Furukawa" fabrike u Zrenjaninu; originalna fotografija

Na osnovu mašinskog projekta za grejanje upravne zgrade utvrđeno je da je za potrebe grejanja neophodna ukupna toplotna snaga od 95,688 kW, od čega 73,05 kW otpada na fan-coil uređaje, a, 638 kW na radijatorsko grejanje. Postojeći gasni kotlovi korišćeni su isključivo za grejanje upravne zgrade i u ovom radu su poslužili kao referentni sistem za poređenje sa novoimplementiranim sistemom toplotnih pumpi [10].

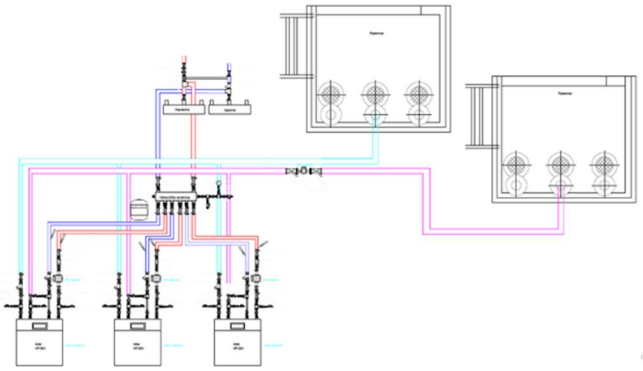


Slika 5 - Instalirane toplotne pumpe u kotlarnici ARTEL HP-90H; originalna fotografija

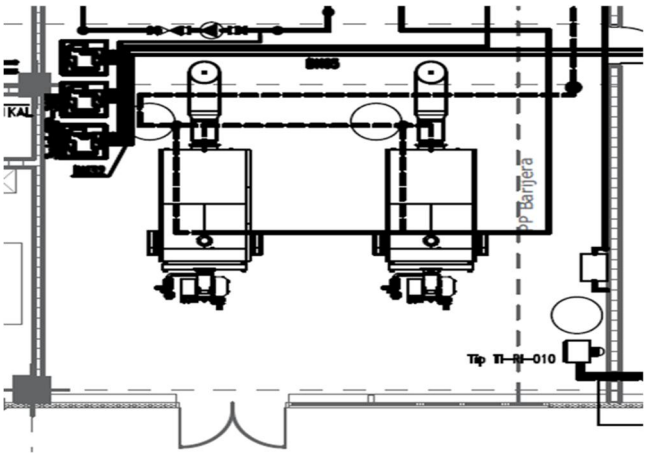
U sistemu su primenjene toplotne pumpe modela ARTEL HP-90H, slika 5, kapaciteta 90 kW za režim grejanja pri temperaturskom režimu 40/45°C, sa maksimalnom temperaturom potisnog voda do 52°C [13, 16]. Uređaj je konstruisan sa tri Scroll Copeland kompresora, šest pločastih lemljenih SWEP izmenjivača od nerđajućeg čelika, ARTEL touch display sistemom za kontrolu rada i Danfoss komponentama za regulaciju i zaštitu kompresora. Radni fluid u sistemu je R407c, dok je napon napajanja 400V ± 10%, 3 Ph, 50 Hz. Navedene tehničke karakteristike ukazuju da je sistem projektovan za stabilan rad u niskotemperaturnom režimu grejanja, što je u skladu sa namenom i uslovima istraživanja [12, 13].

Na slikama 6 i 7 prikazane su šema tehničkog rešenja i šema tehničke prostorije, odnosno kotlarnice, sa stvarno izvedenim stanjem. Ove šeme su od posebnog značaja za verifikaciju načina povezivanja primarnog i sekundarnog kruga, položaja toplotnih pumpi u odnosu na postojeće kotlove i ukupne integracije novog sistema u postojeću infrastrukturu objekta.

Postojeći konvencionalni sistem grejanja, koji je u ovom istraživanju korišćen kao referentni sistem za poređenje, čine dva toplovodna gasna kotla marke Hoval Max-3, smeštena u kotlarnici upravne zgrade i evidentirana kao emiteri E1 i E2. Prema raspoloživoj tehničkoj i mernoj dokumentaciji, kotlovi su namenjeni isključivo za grejanje upravne zgrade, rade na prirodni gas, u režimu pretežno nepromenljivog rada, sa maksimalnom temperaturom vode do 105°C, dok je kotlovski sistem u dokumentaciji vođen sa toplotnom snagom od 1.750 kW.



