

N. Čehajić, S. Eljšan, S. Halilčević, J. Fejzić\*

# OKOLINSKI I TERMODINAMIČKI PRIHVATLJIVI RADNI FLUIDI U ORGANSKOM RANKINOVOM CIKLUSU ZA UPOTREBU BIOMASE

UDK 620.95:504.06  
PRIMLJENO: 23.11.2017.  
PRIHVAĆENO: 5.10.2018.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License



**SAŽETAK:** Potpuno halogenizirani klorofluorouglicji (CFC) su i pored dobrih termodinamičkih obilježja, stabilnosti i netoksičnosti, eliminirani iz upotrebe. Zbog sadržaja jednog atoma klora u molekulu, upotreba hidroklorofluorouglikovodika (HCFC) reducirana je u mnogim europskim zemljama. Upotreba djelomično halogeniziranih hidrofluorouglijika (HFC), u čijim molekulama nema atoma klora, također, je zbog povećane zapaljivosti, u velikoj mjeri ograničena. U radu je uspostavljena metodologija izbora radnih fluida ili mješavina za upotrebu u kogeneracijskom ORC postrojenju na biomasu koja će, pored termodinamičkih, uzeti u obzir i sigurnosne i okolinske kriterije prihvatljivosti radnog fluida. Analizirani su učinci termodinamičkih obilježja predizabranih radnih fluida na performanse kogeneracijskog ORC postrojenja, te su termodinamička obilježja radnih fluida optimizirana pomoću eksergijske učinkovitosti ORC kao funkcije cilja, upotrebom genetskog algoritma. Optimalne vrijednosti eksergijske učinkovitosti, veličina komponenti i eksergijskih gubitaka kogeneracijskog ORC postrojenja za uporabu energije biomase su komparirane i analizirane pod istim uvjetima izvora topline i unaprijed definiranim graničnim uvjetima. Eksergijska analiza kogeneracijskog ORC pokazuje da je za iskorištenje energije iz biomase od izabranih radnih fluida najpogodniji p-ksilen, jer u odnosu na undekan, MDM (OMTS) i D4 (OMCTS) ima najveću vrijednost eksergijske učinkovitosti, ali i zahtijeva najmanje dimenzije komponenti ORC (turbine i kondenzatora).

**Ključne riječi:** organski Rankinov ciklus, biomasa, zaštita okoliša i zdravlja, radni fluid, kogeneracija, eksergijska učinkovitost

## UVOD

U cilju racionalnijeg gospodarenja energijom kao ključnom pretpostavkom održivog razvoja, kao i povećanju industrijske konkurentnosti i zaštite okoliša, energetska politika EU-a teži ka decentraliziranoj proizvodnji električne energije

je, odnosno na lokaciji potrošača. Na taj način izbjegavaju se troškovi zbog gubitaka u prijenosu i distribuciji električne energije, a značajno se smanjuju i investicijski troškovi u javnu mrežu i distribuciju električne energije (Karl, 2006.).

Učinkovitije tehnologije koje mogu omogućiti maksimalno iskorištenje primarne energije u svim energetske procesima te pored ekonomskih ostvariti i okolinske benefite jesu kogeneracijska postrojenja. Za istu količinu primarne energije (fosilnog goriva, vodika, biomase, industrijskog ili poljoprivrednog otpada) kogeneracij-

\*Dr. sc. Nurdin Čehajić, (nurdin.cehajic@epbih.ba), JP Elektroprivreda BiH, Termoelektrana Tuzla, dr. sc. Sandira Eljšan, red. prof., (sandira.eljsan@untz.ba), Mašinski fakultet Tuzla, dr. sc. Suad Halilčević, red. prof., (suad.halilcevic@untz.ba), Fakultet elektrotehnike u Tuzli, mr. sc. Jasmin Fejzić, (jasmin.fejzic@epbih.ba), JP Elektroprivreda BiH, Termoelektrana Tuzla.

sko postrojenje isporučit će u nekim slučajevima i do 40 % više električne i toplinske energije nego sustav s odvojenom opskrbbom. S druge strane, treba imati na umu da decentralizirana postrojenja imaju veće specifične investicijske troškove i prepreka im je raspoloživi raspon snaga, a što je uvjetovano trenutnom razinom tehnološkog razvoja. Kao minimalni preduvjet isplativosti kogeneracije najčešće se definira postojanje kontinuirane potrebe za toplinskom energijom u trajanju od najmanje 4.500 sati godišnje (*TURBODEN, Clean Energy Ahead, Turboden Biomass Solutions, 2012.*).

Dobrim energentom za upotrebu u kogeneracijskom ORC postrojenju pokazuje se biomasa koja zanemarivo opterećuje atmosferu s ugljičnim dioksidom ( $\text{CO}_2$ ), jer je količina emitiranog ugljičnog dioksida prilikom izgaranja biomase jednaka količini ugljičnog dioksida koja je neophodna za rast biljke, pod uvjetom da su sječa i prirast drvne mase u održivom odnosu. Biomasa je široko dostupna, a čine je poljoprivredni, šumski, drvni, komunalni i industrijski otpad. Toplinsku i električnu energiju dobivenu iz ORC i drugih kogeneracijskih postrojenja na biomasu je najbolje koristiti u malim lokalnim zajednicama gdje postoji određena količina biomase, jer je gustoća energije biomase relativno mala, što povećava troškove transporta (*Čehajić, 2014.*).

Kako je izbor radnog fluida jedan od najvažnijih zadataka kod dizajna toplinskog stroja zasnovanog na ORC, potrebno je uspostaviti metodologiju izbora radnog fluida ili mješavine, a koja će uzeti u obzir: sadržaj atoma klora u molekulu, temperaturu samozapaljenja, temperaturu izvora topline i kondenzatora, gustoću pare, izgled krivulje zasićenja pare (T-s dijagram), tlak i temperaturu radnog fluida u isparivaču ORC modula. Na ovaj način izabrani radni fluidi ili mješavine trebaju osigurati najveću vrijednost eksergijske učinkovitosti kogeneracijskog ORC postrojenja, što manje dimenzije komponenti ORC, siguran i ekonomičan pogon i mali utjecaj na okoliš.

Za izabranu skupinu fluida izračunat će se veličine stanja, neophodne prilikom izvršavanja operacija modeliranja i optimizacije parametara kogeneracijskog ORC postrojenja upotrebom

genetskog algoritma (*NIST Chemistry WebBook, <http://webbook.nist.gov/chemistry/>*).

