

PRIMJENA ORGANSKOG RANKINOVOG CIKLUSA (ORC) I PRIKLADNI RADNI FLUIDI

USING AN ORGANIC RANKIN CYCLE (ORC) AND APPROPRIATE WORKING FLUIDS

Nurđin Čehajić, Suad Halilčević, Izudin Softić

Pregledni rad

Sažetak: Prikazane su mogućnosti upotrebe ORC tehnologija za transformaciju niskotemperaturnih izvora topline u električnu energiju. Primjenom ORC kogeneracijskih postrojenja na biomasu omogućava se dobijanje toplinske i električne energije iz jednog izvora topline. Dat je pregled ORC proizvođača sa rasponima snaga, toplinskim izvorom, temperaturnim razinama i korištenim radnim fluidom. Kako radni fluid igra ključnu ulogu u radu ORC sistema dana je uopćena metodologija izbora radnog fluida. Izvršeno je usporedba najčešće korištenih radnih fluida kroz njihov utjecaj na termodinamičku ili eksergijsku učinkovitost ORC procesa, ali i na okoliš i zdravlje ljudi. Dokazano je da se ORC sistem može primijeniti u malim lokalnim zajednicama ili industrijskim pogonima koji raspolažu dovoljnom količinom biomase za zadovoljenje svojih potreba za električnom i toplinskom energijom.

Ključne riječi: Organski Rankinov ciklus (ORC), biomasa, kogeneracija, izvor topline, radni fluid, zaštita okoliša

Review article

Abstract: Shown the possibility of using ORC technology to transform low temperature heat source into electricity. Applying ORC CHP to be getting heat and electricity from a single heat source. A review is given ORC manufacturers with ranges of power, heat source, temperature levels and used working fluid. As the working fluid plays a key role in the ORC system the generalized methodology of choice of working fluid is given. The comparison of the most commonly used working fluid through their influence on the thermodynamic or exergy efficiency of the ORC process is conducted, but also the environment and human health consequences are taken into consideration. It has been shown that the ORC system can be applied in small communities or industrial plants that have a sufficient amount of biomass to meet its demand for electricity and thermal energy.

Key words: Organic Rankine cycle (ORC), biomass, cogeneration, heat source, working fluid, environmental protection

1. UVOD

Interes za niskotemperaturne toplinske izvore raste u posljednjih deset godina, zbog povećane zabrinutosti o nestašici energije i globalnog zatopljenja. World Energy Council [1] procjenjuje da će se do 2030. godine potrošnja svih oblika energije udvostručiti.

Predložen je veliki broj novih rješenja za proizvodnju električne i toplinske energije iz niskotemperaturnih izvora topline. Među predloženim rješenjima, ORC tehnologija je najčešće korištena.

ORC je varijacija Rankinovog ciklusa u kojem se umjesto vode kao radnog medija koristi organski fluid. Zbog relativno niske temperature isparavanja organskog fluida moguće je iskorištavanje niskoentalpijskih izvora topline (biomasa, otpadna toplina, geotermalna i sunčeva energija). ORC tehnologija može pretvoriti toplinsku energiju relativno niskih temperatura u rasponu od 80 do 350°C u električnu energiju i može igrati važnu ulogu u povećanju energetske učinkovitosti novih ili postojećih aplikacija.

Prednost korištenja ORC tehnologije temelji se na činjenici da su potrebni niski radni pritisci u odnosu na

druge termodinamičke cikluse, kao što je Carnot-ov ili klasičan Rankin-ov ciklus. Također, kod ORC tehnologije izbjegava se problem korozije i erozije lopatica turbine i druge opreme postrojenja zbog karakteristika radnog fluida. Važnost ORC tehnologije posebno se može promatrati u svjetlu povećane emisije štetnih (stakleničkih) plinova nastalih uglavnom procesom sagorijevanja fosilnih goriva uzrokujući efekt staklenika, pojavu ozonskih rupa, zagađenje voda, zemlje i oštećenje šuma. Kako bi se to smanjilo potrebno je uložiti mnogo napora za primjenu mjera u svim sektorima potrošnje te primjenu novih tehnologija sa nultom ili veoma niskom stopom emisija stakleničkih plinova.

Dobrim energentom se pokazuju biomasa koja zanemarivo opterećuje atmosferu s CO₂, jer je količina emitiranog CO₂ prilikom sagorijevanja biomase jednaka količini CO₂ koja je neophodna za rast biljke, pod uvjetom da su sječa i prirast drvene mase u održivom odnosu.

Biomasa je široko dostupna, a čine je poljoprivredni, šumski, drveni, komunalni i industrijski otpad. Toplinsku i električnu energiju dobivenu iz biomase je najbolje

koristiti na lokalnoj razini jer je gustoća energije biomase mala, što povećava troškove transporta.

Udio biomase u ukupnoj potrošnji energije u svijetu iznosi 14,7%, od toga u razvijenim zemljama 2,8%, te u zemljama u razvoju 38,1%. Sve procjene potencijala i uloge biomase u svjetskoj energetskej politici u narednom periodu govore o značajnom porastu udjela biomase kao obnovljivog izvora. Predviđa se da će do 2050. godine u svijetu udio biomase u potrošnji energije iznositi između 30 i 40%. U periodu od 2004. do 2006. godine ukupno učešće biomase u Evropi se povećalo za 11% [2].

Tako npr. Ukrajina ima instalirane kapacitete od 320 MW za dobivanje električne energije iz biomase, Njemačka je 2010. godine imala oko 261 postrojenje sa kapacitetom od 1240 MW, Švedska je 2009. godine dobivala od korištenja biomase 32% energije, a Finska 20%. U EU se 58% primarne energije dobivene iz obnovljivih izvora energije dobiva iz drveta i procjenjuje se otvaranje oko 1,5 miliona radnih mjesta u industriji biomase do 2020. godine. Dalje, procjene govore da ukupni svjetski resursi biomase imaju teoretski potencijal koji je deset puta veći od ukupne svjetske potrošnje primarne energije, što je 7 mld tona u ekvivalentu nafte godišnje.