Slika 6 - Šema tehničkog rešenja; tehnički crtež iz projekta



Slika 7 - Šema tehničke prostorije (kotlarnica) sa stvarnim izvedenim stanjem; tehnički crtež iz projekta

Kotlovi Hoval Max-3, slika 8, pripadaju grupi troprolaznih čeličnih toplovodnih kotlova za gas, projektovanih u skladu sa evropskim standardima EN 303 i EN 304, sa zadnjim izvodom dimnih gasova, gornjim priključkom polaznog voda i zadnjim priključkom povratnog voda. Konstruktivno su izvedeni kao potpuno zavareni kotlovi, sa termičkom izolacijom kotlovskog tela od mineralne vune debljine 80 mm i predviđeni su za primenu sa Low-NOx gorionicima, što ih svrstava u tehnički pouzdana rešenja za srednje i velike sisteme grejanja.



Slika 8 - Kotao Hoval – Max 3

Tehnički podaci prikazani su tabeli 1.

Tabela 1. Tehnički podaci o postrojenju u kojem se vrši merenje

Naziv	Kotao br. 1 za grejanje prostorija (E1))	Kotao br. 2 za grejanje sobe (E2)
Vrsta	Novo malo postrojenje za sagorevanje	Novo malo postrojenje za sagorevanje
Pogon	Kotlarnica	Kotlarnica
Proizvođač	Hoval	Hoval
Tip	Toplovodni Hoval Max-3	Toplovodni Hoval Max-3
ID broj	603156810042	603156810041
Kapacitet	Tvode max. = 105 °C	Tvode max. = 105 °C
Način rada	Pretežno nepromenljiv	Pretežno nepromenljiv
Sirovine	Napojna voda kotla	Napojna voda kotla
Proizvod	Topla voda	Topla voda

U metodološkom smislu, istraživanje se zasniva na komparativnoj analizi rada sistema pre i posle ugradnje toplotnih pumpi [10]. Za referentni period uzeta je grejna sezona 2022. godine, kada je sistem grejanja upravne zgrade funkcionisao preko gasnih kotlova, dok je za analizu novog sistema korišćena grejna sezona 2023. godine, kada su u rad uvedene toplotne pumpe voda–voda.

Analiza je obuhvatila praćenje i poređenje potrošnje električne energije i prirodnog gasa, vrednosti COP, finansijskih efekata rada sistema i procenu emisija CO_2. Dobijeni rezultati razmatrani su u odnosu na tehničku dokumentaciju proizvođača, kao i u odnosu na relevantne standarde EN 14511 i EN 14825, što je omogućilo da se performanse analiziranog sistema ocene u okviru savremenih tehničkih kriterijuma za procenu rada toplotnih pumpi [14, 15].

U okviru istraživanja praćene su i analizirane sledeće veličine: temperatura vode na ulazu i izlazu iz sistema, temperatura potisnog voda, potrošnja električne energije toplotnih pumpi, potrošnja prirodnog gasa u referentnom sistemu, vrednosti COP, toplotni konzum sistema, kao i procenjena emisija CO_2.

COP je analiziran kao osnovni pokazatelj trenutnog energetskog učinka sistema, dok su potrošnja energenata, toplotni konzum i emisije korišćeni kao osnova za procenu energetske, ekonomske i ekološke opravdanosti rešenja [11, 12, 17].

Podaci su prikupljani iz HMI/-SCADA sistema, softvera za praćenje rada toplotnih pumpi, tehničke dokumentacije, projektne dokumentacije i internih evidencija o potrošnji energenata [9]. Osnovna veličina za vrednovanje rada toplotnih pumpi bio je koeficijent učinka, koji je definisan odnosom korisne isporučene toplote i utrošene električne energije:

$$COP = Q_{out} / W_{in} \qquad (1)$$

gde je:

Q_{out} - upotrebljiva toplotna energija koja se isporučuje u sistem grejanja [kWh],

W_{in} - utrošena električna energija za rad toplotne pumpe [kWh].

Pored COP-a, u radu je analiziran i toplotni konzum sistema, odnosno ukupna količina toplotne energije isporučene objektu u određenom vremenskom intervalu [11, 12].