Brojni istraživači koristili su razne metode za pronalazak odgovarajućeg radnog fluida i optimizaciju termodinamičkih parametara ORC zasnovanog na niskotemperaturnim i srednjotemperaturnim izvorima topline, pa i biomasi kao takvoj. Istražujući radne fluide, predložena je metoda za pronalazak odgovarajućeg radnog fluida za ORC zasnovan na biomasi (*Dresher-Bruggerman, 2007.*). Istraženi su sigurnosni, fizički i okolinski parametri postojećih i alternativnih rashladnih fluida (*Calm, 2011.*). Analiziran je utjecaj benzena, toluena, p-ksilena, R113 i R123 na učinkovitost ORC za iskorištenje otpadne topline (*Hung, 2001.*). Istraživan je potkritični ORC sa 28 radnih fluida za iskorištenje otpadne topline (*Liu, 2012.*). Usporedno su istražene termodinamičke performanse ORC s regeneratom s  $\text{NH}_3$ , R134a, R22,  $\text{iC}_4\text{H}_{10}$ , R152a, R143a,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , i  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  i  $\text{nC}_5\text{H}_{12}$  na osnovi drugog zakona termodinamike. Pokazano je kako vrijednost ulaznog tlaka u turbinu utječe na eksergijske gubitke na raznim komponentama sustava, ali i na eksergijsku učinkovitost sustava (*Kim, 2013.*). Analiza je obuhvatila industrijska i CHP postrojenja pogonjena biomasom i prirodnim plinom s primjenom za daljinsko grijanje (*Ertesvag, 2007.*), dok su Wang i sur. (*2012.*) analizirali utjecaj skupine radnih fluida i njihovih termodinamičkih obilježja na termičku i eksergijsku učinkovitost ORC za iskorištenje niskotemperaturne otpadne topline.

## IZBOR RADNOG FLUIDA

Izbor radnog fluida i optimizacija termodinamičkih parametara ORC za određeni izvor topline (biomasa, otpadna toplina, geotermalna i sunčeva energija) predstavlja složen i ključni problem. Pri izboru radnog fluida pored pregleda literature o postojećim radnim fluidima potrebno je uzeti u obzir okolišne, sigurnosne i termodinamičke kriterije, kao i kemijske trendove. Radni fluidi izabarni na osnovi navedenih kriterija mogu se uvesti u optimizaciju termodinamičkih i drugih performansi ORC, a komparativnom analizom dobivenih rezultata bira se najpovoljniji radni fluid, u ovisnosti o postavljenoj funkciji cilja.

## Utjecaj radnih fluida na okoliš i zdravlje

Mnogi radni fluidi koji imaju dobra termodinamička obilježja istovremeno negativno utječu na okoliš. Glavni parametri koji definiraju utjecaj radnog fluida na okoliš su:

- potencijal globalnog zatopljenja (engl. Global Warming Potential - GWP) i
- potencijal osiromašivanja ozonskog sloja (engl. Ozone Depletion Potential - ODP).

Potencijal globalnog zagrijavanja (GWP) opisuje utjecaj stakleničkog plina na klimatske promjene u odnosu na istu količinu ugljičnog dioksida, a s obzirom da je CO<sub>2</sub> uzet kao referentni plin, njemu je dogovorno dodijeljena vrijednost GWP-a 1. Ugljični dioksid koristi se kao referentna mjera jer ima najveći neto učinak na globalno zagrijavanje. Voda ima GWP od 0. GWP se računa za točno određeno vrijeme, a najčešće za 20, 100 i 500 godina i obvezno se navodi prilikom prikazivanja vrijednosti GWP-a.

Trošenje stratosferskog ozona (ODP) predstavlja stanjivanje stratosferskog ozonskog omotača, kao rezultat antropogenih emisija. Trošenje stratosferskog ozona negativno utječe na zdravlje ljudi, okoliš i prirodne resurse (*Skupina autora, 2002.*).

Klorofluorouglijci (CFC) su zbog oštećenja ozonskog sloja u Zemljinj atmosferi izbačeni iz upotrebe, a hidroklorofluorouglikovodici (HCFC) se u EU ne upotrebljavaju za nove uređaje od 2000. godine. Potpuna zabrana HCFC radnih fluida je od 2040. godine pa će u ovom radu fluidi iz ove skupine, uz ispunjavanje ostalih kriterija biti prihvatljivi za kogeneracijski ORC za iskorištenje energije biomase.

## Sigurnosni kriteriji

Radni fluid treba biti neotrovan, nezapaljiv i nekorozivan. Sigurnosni podaci u ovom radu uzimaju u obzir nižu razinu zapaljivosti i sigurnosnu klasifikaciju radnih fluida. Podatci o sigurnosnim aspektima radnih fluida uzeti su od Calma (*2011.*).

Prema ASHRAE standardu 34, slovo A odnosi se na "niže" toksičnosti, a slovo B znači veću toksičnost. Brojevi 1, 2 i 3 odnose se na širenje plame-

na, broj 1 znači nema širenja plamena, broj 2 znači manju zapaljivost i broj 3 znači veću zapaljivost (Tablica 1); (*ASHRAE, 2008.*).

**Tablica 1. Sigurnosna klasifikacija radnih fluida**

**Table 1. Safety classification of working fluids**

	Niža toksičnost	Viša toksičnost
Viša zapaljivost	A3	B3
Niža zapaljivost	A2	B2
Nema širenja plamena	A1	B1

U nekim slučajevima skupina 2 označena je sa slovom L (kao A2L i B2L) i ovdje slovo L znači teže zapaljiv (*ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment, 2008.*).

Primjenjuju se i smjernice (*Europska direktiva 97/23/EC za opremu pod tlakom, 1997.*) prema kojoj se ne smiju koristiti radni fluidi koji imaju jedno od obilježja: eksplozivni, ekstremno zapaljivi, visoko zapaljivi, zapaljivi, vrlo toksični, toksični i oksidirajući.

Klasifikacija opasnih fluida definirana je primjenom sigurnosnih obrazaca za pojedini radni fluid (engl. Material Safety Data Sheet - MSDS), a na osnovi Risk-fraza koje karakteriziraju pojedini fluid.

Temperatura samozapaljenja je najniža temperatura potrebna da započne samoodrživo izgaranje neke tvari u odsutnosti iskre ili plamena. Vrijednosti temperatura samozapaljenja mogu nešto varirati, a što ovisi o upotrijebljenoj testnoj metodi (*Generalić, 2017.*).

## Termodinamički kriterij

Termodinamički kriteriji uzimaju u obzir sljedeće:

- graničnu temperaturu primjene radnog fluida
- minimalni granični tlak u kondenzatoru ORC
- maksimalni tlak pare radnog fluida u isparivaču ORC.

Izgaranje biomase u termouljnom kotlu kogeneracijskog ORC postrojenja praćeno je dimnim plinovima koji predaju toplinu termičkom ulju, čija je temperatura u ovom radu postavljena na 288 °C. Uzimajući u obzir raspon temperatura pri kojima radni fluid može tehnički biti upotrebljiv, potrebno je definirati granične uvjete za maksimalnu temperaturu radnog fluida u ORC procesu, poštujući načela prijenosa topline i energetske transformacije u turbini.