U skladu s navedenim u članku su prikazane mogućnosti iskorištenja biomase kao niskoentalpijskog izvora topline za dobivanje električne i toplinske energije upotrebom kogeneracijskog ORC postrojenja sa organskim radnim fluidom. Dalje, dati su usporedni podaci termodinamičke i eksergijske analize ORC sa različitim radnim fluidima.

2. ORC TEHNOLOGIJE SA BIOMASOM KAO POGONSKIM ENERAGENTOM

Tehnologije za korištenje biomase se koriste dugi niz godina, ali je u posljednjih dvadeset godina došlo do naglog razvoja tehnologija za pripremu, sagorijevanje, automatsku dobavu goriva (pelet i sječka) i proizvodnju topline bez nadzora ložača.

Prilikom donošenja odluke o korištenju biomase kao energenta uglavnom se postavlja pitanje izbora tehnologije i određenog kogeneracijskog postrojenja koje će tokom eksploatacije omogućiti siguran, tehnički i ekonomski optimalan, te ekološki prihvatljiv pogon.

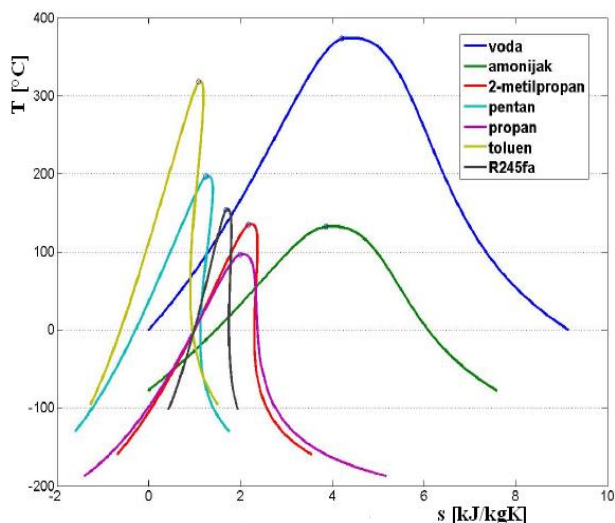
ORC tehnologija se uspješno primjenjuje za mala kogeneracijska postrojenja na biomasu nazivnih snaga između 200 i više od 2000 kW, te se kao takva pokazuju odličnim rješenjem za manje lokalne zajednice bogate biomasom bilo kojeg oblika.

2.1. Princip rada ORC postrojenja

ORC proces ima isti princip rada i glavne komponente (isparivač, turbinu, kondenzator i pumpu) kao i klasičan Rankinov ciklus. U isto vrijeme postoje i neke velike razlike između ova dva ciklusa. Razlike se uglavnom odnose na korišteni radni fluid u ciklusu, termodinamičke osobine radnog fluida i temperaturu izvora topline.

Glavna razlika između dva ciklusa je radni fluid koji se koristi. U Rankinovom ciklusu koristi se samo voda, dok postoje stotine različitih radnih fluida koji se mogu koristiti u ORC ciklusu. Ciklus vodene pare je pogodan za temperature na ulazu u turbinu iznad 350°C. Većina organskih fluida imaju nižu točku vrenja od vode, što ih čini pogodnim za korištenje toplinskog potencijala s temperaturama ispod 350°C. Ovo pokazuje da organski fluidi trebaju nižu temperaturu izvora topline od vode kako bi prešli u parnu fazu, te kao takvi mogu koristiti niskoentalpijske izvore topline.

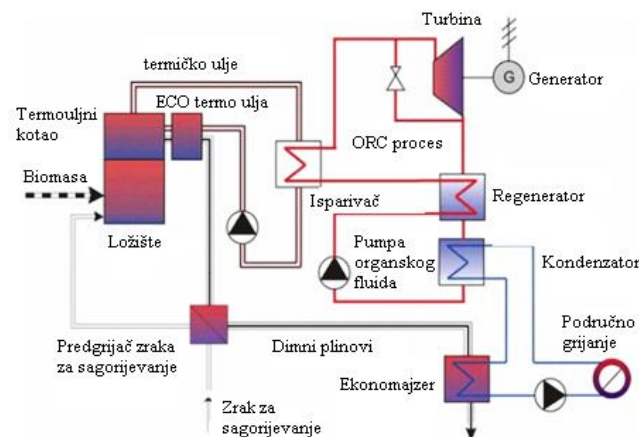
Na slici 1. je prikazan T-s dijagram promjene agregatnih stanja za vodu i neke druge radne fluide koji se koriste u ORC procesu.



Slika 1. T-s dijagram za vodu i druge radne fluide

Sa slike 1. se uočava jasna razlika u promjeni entropije između krive zasićenja tečnosti i krive zasićenja pare za vodu i druge radne fluide. Organski fluidi imaju znatno manju promjenu entropije u odnosu na vodu, jer joj treba znatno veća količina topline da bi promijenila fazu i prešla iz zasićene tekućine u zasićenu paru.

Tipičan kogeneracijski ORC proces baziran na biomasu prikazan je na slici 2.



Slika 2. ORC kogeneracijsko postrojenje na biomasu [3,4]

Kao što se sa slike 2. vidi kod kogeneracijskih niskoentalpijskih ORC postrojenja (u ovom slučaju ulazni energent je biomasa) koristi se međukrug termičkog ulja koje služi kao medij posrednik između topline dobivene sagorijevanjem biomase i radnog fluida. Naime, kod visokih temperatura, voda i para zahtijevaju i odgovarajući visoki radni tlak, koji je kod sistema s termičkim uljem do temperatura od 300°C minimalan. U industrijskoj i energetske primjeni potreban je visok temperaturni nivo, a postizanje tog režima s parom i vodom tehnički je zahtjevno. Postoji još nekoliko prednosti sistema s termičkim uljem u odnosu na vodeno-parne sisteme.

S druge strane ovakva izvedba dovodi do:

1. Više cijene postrojenja zbog nužnosti ugradnje izmjenjivača topline (toplina biomase - termičko ulje, termičko ulje - radni fluid), cirkulacijskih pumpi i cjevovoda sa armaturom i mjernom opremom;
2. Složenije izvedbe.

