

Radne tvari za organske Rankine procese

Cvjetović, Vladimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:397919>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Vladimir Cvjetojević

ZAVRŠNI RAD

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Vladimir Cvjetojević

Radne tvari za organske Rankine procese

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof.dr.sc.Veljko Filipan
Zavod za termodinamiku , strojarstvo i energetiku
Zagreb , Rujan 2019.

SADRŽAJ:

1. UVOD..... 1
2. OPĆI DIO.....2
 - 2.1 DRUGI GLAVNI ZAKON TERMODINAMIKE.....2
 - 2.2 CARNOTOV PROCES.....2
 - 2.3 CARNOTOV PROCES U MOKROM PODRUČJU.....3
 - 2.4 CLAUSIUS RANKINE PROCES.....4
3. ORGANSKI RANKINE PROCES.....6
 - 3.1 PRIMJENA ORC-a.....8
 - 3.1.1 BIOMASA.....10
 - 3.1.2 GEOTERMALNA ENERGIJA.....11
 - 3.1.3 SUNČEVA ENERGIJA.....12
 - 3.1.4 OTPADNA TOPLINA.....13
4. RADNE TVARI.....14
 - 4.1 ODABIR RADNE TVARI ZA ORC.....17
 - 4.2 HFC134a.....18
 - 4.3 HFC245FA.....19
 - 4.4 N-PENTAN.....20
 - 4.5 OMTS.....22
 - 4.6 TOLUEN.....23
5. RADNE TVARI U ORC PROCESU.....25
 - 5.1 HFC134a.....25
 - 5.2 HFC245FA.....26
 - 5.3 N-PENTAN.....28
 - 5.4 TOLUEN....29
 - 5.5.USPOREDBA RADNIH TVARI.....30
6. ZAKLJUČAK.....31
7. LITERATURA.....32
8. ŽIVOTOPIS.....34

Sažetak

Organski Rankineov ciklus je varijacija Rankineovog ciklusa u kojem se kao radni medij umjesto vode koristi lakoisparljivi organski fluid. Kako su u tom slučaju za isparavanje dovoljne relativno niske temperature ovakva tehnologija omogućava iskorištavanje energije niskotemperaturnih izvora poput otpadne topline , geotermalne energije , sunčeve energije , te energije biomase. Ta toplina se pretvara u rad koji se uglavnom koristi za dobivanje električne energije . U ovom završnom radu se iznose neke najčešće upotrebe ORC-a , kriteriji koje radna tvar mora zadovoljavati , ukratko je opisano nekoliko tvari koji su našli svoju praktičnu primjenu uz jednostavni proračun iskoristivosti procesa za dana radne uvjete.

Abstract

Organic Rankine cycle is a variation of Rankine cycle where organic fluid with low evaporation temperature is used instead of water. Thus , enabling the use of low-temperature energy source , this sort of technology makes it possible to yield useful energy from low-temperature heat source like waste heat recovery , geothermal energy , solar energy and biomass. The heat is converted to work which is the most likely used for generating the electricity. In this final thesis are stated some of the most common applicaiton of ORC technology , criteria that each organic fluid must meet , some of the most commonly used compounds , as well as the simple calculation of their efficiency under stated working conditions.

1.UVOD

Kako raste broj ljudi na Zemlji i životni standard njenih stanovnika , potrebe čovječanstva za energijom sve su veće. Fosilna goriva koja trenutno predstavljaju najvažniji pojedinačni izvor energije su ograničenih zaliha , koje se procjenjuje sveukupno na nekih 300 godina u budućnosti. Iako se nas direktno ne tiče nestanak goriva za 300 godina , svi smo svjedoci važnosti opskrbe pojedine civilizacije energijom. World Energy Council predviđa da će se do 2030. godine potrošnja svih oblika energije udvostručiti , stoga je moguće da će se trenutne zalihe energenata potrošiti i prije toga roka. Također , sagorijevanjem konvencionalnih (fosilnih) goriva nastaju velike količine stakleničkih plinova koji uzrokuju prekomjerni efekt staklenika , pojavu ozonskih rupa , zagađenje vode , zagađenje zemlje . Također klasične termoelektrane (ukoliko nisu u kogeneraciji) proizvode jako puno jalove topline koja se baca u okoliš. Kao jedno od mogućih rješenja za navedene probleme nameću se obnovljivi izvori energije , koji unatoč svom primamljivom nazivu imaju nedostatak da su nestabilni i teško ih je pretvoriti u koristan rad. Jedan od načina na koji se obnovljivim izvorima energije ipak može ovladati je korištenje niskotemperaturnog izvora topline pomoću Organskog Rankine ciklusa (ORC) za proizvodnju električne energije. Pod niskotemperaturne izvore topline spada biomasa , otpadna toplina , geotermalna energija te energija sunca.

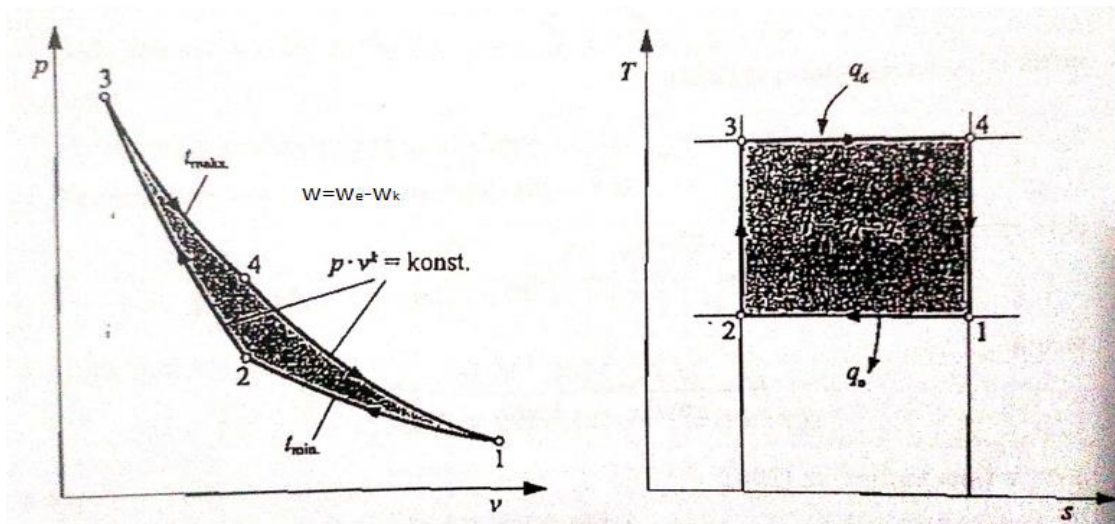
2.OPĆI DIO

2.1 Drugi glavni zakon termodinamike

U svim termoenergetskim postrojenjima koja daju rad se odvija desnokretni termodinamički proces (provode se u smjeru kazaljke na satu). Kada toplina prelazi s tijela više na tijelo niže temperature , proces je desnokretni i daje rad . Takvi se procesi odvijaju u toplinskim strojevima, odnosno postrojenjima , npr. plinskim i parnim turbinama te u motorima s unutrašnjim izgaranjem. [1]

2.2. Carnotov proces

Kako bi dobili radi u kružnom procesu , prema drugom glavnom zakonu toplina mora prelaziti s toplijeg na hladnije tijelo , prema tome moramo imati dva toplinska spremnika , jedan topliji (izvor topline) i jedan hladniji (izvor hladnoće). Sadi Carnot je prvi čovjek koji je predložio jedan takav kružni proces koji bi se sastojao od dvije izoterme i dvije adijabate kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Carnotov kružni proces u p-v i T-s dijagramu