Za postavljenu graničnu temperaturu kondenzacije za svaki radni fluid potrebno je računati tlak kondenzacije i ako je dobivena vrijednost manja od 0,02 bar, radni fluid eliminira se prema tom kriteriju. Tlak kondenzacije od 0,02 bar postavlja se zbog činjenice da vakuumske pumpe u primjeni ne mogu postići tlak manji od 0,02 bar.

Maksimalni tlakovi radnih fluida su različiti i treba izračunati vrijednosti maksimalnog tlaka isparavanja koje može postići svaki radni fluid s obzirom na temperaturu izvora topline i graničnu temperaturu radnog fluida prema jednadžbi stanja. Kako radni tlakovi moraju biti u granicama prihvatljivim za tehničku upotrebu fluida i kako se mora ostvariti minimalna temperaturna razlika neophodna za prijenos topline, potrebno je definirati granične uvjete za vrijednosti temperatura u kružnom ciklusu.

Na temelju navedenog, za izbor radnih fluida za upotrebu u kogeneracijskom ORC zasnovanom na biomasi definiraju se sljedeći kriteriji prihvatljivosti:

### 1. Kriterij prihvatljivosti radnih fluida s obzirom na utjecaj na okoliš i zdravlje:

$$\begin{aligned} \text{GWP} &< 2150 \\ \text{ODP} &= 0 \end{aligned} \quad [1]$$

### 2. Sigurnosni kriterij:

Radni fluidi trebaju imati temperaturu samozapaljenja veću od temperature izvora topline (termičko ulje) umanjenu za 5°C, odnosno:

$$t_{\text{samozap}} > t_{\text{ulja max}} - 5 \text{ °C} \quad [2]$$

Radni fluidi koji ne sadrže sljedeće vrste rizika upotrebljivi su za ORC: R-2, R-3, R-7, R-8, R-9, R11, R-12, R-15, R-17, R-23, R-24, R-25, R-26, R-27, R-28, R-39 i R-48.

### 3. Termodinamički kriterij:

Maksimalna temperatura radnog fluida pri minimalnoj temperaturi termičkog ulja mora biti manja za minimalnu temperaturnu razliku neophodnu za prijenos topline:

$$t_{\text{rf max}} \leq t_{\text{ulja min}} - 8 \text{ °C} \quad [3]$$

Da bi se izbjegao mali entalpijski pad u turbini, razlika kritične temperature i temperature kondenzacije radnog fluida treba biti:

$$t_{\text{rf max}} - t_{\text{kond}} \geq 60 \text{ °C} \quad [4]$$

Za prihvaćenu temperaturu kondenzacije od 88 °C tlak kondenzacije (minimalni tlak) radnih fluida treba biti:

$$p_{\text{kond}} \geq 0,02 \text{ bar} \quad [5]$$

Uzimajući u obzir vrijednosti temperature izvora topline, kritične temperature radnog fluida i maksimalne temperature radnog fluida prema jednadžbi stanja, moguća su tri slučaja:

$$t_{\text{ulja}} \leq t_{\text{rf krit}} \quad [6]$$

$$t_{\text{rf kri}} < t_{\text{ulja}} < t_{\text{rf max}} \quad [7]$$

$$t_{\text{ulja}} > t_{\text{rf krit}} \quad [8]$$

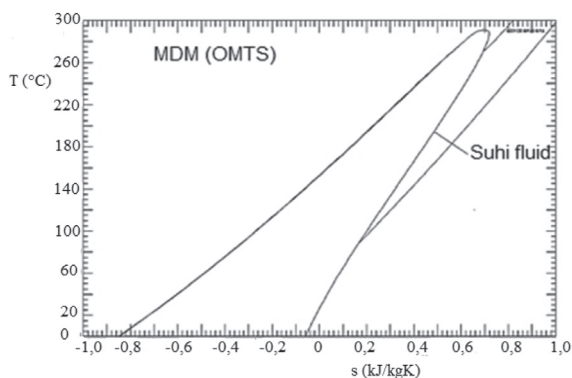
U sva tri slučaja nužno je ostvariti minimalnu temperaturnu razliku između navedenih temperatura kako bi se ostvario prijenos topline s termičkog ulja kao nosioca topline na radni fluid.

U Tablici 2. dani su neki od potencijalnih radnih fluida s osnovnim obilježjima, a koji su zadovoljili postavljene kriterije za korištenje u potkritičnom kogeneracijskom ORC postrojenju za upotrebu toplinske energije iz izgaranja biomase.

**Tablica 2. Predizabrani radni fluidi****Table 2. Preselected working fluids**

	Kemijska formula	Molna masa [kg/kmol]	$t_k$ [°C]	$P_k$ [bar]
P-ksilen	$C_8H_{10}$	106,16	343,02	35,32
Undekan	$CH_3-9(CH_2)-CH_3$	156,31	365,65	19,90
MDM (OMTS)	$C_8H_{24}O_2Si_3$	236,53	290,94	14,15
D4 (OMCTS)	$C_8H_{24}O_4Si_4$	296,62	313,35	13,32

Svi radni fluidi iz Tablice 2. ubrajaju se u suhe radne fluide, što znači da se ekspanzija u turbini završava u pregrijanom području. Na slici 1 prikazan je T-s dijagram za radni fluid MDM (OMTS - oktametiltrisiloksan), na kojem se vidi da mu je nagib krivulje zasićene pare pozitivan.

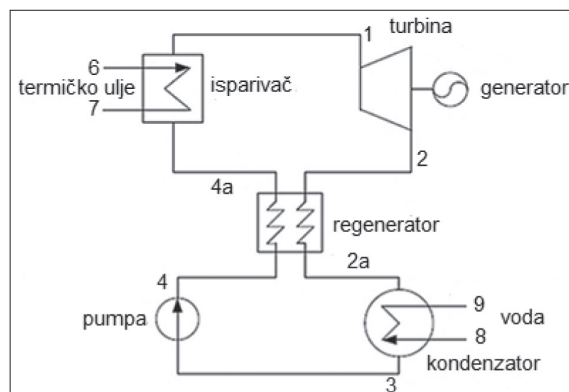
*Slika 1. T-s dijagram MDM (OMTS) radnog fluida**Figure 1. T-s diagram MDM (OMTS) of working fluid*

Ova činjenica važna je s aspekta uporabe regeneratora kao komponente ORC procesa koji se kod upotrebe suhih radnih fluida može koristiti.

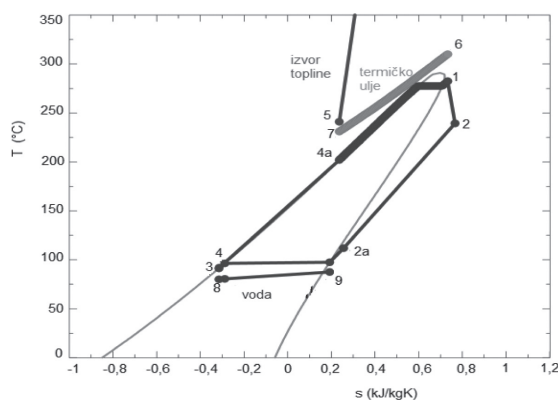
## MATEMATIČKI MODEL I METODE

Na slici 2. prikazan je ORC koji se sastoji se od isparivača, turbine, regeneratora, kondenzatora i pumpe. Ako je temperatura na izlazu iz turbine (točka 2) viša od temperature na izlazu iz pumpe (točka 4), može se koristiti unutarnji izmjenjivač topline (regenerator).