Na temelju navedenog, princip rada kogeneracijskog ORC procesa bazira se na nekoliko sljedećih koraka:

1. Toplinski izvor (biomasa) zagrijava termičko ulje, od 250 do 300°C u zatvorenom radnom krugu. Zagrijano termičko ulje usmjerava se ka isparivaču, gdje se toplina predaje radnom mediju (organski fluid) te on isparava, uz najčešće njegovo prethodno predgrijavanje u regeneratoru;
2. Organska para ekspandira u turbini, gdje se kinetička energija pare pretvara u mehaničku, a mehanička se u generatoru pretvara u električnu energiju. Veza između turbine i generatora je direktna što je moguće zbog relativno malih brzina vrtnje turbine, te su na taj način smanjeni mehanički gubici;
3. Ekspandirana para organskog fluida hladi se u kondenzatoru, gdje se rashladna voda (ili zrak) zagrijava na temperaturu od 80 do 90°C i može se koristiti za područno grijanje i druge namjene;
4. Ohlađeno termičko ulje se pumpom vraća u kotao a kondenzirani organski fluid drugom pumpom se vraća nazad u regenerator, gdje se dogrijava i odlazi u isparivač i ORC proces se ponavlja.

Cjelokupna energetska efikasnost ORC ciklusa je vrlo velika. Naime, od 98% topline termičkog ulja 20% se transformira u električnu energiju, a oko 78% u toplinsku energiju. Oko 2% ulazne energije su gubici na različitim komponentama ORC postrojenja.

Prednosti ORC tehnologije su:

1. Proces se odlikuje relativno visokom iskoristivosti na nižim opterećenjima što predstavlja prednost kod pogona kogeneracijskog postrojenja u režimu koji slijedi toplinsku potrošnju;
2. Korištenjem termičkog ulja umjesto vode omogućen je pogon kotla loženog biomasom na nižim tlakovima s čime se, u usporedbi s vodenom - parnim procesom, smanjuju naprezanja i produljuje vijek trajanja kotla. Za pogon na nižim tlakovima nije potrebna dozvola inspektora parnih kotlova;
3. Proces se može potpuno automatizirati.

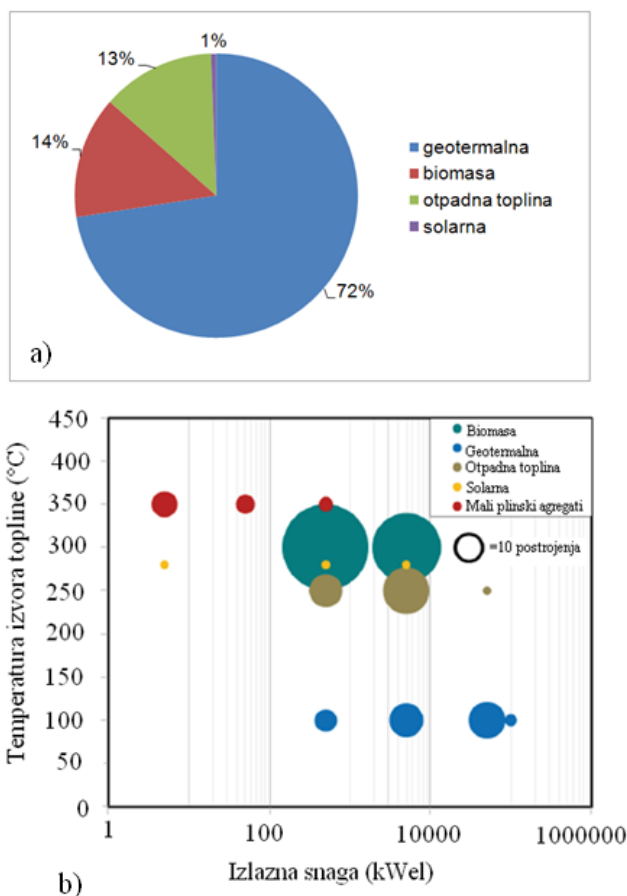
U nedostatke ORC sistema se ubrajaju:

1. Visoki specifični investicijski troškovi (kod manjih postrojenja >4000 EUR/kWe);
2. Zapaljivost organskog radnog fluida na sobnim temperaturama kao i potrebna primjena dodatnih mjera zaštite od propuštanja vrelouljnog kotla;
3. Visoka temperatura izlaznih plinova iz kotla što može smanjiti učinkovitost kotla. Da bi se to izbjeglo neophodno je iskorištenje topline dimnih plinova kroz predgrijavanje zraka za sagorijevanje, predgrijavanje radnog fluida i dr. (slika 2.).

2.2. ORC proizvođači

ORC proizvođači su prisutni na tržištu od početka 80 - tih godina prošlog stoljeća. Procijenjena ukupna izlazna snaga generiranih ORC sistema je oko 1,3 GW_{el} [3,5,6].

Sa slike 3.a se vidi da geotermalne ORC aplikacije proizvode veći dio električne energije, nakon čega slijedi biomasa i iskorištenje otpadne topline, dok je postotak proizvodnje solarnih zanemariv. Slika 3.b. prikazuje broj instaliranih ORC postrojenja prema izlaznoj snazi i vrijednosti temperature izvora topline, za pet različitih aplikacija.



Slika 3. a) Udio pojedinih ORC aplikacija u proizvodnji električne energije; b) Broj instaliranih ORC postrojenja prema rasponu temperature izvora topline i izlaznoj snazi [7]

U tabeli 1. je dat pregled instaliranih ORC postrojenja u zadnjih dvadeset godina sa širokim rasponom snage, temperature toplinskog izvora i izabranim radnim fluidom.

