

# Proizvodnja tehnološke pare korištenjem OIE

---

**Pokrivka, Patrik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:674147>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Patrik Pokrivka

Zagreb, 2023. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc Draženu Lončaru na pruženoj pomoći u izradi ovog rada, prenesenom znanju i konstruktivnim kritikama koje su podigle kvalitetu ovog rada.

Zahvaljujem se roditeljima, obitelji i svim prijateljima i kolegama koji su bili potpora u teškim trenucima studija.

Posebno se zahvaljujem svojoj djevojci Magdaleni čija je neizmjerena podrška i razumijevanje pružila oslonac u trenucima visokog stresa tijekom pisanja ovog rada.

Patrik Pokrivka



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Patrik Pokrivka** JMBAG: 0035219425

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proizvodnja tehnološke pare korištenjem OIE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Industrial steam generation by RES utilisation**

Opis zadatka:

Zahtjevi za smanjenjem ovisnosti o fosilnim energetske izvorima potaknuli su i projekte planiranja i izgradnje postrojenja za proizvodnju tehnološke pare u industriji koja će umjesto ugljena, loživog ulja ili prirodnog plina koristiti obnovljive izvore poput biomase, bioplina, dizalica topline, geotermalne energije ili pak električne energije proizvedene u solarnim, hidro ili vjetroelektranama.

U okviru rada potrebno je za potrošača tehnološke pare stanja 6 bar s.z.p i nazivnog protoka 15 t/h:

1. Konfigurirati sustave za proizvodnju tehnološke pare koji će koristiti obnovljive izvore energije;
2. Provesti tehnno-ekonomsku analizu isplativosti pogona konfiguriranih sustava za različite profile potrošnje pare (kontinuirano, dvosmjenski, vikend obustave pogona);
3. Za odabranu konfiguraciju izvesti matematički model dinamike termohidrauličkih procesa u glavnim komponentama postrojenja;
4. Simulacijom izvedenog matematičkog modela analizirati mogućnost utjecaja različitih strategija vođenja na učinkovitost pogona odabrane konfiguracije.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

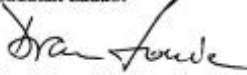
Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. Uvod .....	1
1.1. Pregled trenutnog stanja potrošnje primarne energije.....	1
1.2. Energetska tranzicija i prekretnica u energetskej politici Europe i svijeta .....	3
2. Analiza toplinskih potreba industrije.....	7
2.1. Potrebe industrije za toplinskom energijom i tehnološkom parom – EU .....	7
2.2. Potrebe industrije za toplinskom energijom i tehnološkom parom – Republika Hrvatska .....	8
2.3. Temperaturni rasponi potrebne toplinske energije.....	9
2.3.1. Procesi visoke temperature - Temperature iznad 200 °C.....	10
2.3.2. Procesi niske temperature - Temperature ispod 200 °C.....	11
3. Obnovljivi izvori energije za proizvodnju tehnološke pare.....	14
3.1. Kotlovi na biomasu .....	14
3.2. Električni kotlovi.....	17
3.3. Dizalice topline .....	19
3.3.1. Karakteristike i način rada .....	19
3.3.2. Postizive temperaturne razine .....	20
3.3.3. Visokotemperaturne dizalice topline .....	21
4. Konfiguracija sustava za proizvodnju tehnološke pare .....	25
4.1. Opis industrijskog postrojenja .....	25
4.2. Dimenzioniranje sustava za proizvodnju tehnološke pare .....	25
4.3. Modeliranje godišnjih toplinskih potreba .....	26
4.3.1. Profili potrošnje tehnološke pare – industrijske potrebe.....	26
4.3.2. Potrebe za grijanjem i pripreme PTV-a .....	27
4.4. Konfiguracija sustava za proizvodnju tehnološke pare.....	29
4.4.1. Proizvodnja električne energije – FN elektrana.....	29
5. Analiza isplativosti konfiguriranih postrojenja .....	32
5.1. Investicijski i O&M troškovi .....	32
5.2. Pogonski troškovi – cijene energenata.....	33
5.2.1. Biomasa – drvena sječka .....	34
5.2.2. Prirodni plin .....	34
5.2.3. Električna energija .....	34
5.3. Cijena otkupa električne energije.....	35
5.4. Trošak emitiranja CO <sub>2</sub> .....	37
5.5. Pogonski troškovi odabranih konfiguracija .....	38

5.5.1.	Profil potrošnje pare: Kontinuirana potrošnja.....	38
5.5.2.	Profil potrošnje pare: Vikend obustava pogona.....	39
5.5.3.	Profil potrošnje pare: Dvosmjenski rad .....	40
5.5.4.	Utjecaj proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane na ukupne troškove postrojenja .....	41
5.5.5.	Godišnje emisije stakleničkih plinova .....	43
6.	Analiza osjetljivosti .....	44
6.1.	Promjena cijene energenata .....	44
6.1.1.	Kontinuirani profil potrošnje tehnološke pare .....	44
6.1.2.	Vikend obustava pogona.....	46
6.1.3.	Dvosmjenski rad .....	48
6.2.	Utjecaj promjene cijene investicije .....	49
6.3.	Utjecaj COP-a dizalice topline na pogonske troškove.....	51
7.	Utjecaj različite konfiguracije dizalice topline na učinkovitost pogona.....	52
7.1.	Raspoloživi i potrebni toplinski izvori i ponori .....	52
7.2.	Odabir radne tvari .....	52
7.3.	Jednostupanjska kompresija.....	55
7.4.	Ubrizgavanje pare za vrijeme kompresije radne tvari.....	59
7.5.	Utjecaj omjera ubrizgavanja na COP za različite temperature toplinskog izvora .....	64
7.5.1.	Optimalni omjer ubrizgavanja za različite pogonske uvjete rada .....	66
8.	Zaključak .....	68
LITERATURA.....		70
PRILOZI.....		73

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Potrošnja primarne energiju prema energetsom izvoru [1].....	1
Slika 2. Promjena koncentracije CO <sub>2</sub> u atmosferi kroz godine, Mauna Loa Hawaii [3] .....	2
Slika 3. Europski zeleni plan – ciljevi i mjere [8] .....	4
Slika 4. Kretanje cijene prirodnog plina euro/MWh [9] .....	5
Slika 5. Diversifikacija opskrbe EU-a radi smanjenja ovisnosti o ruskom plinu [10] .....	5
Slika 6. Potrošnja finalne energije po sektoru, EU28 [13].....	6
Slika 7. Potrošnja finalne energije po sektoru, EU 28 [15].....	7
Slika 8. Ukupna finalna potrošnja energije u 2021. godini po sektorima industrije (EU 28) [16] .....	8
Slika 9. Raspodjela ukupne godišnje isporučene energije za potrebe sektora industrije [17] ...	9
Slika 10. Raspodjela potrošnje procesne topline u procesu proizvodnje prema temperaturnim rasponima, EU 28 [15] .....	10
Slika 11. Potrebni temperaturni raspon različitih industrijskih procesa ispod 200 °C [14].....	12
Slika 12. Godišnji potencijal zamjene fosilnih goriva s OIE za temperature ispod 200 °C [15] .....	13
Slika 13. Shematski prikaz kotla i postrojenja za izgaranje biomase u fluidiziranom sloju [24] .....	15
Slika 14. Udio površine šuma u odnosu na ukupnu površinu [25] .....	15
Slika 15. Europsko tržište kotlova na biomasu [27].....	16
Slika 16. Vrste električnih kotlova [22] .....	17
Slika 17. Europsko tržište električnih industrijskih kotlova [28].....	18
Slika 18. Shematski prikaz rada dizalice topline [29].....	19
Slika 19. Vrste dizalica topline s obzirom na temperaturu toplinskog izvora i toplinskog ponora [30] .....	21
Slika 20. Potencijalni toplinski izvori i toplinski ponori u industriji .....	22
Slika 21. Tjedno toplinsko opterećenje industrijskog pogona – Kontinuirani rad.....	26
Slika 22. Tjedno toplinsko opterećenje industrijskog pogona – Dvosmjenski rad .....	27
Slika 23. Tjedno toplinsko opterećenje industrijskog pogona – Vikend obustava pogona.....	27
Slika 24. Toplinske potrebe za grijanje industrijskog postrojenja i uredskih prostora .....	28
Slika 25. Insolacija kroz 2020. godinu za promatranu lokaciju .....	30
Slika 26. Proizvodnja električne energije iz solarne elektrane – 5 MW FN .....	31
Slika 27. Kretanje emisijske naknade ugljikovog dioksida, ETS dozvola [€/tCO <sub>2</sub> ] [37].....	37
Slika 28. Ukupni trošak pogona za kontinuirani profil pare .....	39
Slika 29. Ukupni trošak pogona za profil vikend obustave.....	40
Slika 30. Ukupni trošak pogona za dvosmjenski rad .....	41
Slika 31. Ukupni trošak pogona dizalice topline – utjecaj FN elektrane .....	42
Slika 32. Ukupni trošak pogona dizalice topline – utjecaj FN elektrane .....	42
Slika 33. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona dizalice topline i plinskog kotla .....	44
Slika 34. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona električnog i plinskog kotla.....	45
Slika 35. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona dizalice topline i plinskog kotla .....	46
Slika 36. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona električnog i plinskog kotla.....	47
Slika 37. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona dizalice topline i plinskog kotla .....	48
Slika 38. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona električnog i plinskog kotla.....	49
Slika 39. Utjecaj smanjenja investicijskog troška – dizalica topline s 5 MW FN .....	50
Slika 40. Utjecaj smanjenja investicijskog troška – dizalica topline s 10 MW FN .....	50
Slika 41. Utjecaj COP-a dizalice topline na pogonski trošak .....	51
Slika 42. Shematski prikaz visokotemperaturne dizalice topline – jednostupanjska kompresija .....	55

---

Slika 43. log p – h dijagram jednostupanjske kompresije.....	57
Slika 44. Ovisnost COP-a dizalice topline o temperaturi toplinskog izvora – Jednostupanjska kompresija .....	58
Slika 45. Shematski prikaz visokotemperaturne dizalice topline - EVI.....	60
Slika 46. log p – h dijagram – ubrizgavanje pare – EVI.....	63
Slika 47. Ovisnost COP-a kružnog procesa o omjeru ubrizgavanja .....	64
Slika 48. Ovisnost COP-a o $r_m$ – Temperatura toplinskog ponora 158,83 °C .....	65
Slika 49. Ovisnost COP-a o $r_m$ – Temperatura toplinskog ponora 140 °C .....	65
Slika 50. Ovisnost COP-a o $r_m$ – Temperatura toplinskog ponora 120 °C .....	66
Slika 51. Optimalni $r_m$ za različite temperature toplinskog izvora i ponora .....	67



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Konfigurirani sustavi za proizvodnju tehnološke pare.....	29
Tablica 2. Investicijski i O&M troškovi [26].....	33
Tablica 3. Cijena električne energije za industrijska postrojenja.....	34
Tablica 4. Otkupna cijena električne energije za sustav sa PV elektranom i dizalicom topline .....	36
Tablica 5. Otkupna cijena električne energije za sustav sa PV elektranom i električnim kotlom .....	36
Tablica 6. Emisijski faktori korištenih energenata [38].....	38
Tablica 7. Godišnje emisije stakleničkih plinova analiziranog industrijskog postrojenja .....	43
Tablica 8. Raspoložive temperature toplinskog izvora i toplinskog ponora .....	52
Tablica 9. Uvjeti koje trebaju ispunjavati radne tvari za primjenu i visokotemperaturnim dizalicama topline [39],[40],[41].....	53
Tablica 10. Svojstva potencijalnih radnih tvari za visokotemperaturne dizalice topline [40], [41] .....	54
Tablica 11. Ulazni parametri za proračun stacionarnog stanja dizalice topline s jednostupanjskom kompresijom.....	56
Tablica 12. Jednadžbe korištene za proračun stacionarnog stanja – jednostupanjska kompresija .....	57
Tablica 13. Proračun stacionarnog stanja procesa za definirane ulazne parametre .....	58
Tablica 14. Ulazni parametri za konfiguraciju sustava s ubrizgavanjem pare.....	61
Tablica 15. Jednadžbe korištene za proračun sustava s EVI.....	62
Tablica 16. Parametri EVI procesa za $rm = 0,55$ .....	63

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$COP_{Carnot}$	-	Ogrjevni učin carnotovog procesa
$\Phi_{kond}$	MW	Izmijenjeni toplinski tok u kondenzatoru
$P_{komp}$	MW	Snaga kompresora
$T_h$	°C	Temperatura ogrjevnog spremnika
$T_g$	°C	Temperatura rashladnog spremnika
$\Phi_{Toplinsko}$	MW	Vršne toplinske potrebe postrojenja
$\dot{g}_{m\_pare}$	t/h	Maseni protok pare
$c_p$	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet vode
$\vartheta_{pare}$	°C	Temperatura suhizasićene pare na izlazu iz kondenzatora
$\vartheta_{ulaz}$	°C	Temperatura vode u kondenzator
$C_i$	€/MWh	otkupna cijena električne energije
$E_{ii}$	MWh	ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca
$E_{Pi}$	MWh	ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca
$PKC_i$	€/MWh	prosječna cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču dodatnih naknada
$T_{w\_ul}$	°C	Temperatura geotermalne vode na ulazu u isparivač
$\Delta T_w$	°C	Razlika temperature vode na isparivaču
$\Delta T_i$	°C	Razlika između temperature isparavanja i temperature izlazne geotermalne vode iz isparivača
$\Delta T_{i\_preg}$	°C	Temperatura pregrijanja na izlazu iz isparivača
$\Delta T_{kond}$	°C	Razlika temperature vode/pare na kondenzatoru
$\Delta T_k$	°C	Razlika između temperature kondenzacije i temperature pare na izlazu iz kondenzatora
$\Delta T_{k\_poth}$	°C	Temperatura pothlađivanja na izlazu iz kondenzatora
$\eta_{is}$	-	Izentropski stupanj kompresije
$\dot{g}_{m\_rm}$	t/h	Protok radnog medija dizalice topline

---

$h_{ul\_vode}$	kJ/kg	Entalpija vode na ulazu u kondenzator
$h_{iz\_pare}$	kJ/kg	Entalpija pare na izlazu iz kondenzatora
$h_{ul\_w}$	kJ/kg	Entalpija geotermalne vode na ulazu u isparivač
$h_{iz\_w}$	kJ/kg	Entalpija geotermalne vode na izlazu iz isparivača
$g_{m\_w}$	t/h	Protok geotermalne vode
$\Phi_{isp}$	MW	Izmijenjeni toplinski tok na isparivaču
COP	-	Ogrjevni učin realnog lijevokretnog procesa
$\Delta T_{EVI}$	°C	Razlika između ulazne temperature glavne struje i izlazne temperature ubrizgavane pare u ekonomajzeru
$\Delta T_{EVI\_preg}$	°C	Temperatura pregrijanja na izlazu iz ekonomajzera
$\eta_{eko}$	-	Efikasnost izmjene topline na ekonomajzeru
$r_m$	-	Omjer ubrizgavane pare
$g_{m1}$	t/h	Protok radnog medija kroz prvi stupanj kompresora
$g_{m2}$	t/h	Protok radnog medija kroz drugi stupanj kompresora
$p_m$	bar	Tlak ubrizgavanja pare

---

**SAŽETAK**

U diplomskom radu se istražene su mogućnosti i prednosti korištenja obnovljivih izvora energije za proizvodnju tehnološke pare u različitim granama industrije. Zahtjevi za smanjenjem ovisnosti o fosilnim gorivima i provedba energetske tranzicije na obnovljive izvore energije zahtijevaju velike novčane investicije u industriju s konačnim ciljem potpune dekarbonizacije industrijskog sektora.

U prvom djelu rada dan je uvid u trenutno stanje potrošnje energije industrijskog sektora te je sagledan potencijal alternativnih izvora energije koje je moguće implementirati za različite toplinske potrebe industrije. Provedena je tehno-ekonomska analiza isplativosti pogona različitih sustava koji koriste OIE uključujući kotao na biomasu, električni kotao i dizalicu topline te plinskog kotla kao predstavnika fosilnih izvora. Tehno-ekonomska analiza je provedena za različite tjedne profile potrošnje tehnološke pare kao bi se usporedila isplativost spomenutih sustava u različitim pogonskim uvjetima. Analiza je pokazala da postoji značajan potencijal za uvođenje obnovljivih izvora energije u sustave za proizvodnju tehnološke pare. Međutim, njihova konačna isplativost ovisi o nizu čimbenika, uključujući kretanje cijena električne energije i fosilnih goriva. Smanjenjem odnosa cijena električne energije i fosilnih goriva OIE sustavi postaju znatno konkurentniji i isplativiji na tržištu.

U drugom dijelu rada izveden je matematički model odabrane konfiguracije visokotemperaturne dizalice topline te je analiziran utjecaj različitih strategija vođenja na učinkovitost pogona pri različitim pogonskim uvjetima rada. Uspoređena je razlika između dizalice topline s jednim stupnjem kompresije i dizalice topline s dodatnim ubrizgavanjem pare za vrijeme kompresije radne tvari. Za manje razlike između temperatura toplinskog izvora i toplinskog ponora, jednostupanjska dizalica topline daje dobre rezultate. Za velike temperaturne razlike između toplinskog izvora i toplinskog ponora prilagodbom parametra ubrizgavanja pare za vrijeme kompresije radne tvari moguće je postići višu učinkovitost sustava što smanjuje ukupni trošak pogona i čini visokotemperaturne dizalice topline isplativijom opcijom.

**Ključne riječi:** obnovljivi izvori energije, tehnološka para, alternativni energetske izvori, visokotemperaturna dizalica topline

---

**SUMMARY**

The thesis investigates the possibilities and advantages of using renewable energy sources (RES) for the production of technological steam in different industries. The requirements to reduce dependence on fossil fuels and implement the energy transition to RES require significant financial investments in industry to achieve the complete decarbonization of the industrial sector.

The first part of the thesis provides an overview of the current state of energy consumption in the industrial sector and assesses the potential of alternative energy sources that can be implemented for different industrial thermal needs. A techno-economic analysis of the profitability of operating different systems using RES is conducted, including a biomass boiler, an electric boiler, a heat pump, and a gas boiler as representative of fossil sources. The techno-economic analysis is done for different weekly profiles of technological steam consumption to compare the profitability of these systems under different operating conditions. The analysis showed that there is a significant potential for the introduction of RES into systems for the production of technological steam. However, their ultimate profitability depends on a number of factors, including the movements of electricity prices and fossil fuels. By reducing the ratio of electricity prices to fossil fuel prices, RES systems become significantly more competitive and profitable on the market.

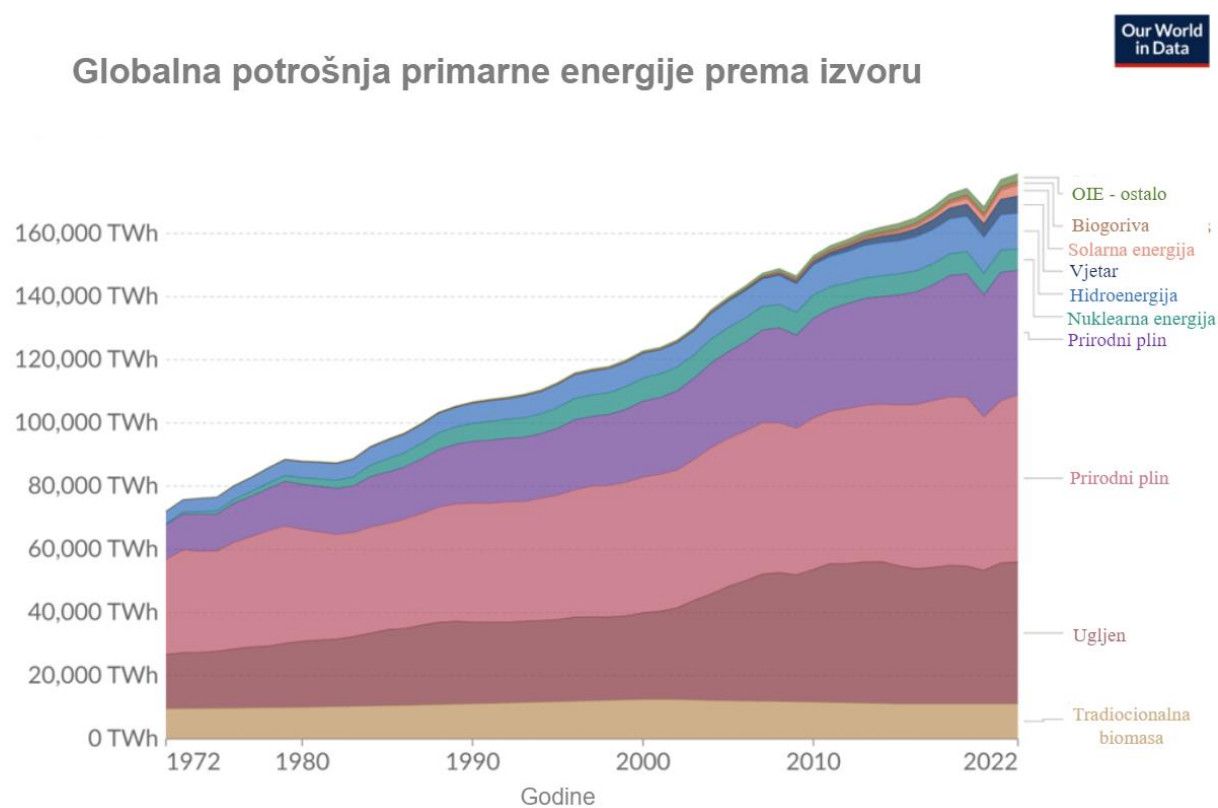
In the second part of the thesis, a mathematical model of a selected configuration of a high-temperature heat pump is modeled and the impact of different control strategies on the efficiency of operation under different operating conditions is analyzed. The difference between a heat pump with one compression stage and a heat pump with enhanced vapour injection is compared. For smaller differences between the temperatures of the heat source and the heat sink, a single-stage heat pump gives good results. For large temperature differences between the heat source and the heat sink, a heat pump with enhanced vapour injection allows for a significant increase in the efficiency of the system, which reduces the total life cycle cost of operation and makes the heat pump a more profitable option.

**Keywords:** renewable energy sources, technological steam, alternative energy sources, high-temperature heat pump

## 1. Uvod

### 1.1. Pregled trenutnog stanja potrošnje primarne energije

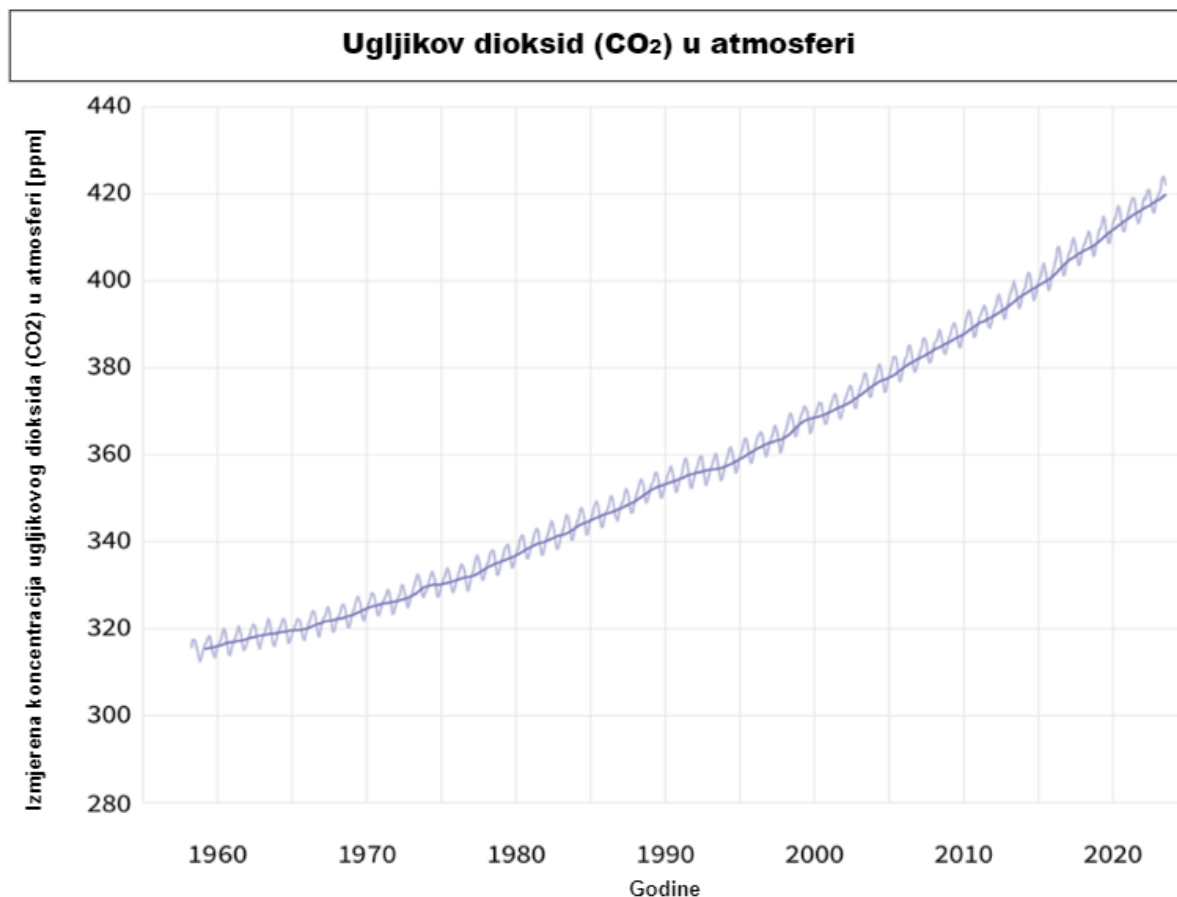
Fosilna goriva su prevladavajući izvori energije za proizvodnju električne i toplinske energije te kao pogonsko glavno pogonsko gorivo u cijelom svijetu. Njihova dominacija se proteže stoljećima, još od 18. stoljeća i izuma parnog stroja odnosno prve industrijske revolucije. Godišnje kretanje potrošnje primarne energije u pedesetogodišnjem razdoblju i struktura izvora energije je prikazana na slici 1.



**Slika 1. Potrošnja primarne energiju prema energetsom izvoru [1]**

Postotak ukupno potrošene primarne energije u svijetu koji je dolazio iz fosilnih goriva u 2022. godini iznosio je čak 81,79 % što je smanjenje od tek 11 % u odnosu na udio od prije 50 godina [1]. Trend smanjenja već godinama postoji, ali tranzicija s fosilnih goriva na obnovljive izvore energije mora ići brže ako se žele postići planirani ciljevi CO<sub>2</sub> neutralnosti do 2050. godine [2]. Jedan od velikih problema energetske tranzicije ilustriran je također na slici 1. Razvojem svjetskog gospodarstva raste apsolutna potreba za energijom, a samim time se i povećava iskorištavanje fosilnog goriva. Iako je njegova relativno niska cijena uz jednostavnu distribuciju i skladištenje omogućilo brzi razvoj društva i povećanje životnog standarda, danas postaju sve

vidljivije mnoge negativne posljedice prekomjernog iskorištavanja fosilnih goriva. Njegovim izgaranjem se oslobađa ugljikov dioksid u atmosferu. Iako je on u atmosferi nužan za održavanje života na Zemlji, njegova prekomjerna koncentracija dovodi do pojačanja efekta staklenika koji rezultira klimatskim promjenama zbog povećanja globalne srednje temperature.



Slika 2. Promjena koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi kroz godine, Mauna Loa Hawaii [3]

Na slici 2 je prikazana Keelingova krivulja koja prikazuje promjenu koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi. Povećanje udjela ugljikovog dioksida u atmosferi kroz povijest je direktno povezano s povećanim ljudskim aktivnostima i razvojem industrije koje je temeljeno na iskorištavanju fosilnih goriva. Danas udio ugljikovog dioksida u zraku iznosi 418,84 ppm što predstavlja povećanje od gotovo 50 % od početka industrijske revolucije [3]. Na temelju brojnih istraživanja moguće je aproksimirati rast globalne srednje temperature od 0,1 °C za svakih 10 ppm oslobođenog CO<sub>2</sub> u atmosferu što zapravo znači da se globalna srednja temperatura povisila za 1 °C od početka industrijske revolucije [4].

S obzirom da se već danas osjećaju snažne posljedice klimatskih promjena u obliku vremenskih nepogoda, sušnih razdoblja i postepenog podizanja razine mora jasno je da je krajnje vrijeme za energetske tranziciju na zelenu i čistu energiju.

## **1.2. Energetska tranzicija i prekretnica u energetske politici Europe i svijeta**

Europska Unija se pozicionirala kao predvodnik energetske tranzicije u svijetu s konačnim ciljem postizanja ugljične neutralnosti i potpune dekarbonizacije do 2050. godine. Iako energetska tranzicija nema službeni početak prvi korak prema dekarbonizaciji je bilo potpisivanje međunarodnog sporazuma o klimatskim promjenama 1997. godine u Kyotu koji je za cilj ima smanjivanje emisije šest glavnih stakleničkih plinova (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, PFC, HFC, SF<sub>6</sub>) [5]. Iako je sporazum ratificiran od strane 190 zemalja, države s najvećom količinom emitiranih stakleničkih plinova, SAD i Kina, nisu ratificirale sporazum. Veliki korak prema smanjenju stakleničkih emisija je započeo potpisivanjem Međunarodnog sporazuma o klimatskim promjenama u Parizu 12. prosinca 2015, godine kojeg je dosad potpisalo 196 zemalja. Zemlje potpisnice su se pravno obavezale smanjiti emisije stakleničkih plinova kako bi se globalni porast temperature ograničio na porast od 2 °C u usporedbi s preindustrijskim razinama, odnosno uložiti dodatne napore kako bi se taj porast ograničio na 1,5 °C [5]. Europska Unija je kao predvodnik energetske tranzicije donijela brojne planove, inicijative i pakete. Najznačajniji od njih je i već spomenuti europski Zeleni plan („Green Deal“). On je nastao na temelju ispunjavanja zakonskih obaveza iz Pariškog sporazuma s jasnim koracima i planom prema osiguravanju zelene tranzicije EU-e i klimatske neutralnosti do 2050. godine. U sklopu Europskog zelenog plana donesen je paket mjera „Spremni za 55 %“ koji sadrži niz prijedloga za reviziju i ažuriranje zakonodavstva EU-u. Paketom mjera se želi olakšati i ubrzati ulaganja u nove zelene tehnologije, poduprijeti zemlje članice u postizanju klimatskih ciljeva EU-a i osigurati konkurentnost industrije EU-a u tranzitnom razdoblju. [7]. Kratkoročni ciljevi europskog Zelenog paketa na putu prema potpunoj dekarbonizaciji do 2050. godine za svaku državu članicu EU-a su [7]:

1. Smanjenje neto emisija stakleničkih plinova za najmanje 55 % u odnosu na razinu iz 1990. godine
2. Povećanje udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije na 45 % do 2030. godine
3. Povećanje energetske učinkovitosti i smanjenje potrošnje primarne energije
4. Održiva poljoprivreda i kružno gospodarstvo
5. Zelena mobilnost – zamjena fosilnih goriva s alternativnim gorivima



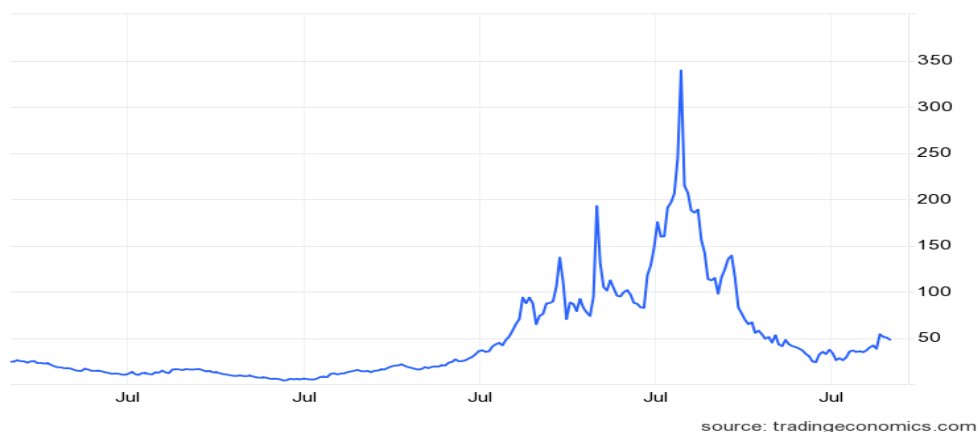
6. Pravedna tranzicija – tranzicija prema održivosti bez zanemarivanja socijalnih i ekonomskih aspekata
7. Reforma Sustava trgovanja emisijama – povećanje cijene emisijskih dozvola te dodatno proširenje na dodatne sektore kao što su pomorski promet i avijacija.