Ovaj izmjenjivač topline predstavljen je s dodatnim točkama stanja 2a i 4a na slici 2. Ostale točke stanja radnog fluida odgovaraju onima u jednažbama matematičkog modela.

*Slika 2. Referentni ORC proces s regeneratom**Figure 2. Referent ORC process with regenerator*

Na slici 3. prikazan je T-s dijagram radnog fluida MDM s pozitivnim nagibom krivulje zasićene pare s ucrtanim točkama stanja radnog fluida, vode i termičkog ulja. Točke stanja fluida sa slike 3. odgovaraju točkama stanja prikazanim na slici 2.

*Slika 3. T-s dijagram potkritičnog ORC s regeneratom**Figure 3. T-s diagram of subcritical ORC with regenerator*

Radni fluid napušta kondenzator kao zasićena tekućina (stanje u točki 3) i zatim se u pumpi komprimira do potkritičnog tlaka (točka 4). Radni fluid zagrijava se u regeneratu na račun ekspanzirane pare iz turbine i kao takav ulazi u isparivač (točka 4a). U isparivaču radni

fluid pri konstantnom tlaku preuzima toplinu od termičkog ulja koje se nalazi u zatvorenom primarnom krugu. Zagrijavanjem radnog fluida u isparivaču on prelazi u parnu fazu i kao suhozasićena para (točka 1) ulazi u turbinu, gdje nakon ekspanzije para dolazi u stanje 2 koje se nalazi u pregrijanom području. Nakon ekspanzije radni fluid ulazi u regenerator gdje mu se oduzima toplina na račun vlastitog zagrijavanja kada je u tekućoj fazi (stanje od 4 do 4a). Radni fluid u takvom stanju prolazi kroz kondenzator gdje mu se oduzima toplina, sve dotle dok ne postane zasićena tekućina (točka 3), čime se ciklus zatvara.

U idealnom procesu ekspanzija i sabijanje izvode se izentropski ( $s = \text{const.}$ ), a procesi isparavanja i kondenzacije su izobarni ( $p = \text{const.}$ ). U realnim procesima nastaju gubici pa je stupanj učinkovitosti ovih procesa manji od idealnog.

Zbog termodinamičkih nepovratnosti koje se javljaju u svakoj od komponenti, kao što je neizentropska ekspanzija, neizentropska kompresija i prijenos topline preko konačne razlike temperatura, primijenit će se metoda eksergijske analize za procjenu performansi kogeneracijskog ORC postrojenja za iskorištavanje topline nastale izgaranjem biomase.

Pri stalnom tlaku (proces 4 - 4a) radni fluid apsorbira toplinu termičkog ulja. Toplina prenesena s termičkog ulja na radni fluid računa se:

$$Q = \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_{4a}) \quad [9]$$

pa je protok radnog fluida:

$$\dot{m}_{rf} = \frac{Q}{h_1 - h_{4a}} \quad [10]$$

gdje su:  $Q$  (kJ) - količina topline,  $\dot{m}_{rf}$  (kg/s) - maseni protok radnog fluida,  $h_1$  (kJ/kg) i  $h_{4a}$

(kJ/kg) - specifične entalpije radnog fluida na ulazu u turbinu i isparivač, respektivno.

Maseni protok vode za grijanje određuje se:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_{rf} \cdot (h_{2a} - h_3)}{(h_{2v} - h_{1v})} \quad [11]$$

gdje su:  $\dot{m}_v$  (kg/s) - maseni protok vode, a  $h_{2a}$  (kJ/kg) i  $h_3$  (kJ/kg) - specifične entalpije radnog fluida u točkama 2a i 3,  $h_{2v}$  (kJ/kg) i  $h_{1v}$  (kJ/kg) - specifične entalpije tople vode na izlazu i ulazu kondenzatora, respektivno.

Eksergija topline na ulazu u ORC računa se prema izrazu:

$$E_{ulORC} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ulja}}\right) \cdot Q \quad [12]$$

gdje su:  $T_0$  (K) i  $T_{ulja}$  (K) temperature okoline i termičkog ulja,  $Q$  (kJ) - količina dovedene topline radnom fluidu u isparivaču.

Eksergija na izlazu ORC koja uzima u obzir i eksergiju tople vode računa se:

$$E_{izORC} = \eta_{el} \cdot \dot{m}_{rf} \cdot (h_1 - h_2) + \dot{m}_v \cdot (h_{2v} - h_{1v}) \quad [13]$$

Eksergijski gubitak ORC računa se kao razlika eksergija na ulazu i izlazu ORC:

$$I_{ORC} = E_{ulORC} - E_{izORC} \quad [14]$$

Eksergijski stupanj iskorištenja ORC određuje se prema izrazu:

$$\eta_{exiORC} = 1 - \frac{I_{ORC}}{E_{ulORC}} \quad [15]$$

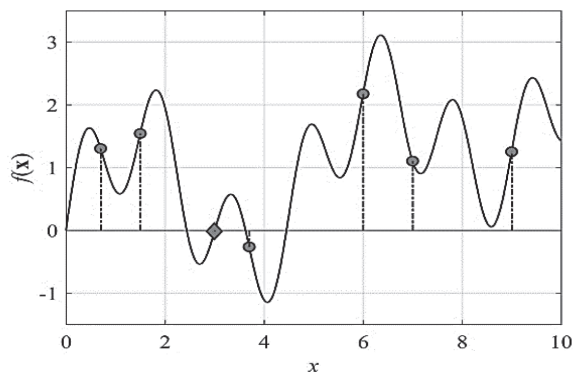
Utjecaj termodinamičkih obilježja radnih fluida iz Tablice 2 na eksergijsku učinkovitost kogeneracijskog ORC s regeneratorom analiziran je pod istim uvjetima izvora topline i drugim unaprijed definiranim uvjetima, zatim u Tablici 3.