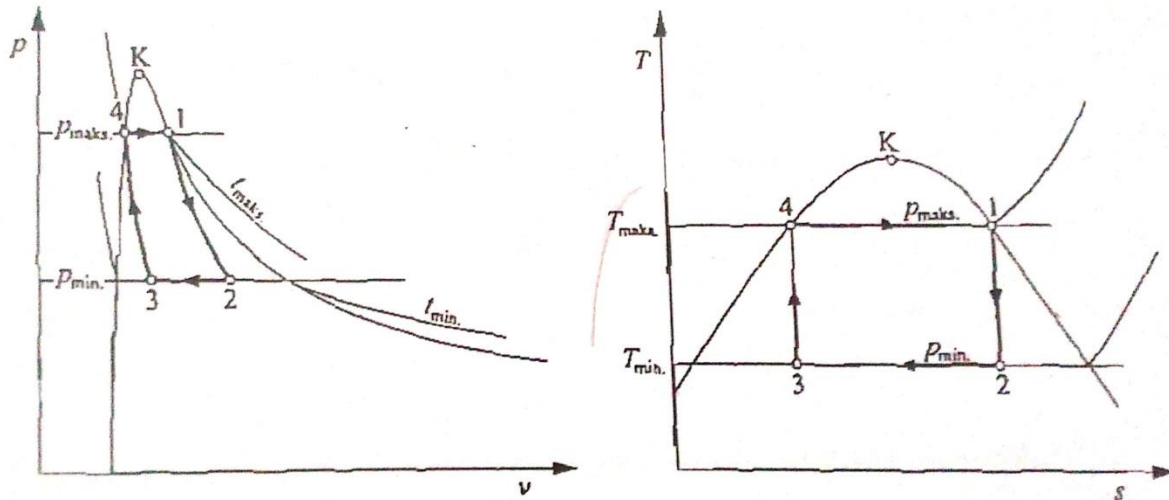
Iz slike slijedi formula za iskoristivost Carnotovog procesa :

$$\eta = \frac{w}{q_d} = \frac{q_d - q_o}{q_d} = \frac{T_3 - T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Iz ovoga slijedi da iskoristivost Carnotovog procesa ovisi o maksimalnoj (temperaturi dovođenja topline) i minimalnoj (temperaturi odvođenja topline) temperaturi u procesu.

2.3 Carnotov proces u mokrom području

Realne radne tvari sa kojima se radi se pri određenim uvjetima se ukapljuju i prelaze u dvofazno (mokro) područje. Carnotov proces u takvom području se također odvija između dvije izoterme i adijabate. U mokrom području izotermne promjene su ujedno i izobarne. Prema tome, na maksimalnoj temperaturi procesa će se dešavati isparavanje a na minimalnoj kondenzacija (slika 2).



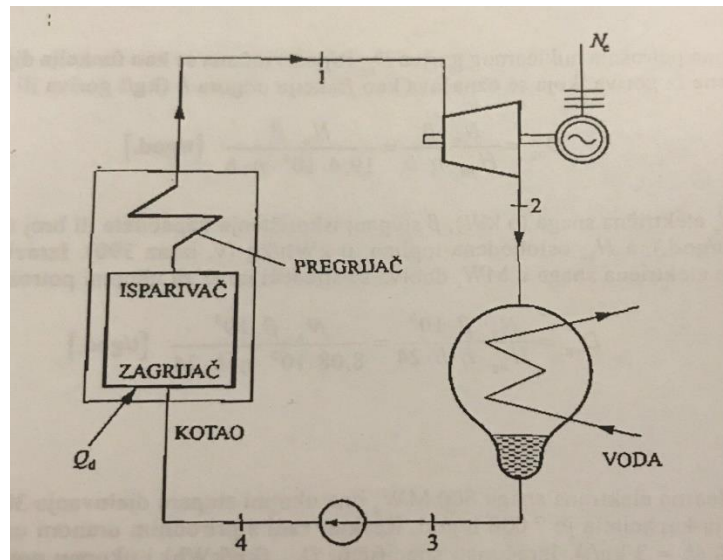
Slika 2. Carnotov proces u mokrom području

Unatoč visokom termodinamičkom stupnju iskorištenja ovaj proces u praksi nikada nije ostvaren jer se naišlo na niz problema. Kako su potrebne velike razlike temperatura javljao bi se veliki omjer maksimalnog i minimalnog volumena (v_1/v_3), što bi značilo izvedbu glomaznog stroja. Ekspanzija bi se odvijala u mokrom području što podrazumijeva pojavu kapljica i eroziju lopatica turbine čime bi se dramatično smanjio njezin radnivijek. Također proces kondenzacije je nepotpun, što ukazuje da bi morali komprimirati mokru paru velikog jediničnog volumena do stanja vrele kapljevine malog jediničnog volumena uz veliki utrošak energiju te glomaznu izvedbu kompresora.

2.4 Clausius-Rankineov proces

U svim parnim postrojenjima odvija se termodinamički proces koji se naziva Rankineov, a zasniva se na Carnotovom procesu u mokrom području (slika 2). Najveća razlika je u tome što se za stlačivanje radnog fluida koristi pumpa (ovdje imamo vrelu kapljevину umjesto mokre pare) a ne kompresor pošto stlačivanje kapljevine zahtijeva daleko manji utrošak energije od kompresije plina. Radi se o ciklusu u kojem radni fluid (voda) isparava te ekspandira u turbini pri čemu daje rad. Jednostavno parno postrojenje sastoji se od sljedećih dijelova:

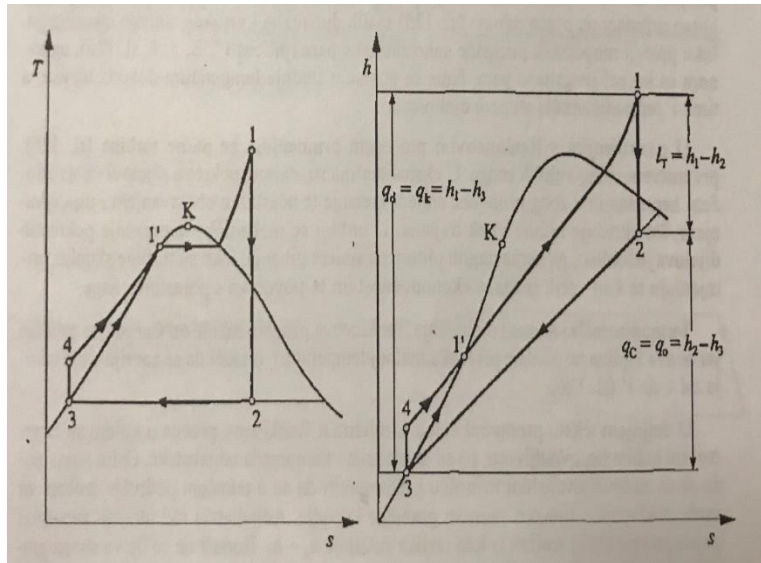
1. Kotla (K), u kojem se proizvodi para uz konstantni tlak, na račun topline koja se oslobađa izgaranjem goriva;
2. Turbine (T), u kojoj se dio energije pare pretvara u mehanički rad;
3. Kondenzatora (C), gdje para prelazi u tekućinu, uz konstantni tlak i temperaturu;
4. Pojne pumpe (P), koja vraća vodu u kotao [1]



Slika 3. Shema jednostavnog parnog postrojenja [1]

Rankineov proces se sastoji od četiri koraka:

- adijabatska ekspanzija pregrijane pare 1-2 (izentropa)
- potpuna kondenzacija pare u kondenzatoru 2-3 (izobara)
- pumpanje vrele kapljevine na tlak u kotlu 3-4 (izentropa)
- zagrijavanje kapljevine do stanja pregrijanosti 4-1 (izobara)



Slika 4. Pojednostavljeni Rankineov proces [1]