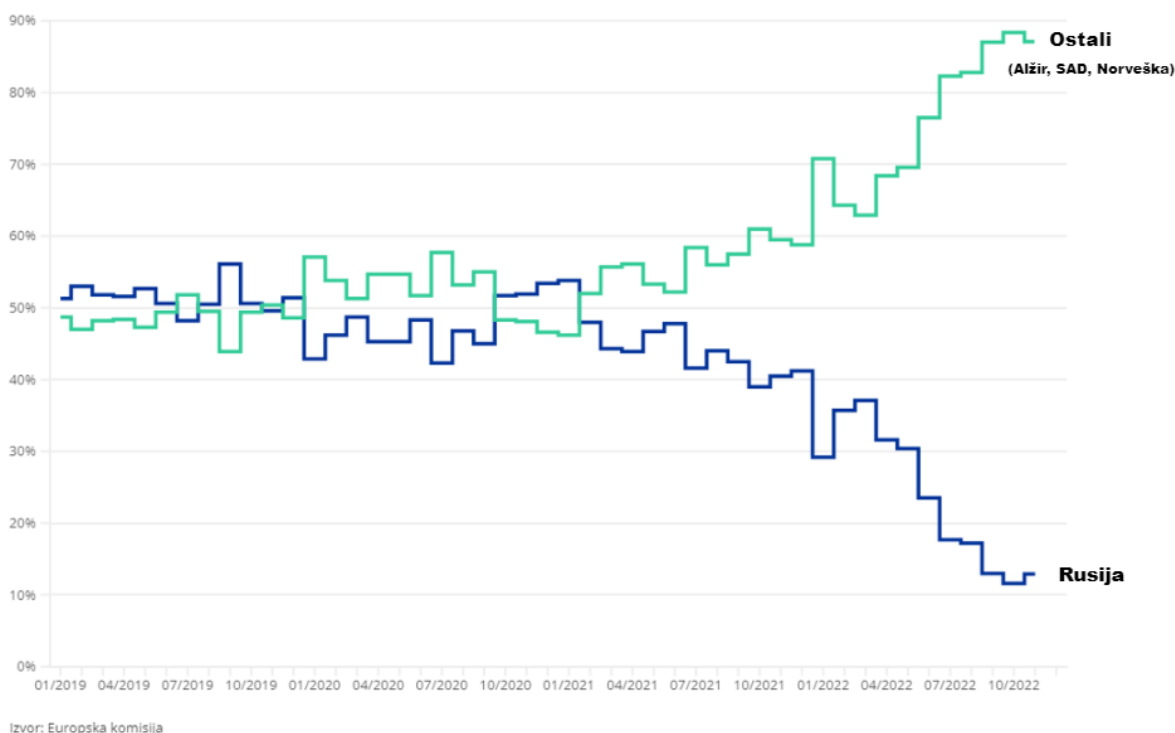
**Slika 3. Europski zeleni plan – ciljevi i mjere [8]**

Osim zbog ekoloških razloga i klimatskih promjena, energetska tranzicija je nužna za osiguravanje energetske neovisnosti u slučaju geopolitičkih sukoba, prirodnih katastrofa ili nepredvidivih događaja. Najsvježiji primjer koji ilustrira važnost energetske neovisnosti je sukob na istoku Europe. Europa je godinama uvozila najviše prirodnog plina iz Rusije (oko 50 % svojih ukupnih potreba) preko Ukrajine. Sukobi između te dvije zemlje te ekonomske sankcije koje su uvedene prema Rusiji dovele su do prekida opskrbe ruskim plinom u Europu. Europa je bila primorana na druge načine osigurati gotovo polovicu potrebnog prirodnog plina. Zbog nedostatka plina i nastale opće panike, zabilježeni su ogromni skokovi u cijenama prirodnog plina koji su utjecali na gospodarstvo, posebice na industrijski sektor i sektor kućanstva. Slika 4 prikazuje kretanje cijena MWh prirodnog plina na tržištu na kojem je jasno vidljiv drastičan skok od čak 7 puta veće cijene plina od cijene prije krize. Kako bi zaštitila svoju industriju i potrošače EU je morao brzo reagirati, provođenjem plana oporavka Europske komisije pod nazivom RePower EU. Glavni ciljevi plana su brzo smanjenje ovisnosti o ruskom plinu, povećano ulaganje u obnovljive izvore energije te diversifikacija izvora energije kako se

ne bi ponovila slična situacija u budućnosti. Na slici 5 se može vidjeti brza i efikasna reakcija Europe koja je uspjela zadovoljiti svoje potrebe uvozom plina iz drugih zemalja uz pomoć LNG terminala i novih plinovoda. Kako je i dalje prisutna uvozna ovisnost, samo o drugim zemljama kao što Norveška, SAD i Alžir, u planu RePowerEU su definirani ciljevi o povećanju proizvodnje energije iz različitih obnovljivih izvora energije uključujući izgradnju 592 GW solarnih elektrana i 510 GW vjetroelektrana do 2027. godine te velika ulaganja u industriju proizvodnje zelenog vodika i biometana kao alternativne fosilnim gorivima. Ukupna vrijednost paketa mjera procijenjena je na preko 210 milijardi eura [11].



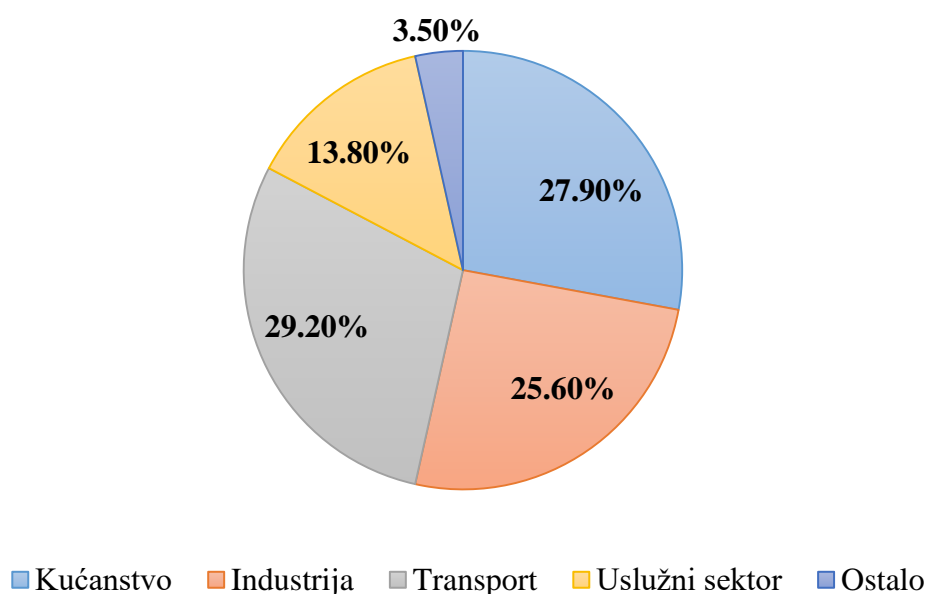
Slika 4. Kretanje cijene prirodnog plina euro/MWh [9]



Slika 5. Diversifikacija opskrbe EU-a radi smanjenja ovisnosti o ruskom plinu [10]

Na slici 6 je prikazan udio potrošnje energije pojedinog sektora u državama EU-a. Za energetska tranzicija je uz sektor transporta najznačajniji industrijski sektor koji je zaslužan za 32 % globalnih emisija stakleničkih plinova [12]. Kroz povijest se industrija pokazala kao glavni pokretač svih gospodarskih djelatnosti. Snažnim razvojem industrije tehnologija koje koriste obnovljive izvore energije može direktno utjecati i na preostale sektore. Danas su još uvijek investicijski troškovi obnovljivih izvora veći od fosilnih što mnoge građane i poduzetnike odvraća od ulaganja. Razvojem tehnologije se očekuje i pad investicijskih troškova što je bitan faktor pri odlučivanju na prelazak na obnovljive izvore energije. Također, procjenjuje se da će energetska tranzicija dovesti do stvaranja oko 15 milijuna radnih mjesta do 2050. godine, ponajviše u sektorima povezanim s energetska učinkovitosti, proizvodnjom PV panela i vjetroelektrana.

### Potrošnja finalne energije po sektoru, EU, 2021.



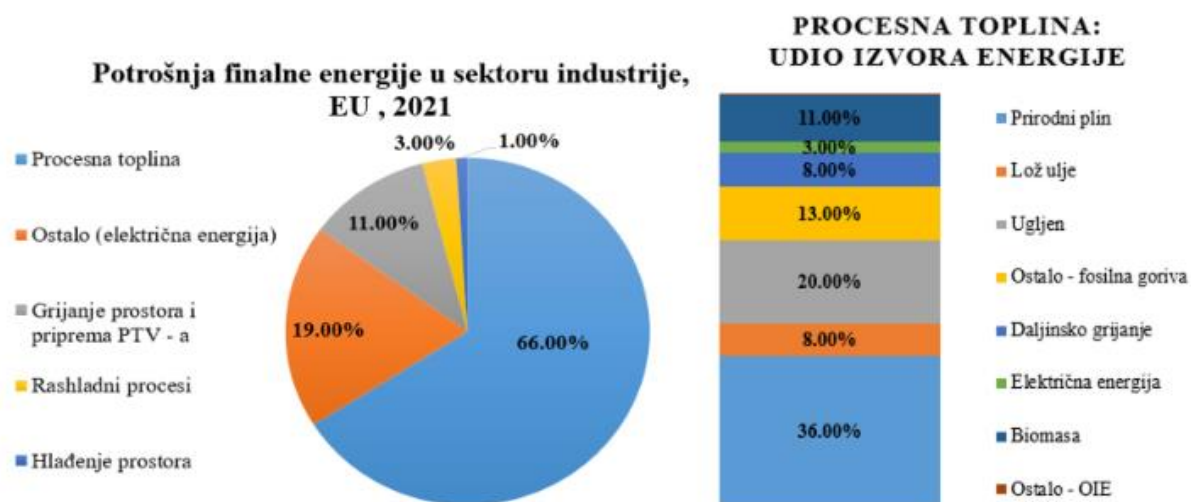
Slika 6. Potrošnja finalne energije po sektoru, EU28 [13]

U nastavku ovog rada posebna će pažnja biti usmjerena na smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima u sektoru industrije. Konkretno, istražiti će se primjena različitih izvora obnovljive energije u svrhu pokrivanja toplinskih potreba različitih industrijskih procesa.

## 2. Analiza toplinskih potreba industrije

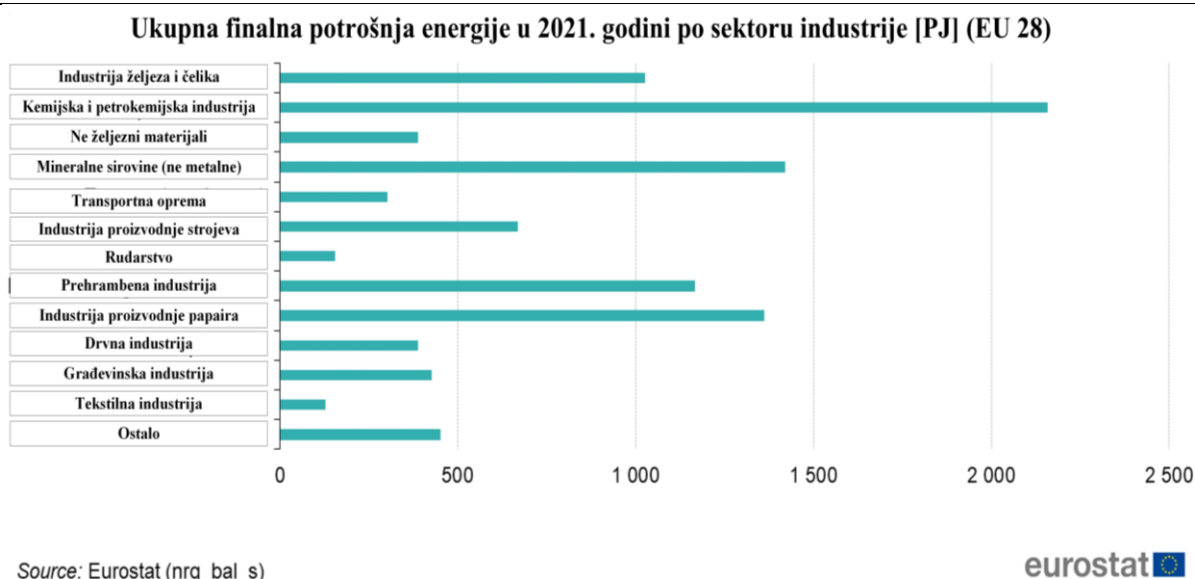
### 2.1. Potrebe industrije za toplinskom energijom i tehnološkom parom – EU

Od ukupno 2.950 TWh finalne energije koju su potrošile države članica EU u 2021. godini u sektoru industrije čak 81 % energije otpada na potrošnju toplinske energije [15]. Kao i u ukupnoj globalnoj potrošnji energije, u sektoru industrije dominiraju fosilni izvori energije s udjelom preko 78 %. Visoki postotci sugeriraju izvrsnu priliku za energetske transformacije sektora industrije uvođenjem obnovljivih izvora energije. Zamjenom fosilnih goriva s obnovljivim izvorima energije moguće je smanjiti emisije CO<sub>2</sub> za 552 Mt godišnje [15]. Potrošnja energije u sektoru industrije u državama članicama EU ilustrirana je na slici 7.



Slika 7. Potrošnja finalne energije po sektoru, EU 28 [15]

Iz priloženog je vidljivo da je najviše energije utrošeno na procesnu toplinu, čak 66 %. Toplinska energija je potrebna u različitim procesima u različitim industrijama kao što su prehrambena, petrokemijska, farmaceutska, tekstilna i papirna industrija te energetika. Slika 8 prikazuje ukupnu finalnu potrošnju energije u 2021. godinu po sektoru industrije. Najveći potrošači su kemijska i petrokemijska industrija te industrija obrade papira i pulpe. U tim industrijama prevladavaju energetske zahtjevni procesi poput destilacije, sušenja i sterilizacije. U različitim industrijama koriste se različiti ogrjevni mediji, a najzastupljeniji ogrjevni medij je vodena para. Tehnološka para je u većini slučajeva najprikladniji izvor potrebne procesne topline u industriji zbog mogućnosti postizanja puno viših temperatura u usporedbi s klasičnim toplovodnim ili vrelovodnim grijanjem. Osim toga para je od iznimne važnosti za provođenje velikog broja toplinskih operacija koje se koriste u industriji poput uparivanja, destilacije i sušenja.

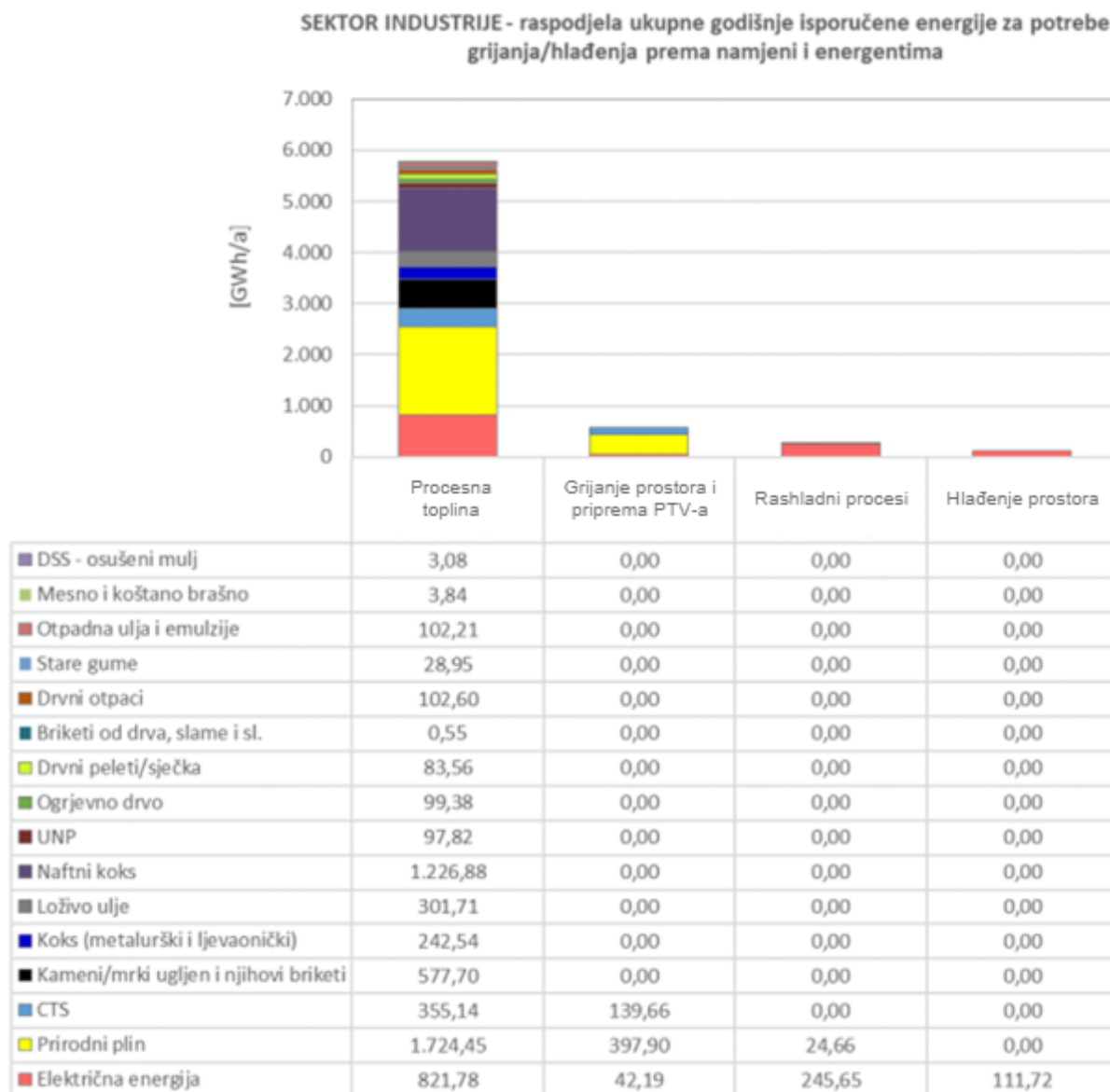


**Slika 8. Ukupna finalna potrošnja energije u 2021. godini po sektorima industrije (EU 28) [16]**

## 2.2. Potrebe industrije za toplinskom energijom i tehnološkom parom – Republika Hrvatska

Potrebe industrije Republike Hrvatske za toplinskom energijom su vrlo slične potrebama EU-a, kao i udio korištenja energetske izvora. Prema podacima Energetskog instituta Hrvoje Požar iz 2019. godine ukupna finalna potrošnja energije Republike Hrvatske je iznosila 8.981 GWh od čega 6.733 GWh potrošnja toplinske energije (75 % od ukupne potrošnje) [17]. Većina potrošene toplinske energije u industriji RH otpada na procesnu toplinu (85,72 %) kao i u ostatku Europske Unije. Ukupna potrošnja i raspodjela isporučene energije prikazana je na slici 9. I ovdje je jasna dominacija fosilnih izvora goriva predvođenih s prirodnim plinom (29,88 %) i ugljenom (31,26 %) [17]. Ako gledamo potrošnju finalne energije po sektorima industrije, najveća potrošnja energije je zabilježena u proizvodnji nemetalnih mineralnih proizvoda (50,79 %). Ova skupina industrije proizvodi široku paletu proizvoda koji se koriste u različitim sektorima za različite potrebe. Proizvodnja uključuje proizvodnju stakla i staklenih proizvoda, proizvodnju cementa, vapna i gipsa, proizvodnju proizvoda od kamena te ostalih porculanskih i glinenih proizvoda. Nakon nje slijedi prehrambena industrija s 12,39 % i industrija prerade drva s 7,53 % udjela u ukupnoj potrošnji energije. Spomenute industrije su od iznimne važnosti za gospodarstvo Hrvatske. One zapošljavaju velik broj ljudi i isporučuju proizvode koji su neophodni za razvoj i održivost hrvatske ekonomije. Potrebno je poduzeti sve moguće mjere kako bi se osigurala sigurna i efikasna energetska tranzicija na OIE bez negativnog utjecaja na produktivnost i profitabilnost industrije. Provođenje mjera poput sufinanciranja OIE i pružanje

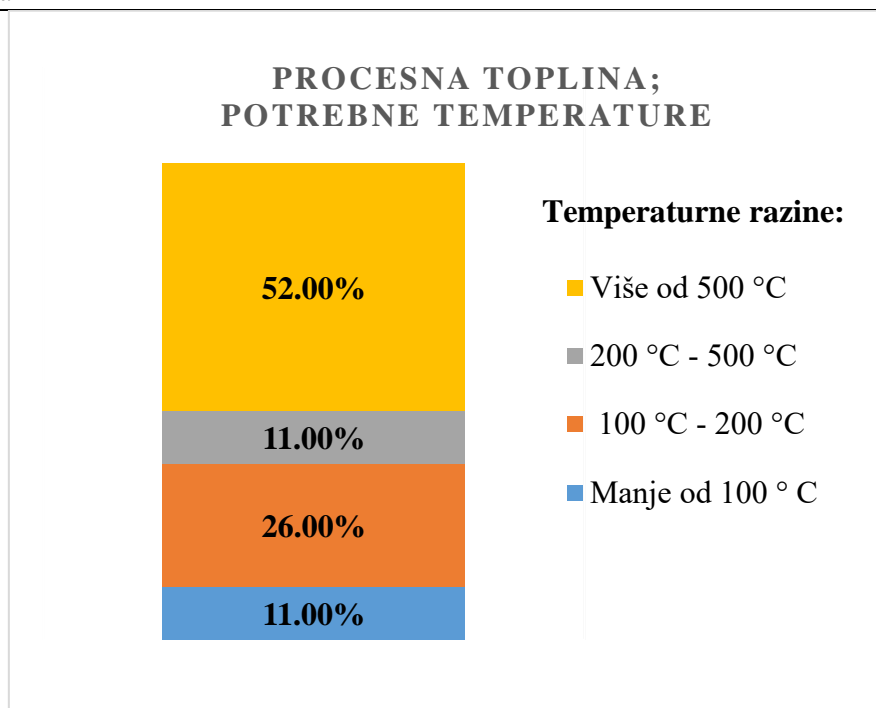
potpore industriji u energetskej tranziciji omogućiti će industriji da ostane konkurenta na globalnom tržištu.



Slika 9. Raspodjela ukupne godišnje isporučene energije za potrebe sektora industrije [17]

### 2.3. Temperaturni rasponi potrebne toplinske energije

Izuzetno bitan faktor prilikom sagledavanja potrošnje toplinske energije i potencijalne zamjene fosilnih goriva s OIE je temperaturna razina toplinskih potreba pojedinog industrijskog procesa. Različitim industrijama dominiraju različiti procesi koji zahtijevaju različite temperaturne razine. Na slici 10 je prikazana raspodjela temperaturnih režima za pokrivanje potreba grijanja u procesu proizvodnje za države EU 28.



**Slika 10. Raspodjela potrošnje procesne topline u procesu proizvodnje prema temperaturnim rasponima, EU 28 [15]**

### 2.3.1. Procesi visoke temperature - Temperature iznad 200 °C

Preko 50 % potrošnje energije se odnosi na procese u kojima je potrebno osigurati temperaturu iznad 500 °C. To su uglavnom procesi u kojima je potrebno osigurati direktno grijanje, bez posrednog medija u obliku tehnološke pare. Takvi procesi su karakteristični za energetske zahtjevne industrije poput cementne, građevinske i metalurške industrije te naftne i petrokemijske industrije. Najbolji primjer direktnog grijanja je rotacijska peć koja se koristi u cementnoj industriji za proizvodnju klinkera koji je jedan od glavnih sastojaka cementa. Za njegovu proizvodnju je potrebno osigurati temperaturu višu od 1.500 °C u rotacijskoj peći zbog čega je nemoguće koristiti posredni medij kao što je vodena para. Tako visoke potrebne temperature imaju za posljedicu i visoku potrošnju energije. Kako se kao energetske izvori koriste uglavnom fosilna goriva poput ugljena i prirodnog plina, proizvodnja cementa je i zaslužna za gotovo 7 % globalnih emisija CO<sub>2</sub> [18].

#### **Mogućnost Dekarbonizacije:**

Zbog spomenutih razloga dekarbonizacija cementne industrije i sličnih je izuzetno zahtjevna, ali i neophodna za postizanje klimatske neutralnosti. Zbog velikih emisija CO<sub>2</sub>, cementna, metalurška i ostale slične industrije plaćaju preko 90 eura po toni ispuštenog ugljikovog dioksida u sklopu Europskog sustava trgovanja emisijama [19]. Visoka cijena emisijskih dozvola je

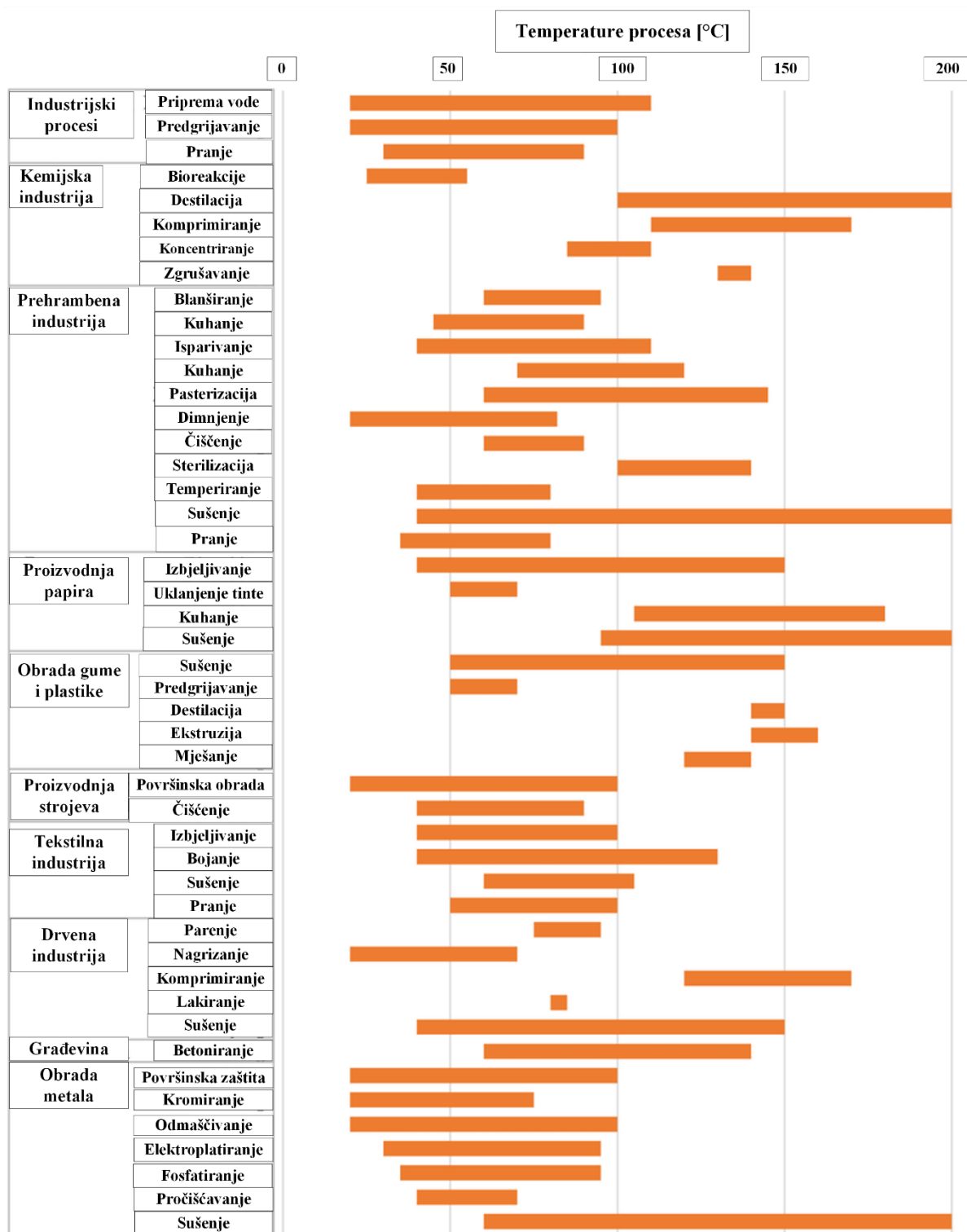
pozitivna kako i za okoliš tako i za energetske tranzicije jer potječe tvrtke i korporacije da ulažu u obnovljive izvore energije kako bi smanjili emisije CO<sub>2</sub> i uštedjele novac. Kao alternativa fosilnim gorivima mnoga postrojenja već koriste alternativna goriva poput biomase i bioplina, zelenog vodika ili pak energetske oporabljuju otpad. Cementne peći se mogu modificirati na način da se uz spaljivanje fosilnih goriva spaljuju i alternativna goriva. Alternativna goriva ne mogu potpuno zamijeniti korištenje fosilnih goriva jer nisu uvijek dostupna u količinama koji se smatraju obnovljivim za tako veliku potrošnju energije. Također, kod energetske iskorištavanja otpada javlja se problem varijabilnosti energetske vrijednosti otpada koji se koristi kao energent. Zbog toga može doći do određenih poteškoća u radu same peći i plamenika te do nemogućnosti ispunjavanja zahtijevane temperature. Kako bi se do 2050. godine postigli ciljevi klimatske neutralnosti kao jedno od rješenje se nameće izdvajanje i spremanje ugljikovog dioksida (eng. *Carbon capture and storage – CCS*). Ta tehnologija omogućuje korištenje fosilnih goriva gdje ga je nemoguće zamijeniti i u klimatskoj neutralnoj budućnosti na način da izdvaja ugljikov dioksid iz ispušnih plinova i skladišti ga u napuštenim naftnim i plinskim poljima te podzemnim špiljama. Iako su investicijski troškovi CCS još uvijek veliki, mnogi veliki potrošači planiraju uvesti upravo CCS u svoja postrojenja zbog visoke cijene emisijskih dozvola koja će zasigurno rasti i u narednim gorivima. Potencijal koji donosi ulaganje u CCS i korištenje alternativnih izvora energije u industriji su prepoznale i perjanice hrvatske cementne industrije; NEXE.d.o.o. i Holcim Hrvatska d.o.o. koji su prijavili projekte dekarbonizacije cementa te hvatanja i trajnog skladištenja ugljikovog dioksida. Projekt „KODECO net zero“ potonje tvrtke je izabran kao jedan od projekata koji će se sufinancirati iz Investicijskog fonda Europske unije. Vrijednost projekta se procjenjuje na 237 milijuna eura te će se njegovom provedbom potpuno dekarbonizirati industrijski pogon u Koromačnom [20].

### **2.3.2. Procesi niske temperature - Temperature ispod 200 °C**

Procesi poput pasterizacije, sterilizacije, sušenja i grijanja karakteristični su za prehrambenu, kemijsku i papirnu industriju. U pravilu takvi procesi ne zahtijevaju veću temperaturu od 200 °C što omogućuje lakšu implementaciju obnovljivih izvora energije poput visokotemperaturnih dizalica topline i električnih kotlova s kojima je moguće potpuno zamijeniti fosilne izvore. Prema podacima prikazanim na slici 10, njihovom implementacijom je moguće pokriti čak 37 % procesne topline u industriji što može smanjiti emisije stakleničkih plinova za 146 Mt godišnje na razini EU. Na slici 11 je prikazan raspon potrebnih temperatura (ispod 200 °C) za određene procese u različitim industrijama. Većina spomenutih procesa se odvija ispod ili nešto



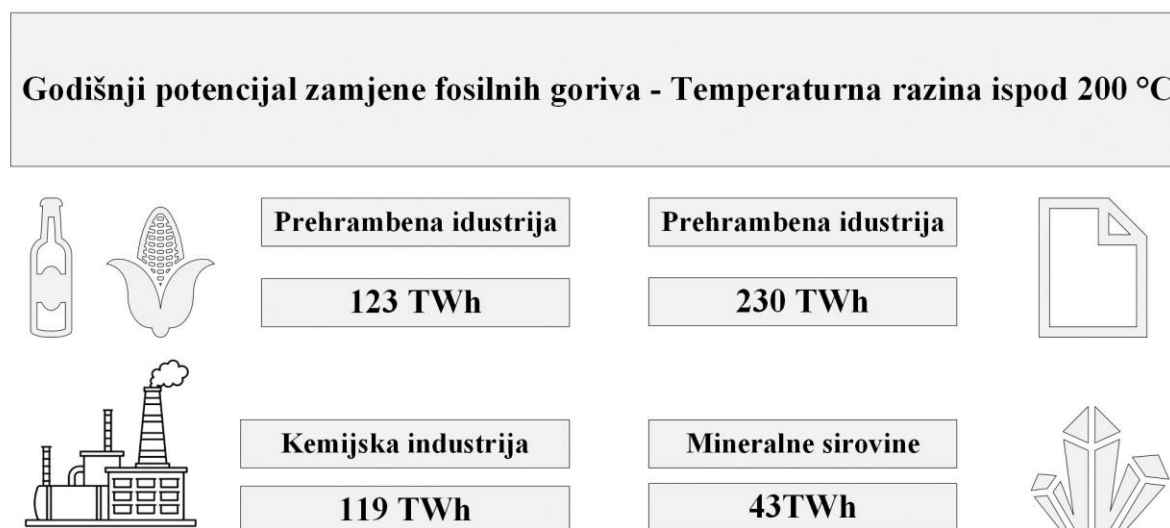
iznad 100 °C, ali navedeni procesi koje traže višu temperaturu su energetski intenzivniji (slika 10) i samim time emitiraju više ugljikovog dioksida u atmosferu.