U tehničkom smislu, potrebno je razlikovati trenutnu toplotnu snagu i ukupni toplotni konzum. Trenutna toplotna snaga predstavlja brzinu prenosa toplote u datom trenutku i izražava se u kW, dok toplotni konzum predstavlja ukupno isporučenu toplotnu energiju u posmatranom periodu i izražava se u kWh.

Trenutna toplotna snaga u vodenom sistemu određuje se na osnovu masenog protoka i temperaturne razlike polaznog i povratnog voda:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_{polaz} - T_{vrat}) \qquad (2)$$

gde je:

$\dot{Q}$ - trenutni intenzitet toplote [kW],

$\dot{m}$ - maseni protok vode [kg/s],

cp - specifični toplotni kapacitet vode [kJ/(kg·K)],

T_{polaz} - temperatura vode [°C],

T_{povrat} - temperatura povratnog voda [°C].

U praktičnim proračunima, kada je radni fluid voda, prethodni izraz se često zapisuje u pojednostavljenom obliku:

$$Q = 1.163 \cdot V \cdot \Delta T \qquad (3)$$

gde je:

$\dot{V}$ - zapreminski protok vode [m³/h],

ΔT - temperaturna razlika između polaznog i povratnog voda [K],

1,163 - koeficijent koji uključuje gustinu i specifični toplotni kapacitet vode [11].

Na osnovu trenutne toplotne snage, toplotni konzum u određenom vremenskom periodu određuje se integracijom snage po vremenu:

$$Q_{konzum} = \int \dot{Q}(t)\, dt \qquad (4)$$

U slučaju približno stacionarnog rada, kada se snaga može smatrati približno konstantnom u posmatranom intervalu, toplotni konzum se može odrediti i jednostavnijim izrazom:

$$Q_{konzum} = \dot{Q}_{avg} \cdot t \qquad (5)$$

gde je:

Q_{konzum} - potrošnja toplote [kWh],

$\dot{Q}_{avg}$ - srednja toplotna snaga u posmatranom periodu [kW],

t - vreme rada sistema [h].

Ukoliko je poznat ukupni protok vode u posmatranom periodu, toplotni konzum se može izračunati i preko ukupne količine protekle vode:

$$Q_{konzum} = 1.163 \cdot V \cdot \Delta T \qquad (6)$$

gde je:

V - ukupna zapremina protekle vode [m³],

ΔT - srednja temperaturna razlika [K] [7], [15].

Za poređenje energetske intenzivnosti grejanja korišćen je i specifični toplotni konzum po jedinici grejane površine:

$$qA = Q_{konzum} / A \qquad (7)$$

gde je:

qA - specifična potrošnja toplote [kWh/m²],

A - grejana površina objekta [m²].

Procena emisije ugljen-dioksida izvršena je na osnovu utrošene energije i odgovarajućih emisionih faktora [7, 8]. U radu je za prirodni gas korišćen emisioni faktor od 0,185 kg CO_2/kWh, dok je za električnu energiju usvojen faktor od 0,80 kg CO_2/kWh. Na toj osnovi emisija CO_2 za gasni kotlovski sistem izračunata je prema izrazu:

$$mCO_{2,\,gas} = E_{gas} \cdot Ef_{gas} \qquad (8)$$

gde je:

mCO_2, gas - emisija CO_2 nastala potrošnjom prirodnog gasa [kg],

E_{gas} - potrošena energija prirodnog gasa [kWh],

EF_{gas} - emisioni faktor prirodnog gasa [kg/kWh].

Za sistem toplotnih pumpi emisija CO_2 određena je na osnovu potrošene električne energije:

$$mCO_{2,\,el} = E_{el} \cdot Ef_{el} \qquad (9)$$

gde je:

mCO_2, el - emisija CO_2 povezana sa potrošnjom električne energije [kg],

E_{el} - utrošena električna energija [kWh]

EF_{el} - emisioni faktor električne energije [kg/kWh]

U cilju uporedne procene energetskih i ekoloških efekata, izračunato je i relativno smanjenje potrošnje energije, odnosno relativno smanjenje emisije CO_2, prema sledećim izrazima:

$$\eta E = ((E_{ref} - EHP) / E_{ref}) \cdot 100 \qquad (10)$$

$\eta CO_2 = ((mCO_2,ref - mCO_2,HP) / mCO_2,ref) \cdot 100$

где је:

ηE - relativno smanjenje potrošnje energije [%],

E_{ref} - potrošnja energije u referentnom sistemu (gasni kotlovi),

EHP - potrošnja energije u sistemu toplotnih pumpi,

ηCO_2 - relativno smanjenje emisije CO_2 [%],

mCO_2, ref - emisija CO_2 u referentnom sistemu,

mCO_2 ,HP - emisija CO_2 u sistemu toplotnih pumpi.