Para ekspandira od 1 do 2 stoga se rad dobiven u ekspanzijskoj turbini može računati kao

$$w = h_1 - h_2$$

Toplina koja se odvede rashladnom vodom u kondenzatoru iznosi:

$$q_c = h_2 - h_3$$

Uzimajući u obzir da je volumen kapljevine prije i poslije kompresije jednak, te da je tlak na ulazu u ekspanzijsku turbinu jednak tlaku na izlazu iz pumpe ($p_1 = p_4$) rad pojne pumpe se može napisati:

$$w_p = v_3(p_1 - p_3)$$

Toplina koja se dovodi u kotlu (ona toplina koja se dobiva uglavnom sagorijevanjem fosilnih goriva)

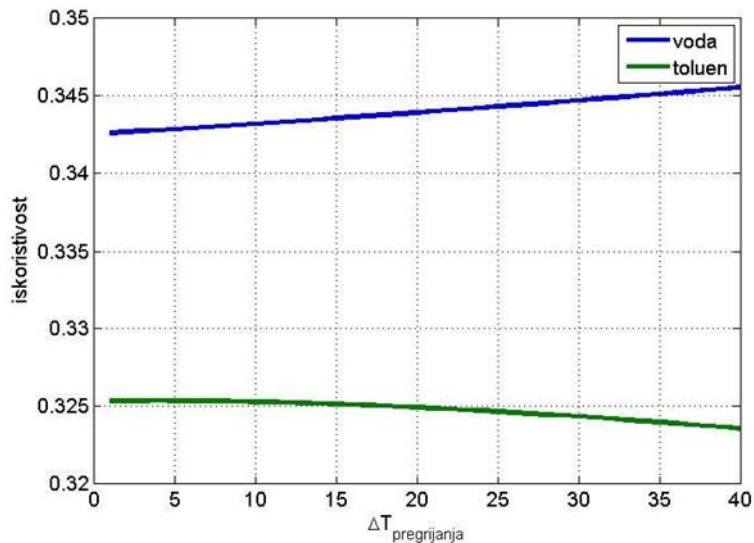
$$q_{dov} = h_1 - h_4$$

Termodinamički stupanj iskorištenja definira se kao omjer dobivenog rada (1-2) i uložene topline (4-1) pa je prema tome:

$$\eta = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_4)$$

3. ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS

ORC je termodinamički proces koji koristi organski fluid velike molekularne mase, po tome je i dobio ime.[2]. Zbog velike molekularne mase turbina radi sa manje okretaja, prisutni su niži radni tlakovi te nema pojave erozije na lopaticama turbine.[3] Organski fluid ima puno nižu temperaturu zasićenja od vode zbog čega je prikladan za niskotemperaturne izvore. Prvi prototip snage 3 kW koristio je sunčevu energiju, a predstavljen je u Rimu 1961. godine. Razvili su ga izraelski inženjer Harry Zvi Tabor i francuz Lucien Bronicki.[4]. ORC tehnologija se koristi kako bi se povećala učinkovitost već postojećih tehnologija za pretvorbu (otpadne) topline u električnu energiju. U tu svrhu može koristiti toplinu izvora temperature već od 80 °C pa do 350 °C ovisno koji se radni fluid koristi. Pri višim temperaturama iskorištenje ORC postrojenja je manje nego što bi bilo za klasičan ciklus sa vodenom parom ilustrirano na slici 4. ORC tehnologija na tržištu se pojavila 80-ih godina čemu je zasigurno poticaj dao drugi naftni šok 1979. godine kada se zbog visokih cijena sirove nafte počelo razmišljati o štednji energije. Termodinamički je identičan Rankineovom procesu te se idealno sastoji od dvije izentropije i dvije izobare, u stvarnosti se događa politropska ekspanzija i kompresija o čemu govori izentropski stupanja djelovanja turbine/pumpe. Zbog trenja je prisutan mali pad tlaka u sustavu zbog čega promjena nije potpuno izobarna, no to se prilikom proračuna obično zanemaruje.



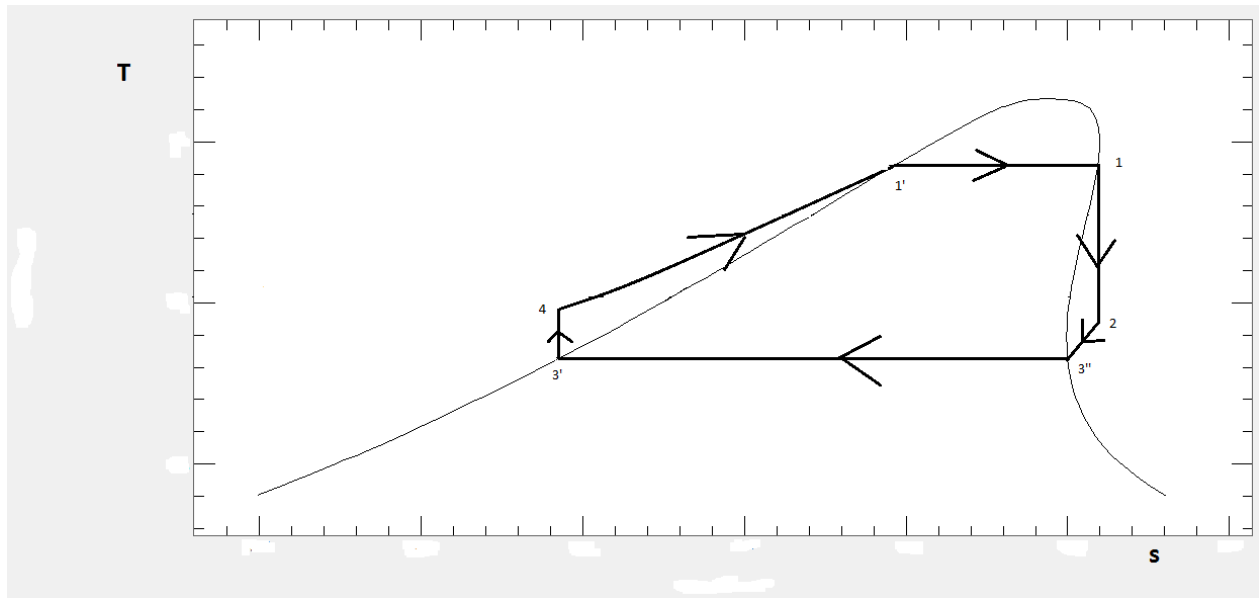
Slika 5. Ovisnost termodinamičke iskoristivosti i temperature pregrijanja kod vode i toluena [5]

Organski Rankine ciklusi imaju brojne prednosti u odnosu na konvencionalne načine proizvodnje električne energije:

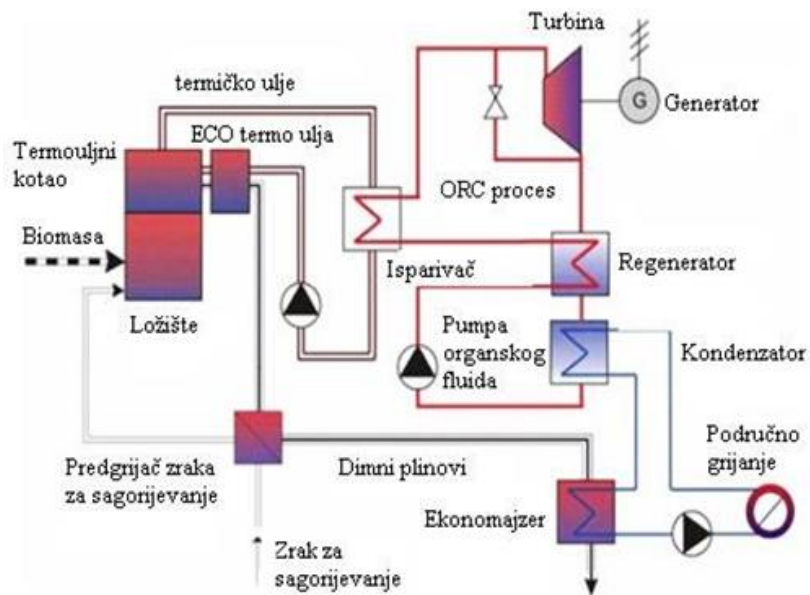
- Rad pri nižim temperaturama
- Niži troškovi rada i održavanja
- Kompaktnost
- Bez potrošnje vode u nekim slučajevima

- Manje dimenzije ekspandera sa većim brojem okretaja
- Tihi rad
- Jednostavno pokretanje/zaustavljanje postrojenja [6]

Još jedna prednost kod ORC-a ,kako se radi o manjoj razlici entalpiji, nema potrebe za višestupanjskom ekspanzijom kao kod vodene pare te su prisutne manje brzine vrtnje same turbine zbog čega se osovina može direktno priključiti na generator te nema potrebe za ugradnjom reduktora.