Slika 11. Potrebni temperaturni raspon različitih industrijskih procesa ispod 200 °C [14]

Iako potencijal postoji te je implementacija OIE nešto jednostavnija zbog nižih temperatura procesa, fosilna goriva još uvijek dominiraju u ovom sektoru. Razlog tome su dugogodišnji

niski troškovi fosilnih goriva i još uvijek visoki investicijski troškovi postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije a koji odbijaju potencijalne investitore. Također, pri temperaturama nižim od 200 °C u industriji se kao ogrjevni medij preferira indirektno grijanje sa vodenom parom kao radnim medijem. Visoka dostupna količina latentne energije suhozasićene pare na visokoj temperaturi omogućava pohranu velike količine energije za kasnije uporabu. Ta toplina se oslobađa kondenzacijom pare natrag u kapljevito stanje pri konstantnoj temperaturi što omogućuje preciznu kontrolu temperature u raznim industrijskim procesima za razliku od korištenja tople vode kao ogrjevnog medija. Vodi se u kapljevitom stanju snižava temperatura sa svakim kJ predane energije što može dovesti do poteškoća u procesima u kojima je potrebna egzaktna i konstantna temperatura. Također topla voda se obično koristi pri atmosferskom tlaku što ograničava njenu primjenu na razinama do 100 °C. Tehnološka para u industriji se može podijeliti prema pogonskom tlaku (sukladno tome i temperaturi) na niskotlačnu paru ( $< 1$  bar), srednjetačnu paru ( $1 < 10$  bara) i visokotlačnu paru ( $p > 10$  bara). U industriji je dominantna srednjetačna para koja je dovoljna za većinu industrijskih procesa. Visokotlačna para je karakteristična za proizvodnju električne energije u termoelektranama, dok se niskotlačna para često korištena u vakuumskim procesima gdje je potrebno osigurati tlak niži od atmosferskog tlaka.



**Slika 12. Godišnji potencijal zamjene fosilnih goriva s OIE za temperature ispod 200 °C [15]**

Glavni fokus u nastavku ovog diplomskog rada će biti upravo mogućnost implementacije alternativnih OIE za procese kojima je potrebna tehnološka para do temperature od 200 °C.

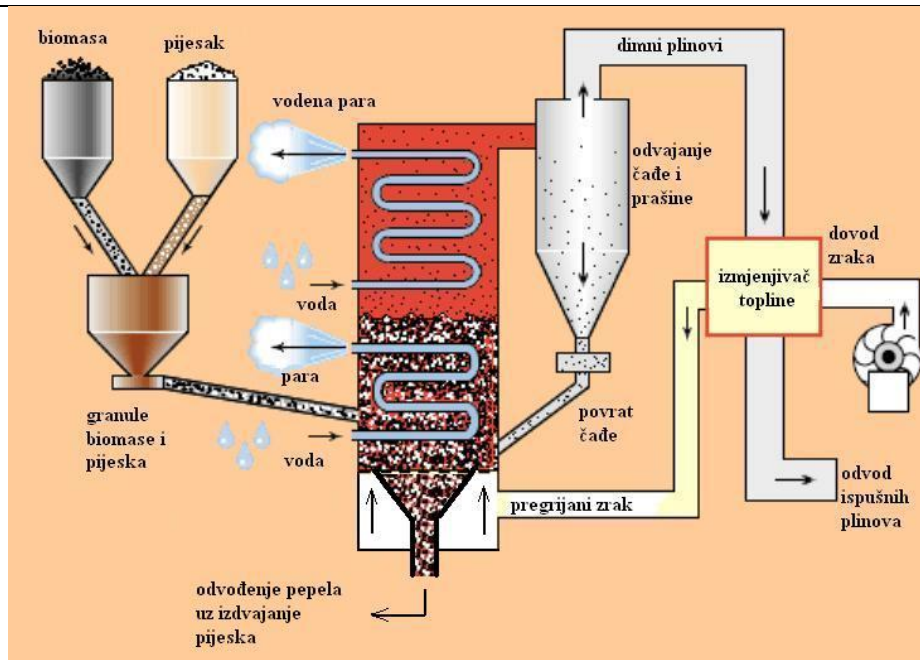
### 3. Obnovljivi izvori energije za proizvodnju tehnološke pare

U nastavku ovog rada će se detaljnije opisati prednosti, ograničenja i mogućnosti implementacije odabranih tehnologija iskorištavanja obnovljivih izvora energije za proizvodnju tehnološke pare koje imaju najviše potencijala i čija je implementacija planirana u Europskom zelenom planu. Nakon pregleda tehnologija provest će se tehno-ekonomska analiza isplativosti pojedinog sustava za različite profile potrošnje tehnološke pare.

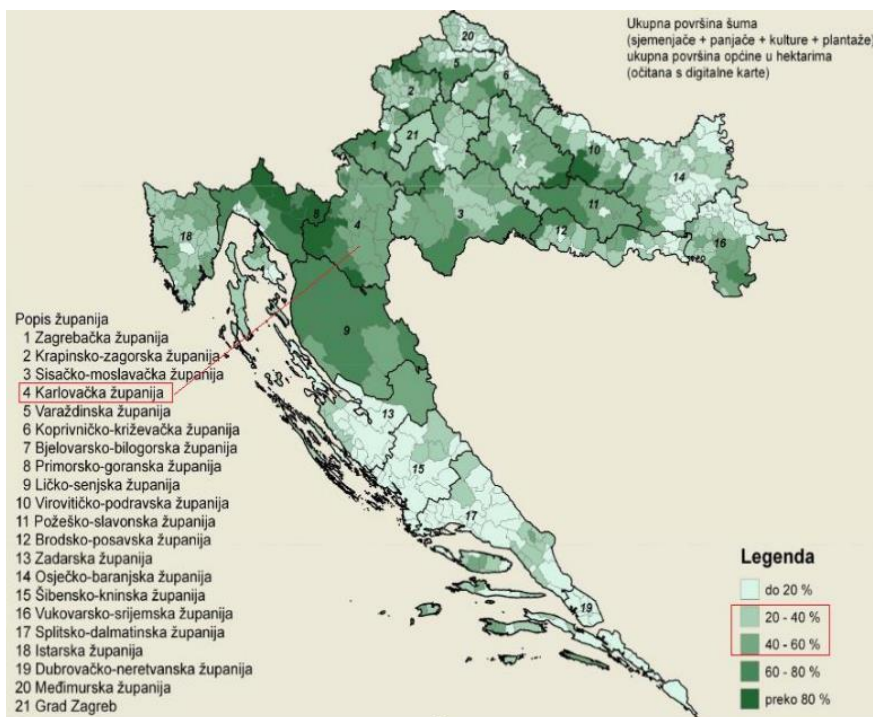
#### 3.1. Kotlovi na biomasu

Kotlovi na biomasu su najbliži kotlovima na fosilna goriva, posebice kotlovima na ugljen. Najveća razlika je u tome što se biomasa smatra obnovljivim izvorom ako se eksploatira održivo. Izgaranjem biomase se emitiraju staklenički plinovi, ali oni ne povećavaju ukupno količinu CO<sub>2</sub> u atmosferi. Razlog tome je što biljke koriste CO<sub>2</sub> iz atmosfere tijekom svog rasta i razvoja. Na taj način se stvara prirodni ciklus kruženja CO<sub>2</sub> koji se može narušiti pretjeranom eksploatacijom. Osim što korištenje biomase kao goriva ne povećava udio CO<sub>2</sub>, cijena biomase je jeftinija je cijene prirodnog plina ili ugljena. Negativna strana su nešto viši investicijski troškovi samog kotla te trošak izgradnje spremnika biomase. Kao energent se mogu koristiti različite vrste biomase poput peleta, briketa, drvene sječke, slame, piljevine, industrijskog otpada od drva itd. [23]. S obzirom na vrstu biomase razlikuje se i konstrukcija i tip samog ložišta. Dvije najviše korištene tehnologije su tehnologija izgaranja na rešetci i tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju. Fluidizacija sloja omogućava suspaljivanje drugih vrsta goriva i povećava efikasnost izgaranja (do 90 %), ali se istovremeno povećava vlastita potrošnja postrojenja (električna energija potrebna za pogon dodatnih ventilatora za fluidizaciju sloja) i investicijski trošak samog postrojenja. Shematski prikaz postrojenja s izgaranjem u fluidiziranom sloju je prikazan na slici 12.

Kao neželjeni produkt izgaranja biomase stvaraju se velike količine pepela koji ispušten u okoliš bez nadzora može prouzročiti veliku štetu. Najbolje način rješavanja tog problema je prikupljanje (različitim filtrima) i ponovna uporaba pepela u industrijama poput cementne i građevinske industrije.



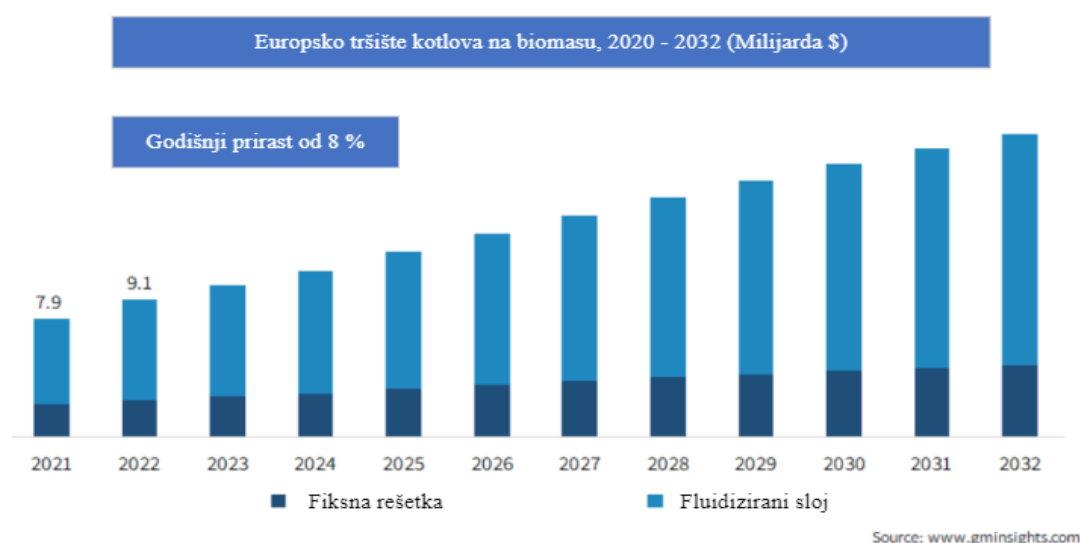
**Slika 13. Shematski prikaz kotla i postrojenja za izgaranje biomase u fluidiziranom sloju [24]**  
 Republika Hrvatska je jedna od najbogatijih država u Europi s obzirom na prostornu raspodjelu biomase koja je prikazana na slici 13. Osim cijene biomase po toni, veliki čimbenik na ukupnu cijenu ima i udaljenost industrijskog pogona od postrojenja za proizvodnju i preradu biomase (npr. peleta). Idealna situacija koja bi osigurala najnižu pogonsku cijenu kotla je proizvodnja peleta ili nekog drugog oblika biomase u neposrednoj blizini lokacije na kojoj će se koristiti.



**Slika 14. Udio površine šuma u odnosu na ukupnu površinu [25]**

Izgaranje biomase je relativno spor i trom proces. Vrijeme koje je potrebno da se biomasa zapali i proizvodi toplinu onemogućava kotlovima na biomasu nagle promjene opterećenje, a samim time i mogućnost pokrivanja vršnih opterećenja proizvodnje para. Problem se može smanjiti ugradnjom spremnika pare koji će „peglati“ vršna opterećenja, ali to zahtijeva dodatne investicijske troškove. Također, za razliku od dizalica topline ili električnih kotlova, kotlovi na biomasu mogu pokrivati raspon opterećenja između otprilike 20 % i 100 % [26]. Najniže opterećenje na kojem kotao na biomasu može raditi se naziva tehnički minimum. U slučaju pogona ispod točke tehničkog minimuma može doći do ozbiljnih oštećenja uslijed nepravilnog izgaranja. Također, nepravilno izgaranje može dovesti do emisija štetnih spojeva u okoliš poput ugljikovog monoksida i dušičnih oksida. U slučajevima kada opterećenje koje kotao mora pokriti padne ispod vrijednosti tehničkog minimuma, gašenje kotla na biomasu nije opcija. Hladni start potpuno ohlađenog kotla traje i do nekoliko sati te drastično smanjuje životni vijek postrojenja i opreme. U praksi je pravilo da se hladan start ne radi osim kada se postrojenje uključuje u rad nakon dužeg prekida kao što je remont. U tim trenucima, kotlovi se drže na tehničkom minimumu koje je dugoročno jeftinije od gašenja kotla i skraćivanja vijeka trajanja svakim njegovim gašenjem.

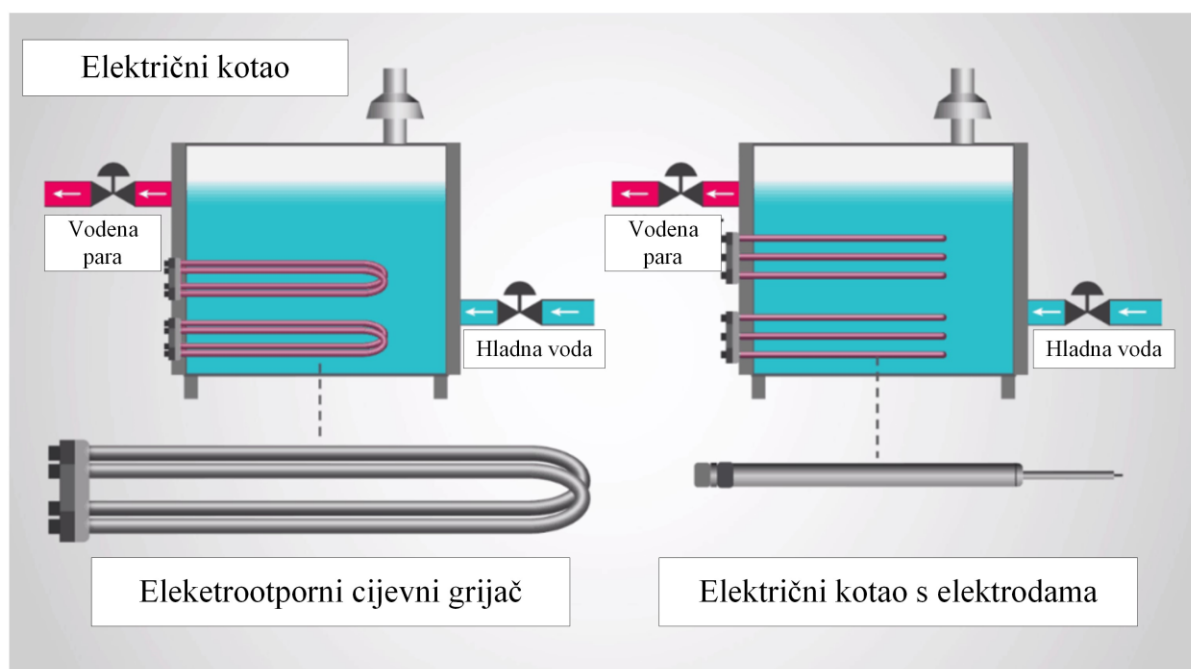
Ne fleksibilnost kotlova na biomasu otežava njegovu integraciju u skladnu cjelinu s ostalim izvorima električne energije i poskupljuje same troškove pogona. Najbolje performanse s obzirom na svoje prednosti pokazuje u hibridnom sustavu kao bazni proizvođač tehnološke pare dok se električni kotao koristi za pokrivanje vršnog opterećenja. Na slici 12 vidi se očekivani rast europskog tržišta kotlova na biomasu. Važno je naglasiti da je biomasa obnovljiva samo ako se ona koristi na održiv način.



**Slika 15. Europsko tržište kotlova na biomasu [27]**

### 3.2. Električni kotlovi

Električni kotlovi za proizvodnju tehnološke pare koriste električne grijače za zagrijavanje vode i proizvodnju tehnološke pare. Sami grijači mogu biti smješteni u cijevima i rade na principu električnog otpora samog elementa zagrijača. Svaka cijev sadrži spiralni grijač koji se zagrijava kada kroz njega prolazi struja. Oslobađa se Jouleova toplina koja se sa zagrijača prenosi na vodu koja isparava. Takva tehnologija se primjenjuje kod manjih uređaja manjih kapaciteta, do 5 MW. Druga skupina električnih kotlova su elektrodni kotlovi. Proizvodnju pare omogućavaju čelične ili bakrene elektrode koje su uronjene u vodu unutar spremnika kotla. Propuštanjem električne energije kroz elektrode dolazi do egzotermne reakcije elektrolize vode pri kojoj se oslobađa toplinska energija za proizvodnju pare. Zbog znatno veće snage, od 3 do 70 MW, i mogućnosti proizvodnje većih količina tehnološke pare elektrodni kotlovi se češće koriste u industriji dok se električni cijevni kotlovi češće koriste u stambenim zgradama za grijanje i pripremu PTV-a.



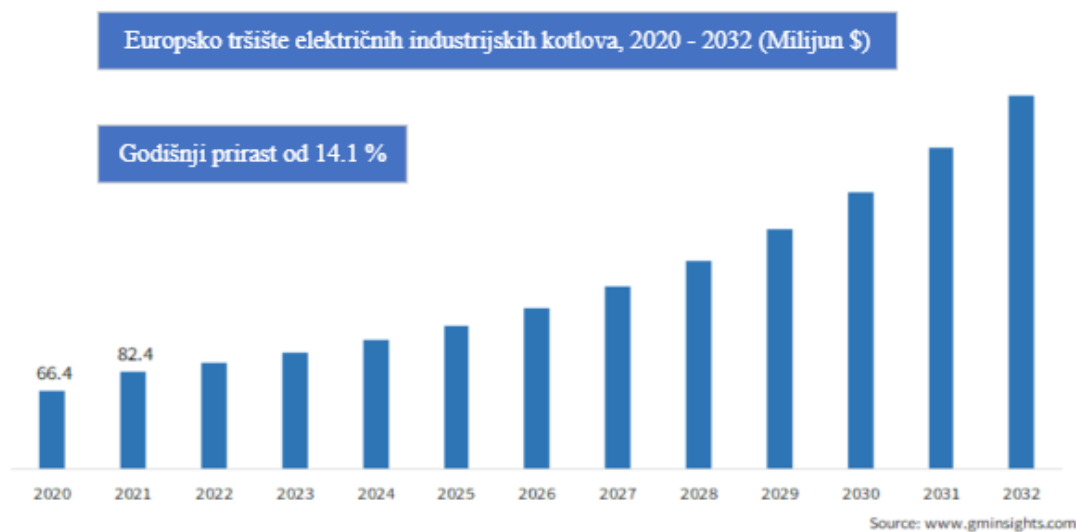
Slika 16. Vrste električnih kotlova [22]

Bez obzira na spomenutu razliku u tehnologiji, karakteristika svih električnih kotlova je visoka efikasnost koja iznosi i do 99 % pri nazivnom opterećenju za razliku od fosilnih alternativa čija je iskoristivost između 80 % i 90 % (kod kondenzacijskih plinskih kotlova nešto i više). Također, izuzetno velika prednost električnih kotlova je njihova fleksibilnost i mogućnost pokrivanja opterećenja od 0 – 100 % u bilo kojem trenutku. Ta karakteristika ih čini izuzetno efikasnim za potrebe pokrivanja vršnih opterećenja proizvodnje tehnološke pare. Temperature

koje je moguće postići električnim kotlovima su značajno više nego kao kod dizalica topline te je moguće postiti izuzetno visoke temperature i do 400 °C što omogućuje njihovu primjenu i u energetske intenzivnim industrijama koje zahtijevaju više temperaturne režime. Ograničavajući faktor je visoki tlak pare pri temperaturama od 400 °C te debljina same stjenke spremnika, odnosno kotla koja mora podnijeti promjenjiva naprezanja.

Međutim, važno je napomenuti da su električni kotlovi isplativi samo u slučaju visokog udjela obnovljive energije u energetske *mix-u*. Naime, prosječna iskoristivost termoelektrane i proizvodnje električne energije iz fosilni goriva je između 35 – 40 % što znači da se znatan dio energije gubi u procesu pretvorbe. Također, korištenjem električnih kotlova u energetske *mix-u* u kojem dominiraju fosilni izvori goriva ne smanjuju se emisije stakleničkih plinova.

Da bi električni kotlovi postali ekološki i ekonomski isplativi potrebno je povećati udio obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije što je i predviđeno Europskim zelenim planom. Zelena električna energija iz solarnih, hidro i vjetroelektrana omogućit će električnim kotlovima da postanu potpuno ekološki prihvatljiva opcija za grijanje i proizvodnju pare bez emisija CO<sub>2</sub>. Također, korištenjem parnih akumulatora moguće je dodatno skladištiti toplinsku energiju kada je cijena električne energije niska (mnogo vjetra ili sunca) i kasnije koristi kada je cijena električne energije skupa ( dan bez vjetra ili bez sunca). Na taj način moguće je dodatno minimizirati ukupni trošak pogona i osigurati stabilnost elektroenergetske mreže. Očekuje se da će se trendovi na europskom tržištu industrijskih električnih kotlova nastaviti u sljedećim godinama (slika 13). Električna energija će biti sve rašireniji izvor energije za industriju, a sve stroži propisi o emisijama stakleničkih plinova potaknuti će industriju da potraži alternativne izvore energije koji proizvode manje emisija stakleničkih plinova.

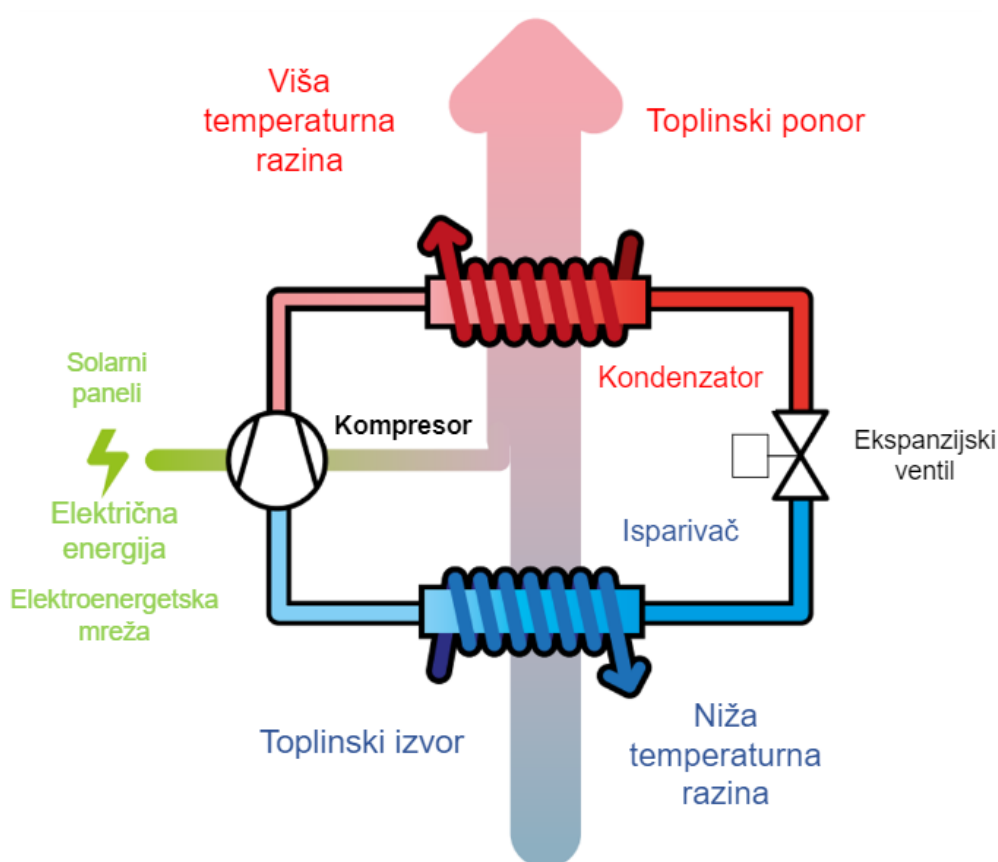


Slika 17. Europsko tržište električnih industrijskih kotlova [28]

### 3.3. Dizalice topline

#### 3.3.1. Karakteristike i način rada

Dizalice topline su uređaji koji rade na principu Rankineovog lijevokretnog kružnog ciklusa između dva spremnika (ogrjevni i rashladni) pomoću kojeg je moguće prenositi toplinsku energije s niže temperaturne razine na višu temperaturnu razinu. Naravno, sukladno drugom zakonu termodinamike takav prijenos topline nije moguć bez dodatnog ulaganja energije (rada). Kod dizalica topline je to dodatni mehanički rad kojeg daje kompresor kojeg pogoni električna energija. Shematski dijagram rada dizalnice topline je prikazan na slici 18.



Slika 18. Shematski prikaz rada dizalnice topline [29]

Za razliku od prethodno obrađenih energetske izvora, dizalice topline su posebne po tome što kao toplinske izvore koriste okolišni zrak, tlo, geotermalne izvore, podzemne vode, otpadnu toplinu iz industrije itd. Uz dodatnu uloženu električnu energiju moguće je osigurati potrebnu temperaturnu razinu za pokrivanje svih toplinskih potreba procesa i na višim temperaturama. Učinkovitost dizalnice topline se često iskazuje preko faktora ogrjevnog učina COP (eng. Coefficient of performance) koji predstavlja omjer između dobivene toplinske energije i



potrebe električne energije koju je potrebno uložiti kako bi se povisila temperaturna razina isporučene toplinske energije. Za idealnu dizalicu topline (koju opisuje idealni Carnotov proces), COP ovisi isključivo o temperaturnoj razlici toplinskog izvora i toplinskog ponora.

$$COP_{Carnot} = \frac{\Phi_{Kondenzator}}{P_{Kompresor}} = \frac{T_h}{T_h - T_g}$$

Za savladavanje većih temperaturnih razlika potrebno je uložiti više električne energije za pokretanje kompresora. COP tipične dizalice topline varira između 2 i 5, ovisno o dostupnom temperaturnom izvoru i potrebnom temperaturnom ponoru. Za dizalicu topline koja radi s ogrjevnim učinkom  $COP = 4$ , dizalica topline isporučuje četiri puta više toplinske energije nego električne energije koja je potrebna za njezin pogon. Odnosno ako gledamo sa stajališta prethodno obrađenih energetske izvora, učinkovitost dizalice topline u ovom slučaju iznosi 400 %. Iz tog podatka je moguće zaključiti da implementacija dizalice topline može drastično smanjiti finalnu potrošnju energije.

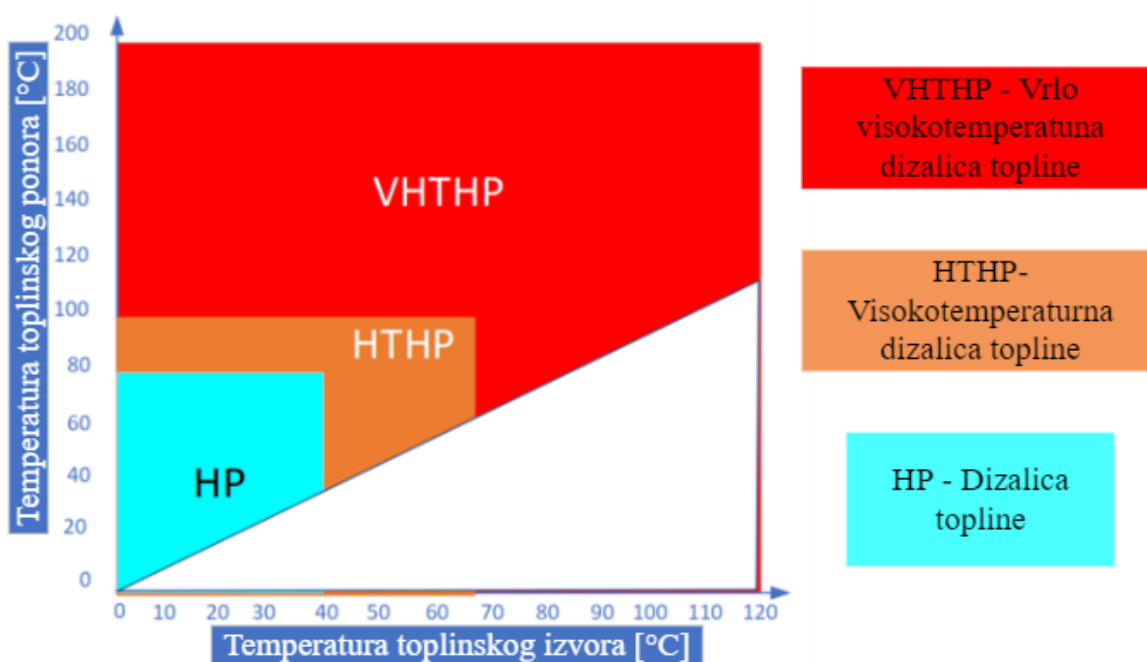
### **Potencijal smanjenja emisija CO<sub>2</sub>:**

Kao i kod električnih kotlova, potencijalno smanjenje emisija ugljikovog dioksida ovisi o udjelu obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. Sa trenutnim udjelom OIE u energetske mix-u Europske unije, moguće je smanjenje emisije ugljikovog dioksida od 67 % u odnosu na trenutno stanje. Za udio od 100 % OIE u energetske mix-u, dizalice topline postaju ne samo potpuno ugljično neutralne već i drastično smanjuju finalnu potrošnju energije što ih čini jednom od najznačajnijih tehnologija energetske tranzicije. Na razini EU-a moguća je ušteda od 146 Mt ugljikovog dioksida godišnje [15]. Osim sa energetske i ekološke strane, primjena dizalice topline osigurava energetske sigurnost i smanjenje ovisnosti o uvozu fosilnih energenata čija je cijena drastično podložna fluktuaciji s obzirom na geopolitičke i tržišne promjene.

### **3.3.2. Postizive temperaturne razine**

Slika 19 prikazuje podjelu dizalice topline s obzirom na temperaturu toplinskog izvora i toplinskog ponora. Najviše temperature koje je moguće postići sa sadašnjom tehnologijom su ograničene na 200 °C. Više temperature su ponajviše ograničene s fizikalnim svojstvima radnih medija dizalice topline koji nisu prikladni za korištenje na tako visokim temperaturama bez velikih promjena i degradacija fizikalnih svojstava radnih tvari. Također, mehanička svojstva materijala koji se koriste za izrade dijelova kompresora degradiraju na povišenim temperaturama zbog čega može doći do lomova i pregaranja u sustava. Za više potrebne

temperature su primjenjivije druge tehnologije iskorištavanja obnovljivih izvora energije poput kotlova na električnu energiju i biomasu.