Tabela 1. Disperzija ORC postrojenja u svijetu [8]

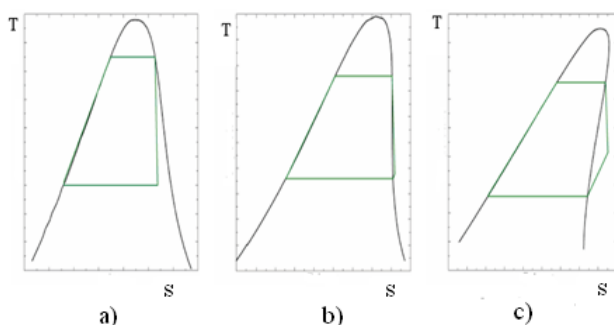
Proizvođač	Toplotni izvor/aplikacija	Raspon snage	Temperatura toplinskog izvora	Radni fluid
ORMAT, US	Geotermalna, otpadna toplina, solarna	200 kWe - 72 MWe	150° - 300°C	n-pentan
TURBODEN, ITALY	geotermalna, kogeneracija	200 kWe - 2 MWe	100° - 300°C	OMTS*, Solkatherm
ADORATEC, GERMANY	kogeneracija	315 – 1600 kWe	300°C	OMTS
GMK, GERMANY	otpadna toplina, geotermalna, kogeneracija	50 kWe – 2 MWe	120° - 350°C	GL 160 (GMK ga patentirao)
KOEHLER-ZIEGLER, GERMANY	kogeneracija	70 – 200 kWe	150°C - 270°C	Hydrocarbons
UTC, US	otpadna toplina, geotermalna	280 kWe	>93°C	-
CRYOSTAR	otpadna toplina, geotermalna	-	100° - 400°C	R245fa, R134a
FREEPOWER, UK	otpadna toplina	6 kWe – 120 kWe	180° - 225°C	-
TRI-O-GEN, NETHERLAND	otpadna toplina	160 kWe	>350°C	-
INFINITY TURBINE	otpadna toplina	250 kWe	>80°C	R134a

* OMTS (Oktametiltrisiloksan) - $C_8H_{24}Si_3O_2$

3. RADNI FLUIDI

3.1. Podjela i osobine radnih fluida

Klasifikacija u smislu mokrih, izentropskih i suhih može se prikazati pomoću T - s dijagrama, slika 4. Mokri fluidi (voda, propan, R134 i dr.) imaju krivu zasićenja pare s negativnim nagibom, izentropski fluidi (R11, R142b i dr.) imaju okomitu krivu zasićenja pare i suhi fluidi (izobutan, R245fa, R236fa, toluen i dr.) imaju pozitivan nagib.



Slika 4. Mokri, izentropski i suhi radni fluidi [7]

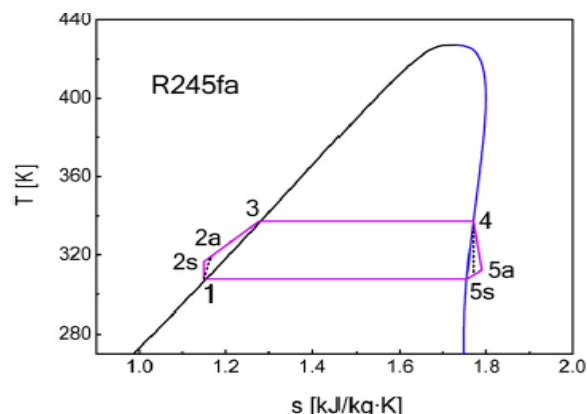
Negativan nagib krive zasićene pare dovodi do povećanja entropije a smanjenja temperature, pozitivan nagib znači da sa smanjenjem entropije dolazi do smanjenja temperature, dok je kod izentropskog nagiba krivulja zasićene pare okomita (linija konstantne entropije).

Izentropski i suhi radni fluidi (slika 4.b i 4.c) sa aspekta zaštite opreme (turbina i kondenzatora) su najpogodniji jer napuštaju turbinu kao pregrijana para i eliminiraju rizik od nastanka korozije. Međutim ako je nagib krive zasićene pare previše nagnut (suhi fluidi)

onda para turbinu napušta sa značajnim pregrijavanjem, što može biti izgubljeno u kondenzatoru. U tom slučaju regenerator minimizira tu pojavu sa predgrijavanjem radnog fluida prije ulaska u isparivač. Regenerator znači dodatnu složenost i veće investicijske troškove ORC postrojenja.

Izentropski fluid napušta turbinu suh, ali bez značajnog pregrijavanja, što rezultira povećanjem učinkovitosti bez potrebe za regeneratorom [7].

Krivulja promjene agregatnog stanja za suhi radni fluid R245fa dana je na slici 5.



Slika 5. T - s dijagram za radni fluid R245fa sa pozitivnim nagibom krive zasićenja pare

Sa slike 5. se vidi da radni fluid R245fa ulazi u turbinu kao zasićena para (točka 4), a nakon ekspanzije dolazi u pregrijano područje (točka 5a).

Nadalje, gustoća organskog fluida igra ključnu ulogu pri dimenzioniranju komponenti ciklusa, koje su ovisne od volumnog protoka. Veća gustoća znači manji specifični volumen, niži volumni protok te manje dimenzije komponenata.

S obzirom na kemijski sastav fluide općenito možemo podijeliti na sljedeće skupine:

1. Ugljikovodike
2. Etere
3. Alkohole
4. Siloksane
5. Fluorovodike
6. Hlorofluorouglijke (CFC)
7. Hidrohlorofluorouglijke (HCFC)
8. Hidrofluorouglijke (HFC)
9. Hidrofluorolefine (HFO)

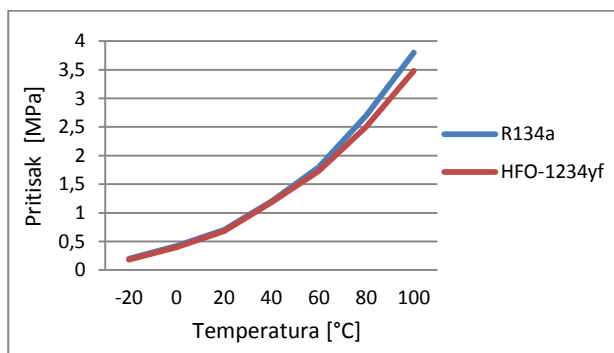
3.2. Utjecaj radnih fluida na okoliš i zdravlje

Mnogi fluidi prikladni za upotrebu u ORC procesu mogu imati štetne učinke na okoliš i zdravlje ljudi.