Slika 6. ORC u T-s dijagramu

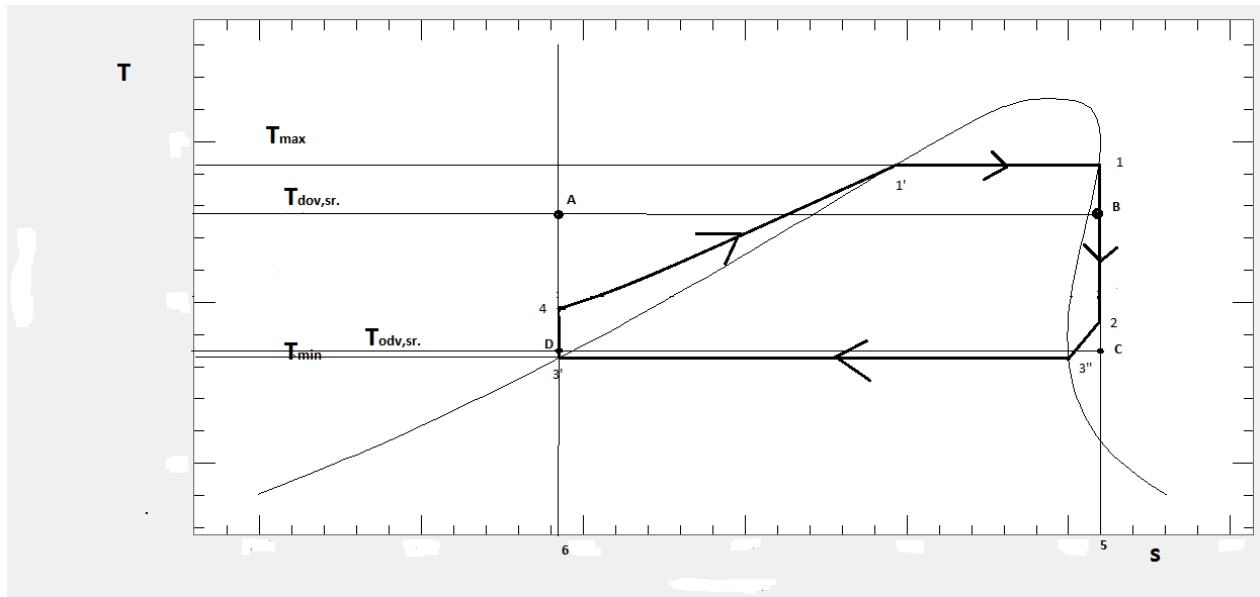


Slika 7. Shema ORC postrojenja na biomasu

ORC kao i svaki drugi termodinamički proces možemo procijeniti uspoređujući ga sa Carnotovim procesom. Međutim, za razliku, od Carnota ovdje se maksimalne i minimalne temperature u procesu ne poklapaju sa srednjim temperaturama dovođenja i odvođenja topline stoga je temperaturu nužno 'osrednjiti'. Srednje temperature dovođenja i odvođenja topline su definirane:

$$T_{dov,sr} = \frac{\int_4^1 T ds}{s_1 - s_4} \quad T_{odv,sr} = \frac{\int_{3'}^2 T ds}{s_2 - s_{3'}}$$

Iz navedene definicije slijedi da je srednja temperatura dovoda topline $T_{dov,sr}$ takva da je dovedena toplina Q_{dov} jednako površini A-B-4-6-A (slika 8.) odnosno 4-1'-1-5-6-4, srednja temperatura odvoda topline $T_{odv,sr}$ je takva da je odvedena toplina Q_{odv} jednaka površini D-C-5-6-D odnosno 3'-3''-2-5-6-3'.



Slika 8. ORC proces sa srednjim temperaturama dovoda/odvoda topline

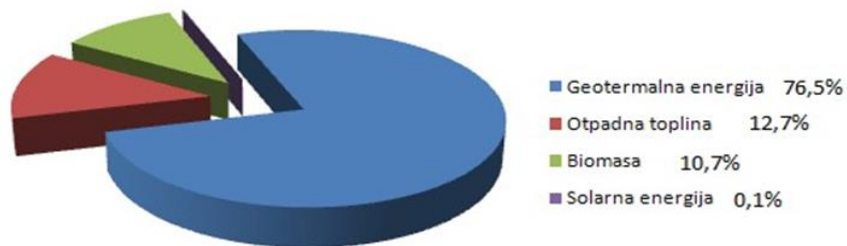
Nakon ovih razmatranja izraz za toplinsku efikasnost procesa glasi:

$$\eta = 1 - \frac{q_{odv}}{q_{dov}} = 1 - \frac{T_{odv,sr}(s_5 - s_6)}{T_{dov,sr}(s_5 - s_6)} = 1 - \frac{T_{odv,sr}}{T_{dov,sr}}$$

3.1. Primjena ORC-a

Svoju primjenu nalazi najčešće kod geotermalnih izvora, biomase, sunčeve energije, te otpadne topline. Procijenjena ukupna izlazna snaga instaliranih ORC sistema je oko 1,3 GW_{el} [7]

Na slici 9. je prikazan udio proizvodnje električne energije pojedine tehnologije.



Slika 9. Udio pojedinog izvora topline ORC postrojenja [4]

Iz navedenog grafikona se vidi da su gotovo tri četvrtine ORC elektrana na geotermalnu energiju, pri čemu se uglavnom radi o elektranama sa binarnim ciklusom gdje topla voda u primarnom krugu preko izmjenjivača topline zagrijava organski fluid u sekundarnom krugu. U pogonu je 80-ak postrojenja (Njemačka, Austrija, Italija...), pri čemu se snaga pojedinog postrojenja kreće od 200 do 2000 kW_{el}

Dolje u tablici su prikazani neki od svjetskih proizvođača ORC postrojenja.

Tablica 1. Disperzija ORC postrojenja u svijetu [7]