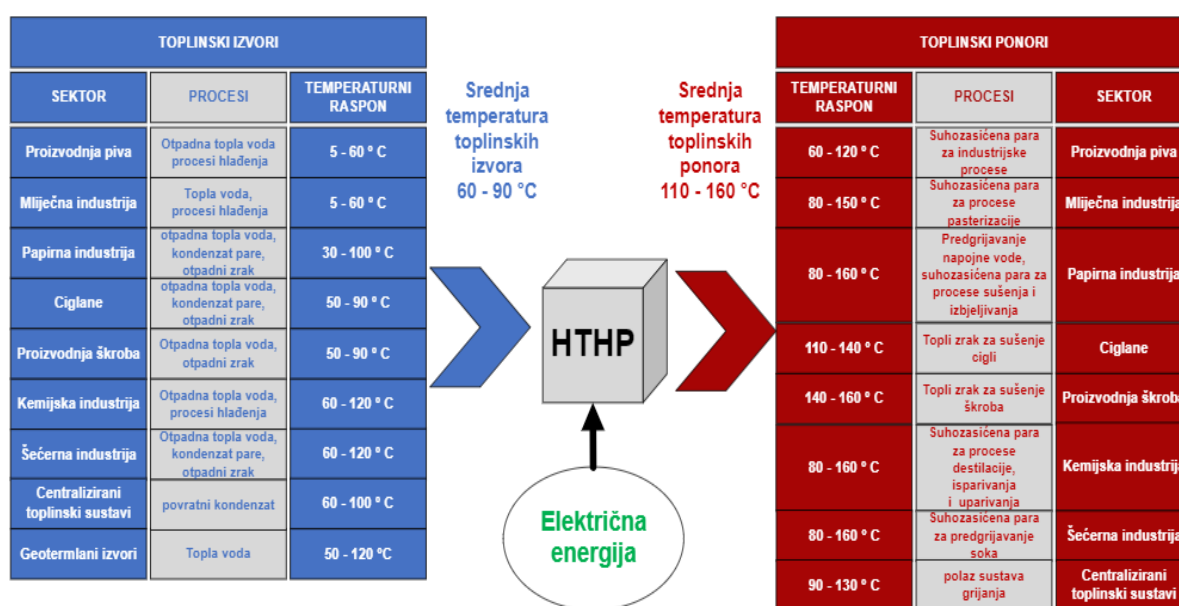
**Slika 19. Vrste dizalica topline s obzirom na temperaturu toplinskog izvora i toplinskog ponora [30]**

Standardne dizalice topline (HP) omogućavaju pokrivanje toplinskih potreba do temperature od 80 °C. One danas predstavljaju komercijalno dostupne uređaje koji se primjenjuju ponajviše u sektoru zgradarstva kao zamjena za tradicionalno fosilne izvore sustave grijanja i hlađenja. Kao toplinske izvore koriste široko dostupne obnovljive izvore energije iz okoline poput zraka, tla i vode. Glavna prepreka u njihovoj implementaciji su visoki početni investicijski trošak kako za samu dizalicu topline tako i za prilagodbu ili rekonstrukciju postojećeg sustava grijanja koje omogućuje rad sustava na nižim temperaturama (ušteda u energiji). Također, potrebno je uložiti veća novčana sredstava u samu toplinsku ovojnicu zgrada i kuća kako bi se povećala energetska efikasnost i smanjila potrošnja finalne energije. Uz brojne poticaje i subvencije na razini EU-a te kontinuiran razvoj tehnologije koji dovodi do sve nižih investicijskih troškova, dizalice topline postaju sve privlačnija opcija za održivo grijanje i hlađenje u sektoru zgradarstva.

### 3.3.3. Visokotemperaturne dizalice topline

Visokotemperaturne dizalice topline (VHTHP i HTHP) su specifične po mogućnosti proizvodnje toplinske energije na visokim temperatura do 200 °C. Kao što je već spomenuto i opisano u prethodnim poglavljima ovog rada, visokotemperaturne dizalice topline su jedno od

moćnih rješenja dekarbonizacije dijela potrošnje energije u industriji. Kako bi se mogle postizati tako visoke temperature potrebno je koristiti toplinske izvore više temperature razine poput otpadne industrijske topline različitih industrijskih procesa ili geotermalnih izvora. Iako je teoretski moguće koristiti izvore topline poput okolišnog zrak i tla, takva konfiguracija nema smisla s ekonomskog stajališta te je u praksi temperaturna razlika između spremnika limitirana na maksimalno 100 °C. Kao što je već objašnjeno, velika temperaturna razlika između toplinskih izvora (spremnika) će rezultirati s malim COP-om što će za posljedicu imati ekonomsku neisplativost korištenja samo dizalice topline. Slika 20 prikazuje temperaturne raspone potencijalnih toplinskih izvora i ponora.



**Slika 20. Potencijalni toplinski izvori i toplinski ponori u industriji**

Da bi se dizalica topline mogla koristiti za pokrivanje industrijskih procesa potrebno je imati dovoljne količine otpadne topline na odgovarajućoj temperaturnoj razini. Za razliku od ostalih energetskih izvora koji mogu dobavljati i koristiti energente iz drugih država, toplinski izvor se mora nalaziti u blizini instalacije dizalice topline jer svaki dodatni kilometar udaljenosti drastično poskupljuje investiciju. U slučaju da toplinski izvor nema dovoljan toplinski kapacitet za potpuno pokrivanje svih toplinskih potreba lokacije moguće je u sustav implementirati električni ili plinski kotao koji će pokrivati vršno opterećenje za koje dizalica topline nema dovoljnog kapaciteta.

## **Tehničke i ekonomske barijere**

Glavna barijera širenja visokotemperaturnih dizalica topline je visoka investicijska cijena i značajan trošak prilagodbe postojećih sustava. Iako su se dizalice topline pokazale kao dugoročno isplativiji sustav za određene pogonske uvijete, visoka cijena investicije povećava period povrata investicije. Investicije s periodom povrata investicije duljim period od 3 godine su nepopularne u industriji zbog nesigurnosti u njezin povrat što stavlja dizalice topline u nepovoljan položaj [29]. Razvojem tehnologije i uz pomoć EU-a i države u vidu subvencija očekuje se smanjenje početnog kapitalnog troška pogotovo za projekte velikih snaga koji trebaju probiti put prema komercijalizaciji proizvoda. S tehničke strane glavne barijere su dostupnost radnih tvari koje su primjenjive na povišenim temperaturama uz mali utjecaj na okoliš, konstrukcija i svojstva materijala samog kompresora te fizikalna i kemijska svojstva mazivnog ulja koje onemogućuju visoke temperature na njegovom izlazu.

### **Stanje na tržištu**

Na trenutnom tržištu postoji veliki broj proizvođača koji mogu postići temperature do 100 °C te se takve dizalice najčešće koriste kao toplinski izvor u centraliziranim toplinskim sustavima i u industriji gdje je potrebna topla voda. Za temperature između 100 °C i 150 °C postoji ograničen broj proizvođača na tržištu. Glavni problemi su vezani uz pronalazak radne tvari koja ima dobra fizikalna svojstva na povišenim temperaturama i široki temperaturni raspon, nema negativan utjecaj na okoliš te mehanička svojstva materijala dijelova kompresora koji ne omogućava postizanje viših temperatura od 180 °C [31]. Za industrije koje zahtijevaju temperaturu višu od 150 °C para proizvedena dizalicom topline se može dodatno komprimirati parnim kompresorom na željeni tlak i/ili temperaturu. Unatoč izazovima, postoji rastući interes i proizvođača i potrošača za što veću primjenu visokotemperaturnih dizalica topline. Kao vodeći proizvođači spominju se tvrtke kao što su Siemens Energy, Turboden, Enertime i MAN Energy Solutions. Navedeni proizvođači imaju široki raspon standardiziranih rješenja za toplinske kapacitete između 1 MW do 10 MW. Dizalice topline za kapacitete iznad 10 MW se obično rade po narudžbi i dogovoru sa samim proizvođačem kako bi se rješenje optimalno prilagodilo pojedinom slučaju. Iako postoji potencijal, dizalice topline s temperaturom toplinskog ponora višom od 150 se još uvijek ne mogu pronaći na tržištu te su one u fazi laboratorijskih istraživanja i pilot projekta manjih snaga. Za industrije koje zahtijevaju temperaturu višu od 150 °C para proizvedena dizalicom topline se dodatno komprimirati odvojenim parnim kompresorom na željeni tlak ili temperaturu što za posljedicu ima smanjuje konačnog COP-a cjelokupnog sustava. Trenutačno su u tijeku razni RD&D projekti koji su

---

potpomognuti nacionalnim inicijativama i uglavnom usmjereni prema lokalnom industrijskom sektoru. Neki od projekata u tijeku su SkaleUp (SINTEF), LowCapex and FUSE (TNO) i SuPrHeat (DTI/DTU). Glavna motivacija navedenih projekata je smanjenje pogonskih troškova i stakleničkih emisija industrije implementacijom visokotemperaturnih dizalica topline u industrijska postrojenja. Na Europskoj razini je drugačija situacija. Niski prioritet istraživanja industrijskih dizalica topline je ograničio broj projekata koji se bavi tom problematikom. Predvodnici europski financiranih projekta su BAMBOO (AIT) i DryFiciency(AIT) [32].

## 4. Konfiguracija sustava za proizvodnju tehnološke pare

### 4.1. Opis industrijskog postrojenja

Kako bi se provela analiza isplativosti i primjenjivosti energetskih izvora i tehnologija iz prethodnog poglavlja potrebno je konfigurirati i dimenzionirati sustave za proizvodnju tehnološke pare prema toplinskim potrebama hipotetskog industrijskog postrojenja u okolici Zagreba koje za potrebe industrijskog pogona koristi suhozasićenu tehnološku paru stanja 6 bara i nazivnog protoka 15 t/h. Potreba za tehnološkom parom je promjenjiva kroz dan te ovisi o toplinskim potrebama pojedinih procesa u industriji te godišnjem dobu. Tijekom zimskog razdoblja tehnološka para se osim za pokrivanje procesnih toplinskih potreba (proces distilacije, sterilizacije i sušenja) koristi za grijanje proizvodnog pogona, uredskih prostorija te pripremu PTV-a.

Proizvodnja tehnološke pare visoke kvalitete zahtijeva konstantan izvor svježe vode iz bunara ili gradskog vodova. Prije ubacivanja vode u sustav, potrebno je kemijski pripremiti vodu kako bi se dobila kemijski čista voda (čisti H<sub>2</sub>O). Voda prolazi kroz pješčane filtere, ionske izmjenjivače te konačno u otplinjač. U otplinjaču se voda zagrijava na 85 °C te je tada spremna za daljnji proces proizvodnje pare.

### 4.2. Dimenzioniranje sustava za proizvodnju tehnološke pare

Sustav se dimenzionira za najveće projektno opterećenje koje će postići tijekom svog životnog vijeka što je u odabranom slučaju proizvodnja tehnološke pare stanja 6 bara i nazivnog protoka 15 t/h. Potreban kapacitet koji je potrebno osigurati iznosi:

$$\Phi_{\text{Toplinsko}} = g_{m_{\text{pare}}} * c_p * (\vartheta_{\text{pare}} - \vartheta_{\text{ulaz}})$$

$$\Phi_{\text{Toplinsko}} = 15 \frac{\text{t}}{\text{h}} * 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * (158.83 \text{ °C} - 85 \text{ °C}) = 10 \text{ MW}$$

gdje su:

$\Phi_{\text{Toplinsko}}$  – Vršne toplinske potrebe postrojenja (MW)

$g_{m_{\text{pare}}}$  – Protok pare (t/h)

$c_p$  – specifični toplinski kapacitet vode (kJ/kgK)

$\vartheta_{\text{pare}}$  – temperatura suhozasićene pare pri tlaku od 6 bara

$\vartheta_{\text{ulaz}}$  – temperatura s kojom voda ulazi u kotao ili dizalicu topline

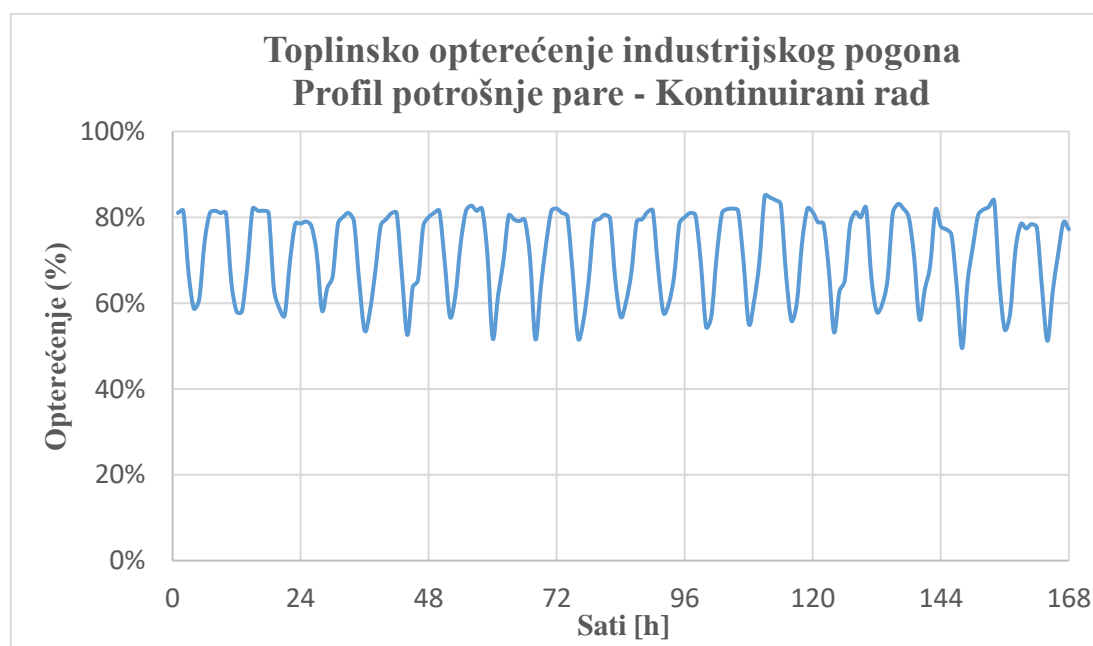
### 4.3. Modeliranje godišnjih toplinskih potreba

Modeliranje toplinskog opterećenja industrijskog pogona može se podijeliti na dva dijela, modeliranje potrošnje tehnološke pare za potrebe industrijskih procesa i modeliranje potrošnje tehnološke pare za grijanje i pripremu tople vode. S obzirom na veliki broj različitih industrijskih pogona i toplinskih procesa, u ovoj analizi će se uzeti u obzir različiti profili potrošnje pare kako bi se procijenila isplativost različitih sustava u različitim uvjetima pogona. Kako bi se što vjerodostojnije prikazale sezonske promjene potrebne toplinske energije za grijanje i pripremu PTV-a, toplinsko opterećenje će se modelirati prema razlici između projektne temperature grijanje i satne razdiobe vanjske temperature na području grada Zagreba.

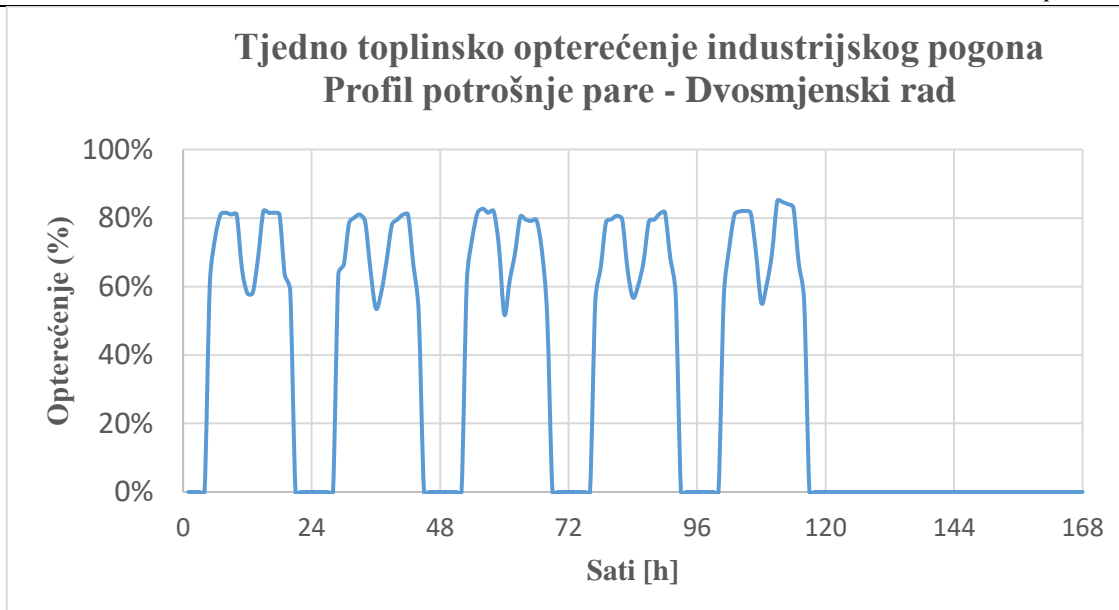
#### 4.3.1. Profili potrošnje tehnološke pare – industrijske potrebe

Na sljedećim grafovima su prikazani različiti profili potrošnje tehnološke pare s obzirom na toplinske potrebe industrijskih procesa i način vođenja samog pogona. Razlikuju se sljedeći profili;

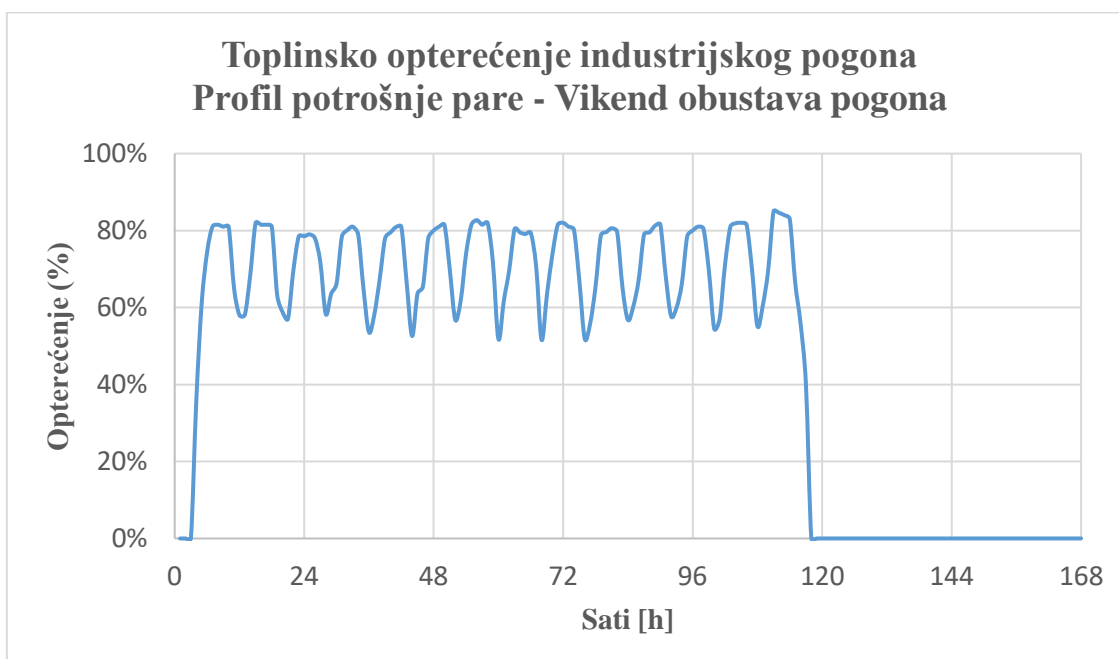
- Kontinuirani rad – postrojenje radi 24 h dnevno, 7 dana u tjednu – 8.520 radnih sati godišnje.
- Vikend obustava pogona – postrojene radi 24 h dnevno – 5 dana u tjednu – 5.589 radnih sati godišnje
- Dvosmjenski rad – postrojenje radi 16 h tjedno, 5 dana u tjednu – 3.925 radnih sati godišnje



Slika 21. Tjedno toplinsko opterećenje industrijskog pogona – Kontinuirani rad



Slika 22. Tjedno toplinsko opterećenje industrijskog pogona – Dvosmjenski rad



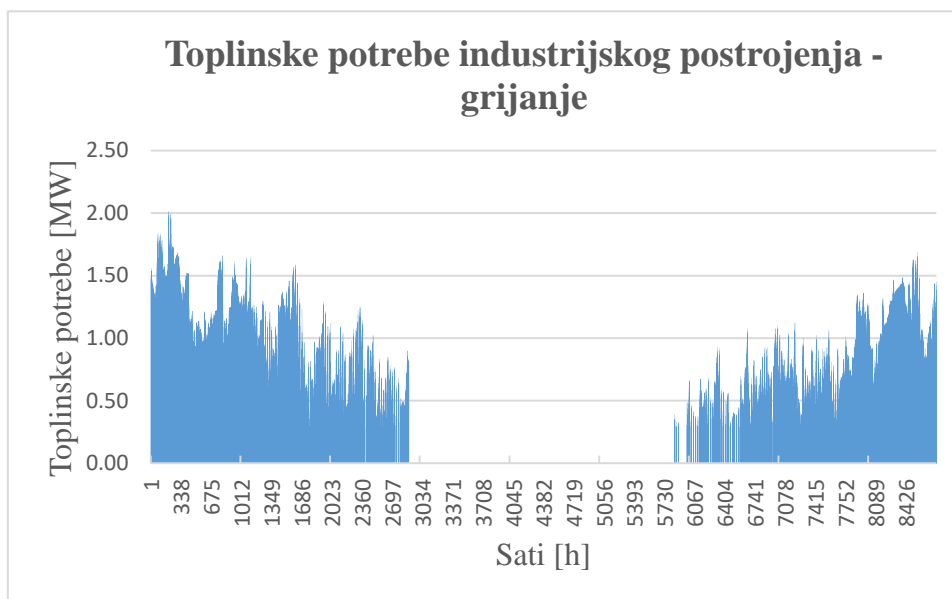
Slika 23. Tjedno toplinsko opterećenje industrijskog pogona – Vikend obustava pogona

#### 4.3.2. Potrebe za grijanjem i pripreme PTV-a

Osim što se para koristi za pokrivanje toplinskih potreba industrijskih procesa, dio proizvedene pare se troši na pokrivanje toplinskih gubitaka samog industrijskog kompleksa i grijanje ureda. Toplinsko opterećenje za grijanje modelirano je na osnovi razlike između vanjske satne temperature zraka izmjerene na Meteorološkoj postaji Zagreb-Maksimir u razdoblju od 2004. do 2013. godine i unutarnje projektne temperature od 22 °C. Za najhladniji dan u godini je



potrebno osigurati 20 % maksimalnog opterećenja instaliranog energetskog izvora. Trajanje sezone grijanja je predviđeno od početka listopada do kraja travnja. Godišnje toplinske potrebe za grijanje industrijskog pogona i uredskih prostora su prikazane na slici 24.



**Slika 24. Toplinske potrebe za grijanje industrijskog postrojenja i uredskih prostora**

#### 4.4. Konfiguracija sustava za proizvodnju tehnološke pare

Za modelirano toplinsko opterećenje industrijskog pogona konfigurirani su različiti sustavi za proizvodnju tehnološke pare koji se koriste u industriji. Tehničke karakteristike sustava su prikazane u tablici 1.

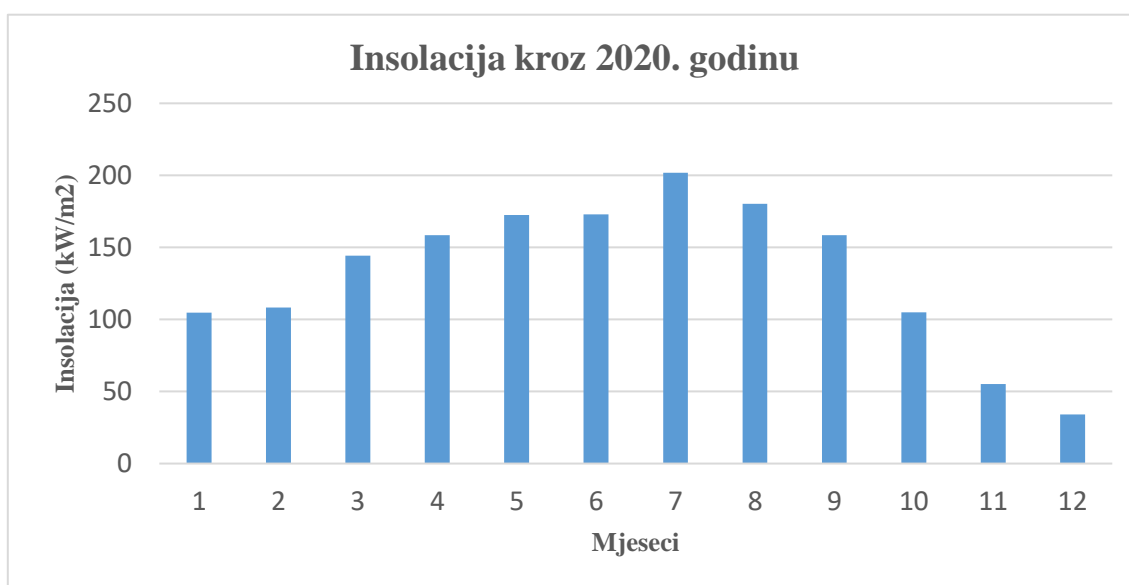
Tablica 1. Konfigurirani sustavi za proizvodnju tehnološke pare

Konfigurirani sustavi	Plinski kotao		Kotao na biomasu		Dizalica topline + FN elektrana		Električni kotao + FN elektrana	
Toplinska snaga postrojenja [MW]	10		10		10		10	
Energent	Prirodni plin		Biomasa (Drvena sječka)		Električna energija		Električna energija	
Efikasnost	Min	55 %	Min	50 %	COP	2,3	Min	95 %
	Max	93 %	Max	90 %			Max	99,5 %
Raspon opterećenja	Min	15 %	Min	20 %	Min	20 %	Min	0 %
	Max	100 %	Max	100 %	Max	100 %	Max	100 %
Radni vijek [godine]	20		20		20		20	
Toplinski izvor	-		-		Geotermalna voda; $T_{polaz} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$		-	

Različite konfiguracije sustava za proizvodnju paru koriste različite energente i imaju različite tehničke karakteristike. Cilj usporedbe različitih konfiguracija za proizvodnju pare je odabrati konfiguraciju koja je najbolja za tražene potrebe industrijskog pogona. Ugradnja fotonaponske elektrane nije striktno vezana samo za dizalicu topline i električni kotao te se može koristiti uz kotao na biomasu i plin te pokrivati jedan dio električne potrošnje lokacije. U ovom radu to nije razmatrano jer je glavni fokus na proizvodnji tehnološke pare iz OIE.

##### 4.4.1. Proizvodnja električne energije – FN elektrana

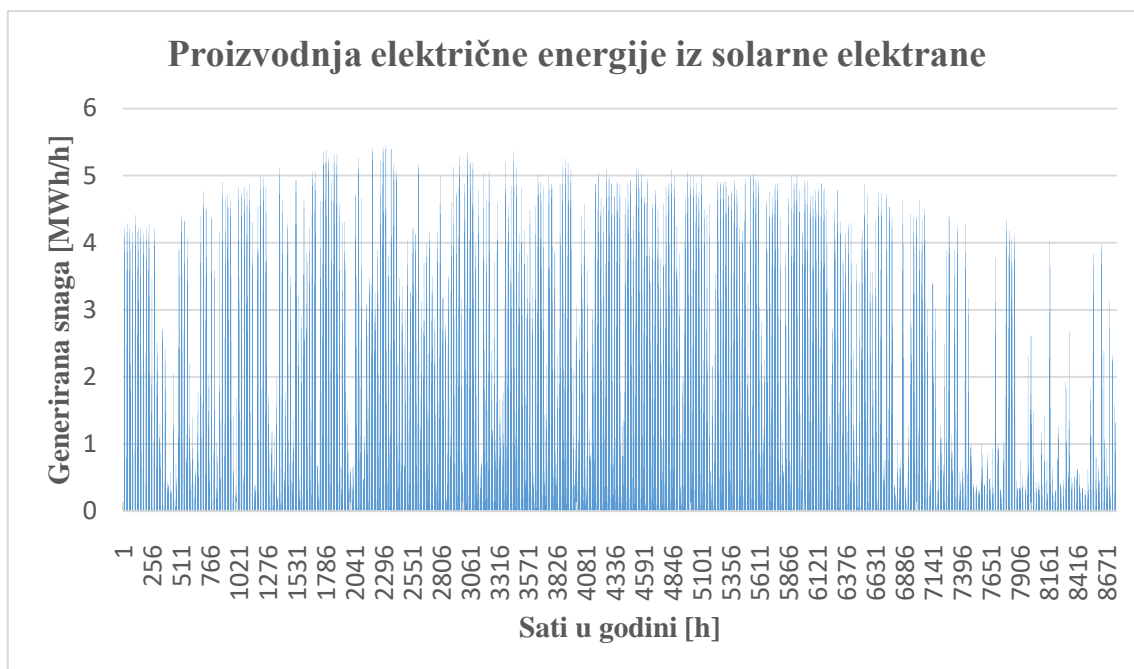
Dizalici topline i električnom kotlu je za pogon potrebna električna energija koju će dijelom preuzimati iz elektroenergetske mreže, a dijelom iz vlastite proizvodnje iz fotonaponske elektrane. Za modeliranje proizvodnje električne energije iz fotonaponskih modula potrebno je poznavati dozračenu sunčevu energiju na lokaciji, položaj, nagib te učinkovitost fotonaponskog sustava koji se planira ugraditi. Podaci o stvarnoj dozračenoj sunčevoj insolaciji su prikupljeni korištenjem besplatnog softvera PVGIS. PVGIS omogućuje dobivanje satnih podataka o insolaciji na godišnjoj razini za bilo koju lokaciju na svijetu. Za ovaj slučaj promatrana lokacija je okolica grada Zagreba. U idealnom slučaju, fotonaponski moduli bi trebali biti okrenuti prema jugu (azimut iznosi  $0^\circ$ ) te pod nagibom od  $39^\circ$ . U tom položaju moduli primaju najviše sunčevog zračenja tijekom cijelog dana. Podaci o insolaciji su iz 2020. godine te su proizašli iz baze podataka PVGIS-SARAH2. Slika 25 prikazuje insolaciju po mjesecima za promatranu lokaciju za idealan slučaj. Kao što je i očekivano, najveća insolacija je u ljetnim mjesecima dok je najmanja u zimskim mjesecima. Ukupna godišnja insolacija za navedenu lokaciju u 2020. godini je iznosila  $1.598 \text{ kW/m}^2$ .



**Slika 25. Insolacija kroz 2020. godinu za promatranu lokaciju**

Za potrebe ovog rada, pretpostavljeno je da su korišteni fotonaponski paneli vršne snage od  $0,55 \text{ kWp}$ , površine  $2,16 \text{ m}^2$  i učinkovitosti od  $19\%$ . Za nominalnu snagu sunčeve elektrane od  $5 \text{ MW}$  potrebno je postaviti  $9.090$  takvih panela. Godišnja satna proizvodnja električne energije iz ovako konfigurirane sunčeve elektrane iznosi je prikazana na slici 26 i iznosi  $5.954 \text{ MWh}$ . Zbog postavljanja fotonaponskih panela na optimalnu lokaciju i na optimalan nagib, maksimalna dnevna proizvodnja električne energije je visoka tijekom cijele godine. No, tijekom

ljetnih mjeseci insolacija traje značajno duže pa je stoga i proizvedena električna energija ljeti veća.



Slika 26. Proizvodnja električne energije iz solarne elektrane – 5 MW FN

## 5. Analiza isplativosti konfiguriranih postrojenja

U ovom poglavlju pružiti će se sveobuhvatan pregled analize isplativosti konfiguriranih sustava za proizvodnu tehnološke pare. Usporediti će se fiksni i varijabilni troškovi pogona postrojenja za projektirani životni vijek postrojenja od 20 godina. Na temelju rezultata biti će donesen zaključak o tome koja je konfiguracija najisplativija za različite profile potrošnje pare.

### 5.1. Investicijski i O&M troškovi

Investicijski troškovi su troškovi poput projektiranja, građevinskih radova te kupnje i instalacije opreme koja će se koristiti u postrojenju. Visoki investicijski troškovi predstavljaju svojevrsan poslovni rizik jer se visoki početni investicijski trošak mora nadoknaditi tijekom životnog vijeka postrojenja. Što je duži period povrata investicije to je veća šansa da će doći do negativnih promjena na tržištu zbog kojih će tvrtka ili investitor pretrpjeti financijski gubitak.