Za procenu ekonomskog efekta sistema primenjena je razlika u ukupnim troškovima energenata u analiziranim periodima:

$$U = C_{ref} - CHP \qquad (11)$$

gde je:

U - ostvarene uštede [€],

C_{ref} - trošak rada referentnog sistema,

CHP je trošak rada sistema toplotne pumpe.

Pored ukupne uštede, za ocenu ekonomske opravdanosti investicije korišćen je i izraz za period povraćaja investicije

$$PP = I / U_{god} \qquad (12)$$

gde je:

PP - period povraćaja investicije [god],

I - ukupna vrednost investicije [€],

U_{god} - godišnja finansijska ušteda [€/god].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Finansijski efekat primene sistema toplotnih pumpi voda-voda analiziran je poređenjem troškova grejanja pre i posle implementacije [10]. Kao referentni period uzeta je grejna sezona 2020. godine sa gasnim kotlovima, dok su za 2023. analizirani troškovi električne energije nakon uvođenja toplotnih pumpi.

Ukupni troškovi grejanja u referentnom periodu iznosili su 99.430 €, dok su u eksploataciji toplotnih pumpi iznosili 39.641 €, što predstavlja uštedu od 59.789 €, odnosno 60,13% [10].

Najveća mesečna ušteda ostvarena je u decembru (10.840 €), dok je najniža relativna ušteda zabeležena u januaru (46,16%). Ovo ukazuje da je sistem ostvario značajan ekonomski efekat tokom cele grejne sezone, uključujući periode najvećeg toplotnog opterećenja.

Rezultati potvrđuju ekonomsku opravdanost primene toplotnih pumpi, što je u skladu sa nalazima iz literature [3, 10].

Period povratka investicije određen je izrazom:

$$PP = I / U_{god}$$

gde je investicija 33.000 €, a godišnja ušteda 59.789 €, što daje:

$$PP = 0{,}55 \text{ godina } (\approx 6{,}6 \text{ meseci}).$$

Kratak period povratka ukazuje na izuzetno povoljnu ekonomsku isplativost i opravdanost primene ovog sistema u industriji [10].

Rad sistema analiziran je preko koeficijenta učinka COP (odnos isporučene i utrošene energije), na osnovu mesečnih podataka iz nadzornog sistema [11]. COP se kretao u opsegu 4,9–5,1, sa prosekom 5,0, uz minimalnu varijaciju od 0,2 (max u decembru 5,1; min u januaru 4,9), što ukazuje na vrlo stabilan rad.

Stabilnost je posledica korišćenja procesne vode kao izvora toplote, za razliku od sistema vazduh–voda gde performanse zavise od spoljašnje temperature [11].

Tokom grejne sezone spoljašnje temperature kretale su se od 4,1°C do 14,3°C (prosek ≈ 8,0°C), ali to nije značajno uticalo na COP, koji je ostao praktično konstantan [12].

Tabela 2. Proračun uštede pre i posle ugradnje toplotnih pumpi

Mesec	20 – Računi - gas- €	2023 – Računi ele. Ener. - €	Ušteda €	Ušteda (%)
Oktobar	4300	1800	2500	58,14%
Novembar	11900	4120	7780	65,38%
Decembar	17000	6160	10840	63,76%
Januar	205	10890	9335	46,16%
Februar	15735	7690	8045	51,13%
Mart	17270	6465	10805	62,57%
April	13000	2516	10484	80,65%
Ukupno	99430	39641	59789	60,13%

Varijacije COP-a predstavljaju normalnu reakciju na promene opterećenja, a ne nestabilnost rada.

Prosečan COP od 5,0 znači da sistem obezbeđuje oko 5 kWh toplote po 1 kWh električne energije, što potvrđuje visok nivo energetske efikasnosti i direktno smanjuje troškove rada [11, 18].