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

3.1.1 Biomasa

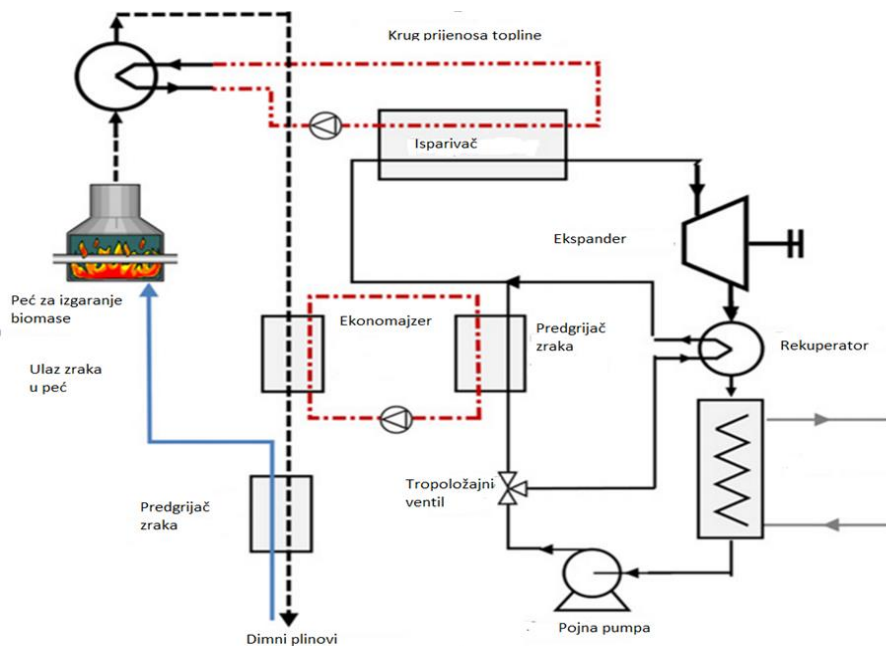
Biomasa je materijal biljnog ili životinjskog podrijetla koja se može koristiti u svrhu dobivanja energije ili kao sirovina u raznim granama industrija. Također se javlja kao otpad u procesu proizvodnje bilja, farmerstvu ili preradi hrane, ali se može i ciljano proizvoditi poput uzgoja šećerne repe radi proizvodnje etanola koji se dodaje benzinu kako bi zadovoljavao sve strože ekološke norme.

Biomasa u zadovoljavanju svjetskih energetske potreba sudjeluje s približno 14% i ponajprije potječe od ostataka poljoprivredne i drvene proizvodnje te iz šuma.[8]

Prema istraživanjima austrijske udruge za biomasu, 15 puta više radnih mjesta osigurava se pri korištenju drva kao energenta u odnosu na fosilne izvore energije. Uz predviđenu proizvodnju od 113 Mtoe ($4.731084 \cdot 10^{12}$) energije iz biomase u 2020. godini u EU bi se stvorile mogućnosti za otvaranje oko 1.500.000 novih radnih mjesta. [8]

U Hrvatskoj se ističu tvrtke poput Lika Energo Eko u kojoj se pojavilo prvo takvo postrojenje marke Turboden, zatim Spin Vallis d.d. – Požega, Cedar d.o.o.- Vrbovsko te Pana d.o.o. –Turopolje koriste ORC tehnologiju istog proizvođača radi podmirivanja vlastitih potreba za električnom energijom, pri čemu je riječ o pilani/sušari koje energiju dobivaju iz drvnih ostataka.

Iako vrlo perspektivan izvor energije, biomasa je prikladna za proizvodnju električne energije samo u lokalnim zajednicama (pogotovo ako je prisutna loša kvaliteta opskrbe električnom energijom) zbog niske gustoće energije koja uzrokuje visoke troškove transporta. Snaga jednog takvog CHP postrojenja se kreće od 6-10 MW od čega je 1-2 MW_{el}, snage pri kojoj bi proizvodnja pomoću vodene pare bila preskupa. Kako se radi uglavnom o malim jedinicama te je proizvodnja samo električne energije nešto skuplja, biomasa se često koristi kako bi zadovoljila prvenstveno potrebe topline potrošača dakle riječ je o kombiniranoj proizvodnji.



Slika 10. Shema ORC CHP postrojenja na biomasi [9]

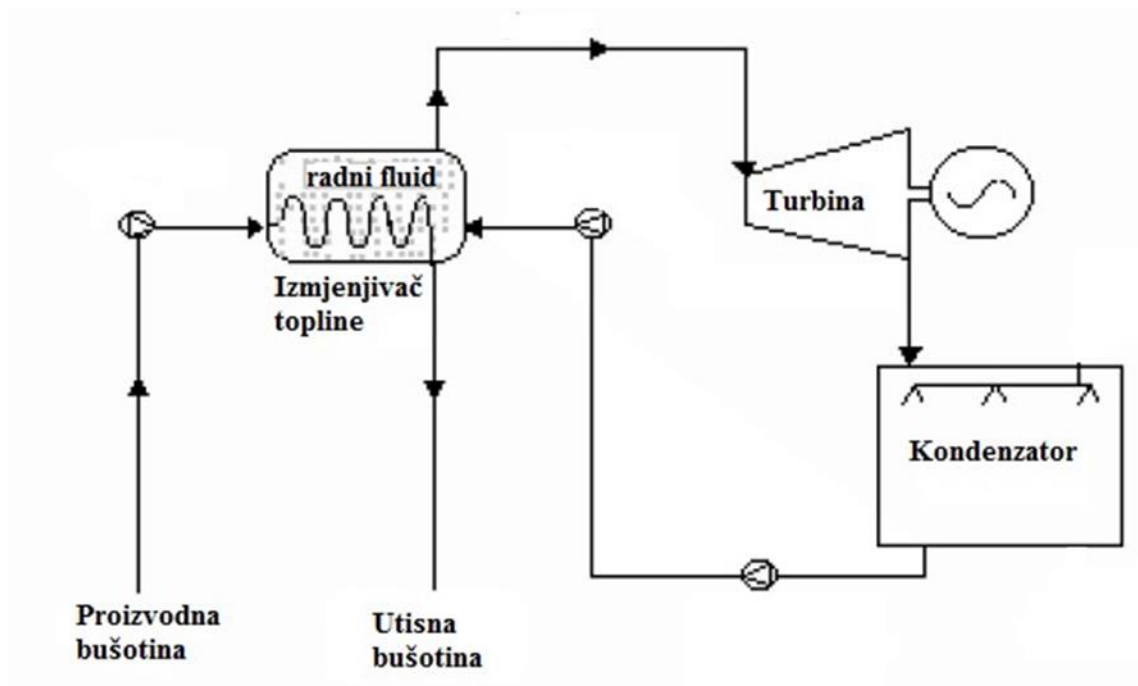
3.1.2. Geotermalna energija

Ovaj izvor energije je najzastupljeniji kod Organskog Rankine procesa čija je shema dana na slici 11 . Jedna od najvećih prednosti je što se radi o vrlo stabilnom izvoru što nije slučaj kod sunčeve energije koja znatno varira u ovisnosti o godišnjem dobu i lokalnim vremenskim prilikama.

U Republici Hrvatskoj 2018. godine je izgrađena i puštena u pogon prva GTE Velika Ciglena snage 17,5 MW_{el.}. Postrojenje se nalazi pokraj Bjelovara i iskorištava geotermalni potencijal bjelovarske poddepresije koji je otkriven 1980. godine, pri istraživanju potencijalnih nalazišta nafte za potrebe INA-e.[10]

Geotermalna ležišta niske entalpije ($T < 150^{\circ}\text{C}$) imaju višestruko veći potencijal za proizvodnju električne energije i mogućnost mnogo šire regionalne distribucije u usporedbi s ležištima visoke entalpije zbog toga što su rasprostranjenija i nalaze se na manjim dubinama.[11]

Kod većine geotermalnih ležišta temperatura geotermalnog fluida iznosi do 150 C , što ih čini prikladnim izvorom topline za ORC. Donja granica temperature izvora topline iznosi 80 C ispod koje iskorištavanje ležišta postaje neisplativo. Pri tome su se najprikladnije pokazale binarne geotermalne elektrane za proizvodnju struje čija je shema dana na slici 11.