Troškovi održavanja (O&M) se odnose na troškove koje su povezani s pogonom i održavanjem postrojenja tijekom njegovog cijelog životnog vijeka. Ovi troškovi uključuju troškove poput plaće osoblja, potrošnog materijala, troškove održavanja opreme te troškove remonta. Ukupni O&M troškovi tijekom cijelog životnog vijeka mogu činiti značajan udio u ukupnih troškovima postrojenja te se ne smiju zanemariti. Tablica 2. prikazuje investicijske i O&M troškove konfiguriranih postrojenja.

Tablica 2. Investicijski i O&amp;M troškovi [26]

Konfigurirani sustavi	Investicijski trošak (€/MW)		Fiksni O&M troškovi (€/kW)	Varijabilni O&M troškovi (€/MWh)	Udio troškova (%)	
					Oprema	Instalacija
Plinski kotao	55.000		2,00	1,10	60 %	40 %
Kotao na biomasu	720.000		33,70	2,78	60 %	40 %
Električni kotao + 5 MW FN	Solarna elektrana	1.150.000	1,11	0,90	85 %	15 %
	Električni kotao	100.000				
Dizalica topline + 5 MW FN	Solarna elektrana	1.150.000	33,00	0,60	40 %	60 %
	Dizalica topline	1.100.000				

Iz podataka u tablici je moguće zaključiti da dizalice topline ima značajno viši investicijski trošak od ostalih sustava. Razlog tome je to što su visokotemperaturne dizalice topline relativno nova tehnologija, u usporedbi s tehnologijama koje koriste prirodni plin, koja se tek probija na tržištu. Očekuje se da će s napretkom tehnologije, širenjem tržišta i standardizacijom samih uređaja doći do značajnog smanjenja cijena dizalica topline koje će omogućiti povećanje konkurentnosti u odnosu na tradicionalne fosilne alternative. S druge strane, investicijski troškovi plinskih kotlova su najmanji što ih je u prošlosti činilo privlačnom opcijom na kratke staze zbog niske ulazne barijere za potrošače te trenutne dostupnosti i etablirane uporabe prirodnog plina kao energetskog izvora. Visoke investicijske troškove u pravilu prate i viši O&M zbog kompleksnosti rada samog sustava, održavanja specifičnih komponenti te uklanjanja potencijalnih kvarova.

## 5.2. Pogonski troškovi – cijene energenata

Cijene energenata su često ključna varijabla koja utječe na konačnu isplativost ili neisplativost rada postrojenja. Povijesno visoke cijene tradicionalnih energenata poput nafte i plina koje su posljedica složene geopolitičke situacije Europe i Rusije potaknule su interes za alternativnim izvorima energije.

### 5.2.1. Biomasa – drvena sječka

Kotao na biomasu može koristiti biomasu u raznim oblicima. Za ovu konfiguraciju odbrana je drvena sječka čija cijena na tržištu iznosi 65 €/t. Pretpostavljajući da ogrjevna vrijednost drvene sječke iznosi 3,6 MWh/t, cijena drvene sječke po MWh iznosi 18 €/t [33].

### 5.2.2. Prirodni plin

**Pogreška! Izvor reference nije pronađen.** prikazuje kretanje cijena MWh prirodnog plina na europskom tržištu u posljednjih 5 godina. Nakon drastičnog porasta u 2022. godini cijene prirodnog plina imaju trend stabilizacije i povratka na prihvatljivije iznose sličnije cijenama prije zabrane uvoza ruskog plina. Za potrebe analize isplativosti pretpostaviti će se cijena prirodnog plina od 60 €/MWh. U kasnijoj analizi osjetljivosti promatrati će se utjecaj promjene cijene plina na pogonske troškove postrojenja.

### 5.2.3. Električna energija

Cijena električne energije je definirana prema tarifnom modelu HEP-a za kupce i korisnike mreže koji spadaju u kategoriju poduzetništvo. Odabran je tarifni model „Bijeli“ na srednjem naponu. Osim cijene radne energije u tarifu ulaze i ostali troškovi poput naknade za distribuciju i prijenos. Tablici 3 prikazuje sve tarifne stavke za tarifni model „Bijeli“ [34].

**Tablica 3. Cijena električne energije za industrijska postrojenja**

Tarifni model „Bijeli“	VT	NT	Specifična cijena
Radna energija	251,80	157,77	€/MWh
Tarifna stavka za distribuciju el. energije	13,27	6,64	€/MWh
Obračunska vršna radna snaga - distribucija	1.593		€/MW [mjesečno]
Tarifna stavka za prijenos el. energije	5,31	2,65	€/MWh
Obračunska vršna radna snaga - distribucija	1.858		€/MW [mjesečno]
Naknada za obračunsko mjerno mjesto [Mjesec]	9,025		€ [mjesečno]
Naknada za opskrbu [Mjesec]	4,645		€ [mjesečno]
Solidarna naknada	2,00		€/MWh
Dodatak za proizvodnju iz OIE	13,90		€/MWh
<b>Varijabilni trošak</b>	<b>286,28</b>	<b>182,96</b>	<b>€/MWh</b>
<b>Fiksni godišnji trošak</b>	<b>207.060</b>		<b>€/godišnje</b>

### 5.3. Cijena otkupa električne energije

Cijena otkupa električne energije proizvedene iz solarne elektrane se razlikuje od cijene električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču. Odabrano industrijsko postrojenje spada u kategoriju kupca s vlastitom proizvodnjom. Na osnovi toga, cijena otkupa električne energije se obračunava prema sljedećim izrazima;

$$\text{a) Ako za obračunsko razdoblje vrijedi } E_{Pi} > E_{ii} \quad Ci = 0,9 * PKC_i$$

$$\text{b) Ako za obračunsko razdoblje vrijedi } E_{Pi} < E_{ii} \quad Ci = 0,9 * PKC_i * \frac{E_{Pi}}{E_{ii}}$$

pri čemu je;

$C_i$  – otkupna cijena električne energije; [€/MWh]

$E_{ii}$  – ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja  $i$ ; [€/MWh]

$E_{Pi}$  – ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja  $i$ ; [€/MWh]

$PKC_i$  – prosječna cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza unutar obračunskog razdoblja  $i$ ; [€/MWh]

Tablice 4 i 5 prikazuju otkupne cijene električne energije iz solarnih elektrana na lokaciji za različite konfiguracije sustava. Kako bi se osigurala maksimalna otkupna cijena potrebno je voditi računa prilikom dimenzioniranja solarne elektrane. Solarnu elektranu je potrebno dimenzionirati tako da ukupna električna energija preuzeta iz mreže unutar obračunskog razdoblja bude veća od ukupne električne energije isporučene u mrežu.



**Tablica 4. Otkupna cijena električne energije za sustav sa PV elektranom i dizalicom topline**

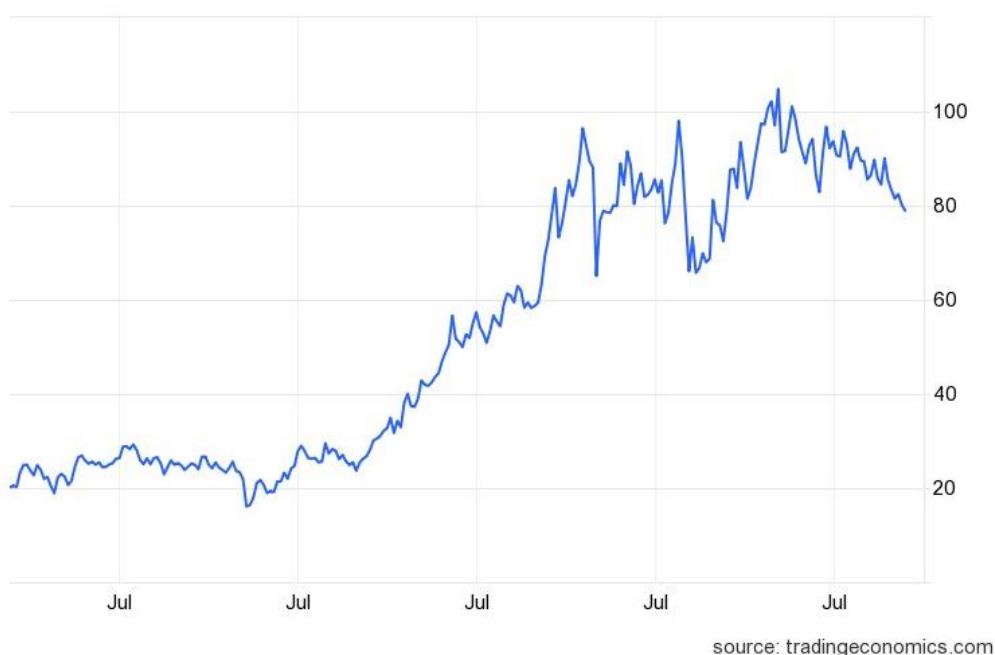
Konfigurirani sustav	Dizalica topline + PV elektrana					
	Kontinuirani		Vikend obustava		Dvosmjenski rad	
Profil potrošnje						
Snaga solarne elektrane [MW]	5	10	5	10	5	10
Preuzeta energija iz mreže [MWh/god]	22.516	20.142	14.995	13.263	9.472	7.738
Isporučena električna energija u mrežu [MWh/god]	753	4.315	2.237	6.459	2.237	6.458
Otkupna cijena električne energije [€/MWh]	183,52	179,46	184,66	180,25	197,26	192,53

**Tablica 5. Otkupna cijena električne energije za sustav sa PV elektranom i električnim kotlom**

Konfigurirani sustav	Električni kotao + PV elektrana					
	Kontinuirani		Vikend obustava		Dvosmjenski rad	
Profil potrošnje						
Snaga solarne elektrane [MW]	5	10	5	10	5	10
Preuzeta energija iz mreže [MWh/god]	59.510	54.230	39.932	36.161	26.977	23.206
Isporučena električna energija u mrežu [MWh/god]	428	1.103	2.006	4.189	2.005	4.188
Otkupna cijena električne energije [€/MWh]	187,88	184,54	189,19	185,72	201,71	198,33

#### 5.4. Trošak emitiranja CO<sub>2</sub>

U okviru europskog sustava trgovanja emisijama (ETS) tvrtke koje ispuštaju stakleničke plinove moraju imati dovoljnu količinu emisijskih dozvola. Određena količina emisijskih dozvola se dodjeljuju godišnje od strane Europske komisije. Za slučaj kada postrojenje ispušta veću količinu stakleničkih plinova od dozvoljene, tvrtka je dužna kupiti dodatne emisijske dozvole na tržištu emisijskih dozvola što povećava pogonske troškove postrojenja. S druge strane, tvrtke koje ispuštaju manju količinu stakleničkih plinova od dozvoljene iste emisijske dozvole mogu prodati drugim tvrtkama na tržištu i na taj način smanjiti troškove pogona. Svake godine Europska komisija smanjuje količinu dodijeljenih emisijskih dozvola u skladu s dugoročnim ciljem smanjenja stakleničkih emisija do 2030 za 40 % u odnosu na razinu iz 2005. godine [35]. Na ovaj način se kontinuirano potiče na ulaganje u obnovljive izvore energije. Kretanje cijena emisijskih dozvola je prikazano na slici 28. Najveća zabilježena cijena emisijskih dozvola je bila zabilježena na 18. veljače 2023. godine te je iznosila 100,34 €/tCO<sub>2</sub> [36]. Za potrebe ovog rada i analize pretpostaviti će se konstantna cijena od 90 €/tCO<sub>2</sub>.



**Slika 27. Kretanje emisijske naknade ugljikovog dioksida, ETS dozvola [€/tCO<sub>2</sub>] [37]**

Ispuštene emisije CO<sub>2</sub> iz različitih energenata se u velikoj mjeri razlikuju. Fosilna goriva oslobađaju veliku količinu CO<sub>2</sub> u usporedbi s obnovljivim izvorima energije. Emisijski faktori pojedinog energenta pokazuju koliko se tona ugljikovog dioksida oslobodi za jedan kWh potrošene energije. Tablica 6. prikazuje emisijske faktore popularno korištenih energenata.

**Tablica 6. Emisijski faktori korištenih energenata [38]**

<b>Energent</b>	<b>Emisijski faktor [kgCO<sub>2</sub>/kWh]</b>
Loživo ulje	0,307
Kameni ugljen	0,349
Drvena sječka	0,034
Prirodni plin	0,214
Daljinska toplina (CTS) – prosjek za RH	0,275
Električna energija iz elektroenergetske mreže	0,159

Poznavajući emisijski faktor pojedinog energenta, finalnu potrošnju energije i cijenu emisijskih dozvola moguće je izračunati ukupni trošak emisije CO<sub>2</sub> za svaki konfigurirani sustav proizvodnje tehnološke pare. Važno je naglasiti da emisijski faktor električne energije ovisi o udjelu OIE u proizvodnji električne energije, odnosno udjelu i vrsti fosilnih goriva u energetsom miks. Potpunom dekarbonizacijom elektroenergetskog sustava emisijski faktor električne energije će iznositi nula. U bliskoj budućnosti se predviđa značajan rast cijena emisijskih dozvola na razinu od 400 €/tCO<sub>2</sub> do 2040. godine što će potaknuti mnoge energetske intenzivne industrije na velika ulaganja u tehnologije s obnovljivim izvorima energije.

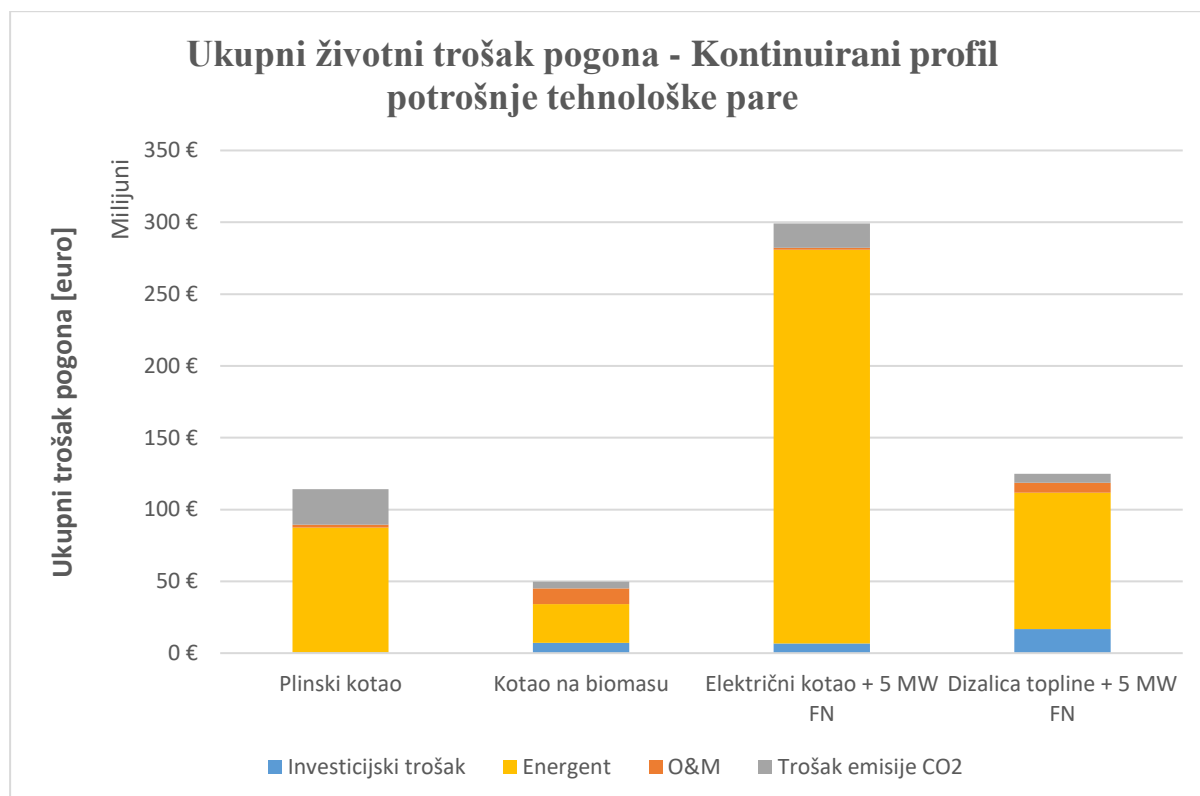
## **5.5. Pogonski troškovi odabranih konfiguracija**

Na sljedećim grafovima su prikazani rezultati tehno-ekonomske analize isplativosti konfiguriranih pogona za tri odabrana karakteristična profila potrošnje pare. Godišnja potrošnja pare za kontinuirani profil potrošnje iznosi 63.790 MWh, za profil vikend obustave potrošnje 43.038 MWh te za profil dvosmjenski rad 30.334 MWh. Različite potrebe će utjecati na isplativost pojedinih konfiguracija.

### **5.5.1. Profil potrošnje pare: Kontinuirana potrošnja**

Za ovako definirani profil potrošnje pare i cijene energenata, kotao na biomasu ima najniži životni trošak pogona. Iako je investicijski trošak instalacije plinskog kotla manji za čak 13 puta, ukupni trošak pogona prirodnog plina nakon životnog vijeka od 20 godina je 2,3 puta veći od troška pogona kotla na biomasu. Razlog tome je velika razlika između cijena korištenih energenata i veliki broj radnih sati postrojenja. Osim toga, zbog visoke emisije CO<sub>2</sub> tijekom rada, postrojenje s plinskim kotlom plaća najviše poreza i naknada koje će u bliskoj budućnosti zasigurno rasti još više. Ukupni trošak investicije i pogona dizalice topline u kombinaciji s fotonaponskom elektranom od 5 MW je viši od plinskog kotla za 10 milijuna eura nakon 20

godina rada. Jedan od razloga je relativno visoki trenutni omjer cijene električne energije i prirodnog plina koji mora biti manji kako bi dizalica toplina bila isplativa. Također, visoki investicijski troškovi instalacije i implementacije dizalice topline i fotonaponske elektrane odbijaju potencijalne investitore od ulaganja, zbog dugog povrata kapitala i početnoj nesigurnosti koju donosi tako velika investicija. Drugi konfigurirani sustav koji koristi električnu energije, električni kotao, je neisplativ. Cijena električne energije je prevelika u odnosu na cijenu ostalih energenata da bi električni kotao bio isplativ.



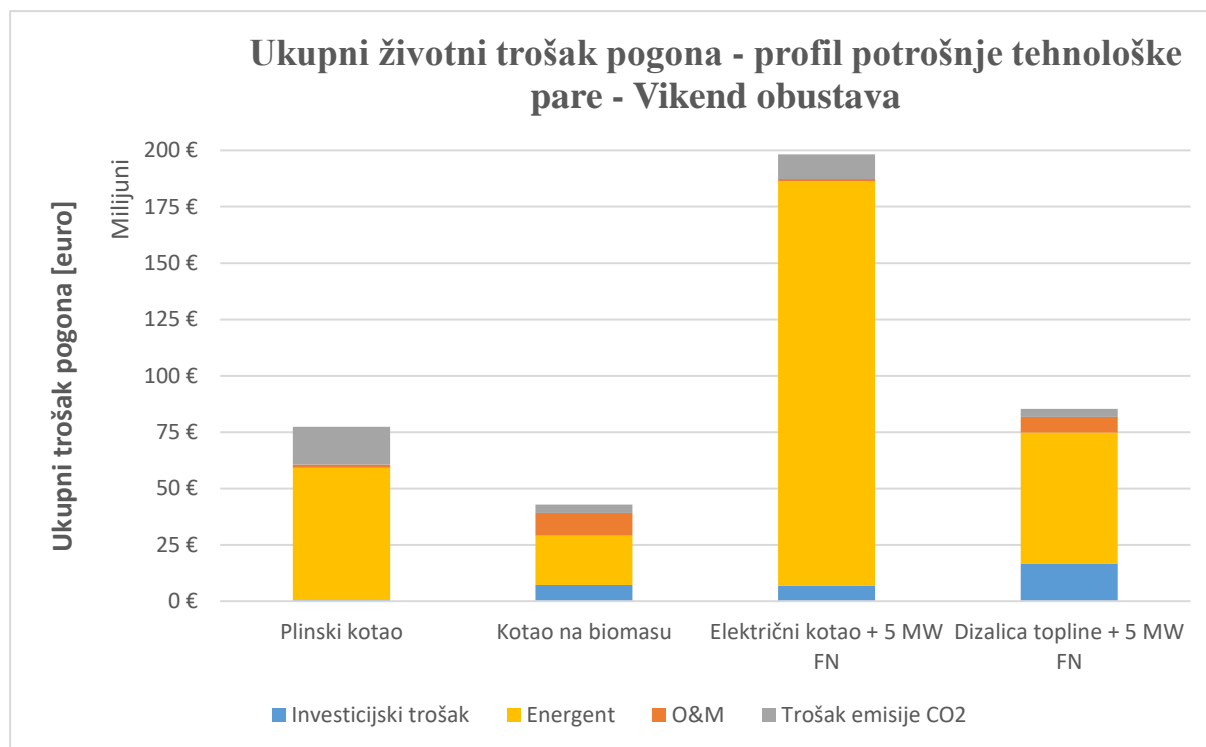
**Slika 28. Ukupni trošak pogona za kontinuirani profil pare**

### 5.5.2. Profil potrošnje pare: Vikend obustava pogona

U situaciji vikend obustave industrijskog pogona, kotao na biomasu i dalje ostaje najisplativije rješenje, iako s nešto manjom razlikom u usporedbi s drugim opcijama. Razlog tomu je neisplativost gašenja kotla na biomasu tijekom vikenda. Kotao na biomasu je trom te zahtijeva duži period paljenja i gašenja koji smanjuje i njegov životni vijek. Tijekom vikenda, kotao na biomasu se drži na tehnološkom minimumu od 20 % nazivnog opterećenja [26]. Ostali izvori su puno fleksibilniji te se potpuno gase za vrijeme vikenda. Uz visoku fleksibilnost, prednost konfiguriranih sustava dizalice topline i električnog kotla s fotonaponskom elektranom je mogućnost prodaje električne energije u mrežu tijekom razdoblja obustave pogona što smanjuje ukupni trošak električne energije potrebne za pogon. To je dovelo do toga da je za ovaj slučaj

životni trošak energenta, (električne energije), dizalice topline manji od troška potrošenog plina.

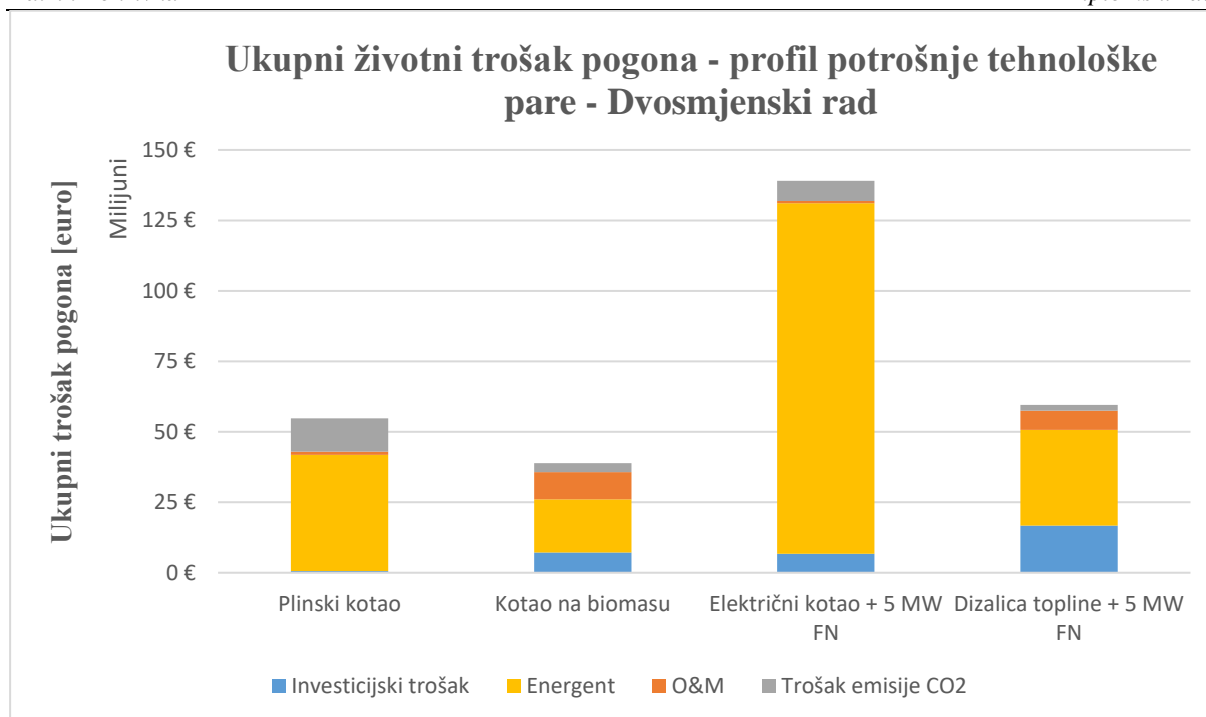
Kotao na plin je isplativiji na račun manjeg investicijskog troška



**Slika 29. Ukupni trošak pogona za profil vikend obustave**

### 5.5.3. Profil potrošnje pare: Dvosmjenski rad

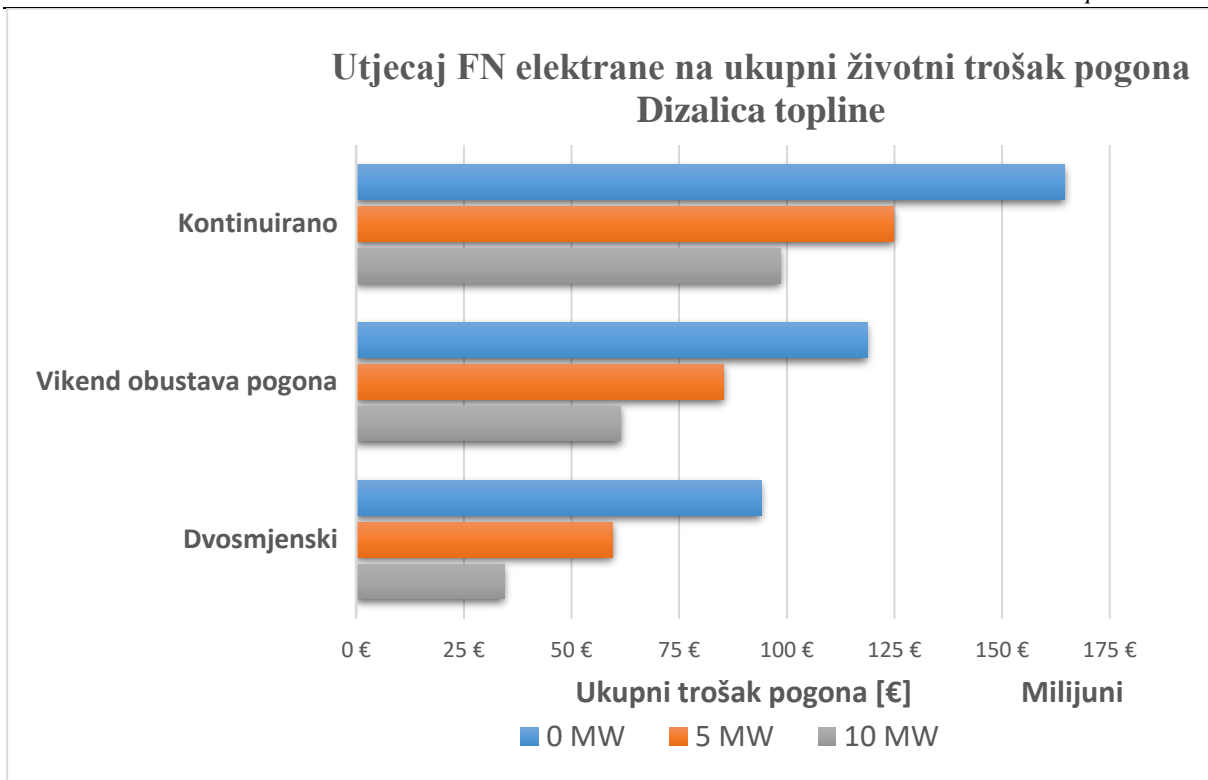
Smanjenjem radnih sati postrojenja dolaze više do utjecaja investicijski troškovi konfiguriranih sustava, posebice kod dizalice topline, ali i dalje većina pogonskih troškova otpada na potrebne energente. Razlika između životnog troška konfiguriranih sustava se smanjuje te jedino kod sustava s električnim kotlom značajnije razlikuje. Cijena električne energije je previsoka za isplativi rad električnog kotla. Za visoke cijene električne energije, električni kotao se isplati jedino za pokrivanje vršnog opterećenja sustava dok baznu potrošnju pokriva neki drugi izvor poput kotla za biomasu. Padom cijene električne energije ili pak investicijskog troška, dizalica topline može postati i najisplativija opcija.



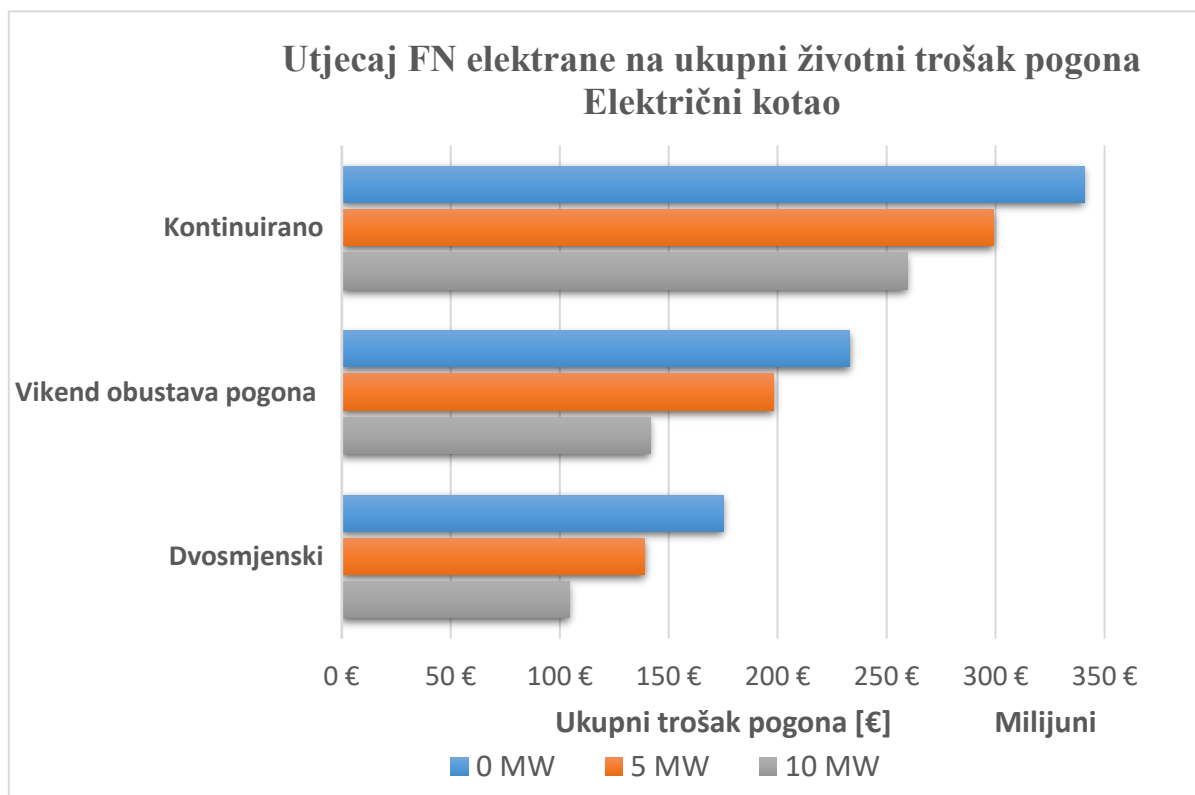
**Slika 30. Ukupni trošak pogona za dvosmjenski rad**

#### 5.5.4. Utjecaj proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane na ukupne troškove postrojenja

Na slikama 32 i 33 su prikazani rezultati usporedbe pogonskih troškova za različite instalirane kapacitete fotonaponskih elektrana. Rezultati su u skladu s očekivanjima. Porastom kapaciteta instalirane fotonaponske elektrane, smanjuje se potreba za skupom električnom energijom iz mreže što za posljedicu ima smanjenje životnog troška pogona. Prilikom projektiranja instalirani kapacitet ne ovisi samo o željama investitora već je kapacitet ograničen s korisnom površinom na koju je moguće instalirati fotonaponske panele te priključnom snagom sa kojim se spaja na elektroenergetski sustav. Za slučaj rada dizalice topline s instaliranim kapacitetom fotonaponske elektrane od 10 MW, ukupni troškovi pogona su niži od troškova pogona kotla na biomasu za slučaj dvosmjenskog rada industrijskog postrojenja. Životni troškovi električnog kotla se povećanjem kapaciteta solara smanjuju, ali su i dalje preveliki u usporedbi s ostalim energentima za trenutnu cijenu električne energije.