Tabela 3. Pregled COP koeficijenta po mesecima u toku korišćenja toplotnih pumpi u 2023. godini

Mesec	COP
Oktobar	5
Novembar	5
Decembar	5,1
Januar	4,9
Februar	5
Mart	5
April	5
Prosek	5

Ekološki efekti analizirani su kroz emisije zagađujućih materija i emisiju CO_2 [7, 19]. Merenja na gasnim kotlovima pokazala su da su koncentracije CO (12,2–13,0 mg/m³) i NO_2 (67,0–73,6 mg/m³) ispod propisanih granica (100 mg/m³ i 150 mg/m³), što znači da je sistem bio usklađen sa propisima u pogledu lokalnog zagađenja.

Međutim, emisija CO_2 direktno zavisi od potrošnje fosilnog goriva, zbog čega je izvršeno poređenje sa sistemom toplotnih pumpi pomoću emisionih faktora: 0,185 kg CO_2/kWh za gas i 0,80 kg CO_2/kWh za električnu energiju [7, 19]. Ukupna potrošnja energije u gasnom sistemu iznosila je 1.628.266 kWh, dok je kod toplotnih pumpi iznosila 63.533 kWh, što predstavlja smanjenje od 96,10%.

Dobijeni rezultati ukazuju da, iako gasni kotlovi zadovoljavaju ekološke standarde za lokalne emisije, primena toplotnih pumpi značajno smanjuje ukupnu potrošnju energije i klimatsko opterećenje sistema [7, 10].

Tabela 4. Prikaz potrošnje energije gasnih kotlova u 20. u odnosu na toplotne pumpe u 2023. (kWh)

Mesec	Gas potrošnja 20 (kWh)	El. Ener. potrošnja 2023 (kWh)	Smanjenje potrošnje energije (%)
Oktobar	209438,6	12402	94,08%
Novembar	247503	11945	95,17%
Decembar	410637,65	91	97,78%
Januar	162797,05	6899	95,76%
Februar	78692,45	3845	95,11%
Mart	147974,3	7466	94,95%
April	3712,85	11854	96,81%
Ukupno	1628265,9	63533	96,10%

4. ZAKLJUČAK

Analiza rezultata pokazuje da primena sistema toplotnih pumpi voda–voda u posmatranom industrijskom slučaju predstavlja tehnički, ekonomski i ekološki opravdano rešenje.

Troškovi grejanja smanjeni su sa 99.430 € na 39.641 €, što daje uštedu od 59.789 € (60,13%). Period povratka investicije (33.000 €) iznosi 0,55 godina (~6,6 meseci).

Sistem je ostvario stabilne performanse sa prosečnim COP = 5,0 (4,9–5,1), uz smanjenje potrošnje energije od 96,10%.

Emisija CO_2 smanjena je sa 301.8 kg na 50.827 kg (−83,13%), iako su gasni kotlovi zadovoljavali lokalne emisione norme.

Rezultati potvrđuju da primena sistema voda–voda ima visok potencijal u industriji, što potvrđuju i savremene studije o primeni i optimizaciji sistema toplotnih pumpi, uz ograničenje da su analizirani različiti vremenski periodi i jedan objekat [5, 20]. Dalja istraživanja treba usmeriti na dugoročno praćenje i širu primenu.

LITERATURA

[1] Arsić L, Vučinić I. Obnovljivi izvori energije: potencijali i trendovi u zemljama Evropske unije i Zapadnog Balkana. *Ecologica 29*, 476–484, doi:10.18-485/ecologica.2022.29.108.2, 2022,.

[2] Petrović A. M. Renewable and Nonrenewable Energy Potential. In Affordable and Clean Energy; Leal Filho W, Azul A. M, Brandli L, Lange Salvia A, Wall T, Eds. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals; Springer International Publishing: *Cham,* pp. 1–10, 2020.

[3] Wheatley, M. C. Advancements in Renewable Energy Technologies: A Decade in Review. *Prem. J. Sci.* doi:10.70389/PJS.100013, 2024.

[4] Dumortier, J. *Regulation (EU) No 910/2014 on Electronic Identification and Trust Services for Electronic Transactions in the Internal Market (EIDAS Regulation)*; Edward Elgar Publishing, 2022.

[5] Busato F, Lazzarin, R. M, Noro M, Two Years of Recorded Data for a Multisource Heat Pump System: A Performance Analysis. *Appl. Therm. Eng. 57*, 39–47, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.053, 2013.

[6] Ommen T, Markussen, W. B, Elmegaard, B. Heat Pumps in Combined Heat and Power Systems. *Energy 76*, 989–1000, doi:10.1016/j.energy.2014.09.-016, 2014.