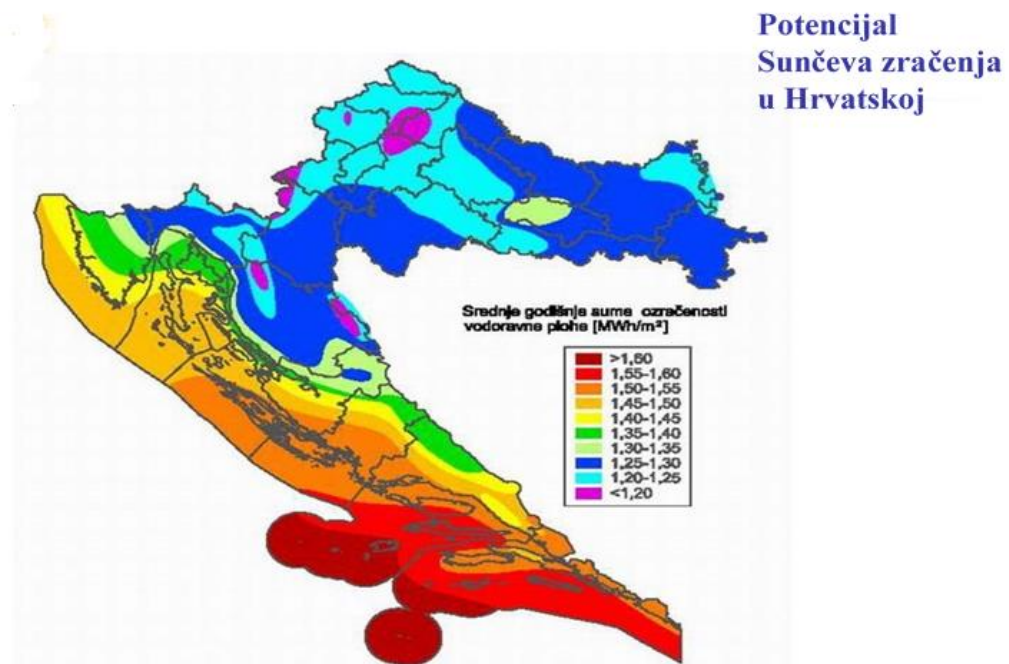
Slika 11. Shema geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem [11]

3.1.3. Sunčeva energija

Sunčevo zračenje, globalno zasigurno pokazuje najveći potencijal od svih nama poznatih izvora energije.

Da bi uspjeli pohraniti onoliku energiju koju nam Sunce daje u samo 30 min bilo bi dovoljno da cijelo čovječanstvo ima besplatnu energiju (električnu energiju) više od godinu dana.[12]

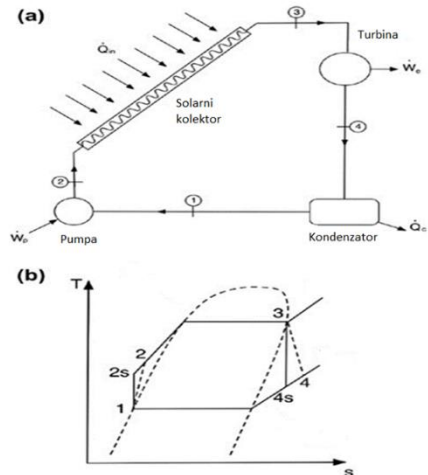
Hrvatska posjeduje veliki potencijal za iskorištavanje ove vrste energije , a pogotovo se to odnosi na područja srednjeg i južnog Jadrana



Slika 12. Potencijal Sunčevog zračenja u Hrvatskoj

Ipak , solarni ORC je vrlo slabo zastupljen u odnosu na druge tehnologije. Poteškoće stvara činjenica da sunčeva energija znatno varira tokom godine , ali ne samo tokom godine već i tijekom dana.

Prema shemi na slici 13 solarni kolektor sunčevu energiju koncentrira kako bi zagrijao (suhi) organski fluid tj. doveo ga do stanja suhe zasićenosti (3) koji vrši rad u turbini , hladi se u kondenzatoru (4-1) te se pumpa pojom pumpom na tlak u isparivaču (1-2)



Slika 13. a) Shema solarnog ORC ; b) Prikaz promjena stanja u T-s dijagramu [13]

2006. godine CSP (Concentrating Solar Power) postrojenje je izgrađeno u Arizoni snage 1 MW_{el} koristeći n-pentan kao radnu tvar.

3.1.4 Otpadna toplina

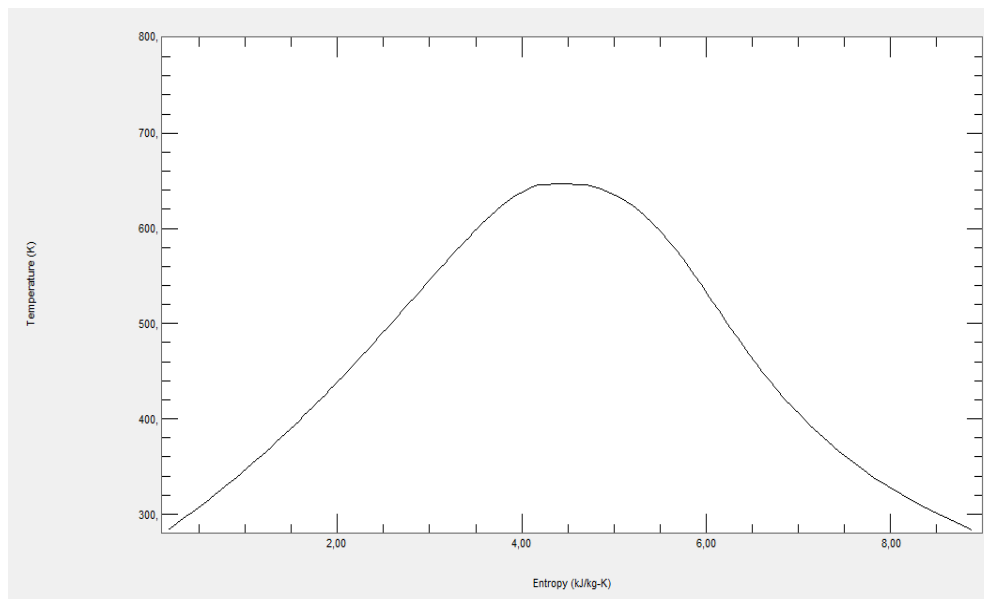
Bacanje otpadne topline u okoliš uzrokuje dvije vrste onečišćenja, jedno su ispušni plinovi poput NO_x , SO_2 , CO_2 te zagrijavanje lokalnih vodotoka što ukoliko nije strogo kontrolirano može ozbiljno narušiti ravnotežu u lokalnim biozajednicama. Otpadna toplina se može koristiti za zagrijavanje organskog fluida pomoću izmjenjivača topline te se upotrijebiti u ORC postrojenju, također se može koristiti kako bi zadovoljila toplinske potrebe potrošača (kogeneracija). Industrije poput cementara imaju veliki potencijal za iskorištavanje ovog oblika otpadne topline gdje se 40% topline baca putem ispušnih plinova u atmosferu. Samo u Sjedinjenim Američkim državama se procjenjuje na potencijalnih 750 MW_{el} [9]

4. RADNE TVARI

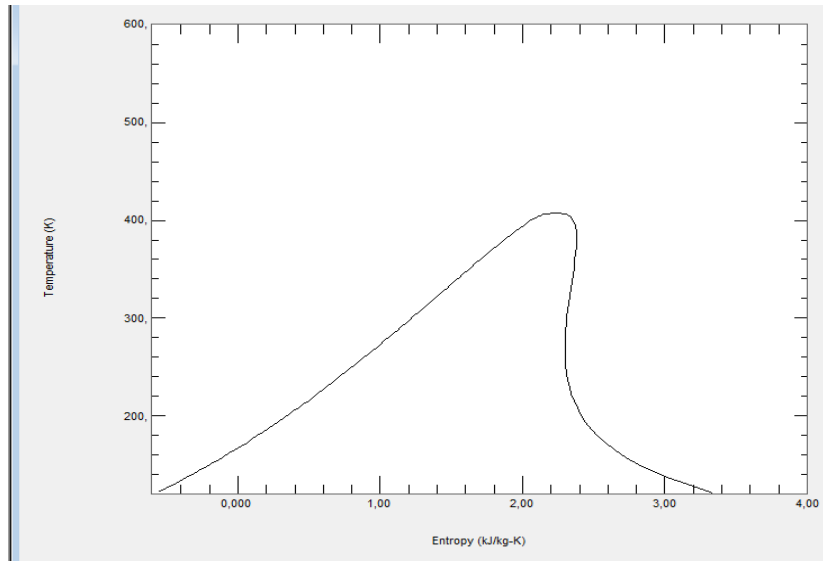
Organski Rankine proces koristi radnu tvar velike molekularne mase koja ima točku vrelišta daleko nižu od vode. Umjesto vode se može koristiti na stotine drugih fluida koji su pogodni za izvore topline čija je temperatura ispod $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ pošto organski fluidi zahtijevaju manju temperaturu kako bi prešli u parnu fazu. Kod organskih fluida radni tlakovi ne prelaze 30 bar, dok kod vode se ta vrijednost kreće od 60-70 bar.

