

ASPEKTI PROIZVODNJE ENERGIJE IZ OBNOVLJIVIH IZVORA PRIMENOM ORGANSKOG RANKINOVOG CIKLUSA

ASPECTS OF ENERGY PRODUCTION FROM RENEWABLE SOURCES USING THE ORGANIC RANKIN CYCLE

Nina OTAŠEVIĆ*

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering

Problem emisije ugljen-dioksida kao i rast cene energenata dovodi do sve veće potražnje ka čistijim izvorima energije. Organski Rankinov ciklus, kao posebna vrsta Rankinovog ciklusa koji umesto vode kao radni fluid koristi organske tečnosti, predstavlja jednu od alternativa za dobijanje čiste energije. Zadovoljavanje energetske potreba pomoću sistema baziranih na Organskom Rankinovom ciklusu postiže se iz niskotemperaturnih ili srednjotemperaturnih izvora otpadne toplote. Zbog tog svojstva može se koristiti za dobijanje električne energije iz obnovljivih izvora kao što su solarna energija, geotermalna energija, otpadna toplota iz industrije, biomasa i dr. U ovom radu se vrši poseban osvrt na otpadnu toplotu iz data centara i geotermalnog izvora. Izrađen je proračun korišćenjem radnog fluida pentafluoropropan, R245fa. Prikazan je i analiziran termodinamički stepen efikasnosti na realnim primerima. Dobijeni rezultati energetske efikasnosti iznose 16.40% (za geotermalni toplotni izvor od 75°C) i 6.80% (toplotni izvor iz data centra 40°C). Izvršen je i proračun izbegnute emisije ugljen-dioksida u Organskom Rankinovom ciklusu, u odnosu na termoelektranu u kojoj se koristi lignit. Dobijeni rezultati prikazuju da bi smanjenje emisije ugljen-dioksida iznosilo 824 t. U radu se analiziraju prednosti i mane koje treba prevazići, efikasnost procesa i performanse različitih konfiguracija, kako iz inženjerske tako i iz ekonomske perspektive.

Ključne reči: *Organski Rankinov ciklus; proizvodnja električne energije; energetska efikasnost; otpadna toplota*

The problem of carbon dioxide emissions as well as the growth of energy prices is leading to increasing demand for cleaner energy sources. The organic Rankine cycle, as a special type of Rankine cycle that uses organic liquids instead of water as a working fluid, is one of the alternatives for obtaining clean energy. Satisfaction of energy needs with the help of systems based on the Organic Rankin cycle is achieved from low-temperature or medium-temperature waste heat sources. Due to this property, it can be used to obtain electricity from renewable sources such as solar energy, geothermal energy, waste heat from industry, biomass, etc. In this paper, a special review is made of waste heat from data centers and geothermal sources. A calculation was made using the working fluid pentafluoropropane, R245fa. The thermodynamic degree of efficiency on real examples is presented and analyzed. The obtained energy efficiency results are 16.40% (for geothermal heat source of 75 ° C) and 6.80% (heat source from the data center 40 ° C). The calculation of the avoided carbon dioxide emission in the Organic Rankine cycle was also performed, in relation to the thermal power plant in which lignite is used. The obtained results show that as much as 824 t of carbon dioxide would be avoided. The paper analyzes the advantages and disadvantages to be overcome, process efficiency and performance of different configurations, both from an engineering and economic perspective.

Keywords: *Organic Rankine Cycle; electricity production; energy efficiency; waste heat*

1 Organski Rankinov ciklus

Organski Rankinov ciklus (ORC) ima isti princip rada kao i Rankinov ciklus. Ključna razlika je u tome što se umesto vode kao radna materija koristi neki organski fluid. Organski fluidi koji se koriste u organskom Rankinovom ciklusu su alkani, aromati i siloksani. Razlog za korišćenje ovih

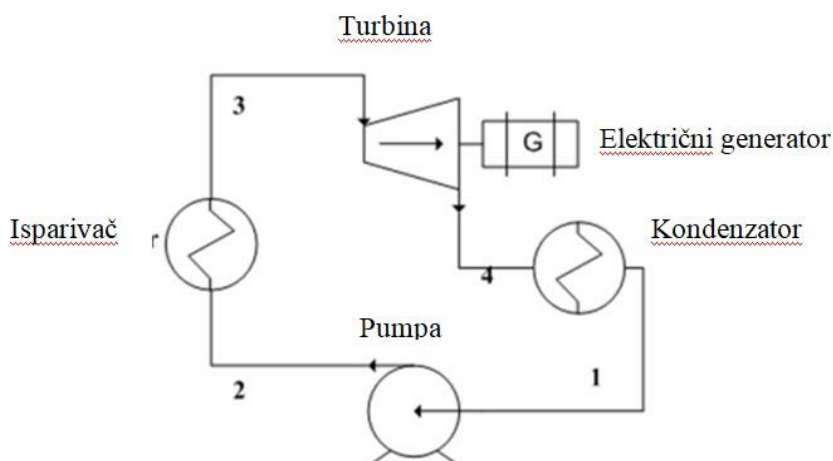
* Corresponding author, e-mail: ninaotasevic13@gmail.com

tečnosti je što imaju niže temperature ključanja u poređenju sa vodom. Tačnije rečeno, promena faze se odigrava na nižim temperaturama nego kod vode. To je razlog zbog kojeg je ORC pogodan za iskorišćenje niskotemperaturnih i srednjotemperaturnih izvora toplote.

Postoji nekoliko primera koji prikazuju da je ova tehnika itekako upotrebljiva i izvodljiva. Jedna strana kompanija u Velikoj Britaniji je instalirala ORC sistem za proizvodnju čiste električne energije i za zagrevanje zgrada. Temperatura izvora se koristi iz geotermalnog niskotemperaturnog toplotnog izvora i iznosi 77-122°C. Takođe, klanica u Švajcarskoj koristi niskotemperaturnu otpadnu toplotu koja dolazi iz sistema za hlađenje. Toplota iz sistema za hlađenje se koristi za grejanje vode u domaćinstvu. Rezultat korišćenja ORC procesa na godišnjem nivou dolazi do uštede 260 000m³ prirodnog gasa i čak 510t ugljen-dioksida [1].

Firma ElectraThrem, čije je sedište u Gruziji, pruža rešenja za ponovno korišćenje toplote uz pomoć Organskog Rankinovog ciklusa. Pomoću raznih tehnologija koje pretvaraju toplotu iz niskotemperaturnih izvora, kao što je otpadna toplota iz data centara ili toplota iz manjih geotermalnih izvora, u električnu energiju. Često koriste toplotne izvore od 70°C pretvarajući ih u 150kWh čiste električne energije [2].

ORC se sastoji od četiri komponente, kao što je prikazano na slici 1: isparivač, turbina povezana sa električnim generatorom, kondenzator i pumpa. Uz pomoć pumpe vrši se kompresija organske tečnosti (1-2) koja prolazi kroz isparivač i potpuno isparava pomoću spoljnjeg izvora toplote (2-3). Zasićena para ekspandira u turbini koja je povezana sa električnim generatorom (3-4). Konačno, para nakon turbine prolazi kroz kondenzator i vrši se kondenzacija iste prije ulaska u pumpu.



Slika 1 - Organski Rankinov ciklus

Primena organskog Rankinovog ciklusa:

- Primena kod biomase kao izvora energije
- Primena kod solarnih izvora toplote
- Primena kod geotermalnih izvora toplote

Udeo proizvedene električne energije korišćenjem ORC ciklusa kao toplotnog izvora najveći u slučaju geotermalne energije (72%), nakon čega sledi biomasa (14%) i iskorišćavanje otpadne toplote (13%), dok je procenat proizvodnje korišćenjem solarne energije zanemaljiv (1%) [3].

1.1 Radni fluidi

U RC koristi se samo voda, dok postoji veliki broj različitih radnih fluida koji se mogu koristiti u ORC ciklusu. Većina organskih fluida ima nižu tačku ključanja od vode. Ovo pokazuje da je organskim fluidima potrebna niža temperatura kako bi prešli u parnu fazu, te kao takvi, mogu koristiti niskotemperaturne izvore toplote.

Izbor radnog fluida je jedna od najbitnijih odluka pri projektovanju ORC procesa. Od izbora fluida direktno zavisi efikasnost i ekonomičnost celog procesa.

Kako bi se optimalno koristila energija i smanjili gubici eksergije, postoje termodinamički kritični parametri koji se uzimaju u obzir pri izboru radnog fluida. To su najčešće:

- graničnu temperaturu primene radnog fluida,

- minimalni granični pritisak u kondenzatoru ORC,
- maksimalni pritisak pare radnog fluida u isparivaču ORC,
- visoka termička stabilnost i kompatibilnost sa materijama,
- nizak uticaj na životnu sredinu,
- visok nivo bezbednosti,
- dobra dostupnost i niska cena,
- visoke performace (energetska efikasnost),
- niska specifična cena instalacije, itd (Živković, 2019).

Veliki broj radnih fluida koji imaju dobre termodinamičke osobine istovremeno negativno utiču na životnu sredinu. Glavni parametri koji definišu uticaj radnog fluida na životnu sredinu su:

- potencijal globalnog zatopljenja i
- potencijal osiromašivanja ozona.

Radni fluid treba da je neotrovan, nezapaljiv i nekorozivan.

Pored navedenih, potrebno je pratiti hemijske trendove pri upotrebi različitih radnih fluida i kontrolisati povećanje određenih hemijskih elemenata (ugljenik, azot, kiseonik, sumpor, vodonik, fluor, hlor, brom, bor i silicijum) na termodinamičke, sigurnosne i aspekte životne sredine radnog fluida.

Uzimajući u obzir ove parametre, izbor fluida predstavlja vrlo težak zadatak, iako postoje određene metode za izbor istog.

Uzimajući u obzir niz kriterijuma i parametara koji radni fluid mora da ispuni, izbor pogodnog radnog fluida i dalje predstavlja jedan od najtežih zadataka. Uprkos nekoliko metoda dostupnih uliteraturi i dalje postoje velike poteškoće u izboru istog.

1. Eksperimentalni deo

Zadatak

U daljem tekstu, razmatra se ORC koji koristi geotermalnu energiju kao niskotemperaturni izvor toplote u prvom slučaju, zatim otpadnu toplotu od data centra u drugom slučaju. U procesu se koristi jedan organski radni fluid. Na samom kraju tumače se dobijeni rezultati.

Organski fluid odabran za rad je **R245fa** (Pentafluoropropan), a njegova svojstva nalaze se u tabeli 1.

Tabela 1 – Svojstva radnog fluida R245fa

Hemijski naziv	Hemijska oznaka	Molekulska masa (g/mo)	Tačka topljenja (°C)	Tačka ključanja (1.013bar)	Kritična temperatura (°C)
Pentafluoropropan	$CF_3CH_2CHF_2$	134,05	-102,1	15,13	154,0

Temperatura geotermalnog izvora toplote $t_1 = 75^\circ\text{C}$. Ova temperatura uzeta je iz realnog slučaja koji je prethodno bio istraživani. Temperatura okoline je $t_0 = 15^\circ\text{C}$.

Šema dobijanja energije iz geotermalnog niskotemperaturnog izvora toplote predstavljena je na slici 2 i sastoji se od sledećih procesa:

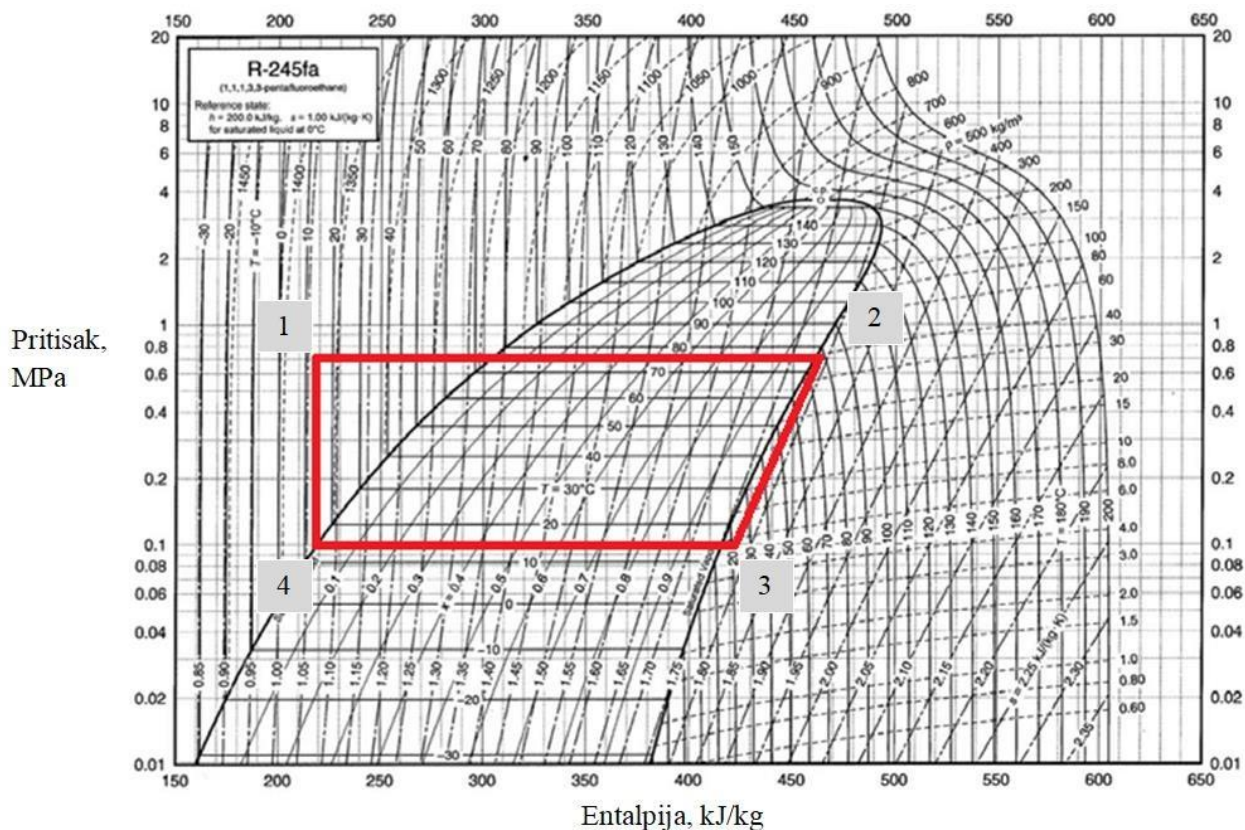
1 - 2 → Radni fluid se zagreva do temperature promene faze, koja je u ovom slučaju 75°C , zatim isparava i ulazi u pregrejanu paru

2 - 3 → Pregrejana para ekspandira u turbini, gdje se mehanička energija sa turbine konvertuje u električnu uz pomoć generatora

3 - 4 → Radni fluid ulazi u kondenzator gde se hladi uz pomoć temperature okoline, kojaje u ovom slučaju 15°C

4 - 1 → Fluid se ponovo zagreva, čime se jedan ciklus završava.

U i-p dijagramu na slici 2 prikazan je ORC proces sa radnim fluidom R245fa na temperaturi izvora 75°C .



Slika 2 - ORC ciklus u i - p dijagramu na temperaturi izvora 75°C za radni fluid $r245fa$

Sa dijagrama se mogu očitati vrednosti pojedinačnih entalpija. Međutim, podaci koji su upotrebljeni za vrednosti iste uzeti su iz tabele, u zavisnosti od temperature na kojoj se pojedinačni procesi nalaze. Tabela iz koje su uzeti podaci za entalpiju, verodostojno prikazuje termodinamička svojstva fluida R245fa.

Tačka 1 i tačka 4 su na temperaturi 15°C i njihova entalpija iznosi $i_1 = i_4 = 219,325 \text{ kJ/kg}$. Tačka 2 nalazi se na temperaturi 75°C , odakle proizilazi da entalpija iznosi $i_2 = 458,401 \text{ kJ/kg}$. Dok je tačka 3 na temperaturi 20°C i vrednost entalpije je $i_3 = 419,115 \text{ kJ/kg}$.

Sledeći proračun i najbitniji korak je određivanje termodinamičkog stepena korisnosti η koristeći geotermalnu energiju kao niskotemperaturni izvor toplote na 75°C .

$$\eta_1 = \frac{W_t}{Q_k} = 1 - \frac{|i_4 - i_3|}{(i_2 - i_1)} = 1 - 0,836 = 0,164 \cdot 100\% = 16,40\%$$

Dobijeni rezultati prikazuju da je termodinamički stepen korisnosti $\eta_1 = 16,40\%$, što znači da se iz geotermalnog izvora energije na 75°C , čak $16,40\%$ se može efikasno iskoristiti za dobijanje energije.

Teorijski maksimum rada koji može da proizvede fluid R245fa u ovom ciklusu, odnosno Karnoov stepen korisnosti:

$$\eta_{c1} = 1 - \frac{T_0}{T_1} = 1 - \frac{288,15\text{K}}{348,15\text{K}} = 1 - 0,828 = 0,172 \cdot 100\% = 17,20\%$$

U drugom slučaju razmatra se niskotemperaturni izvor energije iz data centra, koji iznosi $t_2 = 40^\circ\text{C}$. Temperatura ponora predstavlja takođe temperature okoline čija je vrednost takođe $t_0 = 15^\circ\text{C}$.

Šema dobijanja energije iz data centra sastoji se od sledećih procesa (slika 3):

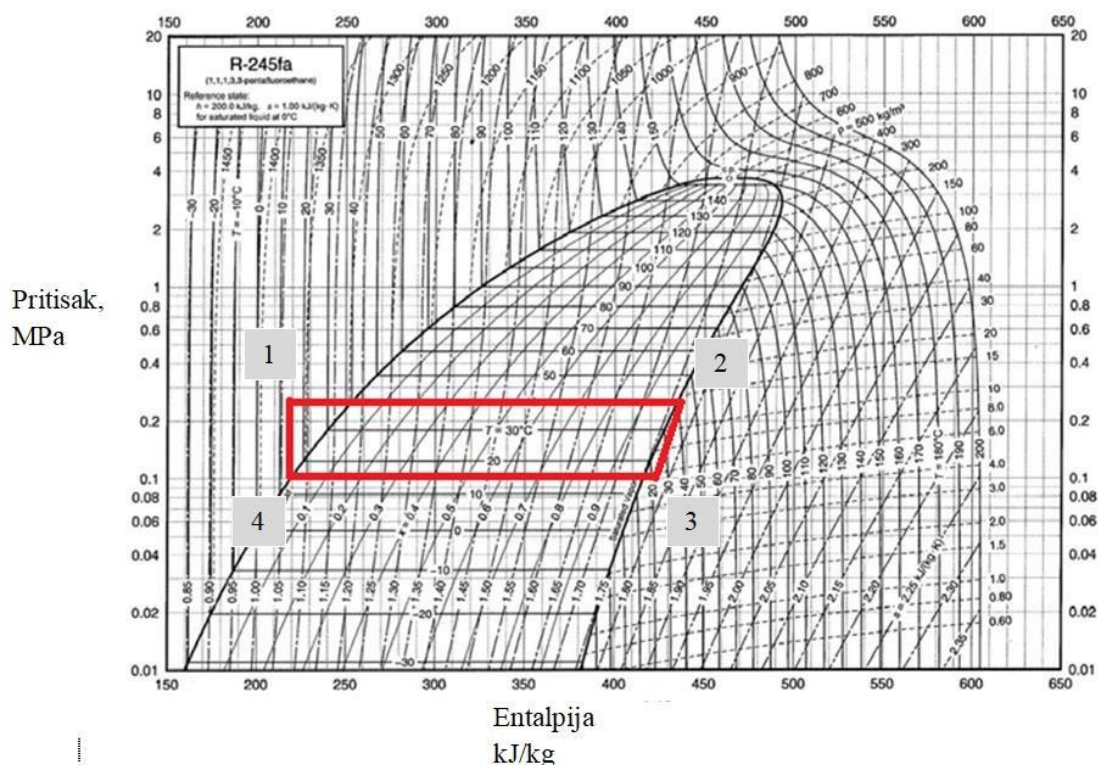
1 - 2 \rightarrow Radni fluid se zagreva do temperature promene faze, koja je u ovom slučaju 40°C , zatim isparava i ulazi u pregrejanu paru

2 - 3 \rightarrow Pregrejana para ekspandira u turbini, gdje se mehanička energija sa turbine konvertuje u električnu uz pomoć generatora

3 - 4 → Radni fluid ulazi u kondenzator gde se hladi uz pomoć temperature okoline, kojaje u ovom slučaju 15°C

4 – 1 → Fluid se ponovo zagreva, čime se jedan ciklus završava.

U i-p dijagramu na slici 3 prikazan je ORC proces sa radnim fluidom R245fa na temperaturi izvora 40°C.



Slika 3 - ORC ciklus u i-p dijagramu na temperaturi izvora 40 °C za radni fluid r245fa

Određuju se vrednosti entalpije u svakoj tački posebno. Na osnovu dobijenih entalpija računa setermodinamički stepen korisnosti, kao i Karnoov stepen korisnosti.

Tačka 1 i tačka 4 su na temperaturi 15°C i njihova entalpija iznosi $i_1 = i_4 = 219,325$ kJ/kg. Tačka 2 nalazi se na temperaturi 40°C, odakle proizilazi da entalpija iznosi $i_2 = 433,713$ kJ/kg. Dok je tačka 3 na temperaturi 20°C i vrednost entalpije j $i_3 = 419,115$ kJ/kg.

Sledeći proračun i najbitniji korak je određivanje termodinamičkog stepena korisnosti η korišćenjem iz data centra kao niskotemperaturni izvor toplote na 40°C.

$$\eta_2 = \frac{W_t}{Q_k} = 1 - \frac{|i_4 - i_3|}{(i_2 - i_1)} = 1 - 0,932 = 0,068 \cdot 100\% = 6,80\%$$

Dobijeni rezultati prikazuju da je termodinamički stepen korisnosti $\eta_2 = 6,80\%$, što znači da se izdata centra kao izvora energije na 45°C, čak 6,80% se može efikasno iskoristiti za dobijanje energije.

Teorijski maksimum rada koji može da proizvede fluid R245fa u ovom ciklusu, odnosno Karnoov stepen korisnosti:

$$\eta_{c2} = 1 - \frac{T_0}{T_1} = 1 - \frac{288,15K}{313,15K} = 1 - 0,920 = 0,08 \cdot 100\% = 8,00\%$$

Dobijeni rezultati prikazuju da energetska efikasnost zavisi od temperature izvora i ponora, koji su u ovom slučaju:

$$\eta_1 = 16,40\% \text{ (za geotermalni toplotni izvor od } 75^\circ\text{C)}$$

$$\eta_2 = 6,80\% \text{ (izvor toplote iz data centra } 40^\circ\text{C)}$$

Umesto ispuštanja toplote u okolni vazduh, ovo je dokaz da ista može biti vrlo korisna. Toplota u ovom slučaju nije nus proizvod, već je iskorišćena za dobijanje energije. Na taj način se obija “besplatnu” energiju, jer bi se u suprotnom toplota ispustila u okolni vazduh.

Veća termodinamička korisnost postignuta je sa izvorom toplote koji ima višu temperaturu. Upravo zbog toga, geotermalni toplotni izvor ima veću termodinamičku efikasnost u odnosu na izvor iz data centra jer ima višu temperaturu toplotnog izvora. S obzirom da se proučava dobijanje energije iz niskotemperaturnih izvora toplote, termodinamički stepen korisnosti je poprilično nizak, ali je i dalje dovoljan za proizvodnju određene količine električne energije. Iako postoji mogućnost da se na taj način dobije “besplatna” energiju, najveći problem ORC postrojenja je visoka cena istog, odnosno isplativost procesa. Isplativost zavisi od mnogih faktora koje spada: cena električne energije, cena postrojenja, cena radnog fluida, temperatura izvora toplote i još mnogi drugi faktori.

Izrađen je i proračun koeficijenta emisionog faktora ugljen-dioksida (K_{CO_2}). Vrednosti su dobijene sagorevanjem lignita u termoelektranama. Koristeći zbirni energetski bilans Republike Srbije dobijaju se sledeći podaci [4]:

Ukupan energetski bilans za termoelektrane i TE-TO: 6,798 Mtoe, odnosno **284618664 GJ**

Ukupna proizvedena električna energija iz termoelektrana i TE-TO [5]: 2,297 Mtoe, odnosno

$$26714110000kWh$$

Koeficijent emisije lignita : **96,4 kgCO₂/GJ**

$$m_{CO_2} = \frac{284618664 \text{ GJ} \cdot 96,4 \text{ kg}_{CO_2}/\text{GJ}}{26714110000kWh} = 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

Proračunom je dobijeno da se za 1 kWh proizvedene električne energije emituje 1,03kg ugljen-dioksida.

Poznato je da Organski rankinov ciklus predstavlja ekološki prihvatljiv proces dobijanja električne energije, odnosno proces koji nema emisije ugljen dioksida (CO₂). Sledeći proračun će nam prikazati smanjenje emisije ugljen-dioksida (CO₂), kada bi se električna energija proizvodila u ORC postrojenju umesto u termoelektrani.

Za primer uzimamo ORC postrojenje koje ima snagu: **100kW** i koje radi **8000h** godišnje. Ukupna proizvedena električna energija dobijena iz ovakvog ORC postrojenja bi bila:

$$100kW * 8000h = 800\ 000kWh$$

Dobijenu proizvedenu električnu energiju množimo sa $m_{CO_2} = 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$

$$800\ 000kWh \cdot 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 824\ 000kg = 824 \text{ t } (CO_2)$$

Dobijeni podatak prikazuje da kada bi umesto termoelektrane koristili ORC proces za dobijanje električne energije, izbegli bi emisiju 824t ugljen-dioksida (CO₂). Ovaj podatak je itekako značajan faktor u borbi protiv klimatskih promena, koji predstavlja ujedno i jedan od najvećih problema sa kojim se čovečanstvo suočava u ovom veku.

2. Zaključak

Proučavanjem Organskog Rankinovog ciklusa u ovom radu, dolazi se do zaključka da je ova tehnologija vrlo perspektivna i da će interesovanje za istu sve više rasti. Organski Rankinov ciklus otvara nove mogućnosti za proizvodnju čiste električne energije u područjima sa niskotemperaturnim izvorima toplote, odnosno otpadne toplote (geotermalna, solarna energija, biomasa, industrijska potrojenja...). Korišćenjem Organskog Rankinovog sistema u energetsku i privrednu sliku jedne zemlje doprinosi štednji fosilnih goriva, energetskoj nezavisnosti, razvoju privrede kroz zapošljavanje stanovništva i najbitnije, smanjenju emisije ugljen-dioksida, što može biti deo rešenja za ublažavanje posledica klimatskih promena.

U ovom radu izrađene su i dve termodinamičke analize stepena korisnosti koje se upoređuju jedna sa drugom. Izrađen je proračun korišćenjem radnog fluida n-pentana, R245fa. Rezultati prikazuju da termodinamički stepen korisnosti Organskog Rankinovog procesa sa geotermalnim izvorom toplote, koji je 75°C bi bio $\eta_1 = 16,40\%$. S druge strane, termodinamički stepen korisnosti Organskog Rankinovog procesa otpadnog izvora toplote iz data centra, koji je 40°C, bi bio $\eta_2 = 6,80\%$. Na temelju proračuna može se zaključiti da je termodinamički stepen korisnosti poprilično nizak, ali je i dalje dovoljan za proizvodnju određene količine električne energije. Na taj način dobijamo “besplatnu” energiju, jer bi se u suptonom toplota ispustila u okolni vazduh.

Izvršen je i proračun izbegnute emisije ugljen-dioksida u Organskom Rankinovom ciklusu u odnosu na termoelektranu u kojoj se koristi lignit. Izbegnuta emisija ugljn-dioksida korišćenjem Organskog Rankinovog ciklusa bi bila **824t (CO₂)**.

Međutim, na putu za usvajanje i implementaciju Organskog Rankinovog ciklusa postoji niz izazova i prepreka koje tek treba prevazići. Isplativost zavisi od mnogih faktora u koje spada: cena električne energije, cena postrojenja, cena radnog fluida kao i temperatura izvora toplote i još mnogi drugi faktori.

3. Reference

- [1] *** *Low-grade waste heat utilization in the European Union*. (2022). Preuzeto sa <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/CE-HEAT/Low-grade-waste-heat-utilization-in-the-European-Union.html>
- [2] *** ElektraTrem. (n.d.). Preuzeto sa <https://electratherm.com/waste-heat-recovery-experts/>
- [3] *** Cycles, T.(2011). Preuzeto sa <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461426/FULLTEXT01.pdf>
- [4] **Živković, M.** (2019). *Osnove energetike*, 2019
- [5] **Otašević, N.** (2022). *Organski Rankinov ciklus*, 2022