

# Korišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji primenom kompresorske toplotne pumpe

Mladen Josijević, Vanja Šušteršič, Vladimir Vukašinić, Dušan Gordić, Dubravka Živković, Jelena Nikolić

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Univerzitet u Kragujevcu

**Rezime** - Industrija hrane i pića je značajna industrijska grana u pogledu potrošnje energije. Ona učestvuje sa oko 30% u ukupnoj potrošnji finalne energije u sektoru industrije. Od ukupne količine energije koja se potroši u ovoj industrijskoj grani najviše se troši na konverziju u toplotnu energiju i na procese hlađenja. Prema istraživanjima čak 30% toplotnih tokova u prehrambenoj industriji gubi se na kraju procesa u vidu otpadne toplote, koja je najčešće relativno niske temperature. Utvrđivanjem postojanja izvora otpadne toplote adekvatnog energetskog potencijala i primenom toplotnih pumpi moguće je podići temperaturni nivo na vrednost koja zadovoljava zahteve procesa. Mapiranje izvora otpadne toplote, utvrđivanje energetskog potencijala tih izvora i izbor optimalne snage toplotne pumpe moguće je izvršiti samo sistematskim pristupom i detaljnom analizom postrojenja.

U radu je predložena metodologija za mapiranje izvora otpadne toplote u prehrambenoj industriji i utvrđivanje mogućnosti za implementaciju kompresorske mehaničke toplotne pumpe za iskorišćenje otpadne toplote. Predložena metodologija je testirana na studiji slučaja, mlekari, u kojoj se prosečno prerađuje 100 tona/dan mleka, na 7 proizvodnih linija. Primenom razvijene metodologije mapirano je ukupno šest lokacija (izvora) otpadne toplote od kojih su dve pogodne za primenu toplotne pumpe. Nakon izvršene tehno-ekonomske analize utvrđeno je da se ukupna investicija u sistem za prikupljanje i akumuliranje otpadne toplote i nabavku toplotne pumpe isplati za oko 17 meseci. Ukupno smanjenje emisije CO<sub>2</sub> je 680 tona godišnje.

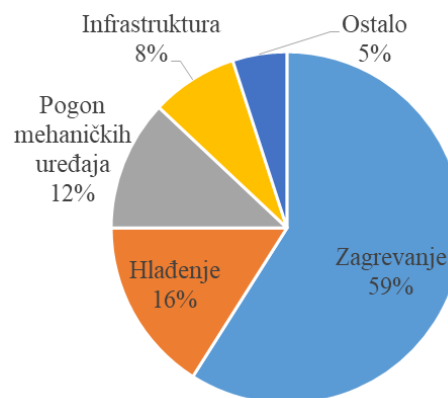
**Ključne reči** - prehrambena industrija, otpadna toplota, toplotna pumpa, mlekara

## I UVOD

Potrošnja finalne energije u industrijskom sektoru u zemljama Evropske unije ima prosečan udeo od 27% u ukupnoj potrošnji energije i 20% učešća u ukupnom BDP-u, od čega se čak 26% troši u sektoru prerade hrane [1]. Ako se uzme u obzir celokupan lanac snabdevanja hranom koji obuhvata proizvodnju hrane na farmama do dopremanja gotovih prehrambenih proizvoda do krajnjih kupaca i potrošača, na globalnom nivou potrošnja energije ovog sektora ima udeo od 30% u ukupnoj potrošnji finalne energije [2]. U Americi, prehrambena industrija je peti po veličini potrošač energije [3], sa udelom od 19% u ukupnoj potrošnji primarne energije [4, 5] i udelom od 10% u BDP-u [6]. U Francuskoj, učešće prehrambenog sektora u ukupnoj potrošnji energije je 14% [4], u Švedskoj 13% [7], a u Engleskoj 18% [8]. U Srbiji, energija koja se potroši u prehrambenom sektoru učestvuje sa preko 35% u ukupnoj potrošnji energije proizvodnog sektora [9]. Zajedno sa sektorom

proizvodnje nemetalnih mineralnih materijala, prehrambena industrija čini više od polovine ukupne potrošnje energije u industriji u Srbiji [10].

U ukupnoj potrošnji energije dominantno se koriste prirodni gas 46% i električna energija 29%, a zatim ugalj 9% i nafta i njeni derivati 8%. Najveći deo energije se troši za konverziju u toplotu neophodnu za različite termičke procese i procese sušenja, čak 59%, dok se za procese hlađenja i za različite motorne pogone troši 16% i 12% električne energije, respektivno (Slika 1) [3, 11].



**Slika 1.** Tipična potrošnja energije u prehrambenom sektoru industrije

Najviše toplotne energije se koristi za procese pečenja, sušenja, pasterizacije, ukuvavanja i za zagrevanje prostora, dok se električna energija najviše koristi za procese hlađenja 31% i za pogon elektromotora 25%. Procesno grejanje i hlađenje, u sektoru prerade hrane često imaju udeo od preko 70% u potrošnji energije [12]. U mlekarama na primer, često se za procese hlađenja i zamrzavanja potroši i preko 80% električne energije [13]. Sa druge strane, procene su da se čak 30% toplotnih tokova energije u prehrambenoj procesnoj industriji gubi na kraju procesa u vidu otpadne toplote (OT), najčešće srednje ili niske temperature. Otpadna toplota srednje temperature (230°C do 650 °C) obično se javlja na kraju procesa sušenja ili pečenja i u praksi se najčešće koristi za predgrevanje ili isparavanje. Otpadna toplota niske temperature najčešće se manifestuje pri procesima kuvanja, pečenja, sušenja, isparavanja, pasterizacije, sterilizacije, pranja, destilacije i hlađenja. Uglavnom je preko 90% raspoloživog tehničkog potencijala otpadne toplote u sektoru prerade hrane niskog temperaturnog nivoa (100-200°C) [16]. Nedovoljno visok temperaturni nivo OT i vremensko neslaganje dostupnosti izvora OT sa zahtevima za toplotom procesa