Potpuno halogenizirani klorofluorouglijci (CFC) su i pored dobrih termodinamičkih osobina, stabilnosti i netoksičnosti, Montrealskim protokolom (1987. godine) eliminirani iz upotrebe. Radi sadržaja jednog atoma klora u molekulu, upotreba hidroklorofluorouglijka (HCFC) je reducirana u mnogim evropskim zemljama. Upotreba djelomično halogeniziranih hidrofluorouglijka (HFC), u čijim molekulama nema atoma klora također je zbog povećane zapaljivosti, u velikoj mjeri ograničena.

Tražeći radne fluide koji ne sadrže atome klora (ODP - Ozone Depletion Potential jednak nuli), a koji imaju nizak utjecaj na globalno zatopljenje (GWP - Global Warming Potential što manji) i slabu zapaljivost, hidrofluorolefini (HFO) se nameću kao izbor za novu generaciju radnih fluida. Svi HFO su razvijeni kao zamjena za R134a.

Termofizičke osobine fluida HFO-1234 su veoma slične svojstvima R134a, što omogućava dobre performanse postrojenja u širokim opsegu temperatura isparavanja i kondenzacije. Na slici 6. u dijagramu p-t su prikazane ravnotežne krive parne i tečne faze za R134a i HFO-1234yf.



Slika 6. Ravnotežne krive parne i tečne faze u p-t dijagramu za dva radna fluida [13]

Uspoređivanjem ravnotežnih krivih R134a i HFO-1234yf jasno je vidljivo da se one za temperature ispod 60°C dobro poklapaju, a na temperaturama iznad 60°C ravnotežna krivulja za R134a je nešto strmija od krive za HFO-1234yf [13].

Svi HFO-1234 imaju odlična ekološka svojstva, GWP im ne prelazi 7. Dozvoljena granica GWP je 150, dok EU u posljednje vrijeme razmatra vrijednost 2150. HFO-

1234 su blago zapaljivi, u prirodnim uslovima se brzo razlažu i ne prouzrokuju nikakvu toksičnost [14].

Ugljikovodonici kao što su pentan ili toluen imaju dobre termodinamičke osobine, ali su otrovni i vrlo zapaljivi. Uz odgovarajuće mjere opreza zasićeni ugljikovodonici (metan, propan i butan) se uspješno koriste u ORC sistemima bez oštećenja okoliša ili ugrožavanja ljudskog zdravlja.

Siloksani (silicij ulja) su zapaljivi, ali imaju nisku toksičnost i mali utjecaj na okoliš.

Organske fluide karakterizira niska temperatura samozapaljenja. U slučaju curenja fluida na spojnim mjestima cjevovoda i armature i kontakta sa zrakom došlo bi do zapaljenja fluida. Zbog toga je potrebno da temperatura samozapaljivosti radnog fluida mora biti veća od maksimalne temperature izvora topline.

U tabeli 2. su dati faktori GWP i ODP za različite grupe fluida, kao i vijek trajanja u atmosferi (ALT - Atmospheric Life Time).

Tabela 2. Faktori ODP, GWP i ALT za različite grupe radnih fluida [15]

Grupa fluida	Fluid	ODP	GWP (100 god.)	ALT (godina)
CFC	R11	1	4750	50
	R12	1	10900	102
	R113	0,8	6130	85
HCFC	R22	0,055	1790	11,9
	R141b	0,11	717	9,2
	R142b	0,065	2220	17,2
HFC	R134a	0	1370	13,4
	R32	0	716	5,2
	R143a	0	4180	47,1
	R245fa	0	1050	7,7
	R125	0	3420	28,2
	R152a	0	133	1,5
	R227ea	0	3580	38,9
HFO	R1234yf	0	4	10,5 dana
	R1234ze	0	7	16,4 dana

U cilju smanjenja GWP nastaju nove mješavine fluida kao kombinacija radnih fluida sa određenim postotnim udjelom.

Radni fluid R404a je nastao kao kombinacija fluida R125/R143a/R134a sa postotnim udjelima (44/52/4).

GWP mješavine se računa pomoću formule [15]:

$$GWP = (GWP \cdot u\%) + (GWP \cdot u\%) + (GWP \cdot u\%) \quad (8)$$

Uvrštavanjem vrijednosti *GWP* faktora i postotnih udjela radnih fluida R125, R143a i R134a u izraz (8) dobiva se:

$$GWP_{R404a} = (3420 \cdot 0,44) + (4180 \cdot 0,52) + (1370 \cdot 0,04) = 3733$$

Nove mješavine mogu nastati kombiniranjem radnih fluida sa velikim i malim potencijalom globalnog zatopljenja.

Korištenjem R32 umjesto R143a sa istim udjelom, a na osnovu (8) dobiva se:

$$GWP_{mješavine} = (3420 \cdot 0,44) + (716 \cdot 0,52) + (1370 \cdot 0,04) = 1932$$

Kao što se vidi ova mješavina je ispod limita od 2150. Problem kod mješavina može biti u zapaljivosti i pri promjeni mješavine može doći do temperaturnog klizanja, a ako je veliko može prouzrokovati ozbiljan problem.

Neke od novih mješavina su zasnovane na binarnim mješavinama R32 i R1234yf. Na osnovu izraza (7), postotnog udjela i faktora *GWP* pojedinog radnog fluida nastaju nove mješavine, tabela 3.