Slika 31. Ukupni trošak pogona dizalice topline – utjecaj FN elektrane



Slika 32. Ukupni trošak pogona dizalice topline – utjecaj FN elektrane

### 5.5.5. Godišnje emisije stakleničkih plinova

U tablici su prikazane godišnje emisije stakleničkih plinova konfiguriranih sustava za proizvodnju tehnološke pare.

**Tablica 7. Godišnje emisije stakleničkih plinova analiziranog industrijskog postrojenja**

Emisije stakleničkih plinova (tCO <sub>2</sub> )	Plinski kotao	Kotao na biomasu	Dizalica topline + FN elektrana			Električni kotao + FN elektrana		
			0	5	10	0	5	10
			MW	MW	MW	MW	MW	MW
Kontinuirani profil	15.479	2.565	4.397	3.453	2.509	10.312	9.368	8.424
Vikend obustava	10.444	2.080	2.967	2.023	1.078	6.958	6.013	5.069
Dvosmjenski	7.359	1.789	2.091	1.147	203.07	4.903	3.959	3.015

Analizom podataka vidljiv je negativan utjecaj korištenja plinskog kotla na okoliš koji je rezultat visokih emisija CO<sub>2</sub>. Njegove alternative poput kotla na biomasu i dizalice topline imaju drastično manju emisiju stakleničkih plinova. Iako je biomasa obnovljiv izvor energije, njezino iskorištavanje također oslobađa stakleničke plinove koje su posljedica cijelog lanca proizvodnje biomase, od procesa obrade do samog transporta, ali u punoj manjoj mjeri. Također, oslobođene emisije stakleničkih plinova iz dizalice topline ili električnog kotla ovise o udjelu fosilnih goriva koji se koriste za proizvodnju električne energije koju uređaji preuzimaju iz mreže. U slučaju potpuno obnovljivog elektroenergetskog sustava ili uz integraciju fotonaponske elektrane dovoljno velikog kapaciteta, moguće je svesti emisije na nulu što je i konačni cilja energetske tranzicije.

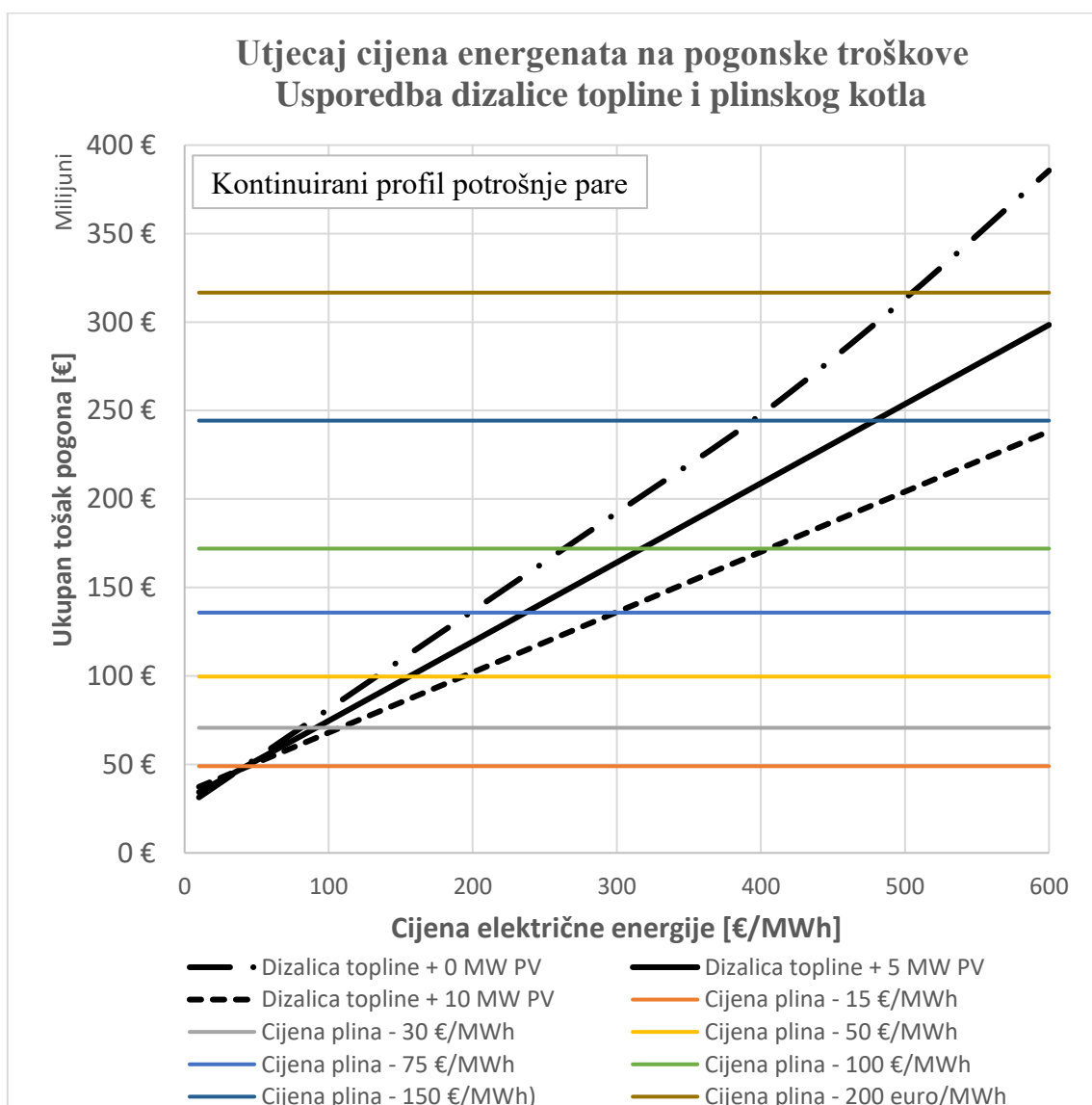


## 6. Analiza osjetljivosti

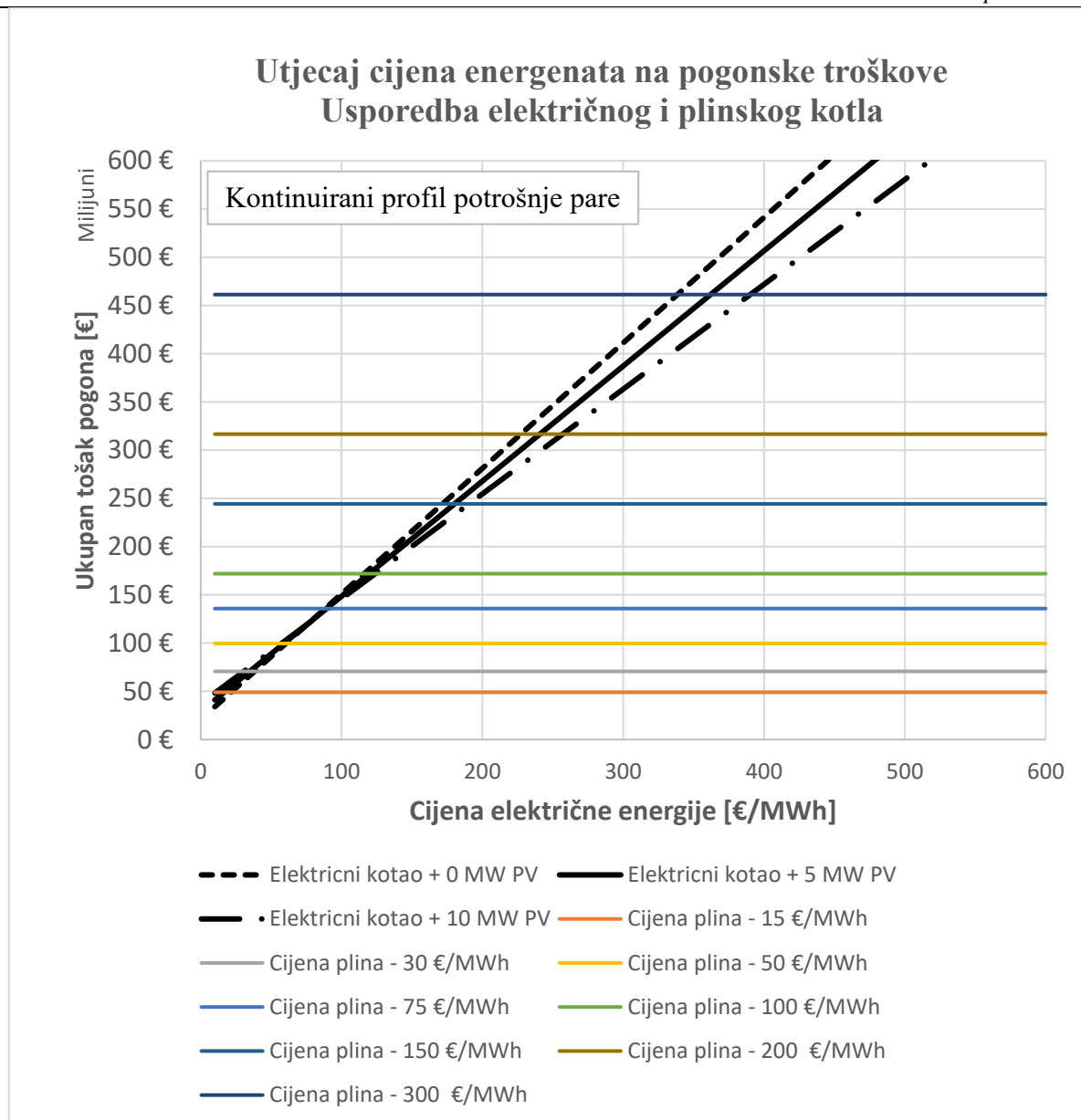
### 6.1. Promjena cijene energenata

Iz provedene analize se može zaključiti da isplativost pogona ponajviše ovisi o cijenama energenata. Zadnjih godina su cijene drastično oscilirale te će budući trend kretanje cijena bit ključan za isplativost primjene spomenutih tehnologija. Analiza osjetljivosti će se posebno fokusirati na isplativosti konfiguriranih postrojenja koje koriste prirodni plin i električnu energiju budući da je njihova cijena najviše varirala posljednjih godina.

#### 6.1.1. Kontinuirani profil potrošnje pare



Slika 33. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona dizalice topline i plinskog kotla

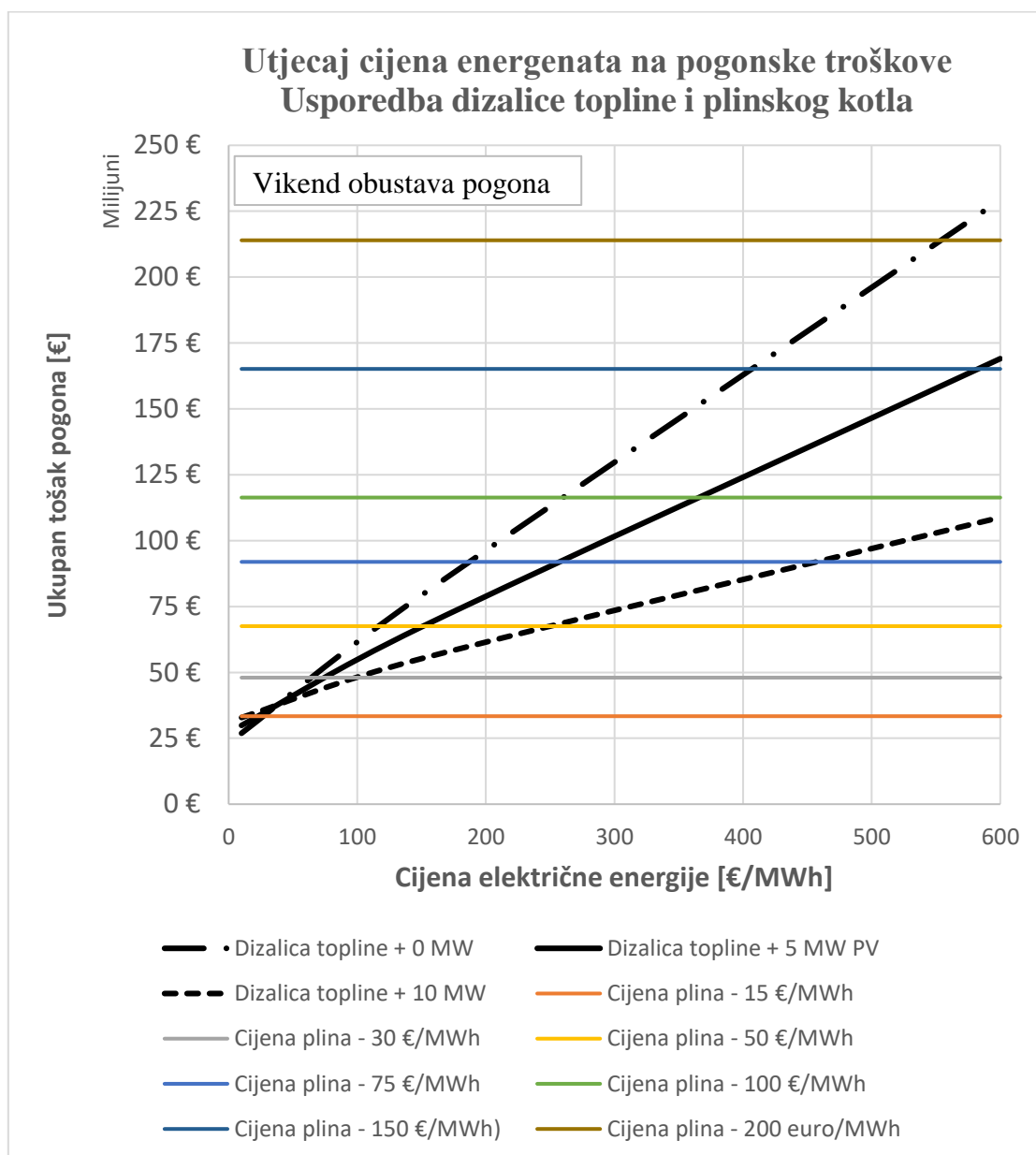


**Slika 34. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona električnog i plinskog kotla**

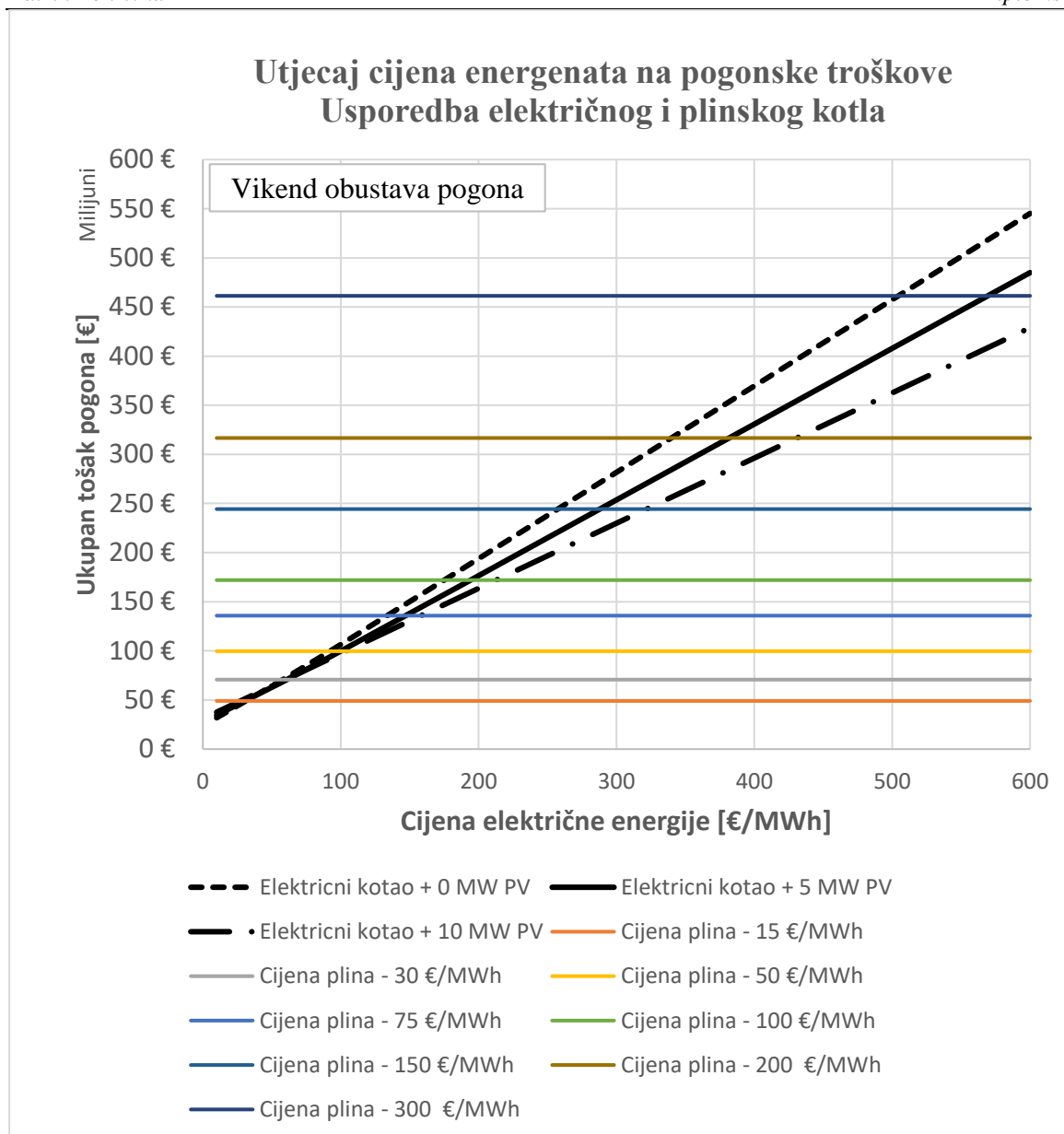
Na prikazanim grafovima se može jasno vidjeti očekivana ovisnost između cijena električne energije i plina na isplativost pogona promatranog sustava. Za cijene prirodnog plina ispod 30 €/MWh, (cijena prije sukoba na istoku Europe), cijena električne energije za isplativ pogon dizalice topline mora biti ispod cijene od 100 €/MWh. Porastom cijene plina, dizalice topline postaju sve primamljiva opcije te će za cijenu plina od 100 €/MWh dizalice topline biti isplativije ako je cijena električne energije manja od 400 €/MWh.

Električni kotlovi pak zahtijevaju puno nižu cijenu električne energije od cijene prirodnog plina kako bi bili isplativi. No, velikim porastom cijene plina, (kakva je zabilježena kroz 2022 i 2023 godinu), i električni kotlovi postaju isplativa rješenja uz relativno nisku cijenu električne energije.

### 6.1.2. Vikend obustava pogona



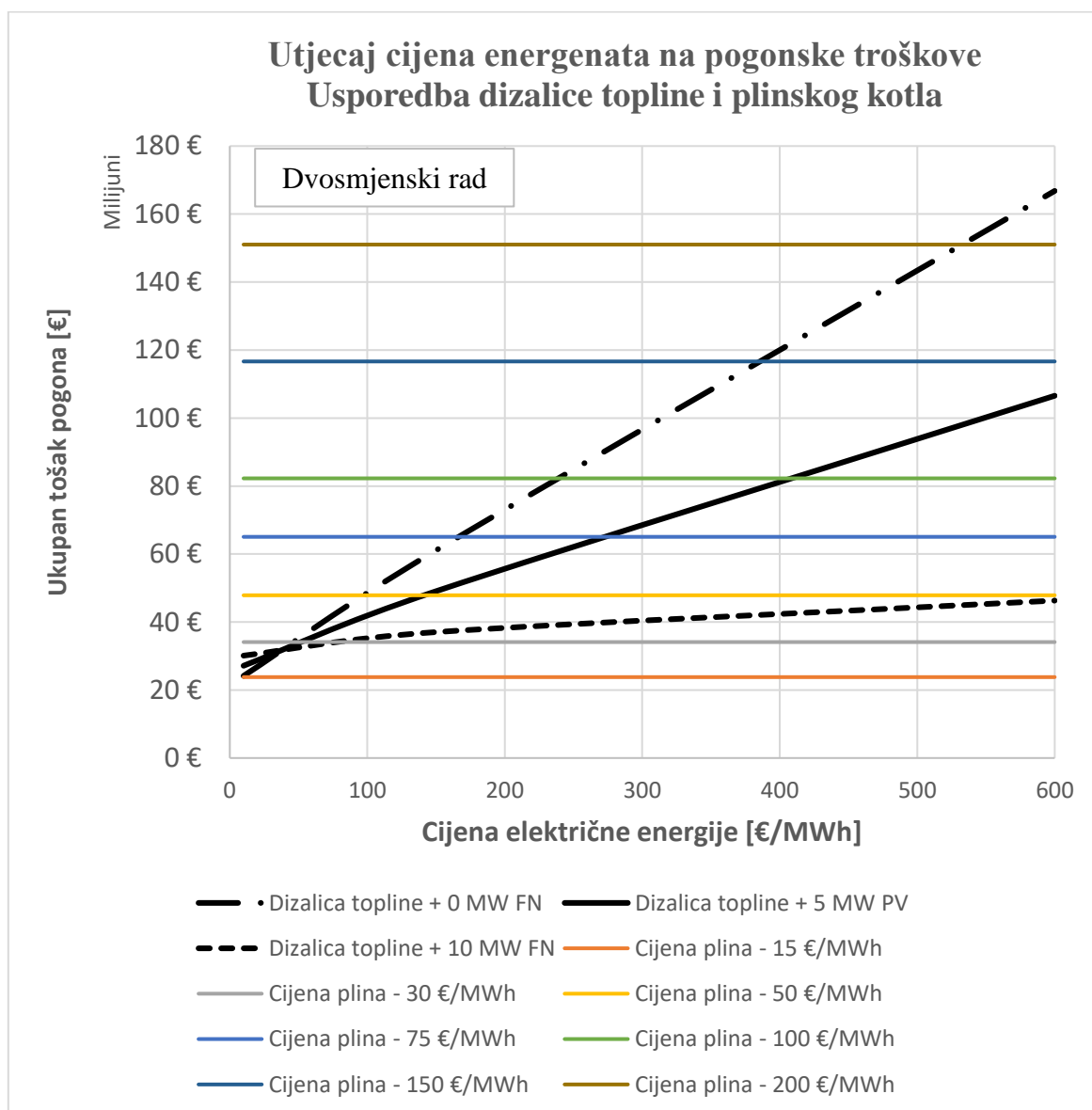
Slika 35. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona dizalice topline i plinskog kotla



**Slika 36. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona električnog i plinskog kotla**

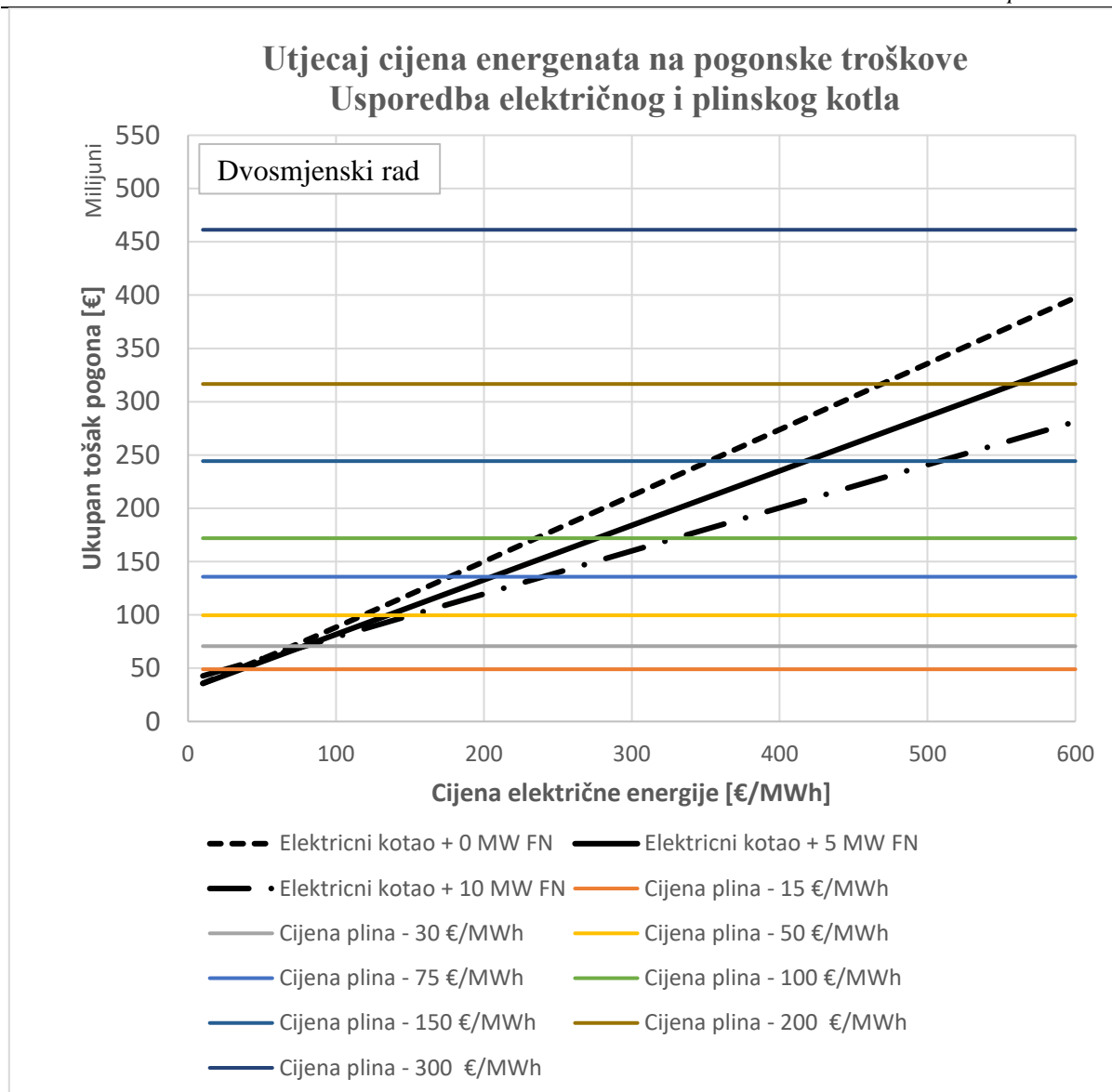
U situaciji vikend obustave industrijskog pogona rezultati analize prate sličan trend. Zbog mogućnosti prodaje viška električne energije za konfiguracije s fotonaponskom elektranom, cijena električne energije može biti viša od cijene izračunate za kontinuirani profil proizvodnje pare u prethodnom poglavlju što sustave s dizalicom topline i električnim kotlom stavlja u bolji položaj. Takav trend odnosa cijena se nastavlja i za slučaj proizvodnje pare u dvosmjenskom radu. Također ono što valja primjeriti je veći utjecaj instalacije dodatnog kapaciteta fotonapona na isplativost dizalice topline nego na električni kotao. Sa što većim COP-om, utjecaj dodatnog fotonapona je izraženiji.

### 6.1.3. Dvosmjerni rad



**Slika 37. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona dizalice topline i plinskog kotla**

U situaciji vikend obustave industrijskog pogona vidljiv je pad ukupnog životnog troška s povećanjem udjela vlastite proizvedene električne energije iz fotonaponskog sustava. Za izrazito jeftinu cijenu prirodnog plina od 15 €/MWh, dizalica topline ne može biti isplativa, ali s obzirom na sadašnju cijenu i cijenu od prije par mjeseci, dizalica topline je znatno isplativa.



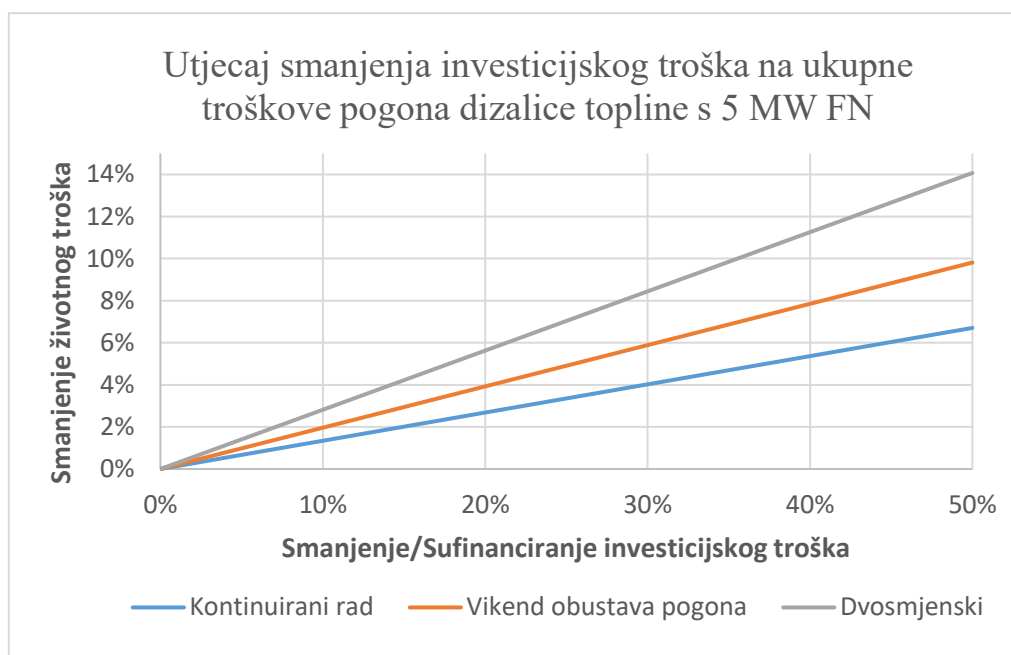
**Slika 38. Utjecaj promjene cijena na isplativost pogona električnog i plinskog kotla**

Osim cijene energenta, značaj utjecaj na smanjenje životnog troška dizalice topline imaju promjena cijena investicijskog troška te utjecaj COP i njegovog povećanja na troškove pogona. Analiza utjecaj spomenutih čimbenika je izrađena u sljedećim poglavljima.

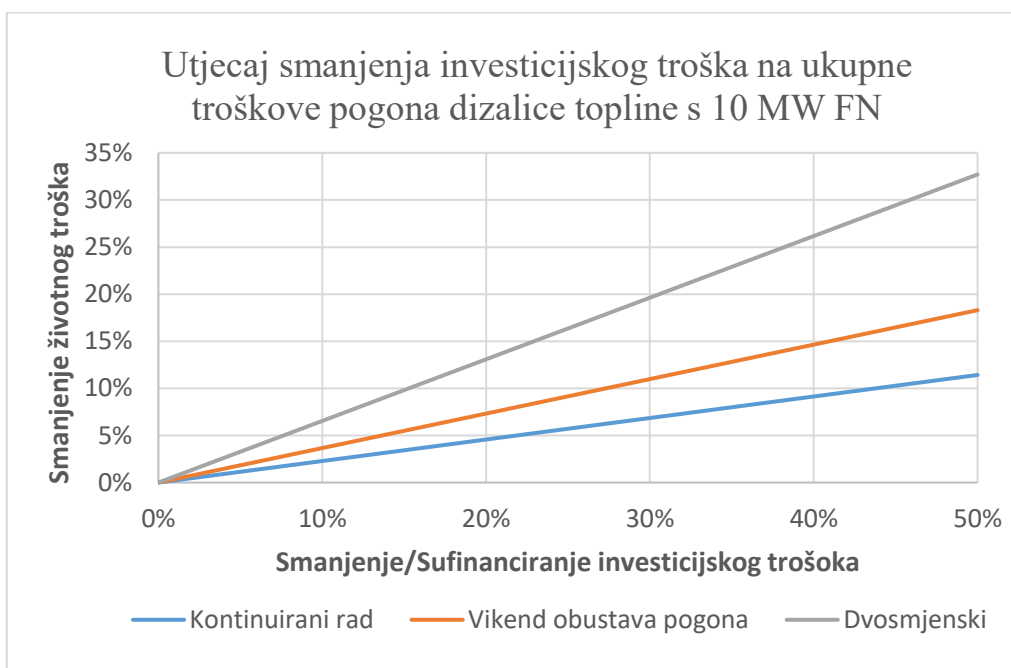
## 6.2. Utjecaj promjene cijene investicije

Kako je visoka cijena investicije jedan od najvećih razloga zašto se investitori ne odlučuju na visokotemperaturne dizalice topline, analiziran je utjecaj smanjenja troškova investicije na ukupne životne troškove industrijskog postrojenja. U narednim godinama se očekuje pad cijena samih dizalica topline dok se probijaju na europsko i svjetsko tržište. Također, postoji mogućnost za sufinanciranje određenog postotka investicijskog troška putem različitih fondova poput Modernizacijskog fonda (MF) Europske unije. Na slikama 40 i 41 je prikazano smanjenje

ukupnih životnih troškova postrojenja za postotno smanjenje investicijskih troškova od 0 % do 50 % za različite profile potrošnje tehnološke pare.