onemogućavaju da se OT koristi direktno. Akumuliranje otpadne toplote i primena toplotne pumpe za podizanje nivoa temperature predstavljaju jedno od mogućih rešenja za iskorišćenje ovog potencijala [17].

Poslednjih godina u ekspanziji je upotreba toplotnih pumpi u industriji, naročito kada je u pitanju njihova primena u različitim tehnološkim procesima poput sušenja, destilacije, proizvodnje pare, ukuvavanja, isparavanja, zagrevanja različitih fluida ili istovremenog zagrevanja jednog i hlađenja drugog fluida. Obzirom na to da se koriste za rekuperaciju otpadne toplote iz različitih procesa, toplotne pumpe predstavljaju efikasnu i ekonomičnu alternativu za poboljšanje ukupne energetske efikasnosti proizvodnog procesa [18]. Efikasnost industrijskih toplotnih pumpi je obično veća od onih koje se koriste za zagrevanje objekata jer one uglavnom rade pri relativno ustaljenim režimima, a i prilikom podizanja nivoa toplotne energije obično treba da savladaju manju temperaturnu razliku između toplotnog izvora i toplotnog ponora. Prema [19], toplotnom pumpom je sa izvora otpadne toplote temperaturnog nivoa 45-60°C, isporučeno od 2,5 pa čak do 11 puta više korisne energije u poređenju sa drugim (komercijalnim) tehnologijama za rekuperaciju otpadne toplote. Raznolikosti izvora otpadne toplote i opsega temperatura uslovlili su razvoj različitih tipova industrijskih toplotnih pumpi koje mogu biti klasifikovane na različite načine. Na primer, prema vrsti pogonske energije dele se na pumpe pogonjene mehaničkom pogonskom energijom i one pogonjene toplotom, prema vrsti procesa na kompresione, ejektorske i apsorpcione, prema vrsti ciklusa na one koje rade po otvorenom ili one koje rade po zatvorenom ciklusu, u odnosu na vrstu fluida, prema izvoru toplote itd. [19]. Toplotne pumpe čiji se princip funkcionisanja zasniva na kompresiji pare su najzastupljenije, čak 95% od ukupnog broja instaliranih toplotnih pumpi u industriji [20]. Koeficijent performansi (COP) kompresorskih toplotnih pumpi se kreće u granicama od 3-8.

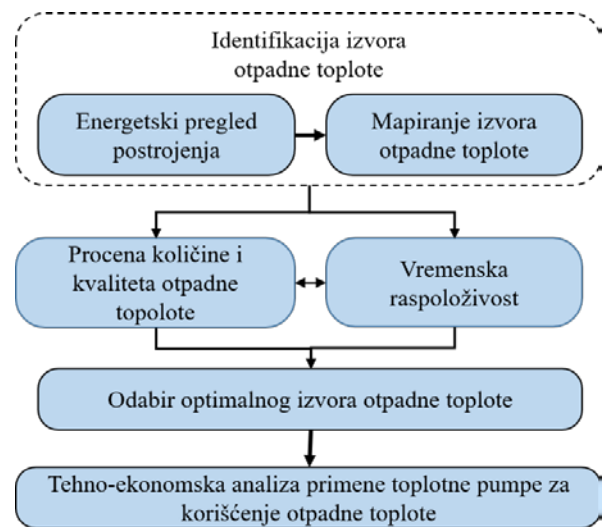
Iako su razlozi za primenu toplotnih pumpi u industriji očigledni, trenutno je u svetu i dalje mali broj postrojenja koja koriste toplotne pumpe. Razlog su najčešće visoka početna investicija, nedostatak stručnosti i nezainteresovanost donosioca odluka u preduzeću za investiranje u mere energetske efikasnosti.

U radu će biti prikazana metodologija za mapiranje lokacija potencijalnih izvora otpadne toplote i korišćenje raspoloživog potencijala primenom kompresorske toplotne pumpe.

## II METODOLOGIJA ZA MAPIRANJE I KORIŠĆENJE OTPADNE TOPLOTE PRIMENOM KOMPRESORSKE TOPLOTNE PUMPE

Identifikacija (mapiranje) potencijalnih izvora otpadne toplote i utvrđivanje mogućnosti za njeno iskorišćenje može da bude relativno složen zadatak. Često su procesna postrojenja koja su predmet analize vrlo složena. U njima se obavlja mnoštvo različitih procesa i koriste se različiti oblici finalne energije, pa je zato vrlo teško prepoznati potencijalne lokacije na kojima se javlja otpadna toplota. Pored toga potrebno je i proceniti kompatibilnost izvora otpadne toplote i krajnje upotrebe. S tim u vezi, prvi korak predložene metodologije predstavlja identifikaciju izvora otpadne toplote u okviru koje je predviđeno sprovođenje energetskog pregleda prema standardu ISO 50002 (Slika 2).