**Tablica 3. Specifikacija ORC uvjeta****Table 3. Specification of ORC conditions**

Opis	Vrijednost
Temperatura termičkog ulja	278 °C
Temperatura izlazne vode iz kondenzatora	80 °C
Temperatura vode na ulazu u kondenzator	60 °C
Temperatura okoline	20 °C
Razlika pinč temperatura u kondenzatoru	8 °C
Razlika pinč temperatura u isparivaču	8 °C
Razlika pinč temperatura u regeneratu	8 °C
Dovedena količina topline u isparivač	1000 kJ/s
Izentropska učinkovitost turbine	0,85
Izentropska učinkovitost pumpe	0,65
Električna učinkovitost generatora	0,98

U ovom radu analizirani su utjecaj temperature i tlaka na ulazu u turbinu na eksergijsku učinkovitost kogeneracijskog ORC postrojenja, danog pomoću izraza [15]. Kako su upravljački promjenjive ulazna temperatura ( $t_1$ ) i ulazni tlak u turbinu ( $p_1$ ), za rješavanje optimizacijskog postupka potrebno je poznavati ovisnost između ulazne entalpije ( $h_1$ ) od ulaznog tlaka i temperature, odnosno  $h_1(t_1, p_1)$ . Ova vrijednost dobiva se pozivom NIST REFPROP funkcije. Kada su poznate sve upravljački promjenjive ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), moguće je izračunati vrijednost funkcije cilja  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Pri optimizaciji ORC postrojenja zanemarit će se pad tlaka u cijevima, kao i toplinski gubici u isparivaču, kondenzatoru, turbini i pumpi. Za optimizaciju eksergijske učinkovitosti ORC za potencijalne radne fluide iz Tablice 2. korišten je genetski algoritam s realnim brojevima. Genetski algoritam ulazi u skupinu metaheurističkih metoda koje se sve češće biraju za rješavanje konkretnih problema iz četiri glavna razloga, i to: jednostavnost primjene, fleksibilnost, odsutnost izvoda i izbjegavanje lokalnih optimuma. Prostor rješenja nekog problema stohastički se pretražuje, tako da

je omogućena dobra pretraga cijelog prostora, te se na taj način izbjegavaju lokalni optimumi (Deb, 2001.). Prostor pretrage realnih problema je najčešće nepoznat i veoma kompleksan s velikim brojem lokalnih optimuma. Primjer jednostavnog prostora pretrage prikazan je na slici 4.



Slika 4. Skup rješenja prilikom primjene stohastičke i klasične metode

Figure 4. Set of solutions in the application of stochastic and classic method

Na slici 4. krugovima su označena početna pogađanja neke metaheurističke metode, dok je deltooidom prikazana polazna točka klasične metode. Metaheuristička metoda (genetski algoritam) može pronaći približno optimalno rješenje primjenom svojih operacija.

Proces optimizacije počinje učitavanjem podataka i formiranjem početne populacije za koje se računaju vrijednosti funkcije cilja. Zatim slijedi operacija selekcije i formiranje bazena jedinki s kojim će se izvesti druge operacije genetskog algoritma. U tu svrhu prvo je potrebno izračunati vjerojatnost odabira svakog kromosoma pomoću izraza:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad [16]$$

gdje je:  $p_i$  - vjerojatnost odabira  $i$ -tog kromosoma. Nakon toga radi lakšeg razvrstavanja izračunava se kumulativna vjerojatnost.

Sljedeća operacija koja se provodi nad kromosomima je operacija ukrštavanja. Za potrebe optimizacije prihvaćena je vrijednost koeficijenta  $\eta_c = 5$ , vjerojatnost ukrštavanja  $p_c = 0,7$  i

generiran je proizvoljan broj  $u$  iz opsega  $(0,1)$ . Izračunava se  $\beta_q$ :

$$\beta_q = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & u \leq 0,5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & u > 0,5 \end{cases} \quad [17]$$

gdje je:  $\eta_c$  - indeks raspodjele kojim se kontrolira rasprostiranje potomaka po prostoru rješenja. Ovaj indeks uzima vrijednost iz opsega  $(1, 10)$ . Potomci (nove vrijednosti upravljačkih promjenjivih) formiraju se od proizvoljno izabranih roditelja  $p_1$  i  $p_2$ :

$$\begin{aligned} c_1 &= 0,5((1 + \beta_q)p_1 + (1 - \beta_q)p_2), \\ c_2 &= 0,5((1 - \beta_q)p_1 + (1 + \beta_q)p_2) \end{aligned} \quad [18]$$

Nakon operacije ukrštavanja slijedi operacija mutacije. Za operaciju mutacije prihvaćena je vjerojatnost od  $p_m = 0,1$  i proizvoljan broj  $r \in (0, 1)$ , te se izračunava  $\delta$  pomoću izraza:

$$\delta = \begin{cases} (2r)^{\frac{1}{\eta_m+1}} - 1 & r < 0,5 \\ 1 - (2(1-r))^{\frac{1}{\eta_m+1}} & r \geq 0,5 \end{cases} \quad [19]$$

gdje je:  $\eta_m$  - indeks raspodjele kojim se kontrolira rasprostiranje mutiranog niza od originalnog. Ovaj indeks uzima vrijednost iz opsega  $[10, 100]$ . Nakon dobivenog  $\delta$  moguće je izvršiti operaciju mutacije upotrebom sljedećeg izraza:

$$c' = c + (x_{\max} - x_{\min})\delta \quad [20]$$

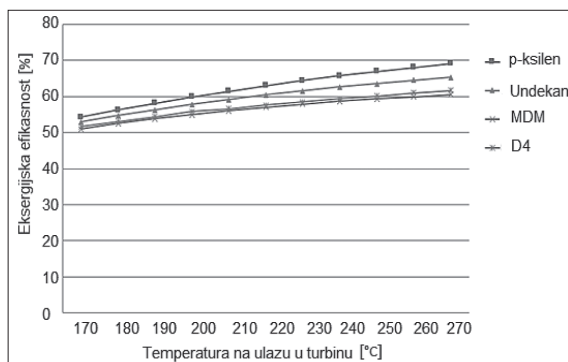
gdje su:  $x_{\max}$  i  $x_{\min}$  - gornje i donje ograničenje upravljački promjenjive, respektivno.

Nakon obavljenih svih operacija genetskog algoritma potrebno je izračunati vrijednost funkcije cilja (eksergijskog koeficijenta učinkovitosti ORC). Ako je zadovoljen kriterij zaustavljanja naći najbolje rješenje u novoj populaciji, u suprotnom nova populacija postaje trenutna populacija i algoritam se ponavlja.

## REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 5. prikazani su rezultati eksergijske učinkovitosti kogeneracijskog ORC sustava za

predizabrane radne fluide u ovisnosti o temperaturi radnih fluida na ulazu u turbinu.

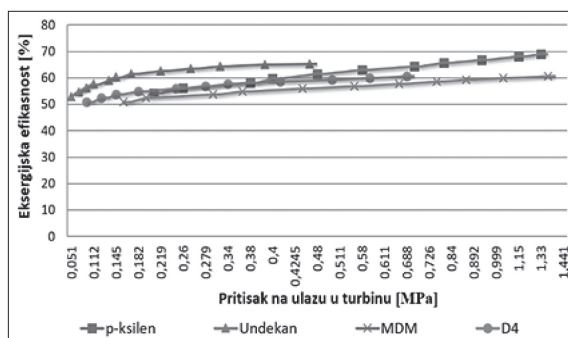


Slika 5. Eksergijska učinkovitost ORC u ovisnosti o temperaturi na ulazu u turbinu

Figure 5. ORC exergy efficiency in relation to the temperature at turbine inlet

Vidi se na slici 5. da svi izabrani radni fluide s porastom temperature na ulazu u turbinu postižu više vrijednosti eksergijske učinkovitosti. Svoje optimalne vrijednosti eksergijske učinkovitosti dostižu pri maksimalnim vrijednostima temperature na ulazu u turbinu.