[7] Wang J, Belusko M, Evans M, Liu M, Zhao C, Bruno F. A, Comprehensive Review and Analysis on CO2 Heat Pump Water Heaters. *Energy Convers. Manag. X 15*, 100277, doi:10.1016/j.ecmx.2022.100277, 2022.

[8] Fischer D, Madani H, On Heat Pumps in Smart Grids: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev. 70*, 342–357, doi:10.1016/j.rser.2016.11.182, 2017.

[9] Zhang J, Zhang H. H, He Y. L, Tao W. Q, A Comprehensive Review on Advances and Applications of Industrial Heat Pumps Based on the Practices in China. *Appl. Energy 178*, 800–825, doi:10.1016-/j.apenergy.2016.06.049, 2016.

[10] Gaur A. S, Fitiwi, D. Z, Curtis, J. Heat Pumps and Our Low-Carbon Future: A Comprehensive Review. *Energy Res. Soc. Sci. 71*, 101764, doi:10.1016/j.-erss.2020.101764, 2021.

[11] Staffell I, Brett D, Brandon N, Hawkes,A, A Review of Domestic Heat Pumps. *Energy Environ. Sci. 5*, 9291, doi:10.1039/c2ee22653g, 2012.

[12] David A, Mathiesen B. V, Averfalk H, Werner S, Lund H, Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems. *Energies 10*, 578, doi:10.3390/en10040578, 2017.

[13] Sanner B, Karytsas C, Mendrinos D, Rybach L, Current Status of Ground Source Heat Pumps and Underground Thermal Energy Storage in Europe. *Geothermics, 32*, 579–588, doi:10.1016/S0375-6505(03)00060-9, 2023.

[14] Jankov S. M, Stanisavljev S. M, Novaković B. Z, Đorđević L. R, Visualization of Operation Parameters and Remote Management of Oil Production through the Implementation of SCADA System. *Tehnika, 80*, 501–506, 2025.

[15] Lund J, Sanner B, Rybach L, Curtis R, Hellstrom G, *Geothermal (ground-source) heat pumps - a world overview*. 2004.

[16] Ochsner K, Ochsner K, *Geothermal Heat Pumps: A Guide for Planning and Installing*; Earthscan: London, ISBN 9781844074068 2008.

[17] Meunier F, Adsorption Heat Powered Heat Pumps. *Appl. Therm. Eng. 61*, 830–836, doi:-10.1016/j.applthermaleng.2013.04.050, 2013.

[18] Arpagaus C, Bless F, Schiffmann J, Bertsch S. S, Multi-Temperature Heat Pumps: A Literature Review. *Int. J. Refrig. 69*, 437–465, doi:10.1016-/j.ijrefrig.2016.05.014, 2016.

[19] Fischer D, Madani H, On Heat Pumps in Smart Grids: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev. 70*, 342–357, doi:10.1016/j.rser.2016.11.182, 2017.

[20] Willem H, Lin Y, Lekov A, Review of Energy Efficiency and System Performance of Residential Heat Pump Water Heaters. *Energy Build. 143*, 191–201, doi:10.1016/j.enbuild.2017.02.023, 2017.

SUMMARY

APPLICATION OF WATER-TO-WATER HEAT PUMPS FOR UTILIZING WASTE PROCESS HEAT AS AN ALTERNATIVE TO GAS BOILERS IN INDUSTRIAL HEATING

This paper investigates only one potential source of heat energy, with a special focus on heat pump technologies, with an emphasis on water-to-water systems. The experimental part of the work includes a project to implement water-to-water heat pumps in the copper wire factory Essex Furukawa d.o.o in Zrenjanin, where water from the machine cooling process was used instead of conventional geothermal water (wells). The financial effects, coefficient of performance (COP), electricity and gas consumption, and carbon dioxide air pollution were analyzed. The results show that water-to-water pumps, implemented within the framework of a project that does not use geothermal water, achieve a stable coefficient of performance as stated by the manufacturer in the technical documentation and the project, thanks to the constant water temperature obtained during the cooling process of the machines. Estimates of CO_2 emissions into the air indicate a reduction in pollution compared to natural gas boilers, which is documented in the paper. The results obtained are in line with relevant studies and standards (e.g. EN 14511, EN 14825, IEA, EHPA). These findings contribute to the understanding and improvement of sustainable development strategies in the field of energy.

Key Words: *renewable energy sources, heat pumps, COP, energy efficiency, natural gas boilers, waste heat recovery*