Prvo se obavlja se intervju sa rukovodstvom preduzeća i donosiocima odluka. Zatim se utvrđuju kriterijumi i prioriteti na osnovu kojih se pristupa izradi detaljnog plana sprovođenja aktivnosti (merenja). Obzirom na to da se potrošnja energije svakog pojedinačnog procesnog aparata ili mašine često značajno razlikuje od projektovane ili od one koju propisuje proizvođač, merenje predstavlja neizbežnu fazu pri obavljanju svakog energetskog pregleda. Merenjem potrošnje energije svakog pojedinačnog uređaja na proizvodnoj liniji povećava se baza podataka koja u narednoj fazi omogućava lakše razumevanje energetskih tokova i proračun specifičnih indikatora potrošnje energije. U narednoj fazi, na osnovu dobijenih pokazatelja, mapiraju se lokacije koje predstavljaju potencijalne izvore otpadne toplote. Utvrđuje se vremenska raspoloživost izvora i procenjuje se dostupna količina toplote ili toplotna snaga. Obzirom na to da je ekonomski neisplativo korišćenje OT primenom toplotne pumpe ako izvor OT nije konstantno dostupan [21], razmatra se pomeranje procesa, integracija više izvora i akumulacija toplotne energije. Pored vremenske raspoloživosti, neophodno je definisati temperature i toplotnu snagu. Vrednost raspoložive snage izvora OT najčešće je moguće utvrditi samo teorijskim proračunima. Kako se proces razmene toplote najčešće obavlja pri konstantnom pritisku konačan izraz za toplotnu snagu  $P$  [W] ima oblik prikazan jednačinom 1.



Slika 2. Šematski prikaz predložene metodologije

$$P = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

gde su:

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

$c_p$  [J/kgK] - specifična toplota medijuma sa koga se vrši prenos toplote,

$\Delta T$  [K] - razlika početne i krajnje temperature OT.

U slučaju kada fluid menja fazu, neophodno je pri proračunu uzeti u obzir energiju koja se troši na isparavanje fluida ili koja se dobija kondenzacijom (jednačina 2).

$$P = \dot{m} \cdot (h_p - c_p \cdot T_v) \quad (2)$$

gde su:

$c_p$  [J/kgK] – specifična toplota medijuma u tečnom agregatnom stanju,

$T_v$  [K] - krajnja temperatura medijuma u tečnom agregatnom stanju,

$h_p$  [J/kg] - entalpija u gasovitom agregatnom stanju.

Vrednost entalpije se određuje na osnovu poznatih vrednosti pritiska i temperature. U praksi je nemoguće sav raspoloživ potencijal otpadne toplote iskoristiti, pa je neophodno uzeti u obzir i gubitke energije koji nastaju u procesu razmene toplote i transporta toplote do mesta krajnjeg korišćenja.

Nakon mapiranja adekvatnog izvora OT i procene dostupnog potencijala i kvaliteta OT bira se odgovarajuća toplotna pumpa nakon čega se vrši tehno-ekonomska analiza. Pri analizi, razmatraju se toplotne pumpe čije radne karakteristike odgovaraju parametrima izvora OT i zahtevima za toplotom. Obično se usvaja toplotna pumpa sa snagom isparivača za 20% manjom od snage izvora OT. Temperatura kondenzatora je za najviše 15 °C viša od temperature medijuma koji se greje (toplotnog ponora). Jednačinom 3 opisana je količina energije koja je dostupna na kondenzatoru.

$$Q_{Ponor} = Q_{izvor} \cdot \left( \frac{(\alpha \cdot COP) + \beta}{(\alpha \cdot COP) + \beta - 1} \right) \quad (3)$$

gde su:

$Q_{Ponor}$  [kW] - snaga kondenzatora,

$\alpha, \beta$  [-] - regresioni koeficijenti,

$COP$  [-] - idealni koeficijent performansi mehaničke kompresorske toplotne pumpe.

Obzirom na to da vrednost koeficijenta performansi, zavisi od temperature izvora otpadne toplote i od izbora radnog fluida, za korelaciju između stvarne i idealne vrednosti koriste se regresioni koeficijenti [22]. Idealni koeficijent performansi mehaničke toplotne pumpe je funkcija temperatura kondenzatora i isparivača (jednačina 4):

$$COP = \frac{T_{con}}{T_{con} - T_{evap}} \quad (4)$$

gde su:

$T_{con}$  [K] - temperatura kondenzatora,

$T_{evap}$  [K] - temperatura isparivača.

Poslednji korak predložene metodologije je tehno-ekonomska analiza primene izabrane toplotne pumpe za korišćenje otpadne toplote sa prethodno mapiranih izvora. Obzirom na to da je prema istraživanju za donosioce odluka u preduzećima iz sektora prehrambene industrije u Srbiji, najvažniji ekonomski pokazatelj opravdanosti investicije prost period povraćaja investicije [21] u radu će biti analiziran samo za ovaj ekonomski pokazatelj.

Prost period povraćaja investicije (PB) predstavlja odnos uložene investicije i ostvarene godišnje dobiti:

$$PB = \frac{Inv}{NGD} \quad (5)$$

gde su:

$Inv$  [€] - vrednost investicije,

$NGD$  [€/god] - neto godišnja dobit.