Tabela 3. Mogućnosti smanjenja *GWP* kombiniranjem radnih fluida [15]

	R32	R125	R134a	R1234yf	GWP
Postotni udio fluida (% /100)					
R407a	0,2	0,4	0,4	-	2107
R407b	0,1	0,7	0,2	-	2804
R407c	0,23	0,25	0,52	-	1774
R407d	0,15	0,15	0,70	-	1627
R407e	0,25	0,15	0,60	-	1552
R407f	0,3	0,3	0,4	-	1825
Nova mješavina A	0,2	0,4	-	0,4	1537
Nova mješavina B	0,1	0,7	-	0,2	2518
Nova mješavina C	0,23	0,25	-	0,52	1032
Nova mješavina D	0,15	0,15	-	0,70	629
Nova mješavina E	0,25	0,15	-	0,60	696
Nova mješavina F	0,3	0,3	-	0,4	1254

3.3. Izbor radnih fluida

Izbor radnog fluida je jedan od najvažnijih zadataka kod dizajna toplinskog stroja baziranog na ORC. Postoji više kriterija o kojima treba voditi računa pri

izboru radnog fluida za ORC, a oni su: priroda izvora topline, termodinamičke i druge osobine fluida te troškovi pumpi i turbina.

Uopćen postupak (metodologija) za izbor radnog fluida je:

1. Pregled literature o postojećim organskim fluidima;
2. Prvi izbor uzimajući u obzir radnu temperaturu izvora topline i kondenzatora;
3. Drugi izbor sa naglaskom na sigurnost i okoliš (Montrealski protokol);
4. Usporedba termodinamičkih svojstava i određivanje učinkovitosti ciklusa;
5. Provjera dostupnosti turbina u smislu razumnog radnog područja.

Izbor radnog fluida i optimizacija termodinamičkih parametara ORC procesa za određeni izvor topline predstavlja ključni problem i tretiran je u brojnim istraživanjima [8,9,10,11,12].

Pri optimiziranju ORC ciklusa sa određenim radnim fluidom najčešće je postavljena ovisnost između termodinamičke ili eksergijske učinkovitosti ciklusa i pritiska i temperature na ulazu u turbinu, ali i temperature u isparivaču i kondenzatoru.

Termodinamička efikasnost ORC ciklusa se računa:

$$\eta_t = \frac{W_t - W_p}{Q} \quad (1)$$

gdje indeksi *t* i *p* označavaju turbinu i pumpu respektivno, *W* snagu i *Q* razmijenjenu toplinu u isparivaču.

Snaga turbine, pumpe i razmijenjena toplina u isparivaču se računaju:

$$W_t = m (h_4 - h_{5a}) \quad (2)$$

$$W_p = m (h_{2a} - h_1) \quad (3)$$

$$Q = m (h_4 - h_{2a}) \quad (4)$$

gdje je *m* maseni protok radnog fluida, a *h*₁, *h*_{2a}, *h*₄ i *h*_{5a} su specifične entalpije u točkama prikazanim na slici 5.

Eksergijska učinkovitost ORC sistema se može napisati kao odnos neto snage turbine i eksergije ulaza u ORC sistem:

$$\eta_{ex} = \frac{W_n}{E_u} \quad (5)$$

Neto snaga turbine se računa prema obrascu:

$$W_n = W_t - W_p = m [(h_4 - h_{5a}) - (h_{2a} - h_1)] \quad (6)$$

Eksergija ulaza u ORC sistem se računa po obrascu:

$$E_u = m_i c_{pi} [(T_i - T_0 - T_0 \ln(\frac{T_i}{T_0}))] \quad (7)$$

gdje su: *m*_i maseni protok izvora topline, *c*_{pi} specifični toplinski kapacitet izvora topline, *T*_i temperatura izvora topline i *T*₀ temperatura okoline.

Opće relevantne karakteristike iz tih istraživanja bi bile:

1. Termodinamička/eksergijska učinkovitost (η_t, η_{ex}) ciklusa ili izlazna snaga turbine trebaju biti što je moguće više za dati izvor topline i temperaturu kondenzacije radnog fluida;
2. Krivulja zasićenja pare (T-s dijagram) treba biti pozitivna ili izentropska. Negativne krive zasićenja pare (mokri fluidi) dovode do oštećenja opreme;
3. Prihvatljivi pritisci radnog fluida. Visoki pritisci u ORC procesu dovode do većih investicijskih troškova i povećanja složenosti;
4. Visoka gustoća pare radnog fluida. Niske gustoće dovode do vrlo velikih dimenzija turbina i kondenzatora;
5. Mali utjecaj na okoliš i visok stupanj sigurnosti;
6. Visoka stabilnost temperature. Za razliku od vode, organski fluidi obično pate od kemijskih pogoršanja i raspadanja na visokim temperaturama. Maksimalna temperatura izvora topline je ograničena kemijskom stabilnosti radnog fluida;
7. Dobra dostupnost i niska cijena.

3.4. Komparacija radnih fluida

Većina istraživanja ORC procesa je uglavnom usmjerena na optimiziranje učinkovitosti ili izlazne snage s obzirom na vrstu (konfiguraciju) ciklusa i određeni radni fluid.

Ovo poglavlje ima za cilj usporedbu najčešće korištenih radnih fluida za tri vrste aplikacija:

1. Prva aplikacija ima termodinamičke parametre: temperatura isparavanja je 85°C, a temperatura kondenzacije je 20°C. Ove temperaturne razine su tipične za geotermalne ORC aplikacije;
2. Temperatura isparavanja ja 145°C, a kondenzacije 45°C, što može odgovarati aplikacijama za otpadnu toplinu;
3. Temperatura isparavanja ja 280°C, a kondenzacije 100°C, što može odgovarati biomasi (kogeneracijske aplikacije).

Šest različitih radnih fluida se razmatraju jer su čini se najčešće korišteni u ORC aplikacijama (tabela 1.). Ti fluidi su: R134a, R245fa, n-pentan, OMCS, R236ea i R245ca.

Tabela 4. pokazuje da radni fluidi R134a i R245fa imaju određene prednosti pri niskim temperaturama isparivača i kondenzatora, ali i zbog veće gustoće u odnosu na n-pentan i OMCS (oktamilciklotrisiloksan). Niske gustoće su štetne za silikonska ulja na niskoj temperaturi. Tako je gustoća silikonskog ulja 61 puta manja od gustoće R245fa na temperaturi od 30°C, što može dovesti do znatnog povećanja dimenzija turbine i kondenzatora.