**Slika 39. Utjecaj smanjenja investicijskog troška – dizalica topline s 5 MW FN**



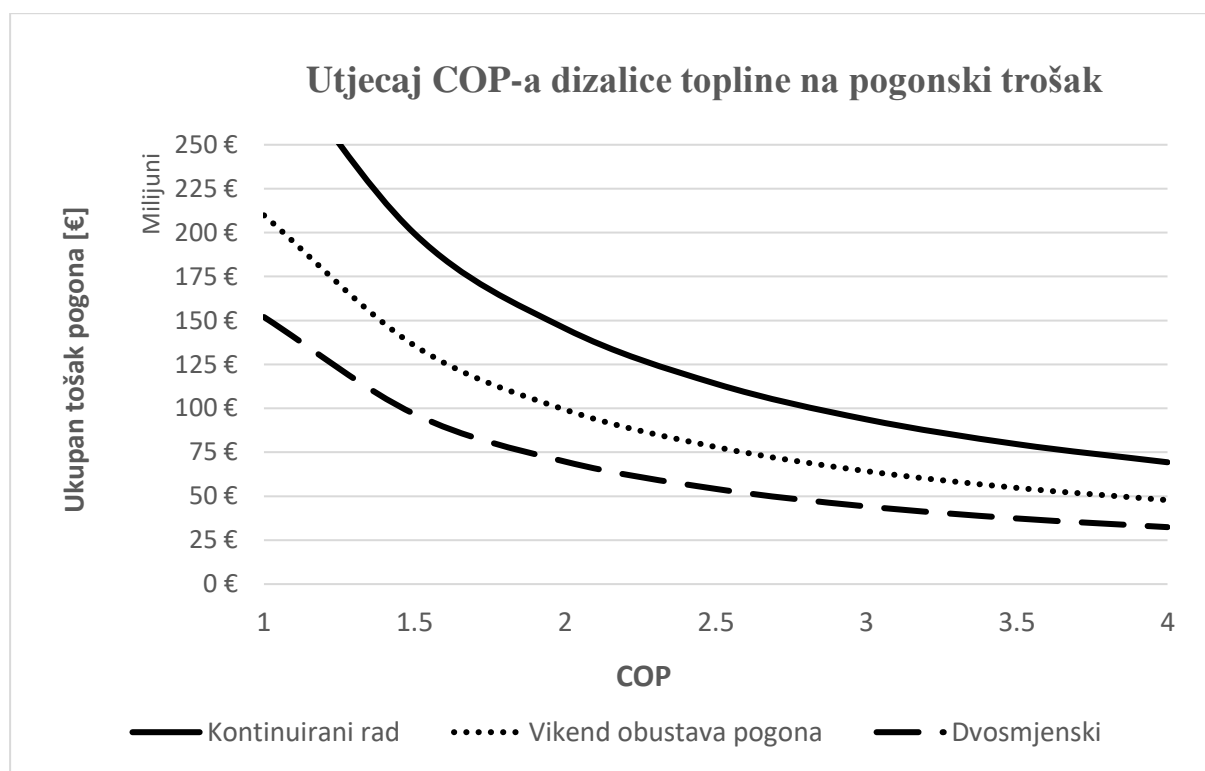
**Slika 40. Utjecaj smanjenja investicijskog troška – dizalica topline s 10 MW FN**

Smanjenje investicijskog troška ima veći značaj za industrijske pogone s manjim brojem radnih sati. Iako smanjuje ukupne životne troškove, smanjenje investicijskog troška ima veći efekt na odluke samih investitora o ulasku u investiciju jer direktno smanjuje novčano ulaganje koje je potrebno uložiti prije samog početka rada postrojenja te samim time skraćuje period povrata

investicije. Smanjenje investicijskog troška može biti od presudne važnosti kod donošenja odluke investitora o ulasku u investiciju.

### 6.3. Utjecaj COP-a dizalice topline na pogonske troškove

COP dizalice topline je jedan od najvažnijih čimbenika koji utječe na njezinu isplativost. Dizalice topline s višim COP-om zahtijevaju manje električne energije za pogon kompresora za proizvodnju iste količine topline. U prethodnom dijelu rada je pokazano da smanjenje temperaturne razlike između toplinskog izvora i toplinskog ponora povećava COP. Odnosno, povećanje temperature toplinskog izvora ili smanjenje temperature toplinskog ponora doprinijet će povećanju učinkovitosti dizalice. Naravno, u stvarnosti je COP dizalice topline ograničen dostupnošću toplinskih izvora (otpadna toplina, geotermalni izvori, centralizirani toplinski sustav) na određenoj temperaturi i zahtijevanom temperaturom od strane industrijskih procesa. Slika 40 prikazuje ovisnost COP-a o ukupnim troškovima pogona dizalice topline s fotonaponskom elektranom od 5 MW. Visokotemperaturne dizalice topline koje moraju svladavati manje temperaturne razlike imaju veći COP što ih čini ekonomski isplativijima i konkurentnijima na tržištu. Povećanjem COP-a investicijski trošak dizalice topline postaje dominantniji iznos u ukupnim pogonskim troškovima postrojenja te period povrata investicije dizalice topline postaje kraći.



Slika 41. Utjecaj COP-a dizalice topline na pogonski trošak



## 7. Utjecaj različite konfiguracije dizalice topline na učinkovitost pogona

U ovom dijelu rada izvesti će se matematički model termohidrauličkih procesa za različite izvedbe visokotemperaturne dizalice topline za proizvodnju tehnološke pare s ciljem međusobne usporedbe različitih strategija vođenja na učinkovitost pogona odabrane konfiguracije.

### 7.1. Raspoloživi i potrebni toplinski izvori i ponori

Za dimenzioniranje sustava potrebno je poznavati toplinsko opterećenje i temperaturu toplinskog ponora kojeg se pokriva dizalicom topline te temperaturu i kapacitet raspoloživog toplinskog izvora. Navedene veličine su izračunate i pretpostavljene u poglavlju 3.2. za potrebe tehno-ekonomske analize. Potrebne ulazne vrijednosti za proračun su dane u tablici 8.

Tablica 8. Raspoložive temperature toplinskog izvora i toplinskog ponora

Veličina	Vrsta	Iznos	Mjerna jedinica
Toplinski kapacitet	-	10	MW
Temperatura toplinskog izvora	Geotermalna voda	80	°C
Temperatura toplinskog ponora	Tehnološka para	158,83	°C

### 7.2. Odabir radne tvari

Odabir radne tvari je od temeljne važnosti za izvedbu i učinkovit rad visokotemperaturne dizalice topline. Visoke temperature toplinskih ponora u rasponu od 100 do 160 °C zahtijevaju radne tvari s visokim kritičnim temperaturama i tlakovima što radne tvari u konvencionalnim dizalicama topline ne mogu zadovoljiti. Odabrana radna tvar mora ispunjavati različita termodinamička svojstva, sigurnosne i funkcionalne osobine te imati nizak utjecaj na razgradnju ozonskog sloja i zagrijavanje atmosfere. U tablici 9 su prikazani najvažniji kriteriji za odabir povoljne radne tvari na visokim temperaturnim razinama.

**Tablica 9. Uvjeti koje trebaju ispunjavati radne tvari za primjenu i visokotemperaturnim dizalicama topline [39],[40],[41]**

<b>Kriteriji</b>	<b>Zahtijevana svojstva</b>
<b>Termodinamička svojstva</b>	Visoko položena kritična točka
	Umjereni tlak zasićenja na temperaturi isparivanja
	Umjereni kompresijski omjer
	Velika latentna toplota isparavanja i kondenzacije
	Mali specifični volumen pri temperaturi isparivanja
<b>Sigurnosni kriteriji</b>	Mala viskoznost
	Nezapaljivost ili niska razina zapaljivosti
	Neotrovnost
	Ne eksplozivnost
<b>Funkcionalne osobine</b>	Lagano otkrivanje prisutnosti u zraku
	Nekorozivnost
	Zadovoljavajuća topljivost u mazivom ulju
<b>Utjecaj na okoliš</b>	Fizikalna i kemijska stabilnost
	U skladu s F – gas regulativom i Montrealskim protokolom;
	1. Bez utjecaja na razgradnju ozona ( $ODP = 0$ ) 2. Mali utjecaj na zagrijavanje atmosfere ( $GWP_{100} < 10$ )
<b>Ostali faktori</b>	Dostupnost na tržištu
	Relativno niska cijena

Tablica 10 prikazuje svojstva i karakteristike potencijalno primjenjivih radnih tvari u visoko temperaturnim dizalicama topline. Zbog važeće F – gas regulative koja definira maksimalni iznos potencijala globalnog zagrijavanja (GWP) na 150, dosad široko rasprostranjeni hidroflogruouglikovodici (HFC) poput R245fa i R134a nemaju budućnost kao radne tvari u EU. Postoje brojne analize i studije u kojima se ispituju potencijalne alternative koje nemaju negativan utjecaj na okoliš, a imaju slična svojstva. Ugljikovodici poput pentana (R601) i isopentana (R601a) imaju veliki potencijal. Visoko postavljena kritična točka im omogućuje postizanje značajno viših temperatura od spomenutih HFC radnih tvari. Međutim zbog njihove

zapaljivosti preporučuje ih se koristiti samo u manjim dobro brtvljenim jedinicama s malom količinom radne tvari kod kojih je moguće kontrolirati zdravstvene i sigurnosne rizike [39]. Voda (R718) također pokazuje dobre karakteristike. Zbog velike latentne topline isparivanja i kondenzacije vode smanjuje se potreban maseni protok radnog medija što omogućava kompaktniji izvedbu kompresora i izmjenjivača. Mana korištenja vode kao radnog medija su visoki kompresijski omjeri te visoke temperature vodene pare na izlasku iz kompresora koje ograničavaju njihovu primjenu sa današnjom raspoloživom tehnologijom. Sintetički spojevi poput hidrofluoroolefina (HFO) i hidroklorofluoroolefina (HCFO) imaju vrlo nizak GWP te nisu zapaljivi. Visoke kritične temperature ukazuju na njihov potencijal za upotrebu na visokim temperatura koji omogućuje dobivanje toplinskog ponora na temperaturi od 160 °C.

**Tablica 10. Svojstva potencijalnih radnih tvari za visokotemperaturne dizalice topline [40], [41]**

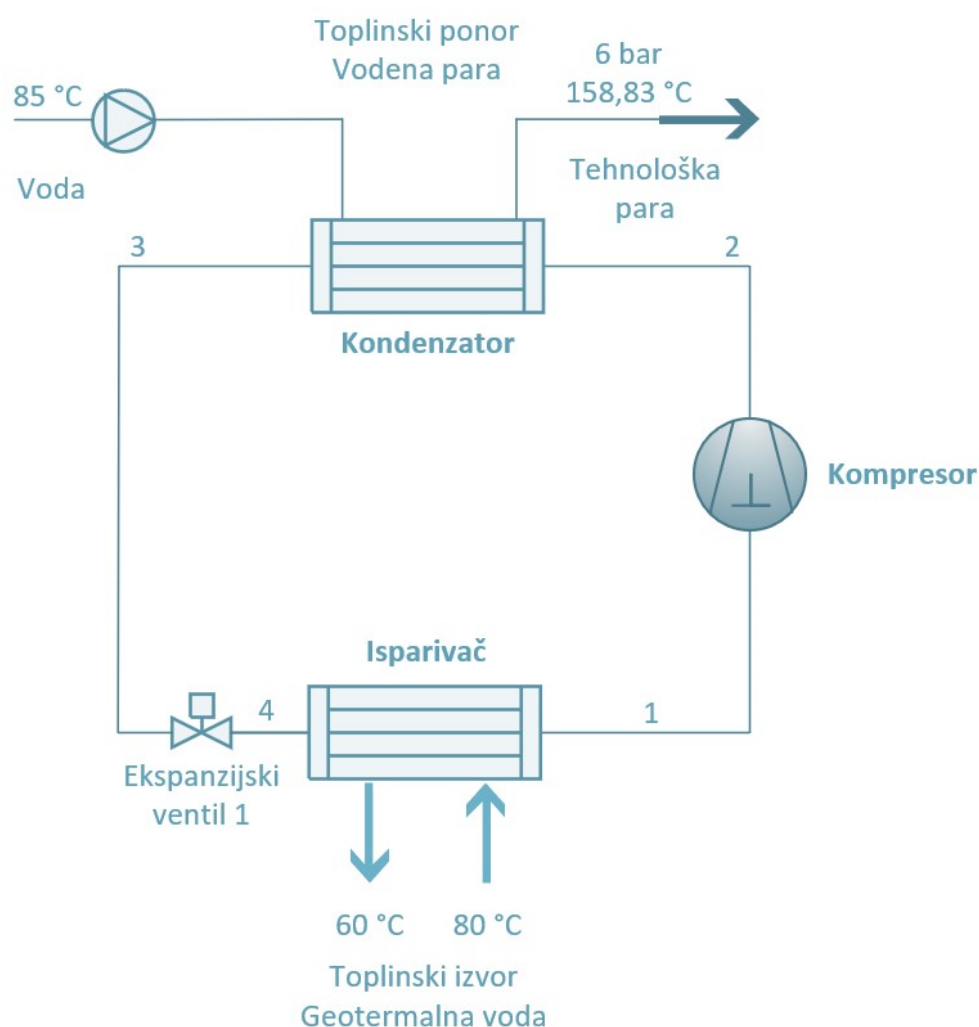
Radna tvar	Vrsta	GWP <sub>100</sub>	ODP	T <sub>i</sub> [°C]	T <sub>k</sub> [°C]	p <sub>kr</sub> [bar]	Klasa
<b>R1233zd(E)</b>	HCFO	1	0	1,55	166,5	36,24	A1
<b>R1234ze(E)</b>	HFO	6	0	-19	109,51	36,34	A2L
<b>R1234ze(Z)</b>	HFO	<10	0	9,8	150,1	35,5	A2L
<b>R1336mzz(Z)</b>	HFO	2	0	33,4	171,3	29	A1
<b>R718</b>	Voda	0,2	0	100	373,95	220,6	A1
<b>R600</b>	Ugljikovodik	4	0	0	152,01	37,96	A3
<b>R600a</b>	Ugljikovodik	3	0	-11,7	134,7	36,4	A3
<b>R601</b>	Ugljikovodik	4	0	36,1	196,56	33,58	A3
<b>R601a</b>	Ugljikovodik	4	0	27,7	187,78	33,78	A3
<b>R245fa</b>	HFC	1.030	0	15,1	154	36,51	B1
<b>R134a</b>	HFC	1.430	0	-26,3	101,06	40,59	A1

Komercijalno dostupni uređaji kao radnu tvar najčešće koriste radnu tvar R1233zd(E) za proizvodnju tehnološke pare dok za proizvodnju vrele vode koriste radnu tvar R1234ze(E) koja ima nešto nižu kritičnu temperaturu. Odabir odgovarajuće radne tvari je posebno prilagođen i ovisi o procesnim i pogonskim uvjetima u kojem se nalazi postrojenje. Uređaji s radnom tvari R1336mzz(Z) nisu komercijalno dostupni te su još u fazi laboratorijskih istraživanja i prototipnih rješenja. Prva istraživanja pokazuje pozitivne i ohrabrujuće rezultate te mogućnost

proizvodnje topline na toplinskom ponoru iznad  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  [42]. Kako njezina termofizikalna svojstva nisu dostupna u bazi podataka CoolProp iz koje se svojstva radne tvari mogu pozvati kao funkcija u programske pakete Excel i Matlab, za daljnji proračun je odabrana radna tvar R1233zd(E) koja ima nešto nižu kritičnu temperaturu, ali i dalje se može koristiti iznad  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 7.3. Jednostupanjska kompresija

Najjednostavnija izvedba dizalice topline je dizalica topline u kojem se proces kompresije odvija u jednom stupanju ili koraku. Takav sustav se obično sastoji od 4 karakteristične komponente; isparivača, kompresora, kondenzatora i termoekspanzijskog ventila. Shematski prikaz takvog sustava je prikazan na slici 43.



**Slika 42. Shematski prikaz visokotemperaturne dizalice topline – jednostupanjska kompresija**

Kao toplinski izvor koristi se geotermalna voda iz bušotine pored industrijskog postrojenja. Ona predaje toplinu na isparivaču i hladi se sa  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  i u takvom stanju se utiskuje u utisnu bušotinu kako bi se održala ravnoteža i spriječilo iscrpljivanje bušotine. U isparivaču radna tvar isparava te se pregrijava za  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  pomoću elektroekspanzijskog ili termoekspanzijskog ventila

kako bi se spriječilo pojavljivanje kapljica u kompresoru tijekom kompresije zbog specifičnog oblika krivulje zasićenja. Nakon kompresije radna tvar predaje toplinski tok vodi koja isparava i odlazi prema industrijskom pogonu. Radna tvar se pothlađuje za 3 °C na izlasku iz kompresora kako bi se povećala učinkovitost i rashladni učin dizalice topline. Radna tvar se zatim spomenutim ekspanzijskim ventilom prigušuje na tlak i temperaturu isparavanja. U tablici 11 su prikazani spomenuti ulazni parametri.

**Tablica 11. Ulazni parametri za proračun stacionarnog stanja dizalice topline s jednostupanjskom kompresijom**

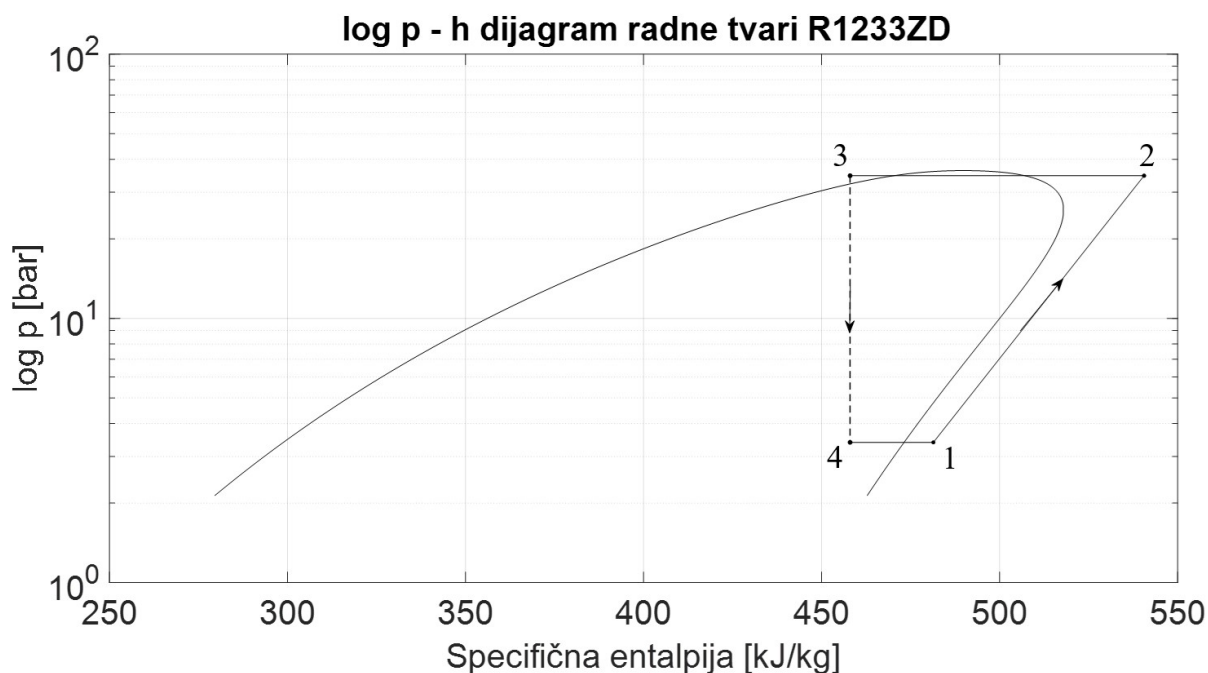
Fizikalna veličina	Simbol	Iznos
Temperatura geotermalne vode na ulazu u isparivač [°C]	$T_{w\_ul}$	80
Razlika temperature vode na isparivaču [°C]	$\Delta T_w$	20
Razlika između temperature isparavanja i temperature izlazne geotermalne vode iz isparivača [°C]	$\Delta T_i$	5
Temperatura pregrijanja na izlazu iz isparivača [°C]	$\Delta T_{i\_preg}$	9
Temperatura pare na izlazu iz kondenzatora [°C]	$T_{kond\_izlaz}$	158,83
Razlika temperature vode/pare na kondenzatoru [°C]	$\Delta T_{kond}$	73,83
Razlika između temperature kondenzacije i temperature pare na izlazu iz kondenzatora [°C]	$\Delta T_k$	5
Temperatura pothlađivanja na izlazu iz kondenzatora [°C]	$\Delta T_{k\_kond}$	3
Izentropski stupanj djelovanja kompresora	$\eta_{is}$	0,7

Proračun stacionarnog stanja napravljen je u programskom paketu Microsoft Excel. Jednadžbe koje su korištene u proračunu su dane u tablici 12

Tablica 12. Jednadžbe korištene za proračun stacionarnog stanja – jednostupanjska kompresija

Komponente dizalice topline	Jednadžbe stacionarnog stanja
Kondenzator	$\Phi_{kond} = g_{m\_pare} * (h_{iz\_pare} - h_{ul\_vode}) = g_{m\_rm} * (h_2 - h_3)$
Isparivač	$\Phi_{isp} = g_{m\_w} * (h_{ul\_w} - h_{iz\_w}) = g_{m\_rm} * (h_1 - h_4)$
Kompresor	$h_2 = h_1 * \frac{(h_{2is} - h_1)}{\eta_{is}}$ $P_I = g_{m\_rm} * (h_2 - h_1)$
Ekspanzijski ventil	$h_3 = h_4$
COP procesa	$COP = \frac{\Phi_{kond}}{P_I}$

Rezultati proračuna stacionarnog stanja su prikazani u tablici 11. Slika 44. prikazuje konstruirani log p – h dijagram koji prikazuje promjenu stanja radne tvari tijekom različitih termohidrauličkih procesa promatranog lijevokružnog procesa.

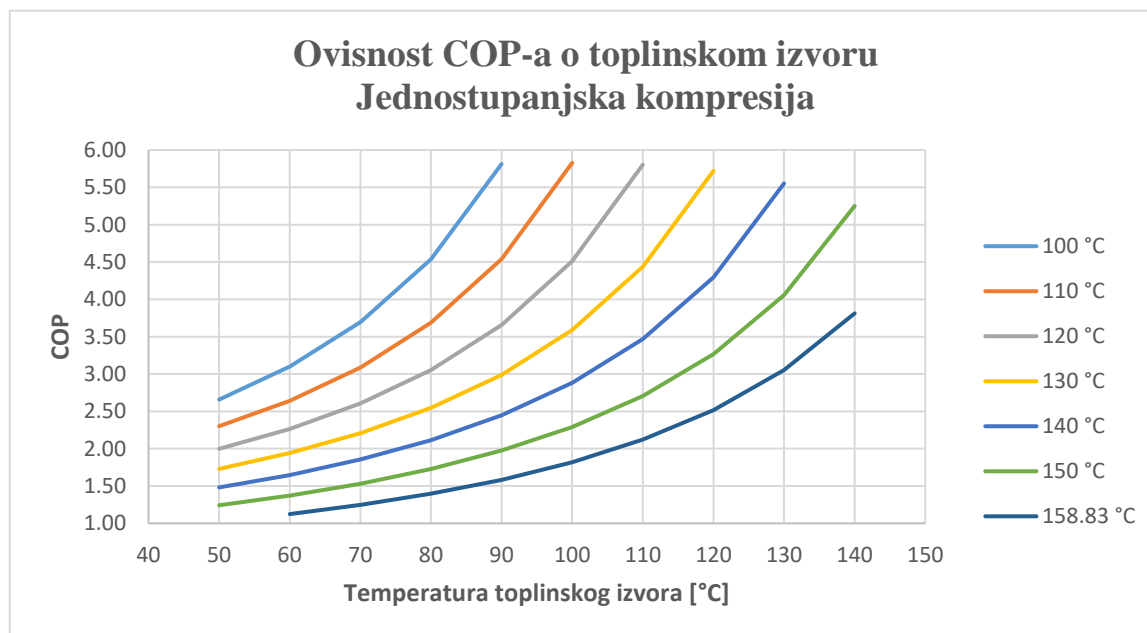


Slika 43. log p – h dijagram jednostupanjske kompresije

**Tablica 13. Proračun stacionarnog stanja procesa za definirane ulazne parametre**

Proračun radnih stanja	Iznos	Mjerna jedinica
Tlak isparavanja, $p_i$	3,37	bar
Tlak kondenzacije, $p_k$	34,57	bar
Toplinski tok na kondenzatoru, $\Phi_{kond}$	10	MW
Protok radne tvari $g_m$	121,07	kg/h
Potrebna snaga kompresora, $P_{komp}$	7,16	MW
Toplinski tok na isparivaču, $\Phi_{isp}$	2,84	MW
<b>COP</b>	<b>1,40</b>	-

Zbog velike temperaturne razlike između toplinskog izvora i toplinskog ponora potrebno je uložiti veći rad kompresora što smanjuje učinkovitost procesa. Također, zbog velikog kompresivnog omjera na izlazu iz kompresora znaju biti izrazito visoke temperature koje mogu utjecati na ispravan rad samog kompresora. Smanjenjem temperature toplinskog ponora ili povećanjem temperature toplinskog izvora moguće je ostvariti veće vrijednosti COP-a. Slika 45 prikazuje kretanje COP-a promatrane dizalice topline za različite temperature ponora i izvora.

**Slika 44. Ovisnost COP-a dizalice topline o temperaturi toplinskog izvora – Jednostupanjska kompresija**

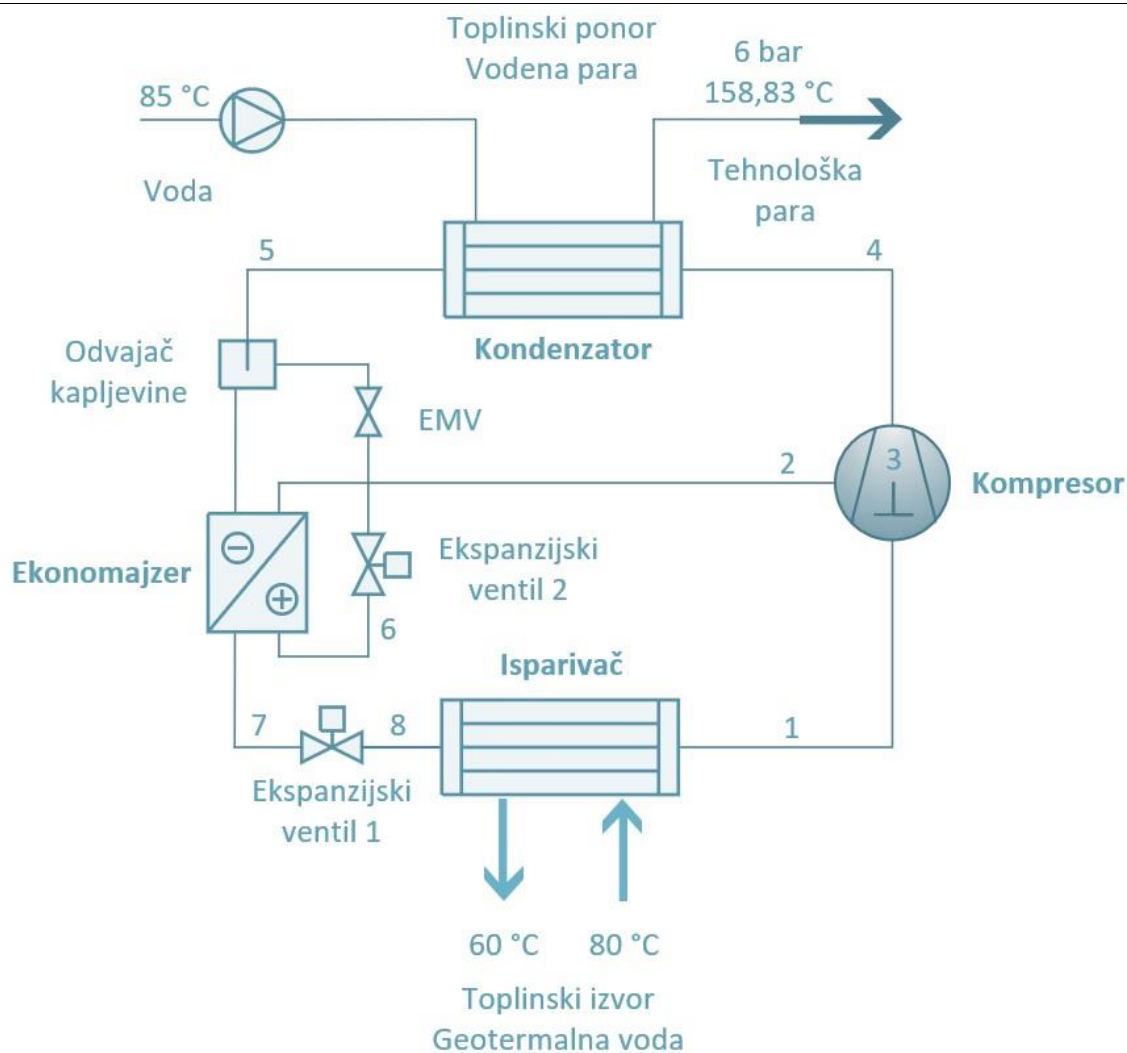
Smanjenjem temperaturne razlike između izvora i ponora drastično se povećava učinkovitost dizalice topline što rezultira smanjenjem pogonskih troškova dizalice topline. Valja primijetiti da se približavanjem temperature toplinskog ponora kritičnoj temperaturi radnog medija smanjuje učinkovitost dizalice topline. Razlog tomu je smanjenje latentne topline kondenzacije na tako visokim temperaturama što posljedično povećava potrebni protok radnog medija kako bi se zadovoljila energetska bilanca. Povećani protok radnog medija kroz kompresor uzrokuje povećanu potrebnu snagu kompresora zbog čega pada vrijednost toplinskog učina.

Za temperaturne razlike između spremnika manje od 40 °C jednostupanjske dizalice topline pokazuju dobra svojstva, pogotovo za temperature toplinskog ponora ispod 120 °C. Problemi u radu i isplativosti se javljaju pri velikim temperaturnim rasponima i visokoj temperaturi toplinskog ponora. Za takve slučajeve potrebno je koristiti dizalicu topline koja koristi višestupanjski proces.

#### **7.4. Ubrizgavanje pare za vrijeme kompresije radne tvari**

Ubrizgavanje pare za vrijeme kompresije radne tvari (*eng* *EVI – Enhanced Vapour Injection*) jedan je od načina poboljšanja učinkovitosti sustava za niske temperature toplinskog izvora, odnosno za velike temperaturne raspone između toplinskog izvora i toplinskog ponora. Glavne prednosti *EVI* sustava su smanjenje temperature radne tvari na izlasku iz kompresora, smanjenje potrebne snage za pogon spiralnog kompresora i povećanje toplinskog toka kojeg je moguće preuzeti na isparivaču pri visokom kompresijskom omjeru i rasponu temperatura. Sustav se osim karakterističnih elemenata jednostupanjske dizalice topline sastoji i od dodanog pločastog izmjenjivača (ekonomajzera) i dodatnog termoekspanzijskog ventila koji omogućuje ubrizgavanje pare pri željenoj temperaturi pregrijanja u međustupanj kompresora. Shematski prikaz sustava je prikazan na slici 46.





**Slika 45. Shematski prikaz visokotemperaturne dizalice topline - EVI**

Za velike temperaturne razlike otvara se elektromagnetski ventil te se kroz njega propušta dio masenog protoka radne tvari nakon izlaska iz kondenzatora. Ekspanzijskim ventilom se radna tvar prigušuje na tlak međukompresije koji je određen samim protok ubrizgavane pare te se nakon dodatnog zagrijavanja u ekonomajzeru radni medij u stanju pregrijane pare ubrizgava u međustupanj spiralnog kompresora. Ubrizgavanjem pare se smanjuje temperatura nakon prvog stupnja kompresija što za posljedicu ima i nižu temperaturu radnog medija nakon drugog stupnja kompresije. Kako se dio pare ubrizgava na tlaku međukompresije, snaga potrebna za kompresiju radne tvari je manja zbog manjeg masenog protoka radne tvari pri prvom stupnjem kompresije. Dodatno, pothlađenje ostatka radne tvari na ekonomajzeru povećava toplinski tok koji je moguće apsorbirati na isparivaču. U tablici 11 su prikazani ulazni parametri za daljnji proračun.