Neto godišnja dobit je definisana kao razlika operativnih troškova pre implementacije tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote i operativnih troškova posle, uvećanih za troškove investicije, rada i održavanja tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote koja je implementirana. Kako su operativni troškovi nakon primene tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote manji za vrednost ostvarene dobiti, konačan izraz za neto godišnju dobit prikazan je jednačinom 6.

$$NGD = UP - (TO + OT) \quad (6)$$

gde su:

$UP$  [€/god] - ukupni godišnji prihodi,

$TO$  [€/god] - troškovi održavanja TP,

$OT$  [€/god] - operativni troškovi TP.

Ukupna vrednost investicije predstavlja zbir investicionih troškova: projektovanja sistema, nabavka i ugradnja sistema za prikupljanje i distribuciju OT i nabavka i puštanje u rad toplotne pumpe. U zavisnosti od složenosti sistema ovi troškovi mogu značajno varirati pa se predlaže detaljna analiza tržišta i donošenje odluke u dogovoru sa rukovodstvom preduzeća.

Ukupni godišnji prihodi su:

$$UP = Q_{ponor} \cdot cte \cdot t \quad (7)$$

gde su:

$cte$  [€/kWh] - cena toplotne energije,

$t$  [h/god] - godišnje časovno angažovanje postrojenja.

### III STUDIJU SLUČAJA ISKORIŠĆENJA OTPADNE TOPLOTE

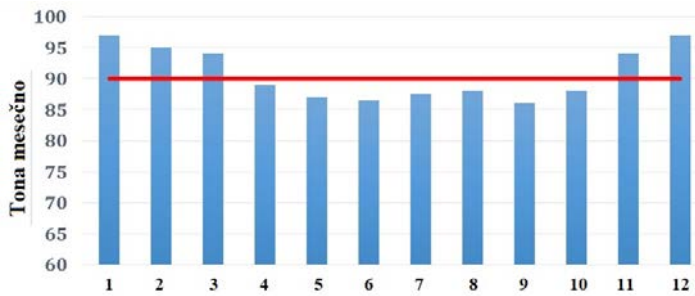
Predložena metodologija je testirana na studiji slučaja, mlekari čiji je dnevni kapacitet prerade sirovog mleka oko 100 tona. U mlekari koja je predmet analize obavljaju se energetske zahtevni mehanički i termički procesi (pasterizacija, kuvanje, separacija, ultrafiltracija, homogenizacija, hlađenje i sl.). Proizvodi se osam različitih mlečnih proizvoda na sedam proizvodnih linija. Proizvodni asortiman čine: sirevi, pavlake, jogurt, kiselo mleko, pasterizovano mleko i paprika u pavlaci.

Celokupna količina mleka koja se kamionima doprema do mlekare se na mestu prijema, a pre skladištenja hladi na temperaturu 4-8°C. Zatim se, u zavisnosti od plana proizvodnje, mleko pasterizuje i standardizuje na željeni procenat masnoće. Zbog raznolikosti tehnologija proizvodnje, svaki od proizvoda ima sopstvenu proizvodnu liniju. Na kraju proizvodnog procesa svi gotovi proizvodi se odlažu u hladnjaču gde se hlade na temperaturu od 4°C.

Kada je u pitanju potrošnja energije analizirane mlekare, od energenata se koriste biomasa i el. energija. Celokupni zahtevi za toplotom podmiruju se sagorevanjem drvnih briketa u dva toplovodna kotla nominalne snage 2x500 kW. Dnevna potrošnja briketa je u proseku oko 3 tone. Na slici 3 je prikazana tipična mesečna potrošnja briketa. Izlazna temperatura vode iz kotla je najčešće oko 100°C.

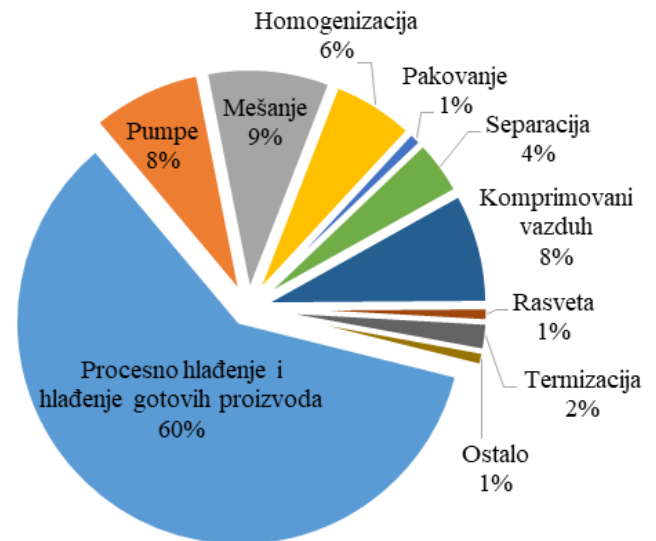
Obzirom na to da je obim proizvodnje konstantan tokom cele godine, povećanje potrošnje briketa u zimskim mesecima je zbog potreba zagrevanja zgrade. Utvrđeno je da se za potrebe grejanja objekta godišnje potroši 38 t briketa, što je uzimajući u obzir usvojenu efikasnost kotla od 75% i donju toplotnu moć

korišćenog briketa od 18 MJ/kg koje deklariraju proizvođači, oko 140 MWh toplotne energije godišnje ili 3% od ukupne potrošnje.