Utjecaj tlaka radnih fluida na ulazu u turbinu na eksergijsku učinkovitost kogeneracijskog ORC postrojenja prikazan je na slici 6.



Slika 6. Eksergijska učinkovitost ORC u ovisnosti o tlaku na ulazu u turbinu

Figure 6. ORC exergy efficiency in relation to the pressure at turbine inlet

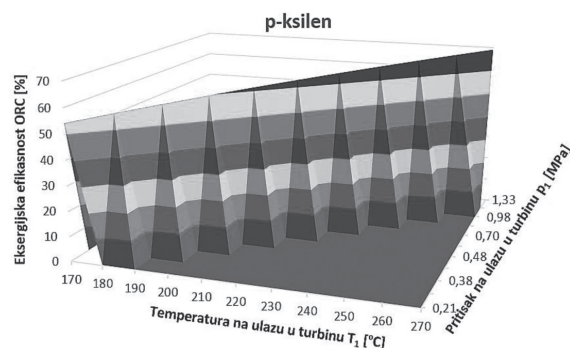
Na slici 6. vidi se da s povećanjem vrijednosti tlaka pare radnih fluida na ulazu u turbinu raste i eksergijska učinkovitost svih radnih fluida.



Svi radni fluidi svoje maksimalne vrijednosti eksergijske učinkovitosti postižu pri maksimalnim vrijednostima tlaka na ulazu u turbinu. Razlika je samo u vrijednostima tih tlakova, tako što p-ksilen i MDM optimalne vrijednosti eksergijske učinkovitosti postižu kod tlaka od 1,34 MPa i 1,44 MPa, respektivno, dok D4 i undekan optimalnu eksergijsku učinkovitost ORC imaju za tlakove od 0,68 MPa i 0,46 MPa, respektivno.

Na slikama 5. i 6. vidi se da najveću vrijednost eksergijske učinkovitosti ORC ima p-ksilen sa  $\eta_{\text{exORC}} = 69,11\%$ , pri vrijednosti temperature na ulazu u turbinu od 270 °C i pripadajućem tlaku od 1,34 bar. Slijede undekan, D4 i MDM s optimalnim vrijednostima eksergijske učinkovitosti od 65,28 %, 61,51 % i 60,57 %, respektivno.

Na slici 7. prikazane su varijacije eksergijske učinkovitosti kogeneracijskog ORC za p-ksilen, u ovisnosti o tlaku i temperaturi radnog fluida na ulazu u turbinu.

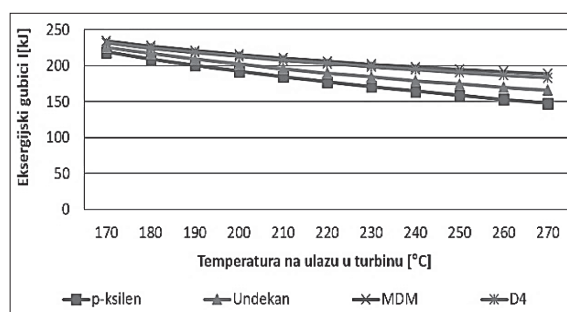


Slika 7. Eksergijska učinkovitost ORC za p-ksilen radni fluid

Figure 7. ORC exergy efficiency for p-xylene working fluid

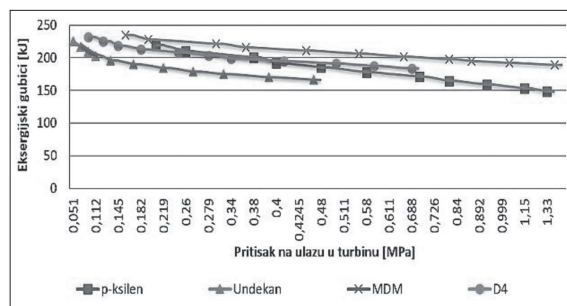
Rezultati eksergijskih gubitaka kogeneracijskog ORC za korištenje biomase u ovisnosti o temperaturi i tlaku na ulazu u turbinu prikazani su na slikama 8. i 9. Na slikama 8. i 9. vidi se da pri maksimalnim vrijednostima temperature i tlaka pare radnih fluida na ulazu u turbinu svi radni fluidi imaju najmanje gubitke, a među njima p-ksilen proizvodi najmanje ukupne eksergijske gubitke. Radni fluidi koji pri istoj dovede-

noj količini topline u isparivač ORC imaju više vrijednosti entalpije, a niže entropije na ulazu u turbinu i pri tome ostvare najveću entalpijsku razliku u pojedinim komponentama ORC imaju najmanje eksergijske gubitke i niže vrijednosti masenih protoka. Manjim eksergijskim gubicima pridonose i fizička obilježja radnih fluida (gustoća, toplinska vodljivost, dinamička viskoznost), te radni fluidi s višim vrijednostima gustoće, toplinske vodljivosti i razlike entalpija na ulazu i izlazu imaju veći koeficijent prolaza topline, a što posljedično dovodi do manjih dimenzija komponenti ORC.



Slika 8. Eksergijski gubici kogeneracijskog ORC u ovisnosti o temperaturi na ulazu u turbinu

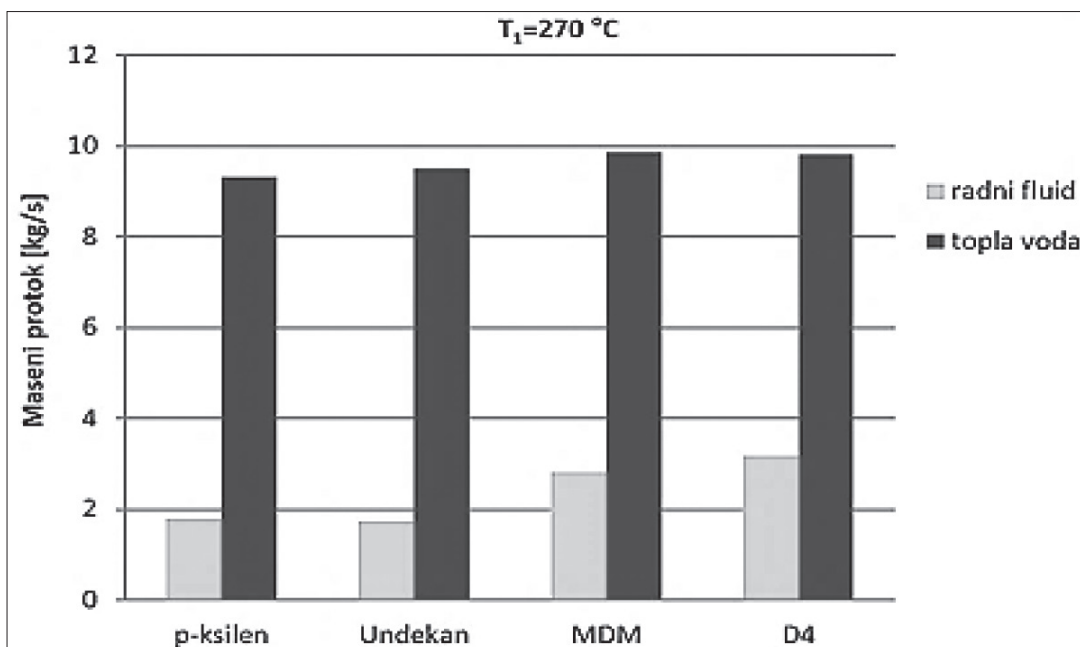
Figure 8. Exergy losses in cogeneration ORC in relation to the temperature at turbine inlet



Slika 9. Eksergijski gubici kogeneracijskog ORC u ovisnosti o tlaku na ulazu u turbinu

Figure 9. Exergy losses in cogeneration ORC in relation to the pressure at turbine inlet

Na slici 10. prikazani su rezultati masenih protoka organskih radnih fluida i tople vode za grijanje, pri optimalnoj vrijednosti temperature na ulazu u turbinu.

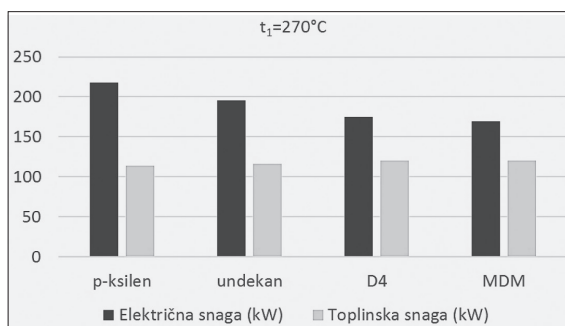


Slika 10. Maseni protoci radnog fluida i tople vode kogeneracijskog ORC postrojenja

Figure 10. Mass flow rates of working fluid and hot water in cogeneration ORC plant

Na slici 10. jasno se vidi da D4 radni fluid ima najveće vrijednosti masenih protoka, iako nema najveću vrijednost eksergijske učinkovitosti. To ukazuje na manji entalpijski pad pare MDM radnog fluida u turbini i manju snagu turbine, ali veću raspoloživu toplinu za grijanje. P-ksilen i undekan imaju najniže vrijednosti masenog protoka od 1,78 kg/s, odnosno 1,73 kg/s, ali zbog većeg entalpijskog pada u turbini p-ksilen u odnosu na undekan generira veću električnu snagu, a neznatno nižu toplinsku snagu.

Iako su maseni protoci tople vode temperature razine 80/60 °C približno istih vrijednosti, indikativno je da najmanji maseni protok tople vode ima kogeneracijski ORC sa p-ksilen radnim fluidom od 9,31 kg/s. Razlog je taj što vrijednosti masenih protoka tople vode slijede vrijednosti eksergijskih učinkovitosti kogeneracijskog ORC. Kogeneracijski ORC s radnim fluidima koji postižu više vrijednosti eksergijske učinkovitosti imaju manje masene protoke tople vode, jer generiraju više električne energije u odnosu na toplinsku energiju (slika 11).



Slika 11. Električna i toplinska snaga kogeneracijskog ORC s izabranim radnim fluidima, pri optimalnim vrijednostima temperature i tlaka na ulazu u turbinu

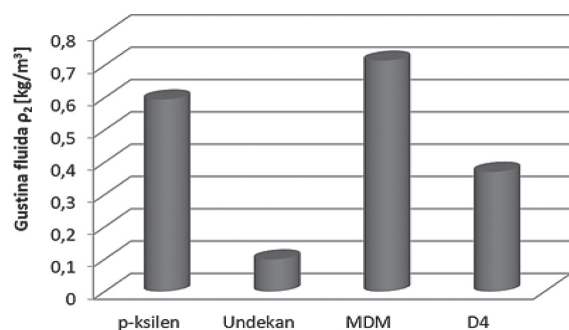
Figure 11. Electric and heat power of cogeneration ORC with selected working fluids, at optimal values of temperature and pressure at turbine inlet

Manja raspoloživa toplina kogeneracijskog ORC uz konstantnu temperaturnu razliku tople vode na ulazu i izlazu iz kondenzatora podrazumijeva i manji protok vode.

Vidi se na slici 11. da kogeneracijsko ORC postrojenje sa p-ksilen radnim fluidom generira

najviše električne snage, a s MDM najmanje. S druge strane, kogeneracijski ORC s MDM radnim fluidom proizvodi nešto više toplinske snage u odnosu na rad sa p-ksilen, undekan i D4 radnim fluidom.

Na slici 12. prikazani su rezultati eksergijske analize kogeneracijskog ORC postrojenja za vrijednosti izlaznih gustoća radnih fluida pri optimalnim vrijednostima temperature i tlaka na ulazu u turbinu.



Slika 12. Vrijednosti gustoća radnih fluida na izlazu iz turbine kogeneracijskog ORC, pri optimalnim vrijednostima temperature i tlaka na ulazu u turbine

Figure 12. Working fluid density values at turbine outlet in cogeneration ORC plant, at optimal values of temperature and pressure at turbine inlet

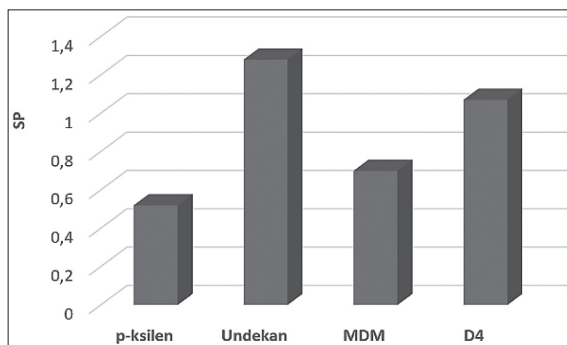
Na slici 12. vidi se da MDM ima najveću gustoću na izlazu iz turbine, a undekan najmanju. P-ksilen je s vrijednosti gustoće odmah iza MDM radnog fluida. Manja vrijednost gustoće na izlazu iz turbine ORC potencijalno dovodi do većih dimenzija turbine i kondenzatora te i obrnuto.

Koristeći se izrazom prema Macchiju (1981.), veličina turbine izražena je pomoću parametra:

$$SP = \frac{\sqrt{\dot{V}}}{\sqrt[4]{\Delta h}} \quad [21]$$

gdje je:  $\dot{V}$  (m³/s) - zapreminski protok radnog fluida na izlazu iz turbine,  $\Delta h$  (kJ/kg) - specifični entalpijski pad u turbini.