Za drugi slučaj temperaturnih razina isparivača i kondenzatora radni fluid R236ea ima veću eksergijsku učinkovitost u odnosu na R245ca.

U trećem slučaju pri višim vrijednostima temperatura isparivača i kondenzatora, OMCS pokazuje značajno veću vrijednost termodinamičkog stupnja iskorištenja ($\eta_t = 18,6\%$) u odnosu na prvi slučaj ($\eta_t = 10,3\%$), dok niža vrijednost gustoće na ovom nivou temperatura ne predstavlja problem.

Također, pokazano je da za istu temperaturu isparavanja radnog fluida manji gubitak toplinske snage je za fluide sa većom nego za fluide sa manjom molnom masom.

U prvom slučaju za temperaturu isparavanja od 85°C izabrani radni fluidi R134a i R245fa ($C_3H_3F_5$) imaju veću molarnu masu u odnosu na n-pentan i OMCS, ali i značajno veću vrijednost gustoće što povlači i manje dimenzije opreme.

Za drugi slučaj pri temperaturi isparavanja od 145°C veću molarnu masu ima izabrani radni fluid R236ea u odnosu na R245fa. Plinski kompaund R245fa ima gustoću od 1404,1 kg/m³ (tečnost kod 1 bar i 0°C) i 5,84 kg/m³ (para kod 1 bar i 15°C). Točka vrenja je 15,3°C.

OMCS ima najmanji gubitak toplinske snage i najveću molarnu masu, ali je za razliku od prvog slučaja kada je zbog male gustoće pri niskoj temperaturi kondenzacije od 20°C eliminiran, u ovom slučaju i na ovom nivou temperature kondenzacije od 100°C mala gustoća neće predstavljati nikakav problem. Usporedbe radi, gustoća radnog fluida OMCS na temperaturi kondenzacije od 100°C je oko 60 puta veća nego pri temperaturi kondenzacije od 20°C.

Promatrajući temperature isparavanja radnih fluida i vrijednosti molarnih masa izvodi se zaključak da fluidi sa većom molarnom masom nužno imaju i višu kritičnu temperaturu (t_c) što omogućava iskorištavanje topline biomase na nivou temperatura od 250 do 300°C.

Tabela 4. Termodinamičke performanse ORC ciklusa za tri različite aplikacije [8,12]

	Fluid	Kemijska formula	Molarna masa (kg/kmol)	Plinska konstanta (J/kgK)	p_{isp} (bar)	p_{kon} (bar)	η_t (%)	η_{ex} (%)	ρ (kg/m ³)
$t_{isp} = 85^\circ C$ $t_{kon} = 20^\circ C$	R134a	CH ₂ FCF ₃	102,03	81,49	29,28	5,74	10,6	-	26,2
	R245fa	C ₃ H ₃ F ₅	134,05	62,03	8,92	1,29	11,7	-	6,775
	n-pentan	C ₅ H ₁₂	72,15	115,24	4,16	0,63	11,5	-	1,803
	OMCS	C ₈ H ₂₄ O ₄ Si ₄	296,62	28,03	0,0454	0,000953	10,3	-	0,007966
$t_{isp} = 145^\circ C$ $t_{kon} = 45^\circ C$	R236ea	C ₃ H ₂ F ₆	152,04	54,69	12	2,06	11,53	35,43	1,25
	R245ca	C ₃ H ₃ F ₅	134,05	62,02	12	1,01	12,37	33,61	5,55
$t_{isp} = 280^\circ C$ $t_{kon} = 100^\circ C$	OMCS	C ₈ H ₂₄ O ₄ Si ₄	296,62	28,03	8,042	0,0872	18,6	-	0,483

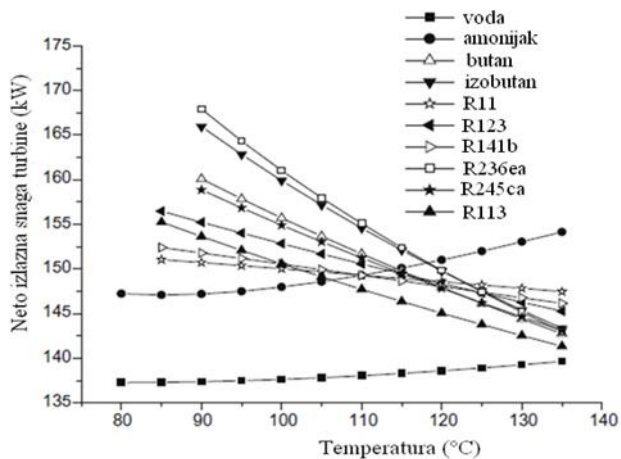
U tabeli 5. su date usporedne vrijednosti termodinamičkog stupnja iskorištenja ORC ciklusa za radni fluid R236ea u zavisnosti od vrijednosti temperature na ulazu u turbinu (t_{ut}).

Tabela 5. Termodinamički koeficijent iskorištenja ORC u zavisnosti od temperature na ulazu u turbinu

Članak	Autori	Radni fluid	t_{ut} (°C)	η_i (%)
Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery	Yiping Dai, Jiangfeng Wang, Lin Gao	R236ea	87,73	11,53
Sustainable working fluids selection for the low temperature organic Rankine cycle	S.N. Haddad, S. Artemenko, D. Nikitin	R236ea	100	12,16

Tablica 5. pokazuje da radni fluid R236ea (HFC - suhi fluid) ima različite vrijednosti termodinamičkog stupnja iskorištenja te je on veći za veću vrijednost temperature na ulazu u turbinu.

Na slici 7. je prikazana varijacija neto izlazne snage turbine u zavisnosti od temperature na ulazu u turbinu za deset različitih radnih fluida.