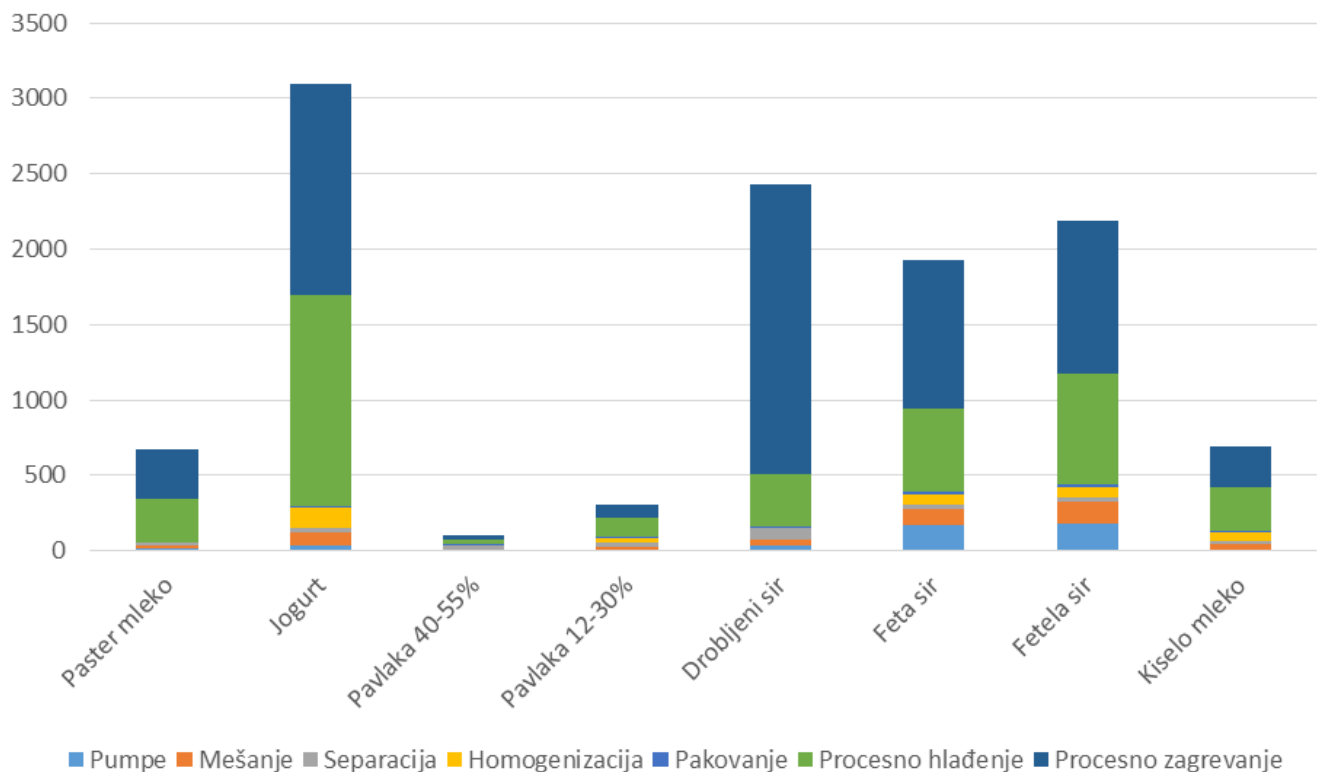


Slika 3. Mesečna potrošnja briketa analizirane mlekare

Prosečna mesečna potrošnja električne energije je oko 200.000 kWh. Najveći udeo u potrošnji električne energije je za procesno hlađenje i hlađenje gotovih proizvoda. Merenjem potrošnje svakog pojedinačnog potrošača u realnim eksploatacionim uslovima utvrđene su vrednosti potrošnje električne energije za svaku od faza proizvodnje, kao i udeli potrošnje pojedinih električnih aparata i uređaja u ukupnoj potrošnji (Slika 4).



Slika 4. Raspodela potrošnje električne energije



Slika 5. Raspodela potrošnje energije za svaki od proizvoda analizirane mlekare na dnevnom nivou

Za svaki od proizvoda izračunata je vrednost specifične potrošnje energije po jediničnoj meri gotovog proizvoda. Potrošnja finalne energije po kilogramu obrađenog mleka prosečno iznosi 0,12 kWh, dok se po toni dobijenog proizvoda u proseku potroši oko 0,3 kWh. Raspodela potrošnje energije za svaki od proizvoda analizirane mlekare na dnevnom nivou prikazana je na slici 5. Detaljnim pregledom postrojenja utvrđene su lokacije koje predstavljaju potencijalne izvore otpadne toplote: rashladna voda

kompresora, kondenzatori rashladnih mašina i čileri, dimni gasovi kotla, kao i procesna toplota na linijama za proizvodnju „Feta“ i „Drobljenog“ sira. Svi mapirani izvori OT sa osnovnim parametrima prikazani su u tabeli 1. Uzimajući u obzir to da je procenjeni tehnički potencijal OT kondenzatora rashladnih mašina najveći i da po svim parametrima (vremenska dostupnost, temperaturni nivo i dr.) odgovara primeni tehnologije toplotne pumpe, predmet analize biće samo korišćenje OT sa ovih izvora.