Tablica 14. Ulazni parametri za konfiguraciju sustava s ubrizgavanjem pare

Fizikalna veličina	Simbol	Iznos
Temperatura geotermalne vode na ulazu u isparivač [°C]	$T_{w\_ul}$	80
Razlika temperature vode na isparivaču [°C]	$\Delta T_w$	20
Razlika između temperature isparavanja i temperature izlazne geotermalne vode iz isparivača [°C]	$\Delta T_i$	5
Temperatura pregrijanja na izlazu iz isparivača [°C]	$\Delta T_{i\_preg}$	6
Temperatura pare na izlazu iz kondenzatora [°C]	$T_{kond\_izlaz}$	158,83
Razlika temperature vode/pare na kondenzatoru [°C]	$\Delta T_{kond}$	73,83
Razlika između temperature kondenzacije i temperature pare na izlazu iz kondenzatora [°C]	$\Delta T_k$	5
Razlika između ulazne temperature glavne struje i izlazne temperature ubrizgavane pare u ekonomajzeru [°C]	$\Delta T_{EVI}$	1
Temperatura pregrijanja na izlazu iz ekonomajzera [°C]	$\Delta T_{EVI\_preg}$	0.5
Izentski stupanj djelovanja kompresora	$\eta_{is}$	0,7
Efikasnost izmjene topline na ekonomajzeru	$\eta_{eko}$	0,9

Proračun je proveden u programskom paketu Matlab. Jednadžbe stacionarnog stanja koje su korištene u proračunu su prikazane u tablici 15.

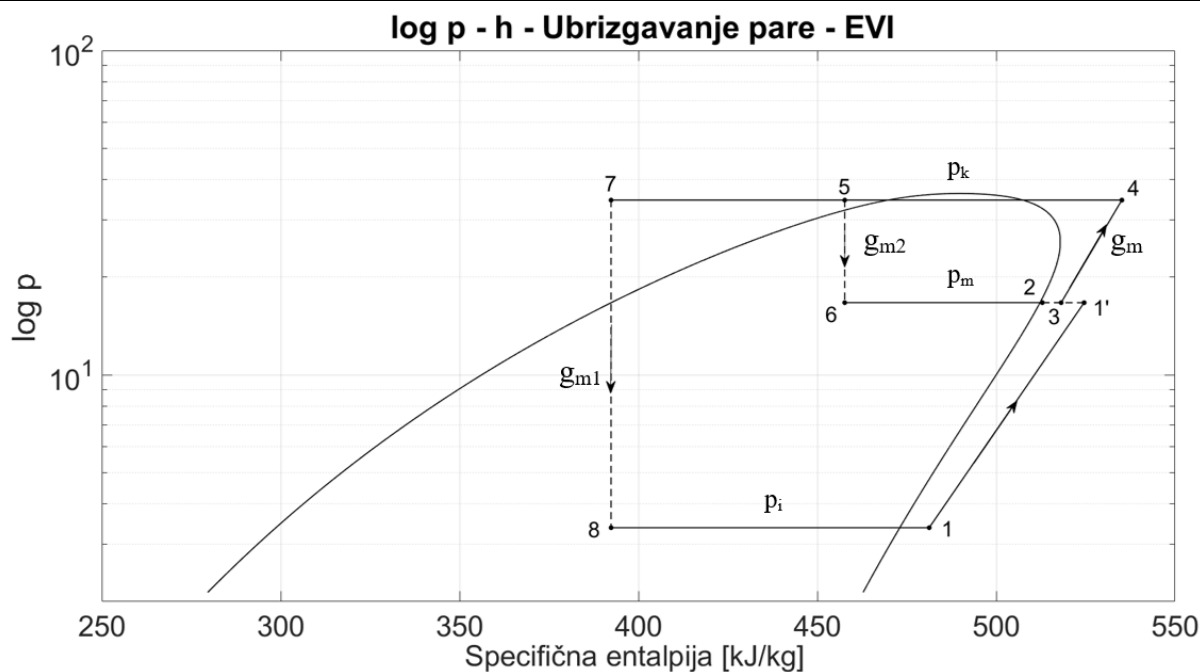
Tablica 15. Jednadžbe korištene za proračun sustava s EVI

Komponente dizalice topline	Jednadžbe stacionarnog stanja
Kondenzator	$\Phi_{kond} = g_{m\_pare} * (h_{iz\_pare} - h_{ul\_vode}) = g_m * (h_2 - h_3)$
Isparivač	$\Phi_{isp} = g_{m\_w} * (h_{ul\_w} - h_{iz\_w}) = g_{m1} * (h_1 - h_8)$
1. stupanj kompresora	$h_2 = h_1 * \frac{(h_{2is} - h_1)}{\eta_{is}}$
	$P_I = g_{m1} * (h_2 - h_1)$
2. stupanj kompresora	$h_3 = \frac{g_{m2} * h_2 + g_{m1} * h_1}{g_{m1} + g_{m2}}$
	$h_4 = h_3 * \frac{(h_{4is} - h_3)}{\eta_{is}}$
	$P_{II} = g_m * (h_4 - h_3)$
Ekonomajzer	$g_{m1} * (h_5 - h_7) = g_{m2} * (h_2 - h_6)$
Ekspanzijski ventil 1	$h_7 = h_8$
Ekspanzijski ventil 2	$h_5 = h_6$
COP procesa	$COP = \frac{\Phi_{kond}}{P_I + P_{II}}$

Povećanje COP-a dizalice topline ovisi o količini ubrizgavane pare za vrijeme kompresije radne tvari. Omjer između ubrizgavane količine pare i ukupnog protoka na kondenzatora je moću prikazati preko veličine  $r_m$  koja je definirana kao;

$$r_m = \frac{g_{m2}}{g_{m1} + g_{m2}}$$

Proračun je proveden za različite vrijednosti veličine  $r_m$  s ciljem pronalaska optimalne vrijednosti. Slika 47 prikazuje konstruirani log p - h dijagram kružnog procesa za optimalan omjer ubrizgavanja pare  $r_m = 0,55$ . Karakteristične točke procesa su prikane u tablici 16;

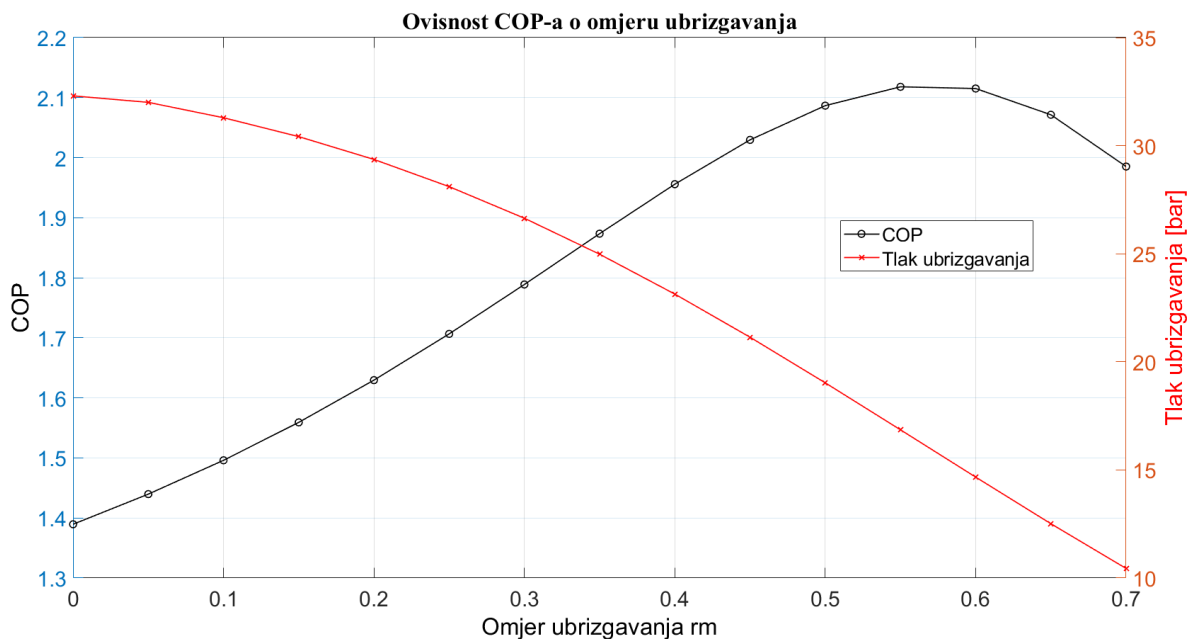


Slika 46. log p – h dijagram – ubrizgavanje pare – EVI

Tablica 16. Parametri EVI procesa za  $r_m = 0,55$ 

Veličina	Iznos	Mjerna jedinica
Tlak isparavanja, $p_1$	3,37	bar
Tlak ubrizgavanja, $p_m$	16,7	bar
Tlak kondenzacije, $p_k$	34,57	bar
Protok radne tvari, $g_m$	129,09	kg/h
Toplinski tok na kondenzatoru, $\Phi_{kond}$	10	MW
Snaga kompresora, $P_{komp}$	4,69	MW
Toplinski tok na isparivaču, $\Phi_{isp}$	5,31	MW
<b>COP</b>	<b>2.13</b>	MW

Za iste temperature toplinskog izvora i toplinskog ponora kao kod jednostupanjskog kružnog procesa, ogrjevni učin procesa s ubrizgavanjem pare za vrijeme kompresije radne tvar iznosi 2,13 što je povećanje od 65,73 %. Osim povećanja učinkovitosti, temperatura na izlazu iz kompresora je niža zahvaljujući „hlađenju“ radnog medija nakon izlaska iz prvog stupnja kompresije što smanjuje potreban rad kompresora.

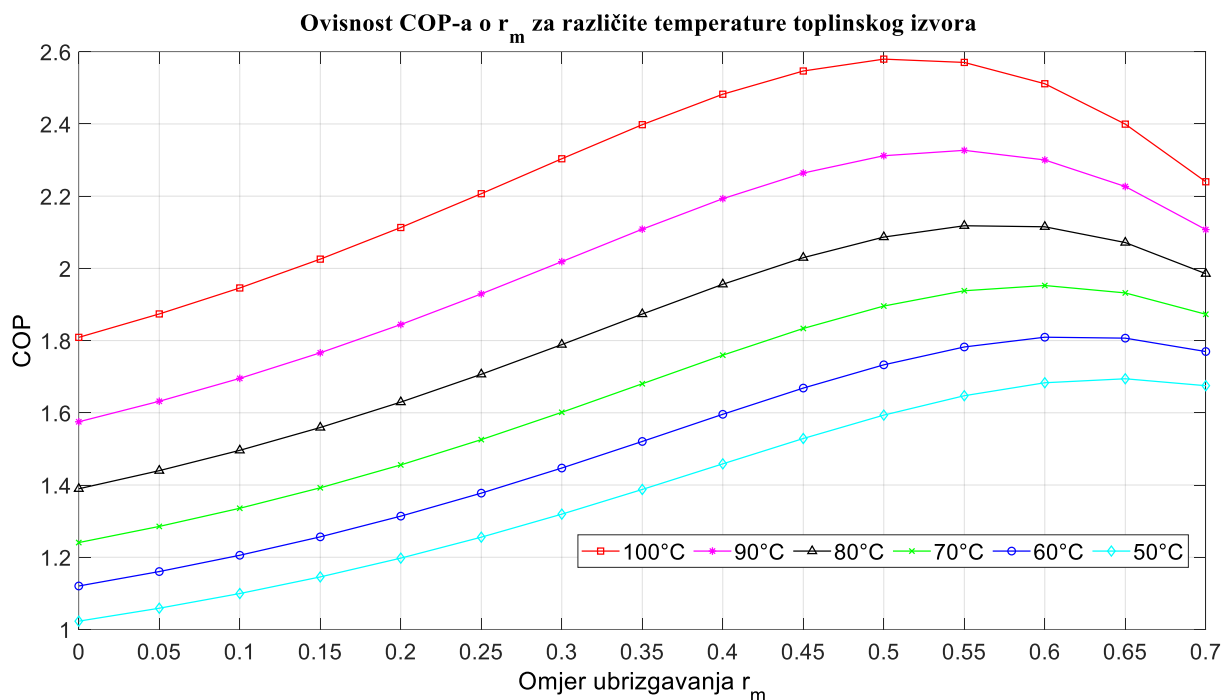


**Slika 47. Ovisnost COP-a kružnog procesa o omjeru ubrizgavanja**

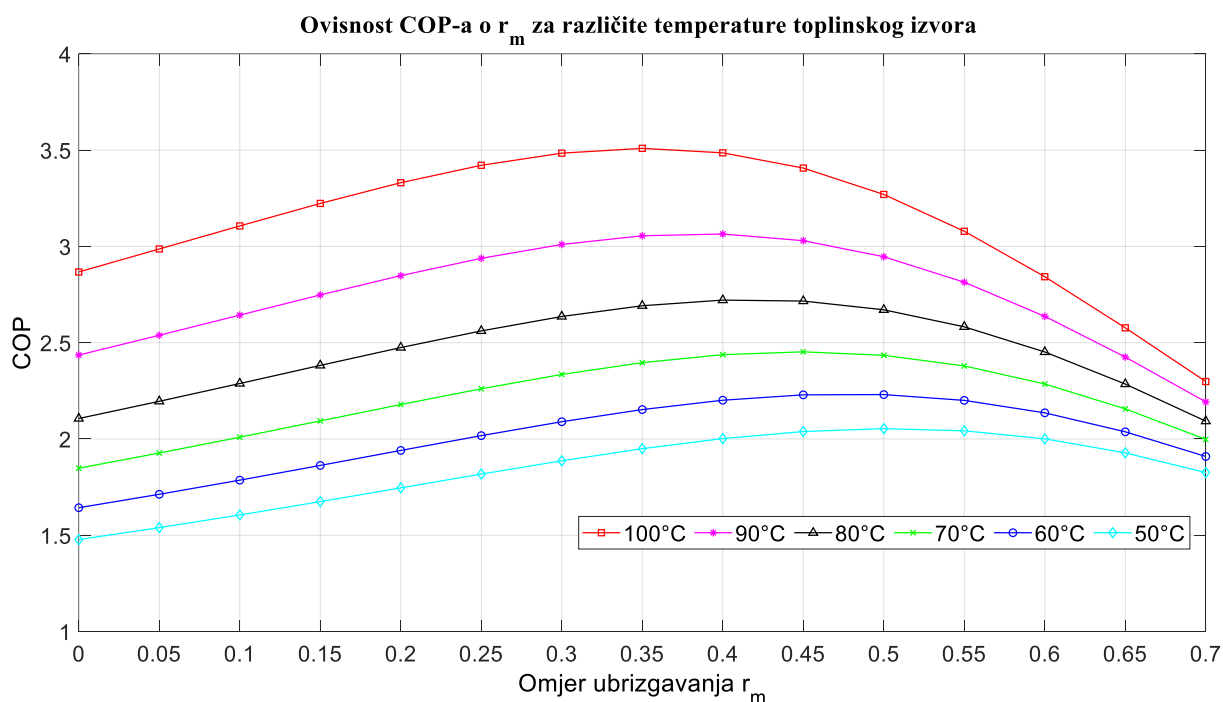
Slika 48 prikazuje kretanje COP-a procesa o ovisnosti količine ubrizgavane pare. Povećanjem iznosa  $r_m$  ogrevni učin raste te postiže optimalnu vrijednost za  $r_m = 0,55$ . Daljnjim povećanjem pare COP počinje padati jer je za visoke omjere količine ubrizgavane pare tlak ubrizgavanja nizak što posljedično povećava potrebnu snagu kompresora za komprimiranje radnog medija

### 7.5. Utjecaj omjera ubrizgavanja na COP za različite temperature toplinskog izvora

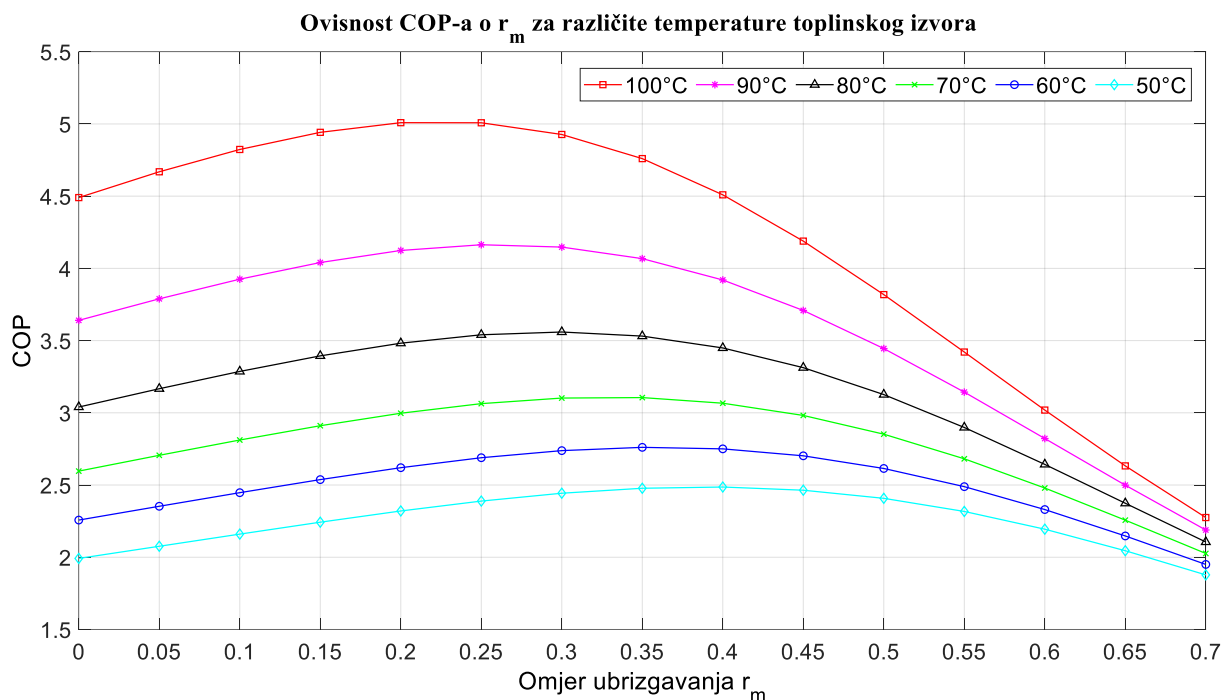
Na slikama 49, 50 i 51 prikazan je utjecaj promjene omjera ubrizgavanja pare  $r_m$  na COP za različite moguće temperature toplinskih izvora i toplinskih ponora. Povećanjem temperature toplinskog izvora smanjuje se vrijednost  $r_m$  za koju se postiže optimalni COP. Razlog tome je smanjenje temperaturnog raspona i kompresijskog omjera koji mora svladati kompresor. Također, smanjenjem temperature toplinskog ponora, COP dizalice topline raste uz smanjenje potrebne količine ubrizgavanja pare. Sa udaljavanjem tlaka kondenzacije od kritičnog tlaka radne tvari postiže se bolja učinkovitost za isti  $\Delta T$  zbog veće dostupne latentne topline što je posebice vidljivo uspoređujući rezultate za temperaturu toplinskog ponora od 158,83 °C i 140 °C.



**Slika 48. Ovisnost COP-a o  $r_m$  – Temperatura toplinskog ponora 158,83 °C**



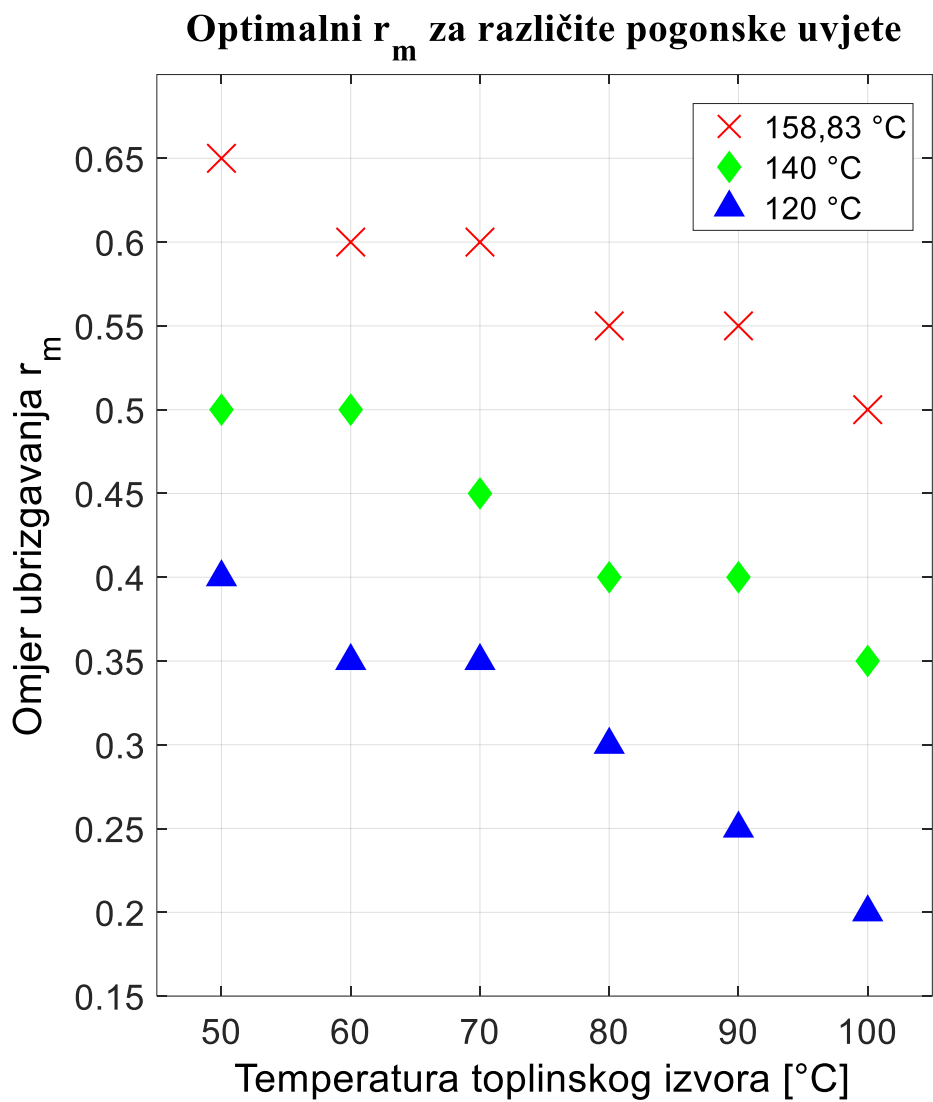
**Slika 49. Ovisnost COP-a o  $r_m$  – Temperatura toplinskog ponora 140 °C**



**Slika 50. Ovisnost COP-a o  $r_m$  – Temperatura toplinskog ponora 120 °C**

### 7.5.1. Optimalni omjer ubrizgavanja za različite pogonske uvjete rada

Slika 52 prikazuje optimalne vrijednosti količine ubrizgavane pare za različite pogonske uvjete rada. Optimalna količina ubrizgavane pare se povećava s padom temperature toplinskog izvora što je posljedica većeg kompresijskog omjera kojeg kompresor mora savladati. Također, povišenjem temperature toplinskog ponora raste i optimalna količina ubrizgavane pare. Ovakvim vođenjem pogona moguće je postići najvišu učinkovitost sustava pri različitim pogonskim uvjetima u kojem se postrojenje može pronaći.



Slika 51. Optimalni  $r_m$  za različite temperature toplinskog izvora i ponora



## 8. Zaključak

Energija za proizvodnju tehnološke pare u industrijskim postrojenjima se tradicionalno osiguravala iz fosilnih goriva i time emitirala značajne emisije stakleničkih plinova. U jeku energetske tranzicije s ciljem postizanja ugljične neutralnosti do 2050. godini, sustavi poput kotla na biomasu, kotla na električnu energiju i visokotemperaturne dizalice topline na otpadnu toplinu razmatraju se kao moguća zamjena postrojenjima koja koriste fosilna goriva. Rezultati provedene tehno-ekonomske analize su pokazali da je kotao na biomasu trenutno najjeftiniji sustav za proizvodnju tehnološke pare. Međutim, moguća ograničenja u raspoloživosti biomase praćena povećanjem cijena upućuju na razmatranje i razvoj drugih sustava poput visokotemperaturnih dizalica topline koje u kombinaciji s fotonaponskim elektranama mogu značajno doprinijeti dekarbonizaciji industrije, posebice za pokrivanje potreba za procesnom toplinom do 200 °C, što na razini EU predstavlja 37 % cjelokupne potrebe.

Osim što značajno smanjuju emisije stakleničkih plinova, OIE osiguravaju energetske neutralnost i smanjuju ovisnost o uvozu energenata što posljedično dovodi do niže cijena energije za industriju i građanstvo. Omjer između cijene električne energije i cijene prirodnog plina je ključan za isplativost OIE. Smanjenjem tog omjera, obnovljivi izvori energije postaju ekonomski isplativija opcija od konvencionalnih fosilnih goriva, što je vidljivo u skandinavskim zemljama.

Bitan parametar kod analize primjenjivosti visokotemperaturnih dizalica topline je toplina dostupnog toplinskog izvora i toplinskog ponora. Toplinski izvor mora biti na temperaturnoj razini između 60 °C – 90 °C ili više kako bi se dizalicom topline mogla efikasno prenositi toplina na temperaturnu razinu koju traže industrijski procesi (110 °C – 160 °C). Na tržištu postoji limitiran broj uređaja koji mogu dostići tako visoke temperature. Glavni problemi su vezani uz pronalazak radne tvari koja ima dobra fizikalna svojstva na povišenim temperaturama i široki temperaturni raspon, te nema negativan utjecaj na okoliš. Radne tvari R1336mzz(Z) i R1233zd(E) pokazuju dobra fizikalna svojstva pri povišenim temperaturama omogućavajući postizanje temperatura do 160 °C. Konačna isplativost pogona visokotemperaturne dizalice topline ovisi o značajkama korištene radne tvari pri povišenim temperaturama i cijeni električne energije potrebne za pogon kompresora. Daljnjim razvojem tehnologije očekuje se mogućnost postizanja još viših temperatura, proširujući temperaturni prag visokotemperaturnih dizalica topline do 200 °C što će omogućiti širu primjenu ovih sustava u proizvodnji tehnološke pare.

---

Uštede potrebne električne energije za pogon kompresora mogu se ostvariti prilagodbom parametara složenih konfiguracija poput dodatnog ubrizgavanja pare za vrijeme kompresije radne tvari, posebice za visoke kompresijske omjere i niske temperature toplinskog izvora. Analizom osjetljivosti COP na promjenu omjera ubrizgavanja pare pokazano je povišenje učinkovitosti pogona sustava pri čemu postoji optimalni omjer ubrizgavanja pare za različite pogonske uvjete.

**LITERATURA**

- [1] <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- [2] [https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20200618STO81513/green-deal-key-to-a-climate-neutral-and-sustainable-eu?&at\\_campaign=20234-Green&at\\_medium=Google\\_Ads&at\\_platform=Search&at\\_creation=RSA&at\\_goal=TR\\_G&at\\_audience=european%20green%20deal&at\\_topic=Green\\_Deal&at\\_location=HR&gclid=Cj0KCQjw84anBhCtARIsAISI-  
xcjO6YxW7e9\\_yWMQHFvgeDGwmMjIaXh9FFo51DsrZTQ7BG4TMrZV5YaAgLCEALw\\_wcB](https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20200618STO81513/green-deal-key-to-a-climate-neutral-and-sustainable-eu?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=european%20green%20deal&at_topic=Green_Deal&at_location=HR&gclid=Cj0KCQjw84anBhCtARIsAISI-<br/>xcjO6YxW7e9_yWMQHFvgeDGwmMjIaXh9FFo51DsrZTQ7BG4TMrZV5YaAgLCEALw_wcB)
- [3] <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/#:~:text=The%20concentration%20of%20carbon%20dioxide,it%20was%20near%20370%20ppm.>
- [4] <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/how-much-will-earth-warm-if-carbon-dioxide-doubles-pre-industrial-levels>
- [5] [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol)
- [6] <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement>
- [7] <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/green-deal/>
- [8] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52019DC0640&from=EN>
- [9] <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas>
- [10] <https://www.consilium.europa.eu/hr/infographics/eu-gas-supply/>
- [11] Energetska tržišta: EU Zeleni plan & RePower EU; predavanja
- [12] <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/aed45f8e-63e3-47fb-9440-a0a14370f243/language-en>
- [13] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_statistics\\_-\\_an\\_overview#Primary\\_energy\\_production](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production)
- [14] [https://www.researchgate.net/figure/Temperature-range-of-various-industrial-processes-Sources-5-9-10-11\\_fig3\\_351536374](https://www.researchgate.net/figure/Temperature-range-of-various-industrial-processes-Sources-5-9-10-11_fig3_351536374)
- [15] <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/industrial-heat-pump-whitepaper/2020-07-10-whitepaper-ihp-a4.pdf>

- 
- [16] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final energy consumption in industry - detailed statistics#The largest industrial energy consumers in the EU](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics#The_largest_industrial_energy_consumers_in_the_EU)
- [17] <https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-01/HR%20CA%202020%20en.pdf>
- [18] <https://www.nrdc.org/bio/veena-singla/cut-carbon-and-toxic-pollution-make-cement-clean-and-green>
- [19] <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/understanding-european-unions-emissions-trading-system>
- [20] <https://www.holcim.hr/projekt-dekarbonizacije-kodeco-net-zero-holcima-hrvatska-vrijednosti-237-milijuna-eura-sufinancirat>
- [21] <https://www.gminsights.com/industry-analysis/industrial-electric-boiler-market>
- [22] <https://realpars.com/boiler/>
- [23] <https://www.sugimat.com/en/products/biomass-fired-steam-boilers/>
- [24] [https://enerpedia.net/index.php?title=Datoteka:Izgaranje biomase.JPG](https://enerpedia.net/index.php?title=Datoteka:Izgaranje_biomase.JPG)
- [25] <https://vlada.gov.hr/UserDocsImages//2016/Sjednice/Arhiva//73.%20-%2012.pdf>
- [26] <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-industrial-process-heat>
- [27] <https://www.gminsights.com/industry-analysis/europe-biomass-boiler-market>
- [28] <https://www.gminsights.com/industry-analysis/industrial-electric-boiler-market>
- [29] <https://hthp-symposium.org/media/1379/strengthening-industrial-heat-pump-innovation-decarbonizing-industrial-heat.pdf>
- [30] Conference Kole – og Varmepumpeforum 2023, March 23rd
- [31] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219310692?via%3Dihp>
- [32] <https://hthp-symposium.org/high-temperature-heat-pumps/white-paper-strengthening-industrial-heat-pump-innovation/>
- [33] <https://www.sugimat.com/en/energy-savings-at-current-natural-gas-prices-what-is-the-payback-period-for-an-industrial-biomass-boiler/>
- [34] <https://www.hep.hr/ods/kupci/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-161/161>
- [35] <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20180208STO97442/smanjenje-emisija-staklenickih-plinova-u-eu-u-nacionalni-ciljevi-za-2030>
- [36] <https://www.euractiv.com/section/emissions-trading-scheme/news/eu-carbon-price-to-hit-e400-mark-with-90-climate-goal-analysts/>
- [37] <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>

- 
- [38] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2022\\_03\\_30\\_370.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2022_03_30_370.html)
- [39] Podloge s predavanje kolegija: Dizalice topline s OIE
- [40] <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2874&context=iracc>
- [41] [https://www.researchgate.net/publication/326847787\\_High\\_Temperature\\_Heat\\_Pumps\\_Market\\_Overview\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_Research\\_Status\\_Refrigerants\\_and\\_Application\\_Potentials](https://www.researchgate.net/publication/326847787_High_Temperature_Heat_Pumps_Market_Overview_State_of_the_Art_Research_Status_Refrigerants_and_Application_Potentials)
- [42] Joaquín Navarro-Esbrí, Adrián Mota-Babiloni Experimental analysis of a high temperature heat pump prototype with low global warming potential refrigerant R-1336mzz(Z) for heating production above 155 °C International Journal of Thermofluids, Volume 17, 2023, 100304, ISSN 2666-2027, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100304>

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc