

# RAZMATRANJE MOGUĆNOSTI ISKORIŠĆENJA OTPADNE TOPLOTE U RAFINERIJAMA

Stojan Simić<sup>1</sup>, Krsto Batinić<sup>1</sup>, Davor Milić<sup>1</sup>, Goran Orašanić<sup>1</sup>, Srđan Vasković<sup>1</sup>, Jovana  
Blagojević<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Mašinski fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno  
Sarajevo, Bosna i Hercegovina<sup>1</sup>*

**Rezime:** *Pri preradi nafte i naftnih derivata u rafinerijama troši se relativno velika količina toplotne energije. Najveća količina toplote se troši za potrebe proizvodnog procesa, a jedan deo toplote se potroši i za održavanje potrebne temperature u pomoćnim postrojenjima. Potrošnja toplotne energije se može smanjiti primenom različitih tehničko-tehnoloških rešenja i organizacionih mera. Jedno od najčešće primenjivanih rešenja je korišćenje otpadne toplote koja se produkuje u energetskim i procesnim rafinerijskim postrojenjima.*

*Korišćenjem otpadne toplote koja nastaje pri preradi nafte i naftnih derivata može se u značajnoj meri uticati na smanjenje potrošnje toplotne energije prilikom odvijanja proizvodnog procesa u rafinerijama. U radu su prezentovana iskustva i konkretni rezultati koji se postižu korišćenjem otpadne toplote u rafinerijama. Korišćenjem otpadne toplote smanjuje se potrošnja goriva za proizvodnju toplotne energije, a ujedno i količina gasova koji se emituju u atmosferu.*

**Ključne riječi:** rafinerije, toplotna energija, otpadna toplota, korišćenje.

## 1. UVOD

Na procese prerade sirove nafte u rafinerijama troši se relativno velika količina energije. Od ukupne potrošnje energije u industriji udeo energije koja se troši u rafinerijama iznosi od 6 do 8 %. Najveći udeo u potrošnji energije pri preradi sirove nafte u rafinerijama imaju procesi atmosferske i vakuum destilacije koji iznosi oko 30 % ukupne potrošnje energije u rafineriji.

Većina rafinerija nafte koje su izgrađene pre pedeset i više godina projektovane su u doba jeftine energije odnosno niske cene sirove nafte. U to vreme investitori su davali prednost nižim investicionim ulaganjima, na račun veće potrošnje energije. Zato su izostala brojna rešenja boljeg iskorišćenja toplote u procesu. Takođe nije dovoljno korišćena otpadna toplota dimnih gasova i

kondenzata vodene pare. U većini rafinerija postoji značajan potencijal za korišćenje toplote iz nekog procesa. Maksimalnim korišćenjem toplote iz svih procesa mogu se značajno smanjiti troškovi prerade nafte i poboljšati ekološki aspekti, kao što su: manja potrošnja goriva, manja emisija gasova koji stvaraju efekat staklene bašte, manja količina tehnoloških voda, manja potrošnja hemikalija za hemijsku pripremu vode i dr.

U rafinerijama nafte se pojavljuje relativno velika količina otpadne toplote. Otpadna toplota predstavlja toplotnu energiju koja se generiše tokom različitih procesa u pojedinim delovima rafinerijskih postrojenja, a koja nema uticaja na proizvodni proces i koja se uglavnom nepovratno oslobađa u životnu sredinu. Istraživanje postupaka i metodologija za iskorišćenje otpadne toplote iz rafinerijskih procesa, predstavlja jedan od ključnih pravaca za smanjenje potrošnje energije i poboljšanje energetske efikasnosti rafinerijskih postrojenja i procesa.

U radu je prezentovano gde se pojavljuju gubici toplotne energije i razmatrane su mogućnosti za iskorišćenje otpadne toplote nastale u energetske i procesnim rafinerijskim postrojenjima.

## **2. POTROŠNJA TOPLOTNE ENERGIJE U RAFINERIJAMA NAFTE**

U poslednjih dvadeset godina, paralelno sa rastom populacije, industrijalizacijom, urbanizacijom i tehnološkim razvojem, raste potražnja za energijom. Potrošnja energije u svetu u poslednjih deset godina prosečno poraste za 1,8 % godišnje. Očekuje se da će se u narednom periodu nastaviti trend porasta potrošnje energije i procene su da će potrošnja energije do 2040. godine porasti za 28 %.

U tehnologiji prerade nafte, skoro sve operacije razdvajanja, kao i hemijski procesi konverzije, zahtevaju grejanje i/ili hlađenje. Radne temperature u procesima prerade nafte kreću se od niskih temperatura (npr. destilacija vazduha -200 °C) do izuzetno visokih temperatura u reaktorima za gasifikaciju (oko 1500 °C).

Rafinerije nafte pripadaju oblasti industrije sa značajnom potrošnjom energije za potrebe proizvodnog procesa. Najviše se potroši energije u procesima grejanja i hlađenja. Pri procesu prerade nafte u rafinerijama se potroši oko 93 % energije za proizvodnju vodene pare i hlađenje procesnih postrojenja. Jedinice s pogonskim motorima (pumpe, kompresori, ventilatori, mešalice i dr.) su drugi najveći potrošači sa udelom od 5 % u potrošnji energije. Grejanje, hlađenje i rasveta postrojenja ima udeo manji od 2 % u ukupnoj potrošnji energije u rafinerijama.

U tabeli 1. prikazan je udeo pojedinih procesa i postrojenja u ukupnoj potrošnji energije u rafinerijama nafte u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD).

Tabela 1. Udio procesa i postrojenja u ukupnoj potrošnji energije u rafinerijama nafte u SAD [1]

Proces	Udeo u potrošnji energije rafinerije, %
Atmosferska destilacija	25,79
Vakuum destilacija	9,60
Visbrejking	0,04
Koksovanje	0,27 ÷ 4,61
Katalitičko krekovanje	7,66
Katalitičko hidrokrekovanje	4,41
Katalitička hidrodesulfatizacija	18,83
Katalitičko reformisanje	15,13
Alkilacija	2,14 ÷ 3,84
Proizvodnja etera	0,52 ÷ 1,34
Izomerizacija	1,09
Proizvodnja mazivih ulja	4,40

U rafinerijama nafte više od 70 % energije se troši na različite toplotne procese i na procese hlađenja, a oko 30 % ovih toplotnih tokova gubi se na kraju procesa u vidu otpadne toplote. Jasno je da otpadna toplota predstavlja potencijal koji je potrebno iskoristiti na odgovarajući način primenom adekvatnog tehničkog rešenja.

### 3. POTENCIJAL OTPADNE TOPLOTE U RAFINERIJAMA NAFTE I TEHNOLOGIJE ZA ISKORIŠĆENJE OTPADNE TOPLOTE

U sistemima za proizvodnju i transport toplotne energije značajna količina toplote se gubi kroz zidove uređaja, u vidu otpadnih gasova i kao toplota sadržana u otpadnim vodama. Ovi toplotni tokovi se najčešće smatraju viškom, pa se kao takvi nepovratno gube na kraju procesa i u suštini predstavljaju otpadnu toplotu. Procene su da se 63 % potrošnje primarne energije u svetu gubi tokom procesa sagorevanja i prenosa toplotne energije [3]. Veliki deo ove toplote se može iskoristiti primenom raznovrsnih tehnologija. Međutim, izazovi povezani sa iskorišćenjem otpadne toplote su njena pojava u različitim oblicima, povremena dostupnost, nedovoljni temperaturni nivoi, i potreba za prenosom toplote od izvora otpadne toplote do potencijalne lokacije za njeno iskorišćenje. Ovi tehnički aspekti, između ostalog, utiču na ekonomsku održivost i na investicione rizike.

Koja će se tehnologija koristiti i koja će biti namena iskorišćene otpadne toplote zavisi od količine dostupne energije i od njenog temperaturnog nivoa. Generalno, postoje četiri kategorije otpadne toplote koje se prema agregatnom stanju i nivou temperature mogu podeliti na [4]:

- tečnosti od 50 do 300 °C,
- dimni gasovi od 150 do 800 °C,
- parni i procesni gasovi od 100 do 250 °C, i
- para od 80 do 500 °C.

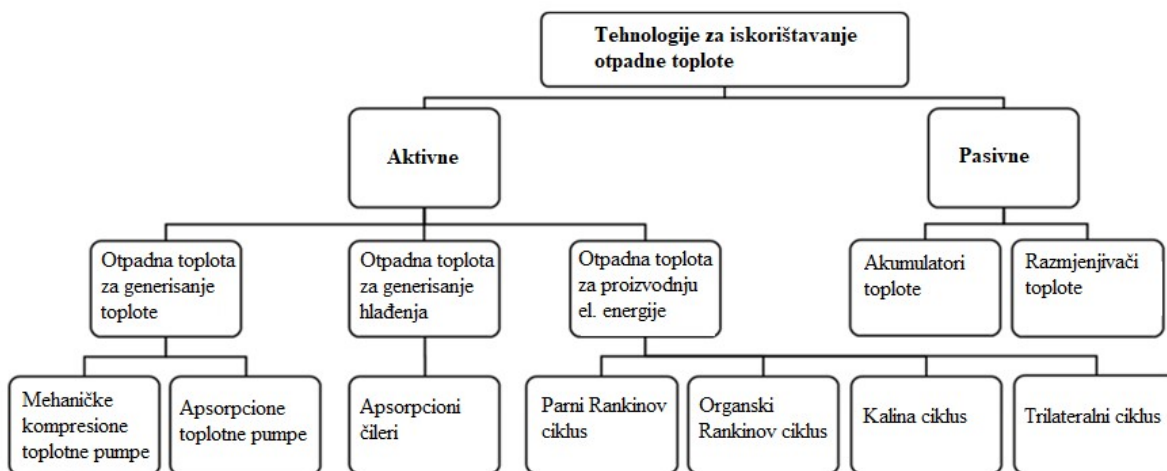
Izbor odgovarajuće tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote zavisi, kako od količine raspoložive toplote i njene temperature tako i od prirode izvora i potreba za toplotom u procesu.

Najekonomičnije je korišćenje toplote direktnom ponovnom upotrebom i primenom razmenjivača toplote. Raznovrsnost izvora otpadne toplote, dostupnih količina i temperaturnih nivoa, uslovalo je razvoj velikog broja tehnologija za njeno iskorišćenje koje se mogu kategorizovati na pasivne i aktivne tehnologije [5]. Ako je predviđeno korišćenje toplote direktno na istoj ili nižoj temperaturi, tehnologija je pasivna. Aktivnim tehnologijama nazivaju se sve one tehnologije iskorišćenja otpadne toplote kojima se toplota pretvara u drugi oblik energije ili se podiže njen temperaturni nivo. Najčešće korišćene tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote na istom ili nižem temperaturnom nivou (pasivne tehnologije) su razmenjivači toplote i akumulatori toplote. Aktivne tehnologije se mogu podeliti u tri grupe:

- tehnologije za generisanje toplote,
- tehnologije za generisanje hlađenja, i
- tehnologije za proizvodnju električne energije.

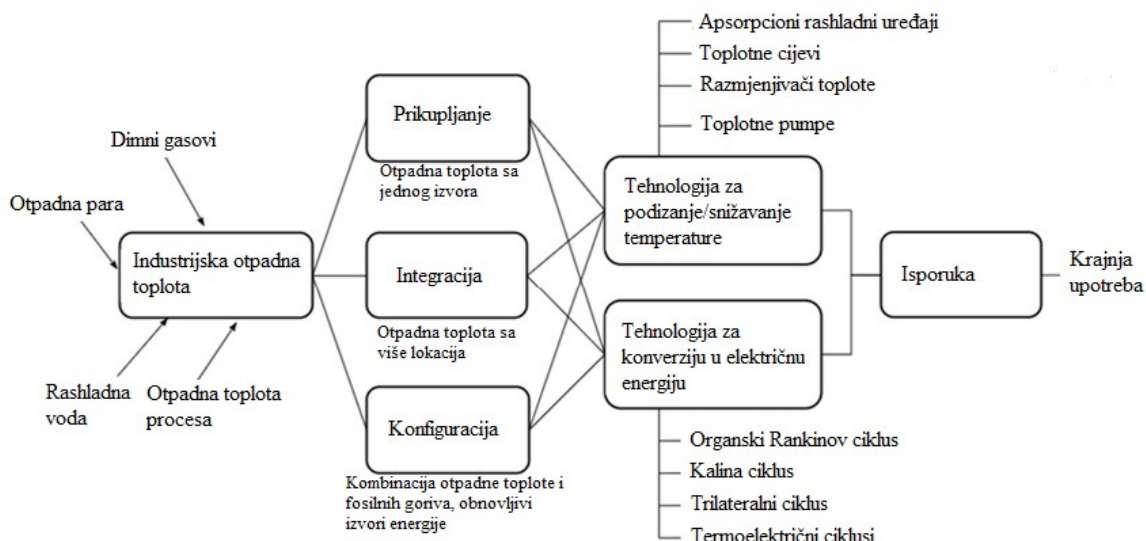
Tipični predstavnici aktivnih tehnologija su mehaničke i apsorpcione toplotne pumpe, apsorpcioni čileri, Rankinov i Kalina ciklusi.

Na slici 1. prikazana je kategorizacija tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote.



Slika 1. Kategorizacija tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote [5]

Tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote mogu se karakterizovati ne uzimajući u obzir temperaturni nivo i tu su podele izvršene na osnovu toga da li se otpadna toplota pretvara u drugi oblik energije ili ne. Prema ovoj kategorizaciji, toplotna pumpa, razmenjivači toplote, kotlovi za iskorišćenje otpadne toplote i rashladni ciklusi predstavljaju tipične direktne sisteme za rekuperaciju toplote, dok organski Rankinov ciklus, Kalina ciklus, trilateralni ciklus i drugi, predstavljaju indirektno tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote kod kojih se toplota koristi za generisanje električne ili mehaničke energije (slika 2.).



Slika 2. Tokovi otpadne toplote od izvorišta do krajnjih korisnika [6]

U nastavku će biti prezentovane neke od tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote koje se najviše primenjuju u rafinerijama nafte.

Za iskorišćenje otpadne toplote u rafinerijama nafte relativno veliku primenu imaju razmenjivači toplote. To su uređaji koji se koriste za prenos toplote između dva ili više fluida koji su dostupni na različitim temperaturama kako bi se zadovoljili tehnički zahtevi industrijskih procesa i procesa proizvodnje. Industrijski razmenjivači toplote najčešće se klasifikuju prema:

- procesima prenosa toplote,
- konstrukciji,
- stepenu kompaktnosti površina,
- nazivnom protoku,
- načinu prolaza fluida kroz razmenjivač,
- agregatnom stanju fluida između kojih se vrši razmena toplote, i
- mehanizmu prenosa toplote.

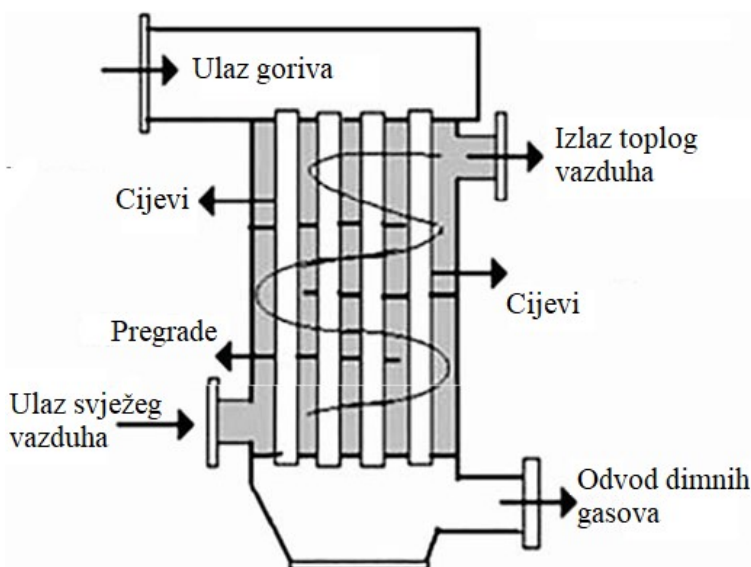
Prema procesima prenosa toplote, razmenjivači toplote se mogu podeliti na razmenjivače sa direktnim kontaktom fluida (vlažne i suve rashladne kule) i razmenjivače sa indirektnim kontaktom

fluida (rekuperatore, regeneratore i razmenjivače sa fluidizovanim slojem). Pored ove klasifikacije, najčešća podela razmenjivača toplote je prema njihovoj konstrukciji.

U rafinerijama nafte temperaturni opseg otpadne toplote najčešće se kreće od 100 do 250 °C. Za iskorišćenje otpadne toplote u rafinerijama nafte najčešće se koriste sledeći tipovi razmenjivača toplote: cevni razmenjivači toplote (dobošasti, cevni razmenjivači toplote tipa cev u cev), pločasti razmenjivači toplote, regenerativni razmenjivači toplote, ekonomajzeri i vazdušni predgrejači. U zavisnosti od vrste radnog medijuma, temperaturnog režima i drugih parametra proizvodnog procesa vrši se izbor razmenjivača toplote.

Ekonomajzeri su cevni razmenjivači toplote koji se uglavnom koriste za rekuperaciju otpadne toplote iz srednjih i niskih temperaturnih izvora. Najčešće se primenjuju za rekuperaciju toplote i zagrevanje napojne vode generatora pare ili kotlova. Njihovom primenom moguće je ostvariti uštedu u potrošnji goriva od 5 do 10 % uz period povrata investicije manji od dve godine.

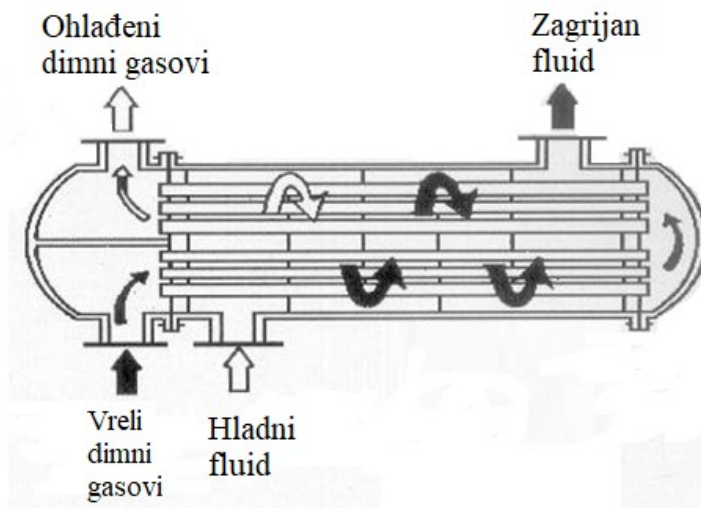
Vazdušni predgrejači se uglavnom koriste za rekuperaciju otpadne toplote niskih i srednjih temperatura iz otpadnih gasova gasne turbine, parne turbine, kotlova i peći. Na slici 3. prikazan je predgrejač vazduha sa cijevima.



Slika 4. Predgrejač vazduha sa cevima

Zbog nepravilnog rada kotla i loše razmene toplote, temperatura dimnih gasova na izlazu iz kotla je često iznad propisane za određenu vrstu kotlova. Ukoliko je temperatura dimnih gasova, iznad 200 °C, toplota dimnih gasova mogla bi da se iskoristi za zagrevanje vode ili vazduha za potrebe grejanja. Temperatura dimnih gasova na izlazu iz kotla zavisi od vrste goriva, odnosno sadržaja štetnih elemenata u gorivu. Za svako gorivo postoji minimalna temperatura dimnog gasa na izlazu iz kotla koja je obično za oko 10 °C viša od temperature kondenzacije (tzv. tačke rose) kiselina. Kod

prirodnog gasa ova temperatura je 95 °C, kod lakog lož ulja 140 °C, a kod mazuta 160 do 180 °C. Na slici 4. prikazan je način iskorišćenja otpadne toplote dimnih gasova za grejanje hladnijeg radnog medijuma (voda ili vazduh).



*Slika 4. Korišćenje otpadne toplote dimnih gasova za grejanje hladnijeg radnog medijuma*

Kotlovi za iskorišćenje otpadne toplote dimnih gasova imaju relativno veliki uticaj na smanjenje potrošnje toplotne energije u rafinerijama nafte. Ova tehnologija je pogodna za rekuperaciju otpadne toplote srednjeg i visokog temperaturnog nivoa i generisanje pare. Kotlovi za iskorišćenje otpadne toplote dimnih gasova koriste toplotu dimnih gasova koji nastaju prilikom procesa sagorevanja ili struju dimnih gasova za proizvodnju vrelе vode ili zasićene pare. Na osnovu ekonomskih i zakonskih činjenica, kotlovi za iskorišćenje otpadne toplote u velikom broju nalaze primenu u kombinaciji sa gasnim turbinama i kogeneracionim modulima. Najširu primenu imaju dve vrste kotlova za iskorišćenje otpadne toplote dimnih gasova: kotlovi za iskorišćenje otpadne toplote dimnih gasova bez dodatnog ložišta i kotlovi proizvođači vrelе vode ili pare koji koriste otpadnu toplotu i ložište.

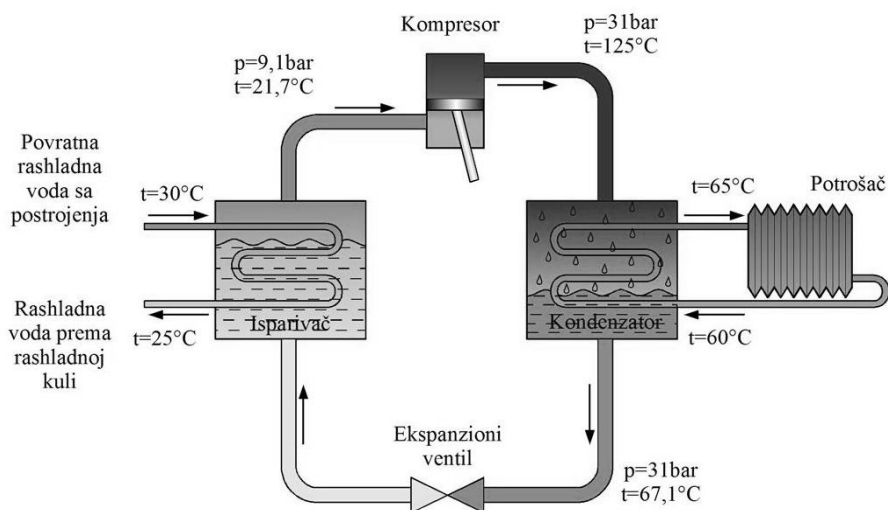
Regenerativni i rekuperativni gorionici, smanjuju potrošnju energije iskorišćenjem otpadne toplote iz vrelih dimnih gasova nastalih u procesu sagorevanja. Regenerativni gorionici se obično sastoje od dva gorionika koji rade naizmenično. Kompleksna konstrukcija i visoka investicija su najveća ograničenja primene ove tehnologije. Gorionici sa rekuperacijom toplote se češće primenjuju. Konstruisani su tako da je površina razmenjivača toplote postavljena na sam gorionik.

Razmenjivači na gorioniku mogu biti izvedeni na različite načine (rebra, žljebovi, cevi) sa osnovnim ciljem prikupljanja toplote iz dimnih gasova i njenog korišćenja za predgrevanje vazduha neophodnog za sagorevanje. Predgrevanjem vazduha postiže se bolje sagorevanje i viša temperatura plamena na izlazu iz mlaznice gorionika što rezultira povećanjem ukupne efikasnosti procesa.

Pored prethodno opisanih tehnologija koje se klasifikuju kao pasivne, postoje tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote koje funkcionišu po principu termodinamičkih ciklusa. Ovim tehnologijama moguće je povećati temperaturni nivo dostupne otpadne toplote, generisati hlađenje ili generisati električnu energiju.

Uzimajući u obzir temperaturni interval sa najvećom količinom otpadne toplote koja je dostupna u rafinerijama nafte ona se najjednostavnije može iskoristiti primenom neke od tehnologija koje funkcionišu na termodinamičkom principu. Za iskorišćenje otpadne toplote najčešće primenjivane tehnologije koje rade na termodinamičkom principu su: toplotna pumpa, Rankinov ciklus, Kalina ciklus i trilateralni ciklus.

Raznolikosti izvora otpadne toplote i opsega temperatura usloveli su razvoj različitih tipova industrijskih toplotnih pumpi koje mogu biti klasifikovane na različite načine. Na primer, prema vrsti pogonske energije na pumpe pogonjene mehaničkom pogonskom energijom i one pogonjene toplotom, prema vrsti procesa na kompresione, ejektorske i apsorbacione, prema vrsti ciklusa na one koje rade po otvorenom ili one koje rade po zatvorenom ciklusu, prema vrsti fluida, prema izvoru toplote i dr. Na slici 5. prikazana je šema rada toplotne pumpe sistema voda-voda.



Slika 5. Šema rada toplotne pumpe [7]

Rankinov ciklus se često koristi kao efikasan način za iskorišćenje otpadne toplote niskog temperaturnog nivoa koja se pojavljuje u rafinerijama nafte. U ove svrhe, koristi se Rankinov ciklus sa organskim fluidom (ORC) ili ugljovodonikom kao radnom materijom, kojim se zbog relativno niske temperature isparavanja može iskoristiti otpadna toplota niskoentalpijskih izvora toplote. Organskim Rankinovim ciklusom može se iskoristiti otpadna toplota u rasponu od 80 do 350 °C za generisanje električne energije.



Kalina ciklus je termodinamički ciklus za pretvaranje toplotne energije u mehaničku snagu sličan Rankinovom ciklusu, s tim da je radni fluid binarna smeša. Razlika između Kalina ciklusa i Rankinovog ciklusa je ta da temperatura ne ostaje konstantna tokom promene agregatnog stanja u isparivaču što omogućava veći stepen rekuperacije toplote. Na osnovu iskustava u praksi, postoje različita mišljenja stručnjaka da li je ekonomski isplativiji ORC ili Kalina ciklus.

Trilateralni ciklus (TLC) je još uvek u fazi tehničkog razvoja i nedovoljno poznata tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote, za razliku od Kalina ciklusa i ORC-a. Komponente trilateralnog ciklusa su iste kao u ORC sistemu, osim što je radna tečnost na ulazu u ekspander u fazi zasićene tečnosti, a ne nezasićene, pregrejane ili superkritične pare kao kod ORC-a. U eksploatacionim uslovima vršeno je poređenje trilateralnog ciklusa i ORC-a i generalni zaključak je da trilateralni ciklus ima bolje performanse. Istraživanja pokazuju da je na temperaturi otpadne toplote od 90 °C, efikasnost trilateralnog ciklusa u odnosu na ORC veća za 14 %.

#### **4. ZAKLJUČAK**

Najčešće korišćeni pristup za povećanje energetske efikasnosti u rafinerijama nafte je smanjenje potrošnje toplotne energije. Postoji više različitih pristupa za smanjenje potrošnje toplotne energije, a jedan od najprihvatljivijih je korišćenje otpadne toplote. Generalno gledano, otpadna toplota u rafinerijama nafte predstavlja značajan resurs, samo je pitanje isplativosti investicije u sistem koji je potrebno izgraditi da bi se taj potencijal iskoristio. Ukoliko ne postoji ili nije opravdano korišćenje otpadne toplote u samom proizvodnom procesu, ona se može koristiti za grejanje objekta.

Korišćenjem otpadne toplote u rafinerijama nafte smanjuje se potrošnja goriva za proizvodnju toplotne energije, a ujedno i količina gasova koji se emituju u atmosferu. Uzevši u obzir specifičnosti procesa prerade nafte i naftnih derivata u rafinerijama, kao i raznovrsnost izvora otpadne toplote, dostupnih količina i temperaturnih nivoa razmatrane su tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote. Prezentovane su neke od tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote koje se najviše primenjuju u rafinerijama nafte. Izvršeno je njihovo poređenje, navedene su njihove prednosti i nedostaci. Takođe, prikazani su konkretni rezultati koji se postižu korišćenjem otpadne toplote u rafinerijama nafte.

#### **LITERATURA**

- [1] Dugić, P., Botić, T., Petrović, Z.: Tehnologija prerade nafte, Tehnološki fakultet, Banjaluka, 2017.
- [2] Simić, S., Orašanić, G., Stanojević, M., Milić, D.: Energetska efikasnost u rafinerijama nafte sa posebnim osvrtom na toplotnu energiju, SMEITS Beograd, 32. Međunarodni kongres o procesnoj industriji, Procesing 2019., Beograd, 30-31.05.2019., str. 183-188.

- [3] Cullen, J., Allwood, J.: Theoretical efficiency limits for energy conversion devices, *Energy*, Vol. 35, 2010., pp. 2059-2069.
- [4] Mahmoudi, A., Fazil M., Morad, M. R.: A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 143, 2018., pp. 660-675.
- [5] Bruckner, S., Liu, S., Miro, L., Radspieler, M., Cabeza, F. L., Lävemann, E.: Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, *Applied Energy*, Vol. 151, 2015., pp. 157-167.
- [6] Huang, F., Zheng, J., Baleynaud, M. J., Lu, J.: Heat recovery potentials and technologies in industrial zones, *Journal of the Energy Institute*, Vol. 90, Issue 6, 2017., pp. 951-961.
- [7] Simić, S., Džudželija, Ž., Ganilović, D.: Iskorišćenje otpadne toplote pomoću toplotne pumpe u Rafineriji ulja Modriča, SMEITS Beograd, 28. Međunarodni kongres o procesnoj industriji, *Procesing 2015.*, Indija, 04-05.06.2015., str. 84-89.

# CONSIDERATION OF THE POSSIBILITY OF USING WASTE HEAT IN REFININERIES

Stojan Simić<sup>1</sup>, Krsto Batinić<sup>1</sup>, Davor Milić<sup>1</sup>, Goran Orašanić<sup>1</sup>, Srđan Vasković<sup>1</sup>, Jovana Blagojević<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Mašinski fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina<sup>1</sup>*

**Abstract:** *The processing of oil and oil derivatives in refineries consumes a relatively large amount of thermal energy for the needs of production plants and auxiliary of these plants. Its consumption can be reduced by applying various technical-technological solutions and organizational measures. One of the most commonly used solutions is the use of waste heat produced in energy and process refineries.*

*The use of waste heat generated during the processing of oil and petroleum products can significantly affect the reduction of thermal energy consumption during the production process in refineries. The paper presents experiences and specific results achieved by using waste heat in refineries. The use of waste heat going to reduce consumption of fuel for the production of thermal energy, and at the same time the amount of gases emitted into the atmosphere.*

**Keywords:** refineries, heat energy, waste heat, utilization.