**Tabela 1** – Osnovni parametri mapiranih izvora otpadne toplote

	Izvori otpadne toplote	Temperatura izvora OT [°C]	Toplotna snaga [kW]	Vremenska raspoloživost [h/dan.]	Količina toplote [kWh/dan.]	Vreme dostupnosti
I1	Procesna otpadna toplota (I linija)	65	200	4	820	11-15h
I2	Kondenzator (hladnjača)	55	221	24	5.300	00-24h
I3	Rashladna voda kompresora	60	15,8	24	378	00-24h
I4	Izduvni gasovi kotlova	130	20,6	24	490	00-24h
I5	Kondenzator (procesno hlađenje)	55	363	24	5.400	00-24h
I6	Procesna otpadna toplota (II linija)	54	65	6	390	7-13h

*Potencijal otpadne toplote sa kondenzatora hladnjače*

Svi proizvodi se nakon pakovanja na proizvodnim linijama, privremeno (do isporuke) smeštaju u hladnjaču gde se u roku od najviše 5 sati hlade na temperaturu od 5-8°C. Vreme potrebno za hlađenje proizvoda uslovljeno je tehnologijom, a projektovana snaga isparivača je oko 200 kW. Dnevne količine gotovih proizvoda koje se smeštaju u hladnjaču sa temperaturama i količinom rashladne energije neophodne za hlađenje na zadatu temperaturu (8 °C) prikazane su u tabeli 2. Iz tabele se može videti da je dnevna proizvodnja mlečnih proizvoda oko 50 t. U tabeli nisu prikazani podaci o dnevnim količinama pasterizovanog mleka jer se ono ne smešta u hladnjaču.

**Tabela 2** – Dnevne količine gotovih proizvoda i energija potrebna za hlađenje istih na temperaturu od 8 °C

Proizvod	Masa proizvoda [kg/dnevno]	Temperatura proizvoda [°C]	Specifična toplota [kJ/kg °C]	Energija koja je potrebna za hlađenje [kWh]
Sir (Fetela)	6.800	35	3,27	166,8
Sir (Feta)	3.200	30	3,27	64
Drobljeni sir	4.700	68	3,5	274,2
Jogurt	20.000	26	3,65	365
Kiselom mleko	7.000	41	3,5	224,6
Pavlaka 40 -50%mm	1.500	15	3,51	10,2
Pavlaka 12 - 20%mm	3.800	45	3,55	138,7
Namazi	2.500	70	3,52	151,6

Za svaki od proizvoda (korišćenjem jednačine 1) izračunata je količina energije koja je potrebna za hlađenje, a koja za sve proizvode koji se na dnevnom nivou unesu u hladnjaču iznosi 1.395 kWh/dan.

Rashladni sistem hladnjače čine tri centrale sa po tri kompresora, ukupne nominalne snage 117 kW. Korišćenjem jednačine 8:

$$COP_{RU} = P_{RU}^{EVAP} / P^{COMP} \quad (8)$$

gde su:

$COP_{RU}$  [-] – koeficijent performansi rashladnog uređaja,

$P_{RU}^{EVAP}$  [kW] – rashladna snaga isparivača,

$P^{COMP}$  [kW] – snaga kompresora,

izračunata je vrednost koeficijenta performansi rashladnog uređaja ( $COP=1,7$ ) koji figuriše u jednačini 9, za proračun raspoložive toplotne snage na kondenzatoru [23].

$$P_{Out}^{COND} = 0.7 \cdot (1 + COP_{RU}) \cdot P^{COMP} \quad (9)$$

gde je:

$P_{Out}^{COND}$  [kW] – raspoloživa toplotna snaga na kondenzatoru.

Obzirom na to da je nemoguće celokupnu teorijski dobijenu količinu energije na kondenzatoru iskoristiti, usvojen je stepen iskorišćenja od 70%. Na ovaj način izračunata je toplotna snaga na kondenzatoru rashladnog uređaja hladnjače u analiziranoj mlekari (221 kW). Procenjena količina otpadne toplote koja je na dnevnom nivou dostupna na kondenzatoru je oko 5.300 kWh pri temperaturi od 55 °C. Temperatura je usvojena na osnovu merenja, preporuka i iskustveno.

*Potencijal otpadne toplote sa kondenzatora rashladnog uređaja za procesno hlađenje*

Procesno hlađenje se u analiziranoj mlekari obavlja gotovo na svim proizvodnim linijama. Radni fluid kojim se preko pločastog razmenjivača toplote odvodi toplota iz sirovine koja se hladi je voda temperature 0-4°C. Svi procesi koji imaju potrebu za hlađenjem snabdevaju se ledenom vodom iz dva bazena ukupne zapremine 50 m<sup>3</sup>. Ukupna instalisana snaga kompresora rashladnih uređaja kojima se hlade bazeni sa vodom je 120 kW. Dnevne potrebe za procesnim hlađenjem su oko 4.700 kWh rashladne energije, a snage isparivača su 2x200 kW. Na osnovu svih navedenih veličina izračunata je vrednost koeficijenta performansi rashladnih uređaja  $COP=3,3$  i toplotne snage koja je dostupna na kondenzatorima, i koja iznosi 363 kW, ukupno. Usvojena vrednost temperature otpadne toplote je 55°C. Procenjena količina toplote koja je na dnevnom nivou dostupna na kondenzatorima rashladnih mašina za procesno hlađenje je 5.400 kWh.

## IV TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA UGRADNJE TOPLLOTNE PUMPE

Nakon detaljne energetske revizije postrojenja i procene potencijala otpadne toplote, u dogovoru sa donosiocima odluka u preduzeću, izvršena je tehno-ekonomska analiza ugradnje toplotne pumpe za iskorišćenje otpadne toplote sa kondenzatora hladnjače. Uzimajući u obzir raspoloživi potencijal toplotne energije (5.400 kWh/dan) usvojena je visokotemperaturna toplotna pumpa "GEA open type heat pumps 35HP" nominalne električne snage 26kW i toplotne snage od 250 do 320kW [24]. Koeficijent performansi toplotne pumpe za režim 45/110 °C se prema katalogu proizvođača kreće u granicama od 3,3 do 3,6. Izračunata je dnevna količina isporučene toplotne energije od oko 7.600 kWh, tj. 50% od ukupne potrošnje toplotne energije analizirane mlekare. U tom slučaju godišnja ušteda u potrošnji toplotne energije je oko 126.000 € računato za srednju cenu briketa od 230 € po toni. Procenjeni godišnji troškovi rada toplotne pumpe za srednju cenu električne energije od 0,089 €/kWh su oko 18.000 €. Ukupna investicija u sistem za prikupljanje, akumuliranje toplotne energije i toplotnu pumpu je

oko 150.000 € od čega je 120.000 € cena toplotne pumpe. Usvojena vrednost godišnjih troškova održavanja je 2% od cene investicije. Na osnovu svega navedenog vrednost neto godišnje dobiti je 105.000 € pa je prost period povraćaja investicije oko 17 meseci. Kada su emisije ugljen-dioksida u pitanju, računato za koeficijente emisija od 0,3 kg/kWh za brikete (prema deklaraciji proizvođača) i 0,8 kg/kWh za električnu energiju, dobijeno je smanjenje emisija za 680 tCO<sub>2</sub> godišnje.

#### V ZAKLJUČAK

Potrošnja energije u sektoru prerade hrane ima značajan udeo u ukupnoj potrošnji energije u industrijskom sektoru, posebno u zemljama u razvoju. Sa druge strane procenjuje se da se oko 20-25% energije u ovom sektoru gubi na kraju procesa u vidu otpadne toplote, često relativno niske temperature ispod 200 °C, a najčešće i ispod 100 °C. Otpadnu toplotu niskog temperaturnog nivoa obično je najpraktičnije i najisplativije iskoristiti direktno, kada za to postoje uslovi (vremensko podudaranje sa zahtevima za toplotom, adekvatna temperatura i količina raspoložive energije i dr.). U slučaju kada mapirani izvor otpadne toplote ima visok energetski i korisni potencijal (količina raspoložive energije i neprekidna vremenska dostupnost), a nižu temperaturu od zahteva u postrojenju, treba razmotriti mogućnosti za implementaciju toplotne pumpe u cilju iskorišćenja raspoloživog potencijala. Mapiranje izvora otpadne toplote i utvrđivanje raspoloživog potencijala predstavlja relativno složen zadatak. Metodologija prikazana u radu koja se bazira na sprovođenju detaljnog energetskog pregleda postrojenja i osnovnih termodinamičkih proračuna može znatno pomoći energetskim menadžerima i donosiocima odluka u preduzećima koja se bave preradom hrane.

Testiranje razvijene metodologije na studiji slučaja (mlekarska industrija, kod koje je najviše otpadne toplote bilodo stupno u rasponu od 55-60 °C) pokazalo je da se investicija u toplotnu pumpu za iskorišćenje otpadne toplote sa kondenzatora rashladne mašine isplati za manje od dve godine, što predstavlja prihvatljiv period otplate.

#### LITERATURA/REFERENCES

- [1] European commission, Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat> [pristupljeno 01.12.2024]
- [2] Jagtap, S., Rahimifard, S., Duong, L.N.K. Real-time data collection to improve energy efficiency: a case study of food manufacturer. *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 46, e14338, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14338>
- [3] Wang, L., *Energy Efficiency and Management in Food Processing Facilities*, CRC Press Taylor&Francis Group, LLC, 2009.
- [4] OECD, *Improving Energy Efficiency in the Agro-food Chain*, OECD Green Growth Studies, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264278530-en>
- [5] Canning, P., Charles, A., Huang, S., Polenske, K.R., Waterset, A. *Energy Use in the U.S. Food System*, Economic Research Report No. 94, United States Department of Agriculture, 2010.
- [6] Egilmez, G.M., Kucukvar, M., Tatari, O., Khurram, M., Bhutta, S. Supply chain sustainability assessment of the U.S. food manufacturing sectors: A life cycle-based frontier approach. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 82, pp. 8-20, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.008>
- [7] Wallgren, C., Hojer, M. Eating energy- identifying possibilities for reduced energy use in the future food supply system. *Energy Policy*, Vol. 37, pp. 5803-5813, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.046>

- [8] Tassou, S., Kolokotroni, M., Gowreesunker, B., Stojceska, V., Azapagic, A., Fryer, P., Bakalis, S. Energy Demand and Reduction Opportunities in the UK Food Chain, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, Vol. 167, No. 3, pp. 162-170, 2014. <https://doi.org/10.1680/ener.14.00014>
- [9] Jovanović, B., Filipović, J., Bakić, V. Prioritization of manufacturing sectors in Serbia for energy management improvement – AHP method. *Energy Conversion and Management*, Vol. 98, pp. 225-235, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.107>
- [10] Jovanović, B., Filipović, J., Bakić, V. Energy management system implementation in Serbian manufacturing - Plan-Do-Check-Act cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 162, pp. 1144-1156, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.140>
- [11] Compton, M., Willis, S., Rezale, B., Humes, K. Food processing industry energy and water consumption in the Pacific. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 47, pp. 371-383, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.04.001>
- [12] Tiwari, K.B., Norton, T., Holden, N.M. *Sustainable Food Processing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [13] Nunes, J., Da Silva, P., Andrade, L.P., Gaspar, P.D. Key points on the energy sustainable development of the food industry – Case study of the Portuguese sausages industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 393-411, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.019>
- [14] International Energy Agency (IEA), *Industrial Energy-Related Technologies and Systems A Technology Collaboration Programme established under the auspices of the International Energy Agency* <https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/183/1.ThoreBerntsson1703202.pdf> [pristupljeno 12.01.2024]
- [15] Al-Rabghi, O.M., Beiruty, M., Akyurt, M., Najjar, Y., Alp, T. Recovery and utilization of waste heat. *Heat Recovery Systems and CHP*, Vol. 13, No. 5, pp. 463-470, 1993. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(93\)90047-Y](https://doi.org/10.1016/0890-4332(93)90047-Y)
- [16] Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., La Commare, U., Micale, G. Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 138, pp. 207-216, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043>
- [17] Baradey, Y., Hawlader, M.N.A., Ismail, A.F., Hrairi, M. Waste heat recovery in heat pump systems: solution to reduce global warming. *IJUM Engineering Journal*, Vol. 16, No. 2, 2015. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v16i2.602>
- [18] Chua, K.J., Chou, S.K., Yang, W.M. Advances in heat pump systems: a review. *Applied Energy*, Vol. 87, No. 12, pp. 3611-3624, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.014>
- [19] Banjac, M., Stamenić, M. *Primena toplotnih pumpi u industriji, Mreža za energetsku efikasnost u industriji Srbije (MEEIS)*
- [20] Goyal, A., Staedter, M.A., Garimella, S. A review of control methodologies for vapor compression and absorption heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 97, pp. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.026>
- [21] Josijević, M. *Mapiranje i iskorišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji*, Kragujevac, Fakultet inženjerskih nauka, 2020.
- [22] Oluleye, G., Jobson, M., Smith, R. Optimisation-based design of site waste heat recovery systems. in *Proc. Ecos2015: 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Pau, France, 29<sup>th</sup> June - 3<sup>rd</sup> July 2015.
- [23] Seck, G.S., Guerassimoff, G., Maizi, N. Heat recovery using heat pumps in non-energy intensive industry: are energy saving certificates a solution for the food and drink industry in France?. *Applied Energy*, Vol. 156, pp. 374-389, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.048>
- [24] GEA Engineering for a better world, <https://www.gea.com/en/products/heat-pumps/open-type-heat-pump/>, [pristupljeno 22.03.2024]

#### AUTORI/AUTHORS

**Mladen Josijević** - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, [mladenjosijevic@gmail.com](mailto:mladenjosijevic@gmail.com), ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)

**Vanja Šušteršič** - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, [vanjas@kg.ac.rs](mailto:vanjas@kg.ac.rs), ORCID

[0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991)

**Vladimir Vukašinović** – vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu,

vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)

**Dušan Gordić** – redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, gordic@kg.ac.rs, ORCID

[0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)

**Dubravka Živković** – docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, dubravka@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-0266-456X](https://orcid.org/0000-0002-0266-456X)

**Jelena Nikolić** – istraživač saradnik, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, jelena.nikolic@fink.rs, ORCID [0000-0001-6781-8059](https://orcid.org/0000-0001-6781-8059)

## Utilisation of Waste Heat in the Food Industry with a Compressor Heat Pump

**Abstract** – The food and beverage industry is a significant global industry in terms of energy consumption. It participates with about 30% in the total energy consumption of the industrial sector. Most of that energy is spent on the conversion into thermal energy and for cooling processes. According to the current findings, 30% of the heat flow in the food industry is lost by the end of a production process. The waste heat obtained hereby has relatively low temperatures. However, it is possible to raise such temperatures to a useful degree, i.e. the one that meets the requirements of a production process, by locating the sources of waste heat with adequate energy potentials and by employing a heat pump. Only systematic approaches and detailed analyses of the plants' features can result in successful mapping of the sources of waste heat, precise evaluations of their energy potentials, and adequate selection of the optimal power of a heat pump needed for such purposes. This paper proposes a methodology for mapping the sources of waste heat in the food industry and determining the possibility of implementing a compressor mechanical heat pump. The methodology developed here was tested on a dairy that processes 100 tons of milk per day on seven production lines. Six sources of waste heat were identified. Only two are suitable for the implementation of a heat pump. Techno-economic analysis indicates that the total investment into the systems for collecting and accumulating waste heat and the purchase of heat pumps should pay off in about 17 months. The total reduction of CO<sub>2</sub> emission is estimated at 680 tons per year.

**Index Terms** – Food processing industry, Waste heat, Heat pump, Dairy