Slika 7. Vrijednost snage turbine u zavisnosti od temperature na ulazu u turbinu [12]

Sa slike 7. se vidi da sa porastom temperature na ulazu u turbinu, snaga turbine se povećava za radne fluide sa negativnim nagibom krive zasićenja pare (amonijak i voda), dok se za radne fluide sa pozitivnim i izentropskim nagibom krive zasićenja pare (butan, izobutan, R11, R123, R141b, R245ea, R245ca i R113) smanjuje. Uspoređujući utjecaj ulazne temperature u turbinu za radni fluid R236ea, jasno se vidi da porast temperature na ulazu u turbinu dovodi do povećanja eksergijskog koeficijenta iskorištenja (tabela 5.), ali s druge strane dolazi do smanjenja izlazne snage turbine (slika 7.). Naime, efektivnost isparavanja radnog medija povećava se sa temperaturom u kotlu i približno

jednakim masenim protokom termičkog ulja i radnog medija. Međutim, stupanj korisnosti cijelog ciklusa opada sa što većom jednakošću masenih protoka zbog činjenice da radni medij je suviše „brz“ za preuzimanje topline od termičkog ulja u evaporatoru. Puno je bolje da maseni protok radnog medija bude što manji u odnosu na protok termičkog ulja.

4. ZAKLJUČAK

Toplotni strojevi bazirani na ORC tehnologiji postaju interesantni za primjenu u malim lokalnim zajednicama, tvornicama namještaja i dr. koji raspolažu sa dovoljnim količinama biomase. Zbog male gustoće energije biomase povećani su troškovi transporta te ju je najbolje upotrijebiti na mjestu njenog nastanka.

Upotreba ORC kogeneracijskih postrojenja na biomasu se čini osobito prikladnim u slučaju nepouzdanih priključaka na elektroenergetsku mrežu.

Prednost kogeneracijskih postrojenja u odnosu na postrojenja sa sistemom odvojene opskrbe je u tome da se za istu količinu primarne energije (biomase, fosilnog goriva i sl.) pod određenim uslovima pomoću kogeneracije može dobiti i do 40% više toplinske i električne energije nego sa sistemom odvojene opskrbe.

Investicijski troškovi ORC postrojenja za male snage su veliki, pa je u prvoj fazi primjene potrebno omogućiti od strane države poticaje za proizvodnju električne i toplinske energije iz obnovljivih izvora energije, kako to rade gotovo sve zemlje EU.

Apliciranjem ORC sistema u energetska i privredna slika jedne zemlje doprinosi se štednji fosilnih goriva, smanjenju emisija CO₂, energetskej neovisnosti, ali i razvoju privrede kroz zapošljavanje stanovništva.

Pokazano je da se pravilnim izborom radnog fluida za date radne uvjete značajno može uticati na učinkovitost ORC procesa, veličinu komponenti, investicijske troškove te okoliš i zdravlje ljudi. Također, važno je u istraživanju ORC postrojenja i traženja njegove najveće efikasnosti uzeti u obzir maseni protok termičkog ulja i radnog medija (kg/s) u funkciji temperature kotla.

Buduće istraživanje nastavlja se u kontekstu odabira radnog fluida ili mješavine čije će termodinamičke osobine dati optimalan eksergijski koeficijent iskorištenja ORC postrojenja pogonjenog biomasom, a sve na temelju statičkog i tranzitnog modela i jednadžba održanja energije i masa.

5. LITERATURA

- [1] World Energy Council report, 2010. (Dostupno: 05.02.2014.)
- [2] Bruton, T.; Tottenham, T.: Biomass CHP Market Potential in the Western Region, The Western Development Commission, Ireland, 2008, 64
- [3] <http://www.turboden.eu/it/home/index.php> (Dostupno: 10.02.2014.)
- [4] Obernberger, I.; Thek, G.: Techno - economic Evaluation of selected decentralised CHP

- applications based on biomass combustion in IEA partner countries, final report, IEA Bioenergy Agreement Task 32 project, March 2004.
- [5] <http://www.ormat.com/global-project> (Dostupno: 12.02.2014.)
- [6] <http://www.adoratec.com/referenznav.html> (Dostupno: 12.02.2014.)
- [7] Rettig1, A.; Lagler, M.; Lamare, T.; Li, S.; Mahadea, V.; McCallion, S.; Chernushevich, J.: Application of Organic Rankine Cycles (ORC), World Engineers Convention, Geneva, september 2011.
- [8] Quoilin, S.; van den Broeck, Declaye, S.; Dewallef P.; Lemort V.: Techno - economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, 5th European Conference Economic and Management of Energy in Industry, Portugal, April 2009.
- [9] 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
- [10] Saleh, B.; Koglbauer, G.; Wendland, M.; Fischer, J.: Working fluids for low - temperature organic Rankine cycles, Energy 32 (2007) 1210–21
- [11] Wei, D.; Lu, X.; Lu, Z.; Gu, J.: Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery, Energy Convers Manage, 48 (2007) 1113–9.
- [12] Dai, Y.; Wang, J.; Gao L.: Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery, Energy Conversion and Management 50 (2009) 576–582
- [13] Kosi, F.; Stojković, M.; Milovančević, U.; Otović, S.: Rashladni fluid HFO-1234yf: Termodinamička analiza ciklusa toplotnih pumpi malih snaga, kgh 1 (2011) 73–76
- [14] Tanaka, K.; Higashi, Y.: Thermodynamic properties of HFO - 1234yf (2,3,3,3 - tetrafluoropropene), International journal of refrigeration 33 (2010) 474–479
- [15] Aleksander, C. P.: Future refrigerants, kgh 4 (2012) 51–55

Kontakt autora:**mr.sc. Nurdin Čehajić, dipl.ing.maš.**

J.U. Mješovita srednja škola Živinice
Ul. Alije Izetbegovića 12a, 75270 Živinice
+387 35 772 611
nurddin_cehajic@hotmail.com

dr.sc. Suad Halilčević, red. prof.

Fakultet elektrotehnike, Univerzitet u Tuzli
ul. Franjevačka 2, 75000 Tuzla
suad.halilcevic@untz.ba

dr.sc. Izudin Softić, viši asistent

Fakultet elektrotehnike, Univerzitet u Tuzli
ul. Franjevačka 2, 75000 Tuzla
izudin.softic@untz.ba