Rezultati proračuna dimenzija turbine pomoću faktora (SP) za sve radne fluide prikazani su na slici 13.



Slika 13. Vrijednosti faktora dimenzija turbine (SP) pri optimalnim vrijednostima tlaka i temperature na ulazu u turbinu

Figure 13. Values of turbine dimension factor (SP) at optimal values of the pressure and temperature at turbine inlet

Na slici 13. vidi se da najmanje dimenzije turbine ORC ima p-ksilen, dok undekan ima najveću vrijednost faktora SP. P-ksilen s najnom izlaznom gustoćom iz turbine u odnosu na MDM, postiže manje dimenzije turbine zahvaljujući većoj razlici entalpija na ulazu i izlazu turbine ( $\Delta h$ ).

## ZAKLJUČCI

Izabrani radni fluide ubrajaju se u suhe organske fluide i nije potrebno njihovo pregrijavanje jer bi ekspanzija završila daleko u pregrijanom području, što može biti izgubljeno u kondenzatoru. Završetak ekspanzije radnih fluida u pregrijanom području sprečava nastanak korozije lopatica turbine.

Pri povećanju tlaka i temperature svih izabranih radnih fluida na ulazu u turbinu raste i eksergijska učinkovitost kogeneracijskog ORC postrojenja. Maksimalna temperatura radnog fluida, a time i tlak je ograničena temperaturom plinova nastalih izgaranjem biomase kao izvora topline, odnosno termičkog ulja kao posrednika između topline iz biomase i radnog fluida.

Kogeneracijski ORC za iskorištenje biomase sa p-ksilen radnim fluidom ima najbolje rezultate eksergijske učinkovitosti i najmanje dimenzije turbine. S druge strane, najnižu vrijednost ekser-

gijske učinkovitosti ima kogeneracijski ORC s MDM radnim fluidom od 60,57 % što je za 8,54 % niže od eksergijske učinkovitosti ORC sa p-ksilen radnim fluidom. Međutim, MDM radni fluid ima vrijednost fakora dimenzije turbine (SP) za oko 97 % niži u odnosu na undekan i za 77 % niži od D4, što ga prema ovom parametru u odnosu na ova dva radna fluida ne eliminira iz potencijalne upotrebe u kogeneracijskom ORC za upotrebu energije iz biomase.

Izbor optimalnog radnog fluida za kogeneracijsko ORC postrojenje na biomasu u rasponu maksimalnih temperatura radnih fluida od 170 °C do 270 °C i pripadajućih tlakova na ulazu u turbinu ne treba samo zasnivati na eksergijskoj učinkovitosti, već i na veličini komponenti ORC.

## LITERATURA

ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment, 2008., Chapter 42.

Calm, J. M., Hourahan, G. C.: Physical, Safety and Environmental data for current and alternative Refrigerants, *ICR 2011*, Prague, Czech Republic, 21 - 26 - August 2011.

Čehajić, N., Halilčević, S., Softić, S.: Primjena organskog Rankinovog ciklusa (ORC) i prikladni radni fluidi, *Tehnički glasnik*, 8, 2014., 229-237

Deb, K., Kalyanmoy, D.: *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, New York, 2001.

Drescher, U., Bruggemann, D.: Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants, *Applied Thermal Engineering*, 27, 2007., 223-228

Ertesvag, I. S.: Exergetic comparison of efficiency indicators for combined heat and power (CHP), *Energy*, 32, 2007., 2038-2050

Generalić, E.: *Temperatura samozapaljenja, Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar*. dostupno na: <<https://glossary.periodni.com>>. 29 Aug. 2017. KTF-Split. 8 Nov. 2017., pristupljeno: 3.1.2018.

Group of authors: *Handbook on life cycle assessment - Operational guide to the ISO standards*, Kluwer Academic Publisher, 2002.

Hung, T. C.: Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids, *Energy Conversion and Management*, 42, 2001., 539-553

Karl, J.: *Dezentrale Energiesysteme*, 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München - Wien, 2006.

Kim, K. H., Ko, H. J., Kim, S. W.: Exergy analysis of organic Rankine cycle with internal heat exchanger, *International journal of materials, mechanics and manufacturing*, 1, 2013.

Liu, C., He, C., Gao, H., Xu, X., Xu, J.: The Optimal Evaporation Temperature of Subcritical ORC Based on Second Law Efficiency for Waste Heat Recovery, *Entropy*, 14, 2012., 491-504

Macchi, E., Perdichizzi, A.: Efficiency prediction for axial-flow turbines operating with non conventional fluids, *Journal Eng. Power Trans. ASME*, 103, 1981., 718-724

NIST Chemistry WebBook, *Thermophysical properties of fluids*, dostupno na: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>, pristupljeno: 3.1.2018.

TURBODEN, Clean Energy Ahead, Turboden Biomass Solutions, A Pratt Whitney Power system Company, Cod. Doc: 11-COM.P-1.rev.16, 12/03/2012.

Wang, D., Ling, X., Peng, H.: Performance analysis of double organic Rankine cycle for discontinuous low temperature waste heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, 48, 2012., 63-71

## **ENVIRONMENT AND THERMODYNAMICS APPROPRIATE WORKING FLUIDS IN ORGANIC RANKINE CYCLE FOR USING BIOMASS**

*SUMMARY: Fully halogenated chlorofluorocarbons (CFCs) are, despite their good thermodynamic properties, stability and non-toxicity, eliminated from use. Due to the content of one chlorine atom in the molecule, the use of hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) has been reduced in many European countries. The use of partially halogenated hydrofluorocarbons (HFCs) in which the molecules have no chlorine atoms, due to increased inflammability, is also to a large extent limited. This paper presents a methodology for selecting working fluids or mixtures for use in cogeneration ORCs on biomass, which will, in addition to thermodynamics, also take into account the safety and environmental requirements of working fluid acceptability. The effects of thermodynamic properties of preselected working fluids on the performance of the cogeneration ORC plant have been analyzed and the thermodynamic properties of the working fluid are optimized by the exergy efficiency of the ORC as a function of the target, using a genetic algorithm. Optimal values of the exergy efficiency, component size and exergy losses of the cogeneration ORC for the use of biomass energy are compared and analyzed under the same heat source conditions and pre-defined boundary conditions. The experimental analysis of the cogeneration ORC shows that the most preferred working fluid is p-xylene because in comparison to undekan, MDM (OMTS) and D4 (OMCTS) it has the highest value of exergy efficiency but also requires the least dimension of ORC components (turbines and capacitors).*

**Key words:** *Organic Rankine cycle, biomass, environmental and health protection, working fluid, cogeneration, exergy efficiency*

*Original scientific paper  
Received: 2017-11-23  
Accepted: 2018-10-05*