Prema izgledu granične krivulje u T-s dijagramu radne tvari se mogu podijeliti u tri skupine

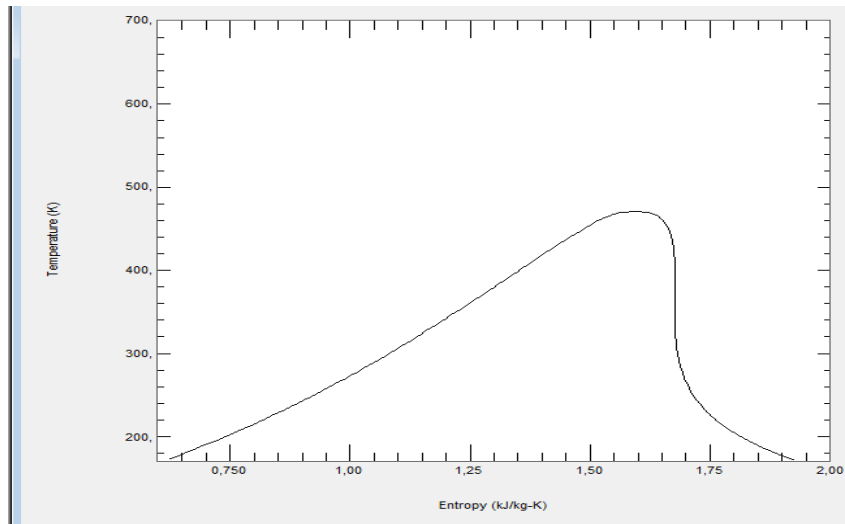
- Mokri fluidi čija je desna granična krivulja u negativnog nagiba npr. voda, propan, R134 (slika 14)
- Suhi fluidi sa pozitivnim nagibom desne granične krivulje npr. izobutan, toluen, R245fa (slika 15)
- Izentropski fluidi čija je desna granična krivulja okomita na apscisu npr. R11, R142b



Slika 14. T-s dijagram za mokri fluid (voda)

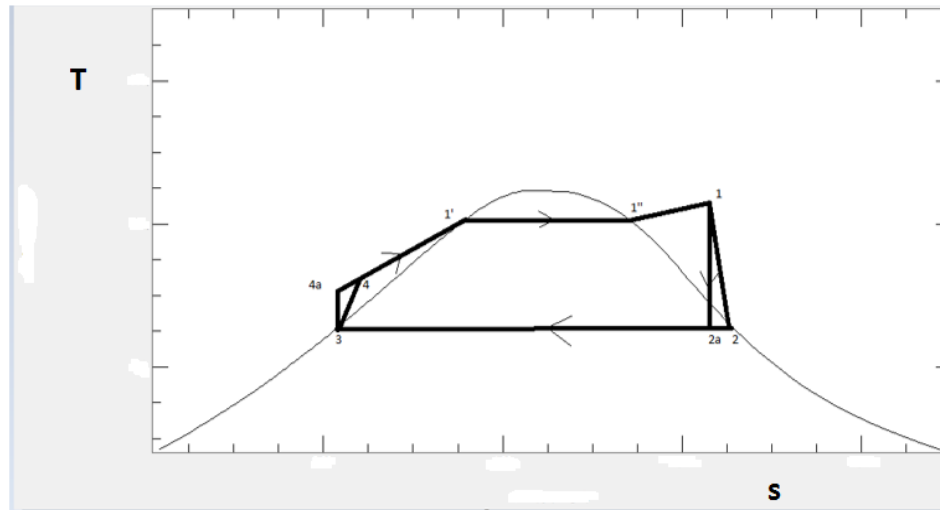


Slika 15. T-s dijagram za suhi fluid (izobutan)



Slika 16. T-s dijagram za izentropski fluid (R11 – triklorfluormetan)

Kod vode , kao tipičnog mokrog fluida koji se koristi ekspanzija može završiti u dvofaznom području (slika 17.) , što znači pojavu kapljicu u zadnjim dijelovima turbine i pojavu erozije koja može uzrokovati znatna oštećenja i problem u radu postrojenja.



Slika 17. Ciklus u mokrom području

Kod suhih fluida tog problema nema jer radna tvar završava svoju ekspanziju u pregrijanom području tako da nije potrebno pregrijavati fluid prije ulaska u ekspanzijsku turbinu, no međutim ukoliko je desna granična krivulja previše nagnuta tada para napušta turbinu sa značajnim pregrijanjem te se puno topline gubi u kondenzatoru. Ipak to se može riješiti ugradnjom regeneratora koji tu toplinu koristi radi predgrijavanja radne tvari čime se poboljšava ukupni koeficijent iskorištenja postrojenja.

Kod izentropskih fluida ekspanzija završava u jednofaznom području te nema potrebe za regeneratom, što smanjuje cijenu konstrukcije samog uređaja.

Nadalje, gustoća pare organskog fluida je još jedan vrlo bitan faktor koji treba uzeti u obzir. Veća gustoća znači da se može koristiti manji volumen fluida za prijenos iste količine topline, što nam smanjuje dimenzije postrojenja, međutim, također valja napomenuti da je razlika između entropije suhozasićene pare i vrele kapljevine puno manja nego kod vode, te je stoga manja entalpija isparavanja te je stoga potreban puno veći maseni protok kako bi se prenijela ista količina topline što znači da pumpa mora više raditi te predstavlja veći trošak. O tome govori veličina BWR (Back Work Ratio) koja je zapravo omjer rada kojeg potroši pumpa i rada koji se dobije u turbini, pa tako za ciklus sa vodenom parom on iznosi oko 0,4%, za višetemperaturni ORC koji koristi toluen kao radnu tvar BWR se obično kreće 2-3%, a za niskotemperaturni izvor koji koristi HFC-134a vrijednost prelazi 10% [9]

Prema kemijskoj sastavu radni fluidi se mogu podijeliti u devet skupina:

- Ugljikovodici
- Eteri
- Alkoholi
- Siloksani
- Fluorovodici
- Klorfluorugljikovodici (CFC)
- Hidroklorfluorugljikovodike (HCFC)
- Hidrofluorugljike (HFC)
- Hidrofluorolefine (HFO) [7]

4.1 Odabir radnih tvari za ORC

Jedno od najvažnijih stvari koji valja imati na umu prilikom projektiranja ORC postrojenja je odabir radne tvari koja će se koristiti. U prvom redu se mora uzeti u obzir temperaturu izvora topline . Pitanje koje svakako treba raspraviti kod ORC ciklusa glasi da li je organski fluid doista bolje rješenje od vodene pare kao radna tvar za dane uvjete. To pitanje se naročito nameće kod srednjetemperaturnih izvora topline.[14] Sljedećih nekoliko kriterija inženjeri moraju uzeti u obzir prilikom odabira prikladnog fluida:

- Fluid mora pokazivati što bolju efikasnost za danu temperaturu isparavanja i temperaturu kondenzacije. Ono ovisi o nizu termodinamičkih svojstava kao što su kritična točka , koeficijent acentričnosti ω (pokazuje koliko je molekula nepravilnog oblika) , specifični toplinski kapacitet , gustoća...
- Valja obratiti pozornost na nagib linije isparavanja , kako bi se izbjegla erozija na lopaticama turbine i ukoliko je potrebno ugraditi regeneratore nakon ekspanzije
- Poželjno je da para bude što gušća tj sa što manjim specifičnim volumenom kako bi se smanjile dimenzije uređaja
- Niska viskoznost kako bi gubici zbog trenja bili što manji
- Visoka toplinska vodljivost kako bi se toplina što bolje i što brže prenijela na fluid u izmjenjivačima topline
- Tlak isparavanja ne smije biti previsok zbog sigurnosnih ali i ekonomskih razloga jer tada raste početna cijena i troškovi održavanja
- Tlak kondenzacije mora biti viši od atmosferskog kako bi se izbjegao ulazak zraka u sistem
- Relativno nizak tlak isparavanja , radi jeftinije izvedbe
- Radna tvar mora biti kemijski stabilna pri višim temperaturama , fluid mora ostati stabilan čak i pri maksimalnoj temperaturi procesa
- Temperatura tališta mora biti dovoljno niska kako ne bi došlo do smrzavanja fluida
- Tvar ne smije biti otrovna i zapaljiva pri maksimalnoj temperaturi procesa
- Ne smije zagađivati okoliš tj ODP (Ozone Depletion Potential) i GWP (Global Warming Potential) koji se mjeri relativno prema CO_2 , moraju poprimati dovoljno niske vrijednosti
- Mora biti lako dostupna i jeftina
- Ne smije kemijski reagirati sa materijalima od kojih je napravljen stroj , niti sa uljima za podmazivanje

Od velikog broja potencijalnih fluida samo njih nekoliko je pronašlo praktičnu primjenu (tablica 2).

Tablica 2. Često korištene radne tvari kod ORC postrojenja [9]

Radna tvar	Kemijsko ime	Kemijska formula	Primjena
HFC-134a (R134a)	1,1,1,2-tetrafluoroetan	$C_2H_2F_4$	Geotermalni izvori ili niskotemperaturna otpadna toplina
HFC-245fa (R245fa)	1,1,1,3,3-pentafluoropropan	$C_3H_3F_5$	Niskotemperaturna otpadna toplina
n-pentan	pentan	C_5H_{12}	CSP postrojenje u Nevadi , otpadna toplina , srednjeterperaturni geotermalni izvori
OMTS (MDM)	Oktametiltrisiloksan	$C_8H_{24}O_2Si_3$	CHP pogonjen na biomasu
Toluen	metilbenzen	C_7H_8	Otpadna toplina

HFC (Hydrofluorcarbons) su svoju primjenu pronašli prvenstveno kao zamjena za CFC (Chlorofluorocarbene) u rashladnim uređajima pošto u sebi ne sadrže atome klora koji uvelike povisuje vrijednost ODP-a , također su se pokazali kao dobri fluidi za upotrebu u ORC-u.

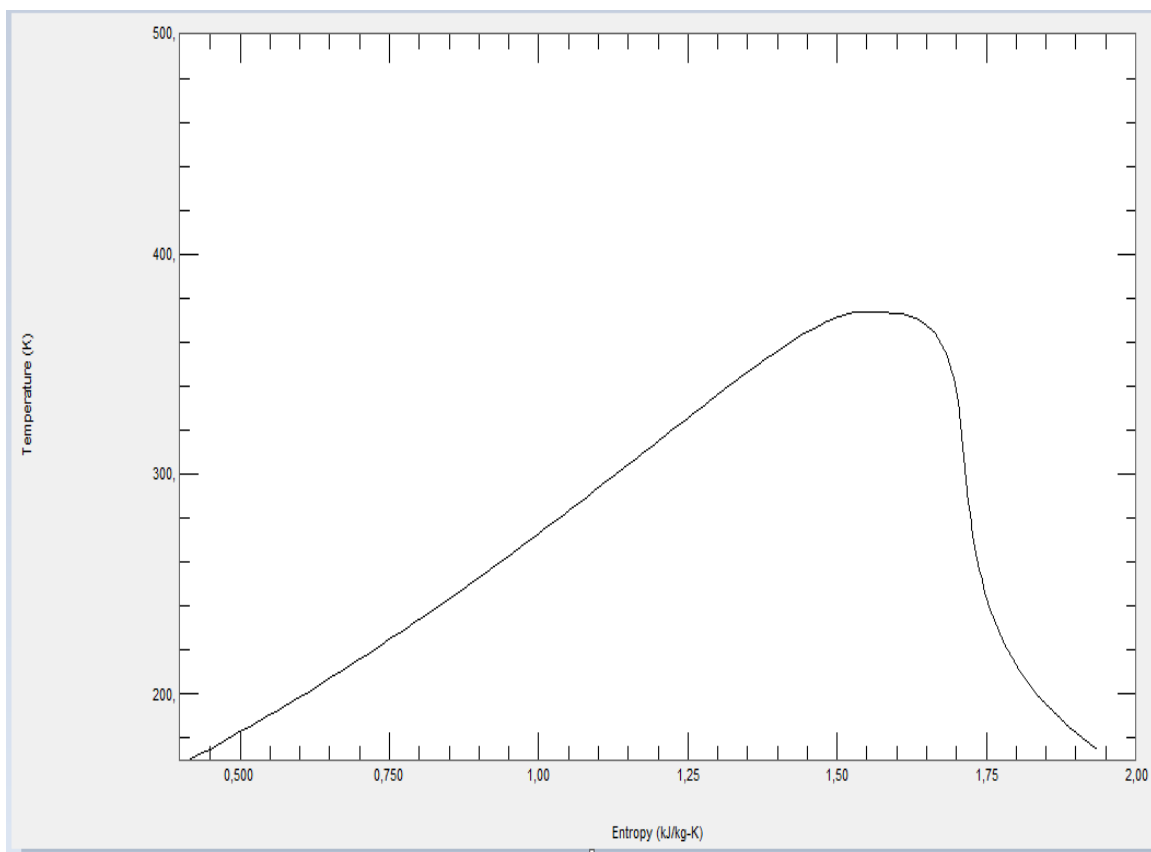
4.2 HFC-134a

Poznat je još pod nazivom R134a , kemijske formule CH_2FCF_3 (1,1,1,2-tetrafluoroetan) u narodu poznat kao 'plin za klime' jer svoju primjenu , osim kod niskotemperaturnog izvora topline nalazi u rashladnim uređajima. Pri temperaturama do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ R134 je najčešće odabran kao radna tvar. Odabir je temeljen na tome da je R134 nezapaljiv i neotrovan , i da ima ODP jednak nuli tako da postoji veliko iskustvo u korištenje ovog fluida u turbostrojevima i izmjenjivačima topline [15]. Isto tako R134a se pokazao efikasan pri nižim temperaturama. U tablici 3. su dana neka termodinamička svojstva R134a.

Tablica 3. Svojstva R134-a [16]

Molarna masa / kgkmol^{-1}	102,03
Temperatura trojne točke / K	169,85
Vrelište pri atmosferskim uvjetima / K	247,08
Kritična točka:	
Temperatura /K	374,21
Tlak /Mpa	4,0593
Gustoća / kg m^{-3}	511,9
Područje primjene:	
Minimalna temperatura /K	169,85
Maksimalna temperatura /K	455
Maksimalni tlak / MPa	70
Maksimalna gustoća / kgm^{-3}	1591,7

Iz danih podataka se vidi da je kritična temperatura oko $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, da je kritični tlak dovoljno visok (40,6 bar) a maksimalna radna temperatura $182\text{ }^{\circ}\text{C}$ znači da primjenu nalazi pri nižim temperaturama te da je tlak u kondenzatoru veći od atmosferskog kako ne bi ulazio zrak u sistem. Također ne predstavlja opasnost za ozonski sloj (ODP = 0) te pokazuje vrlo slaba staklenička svojstva.



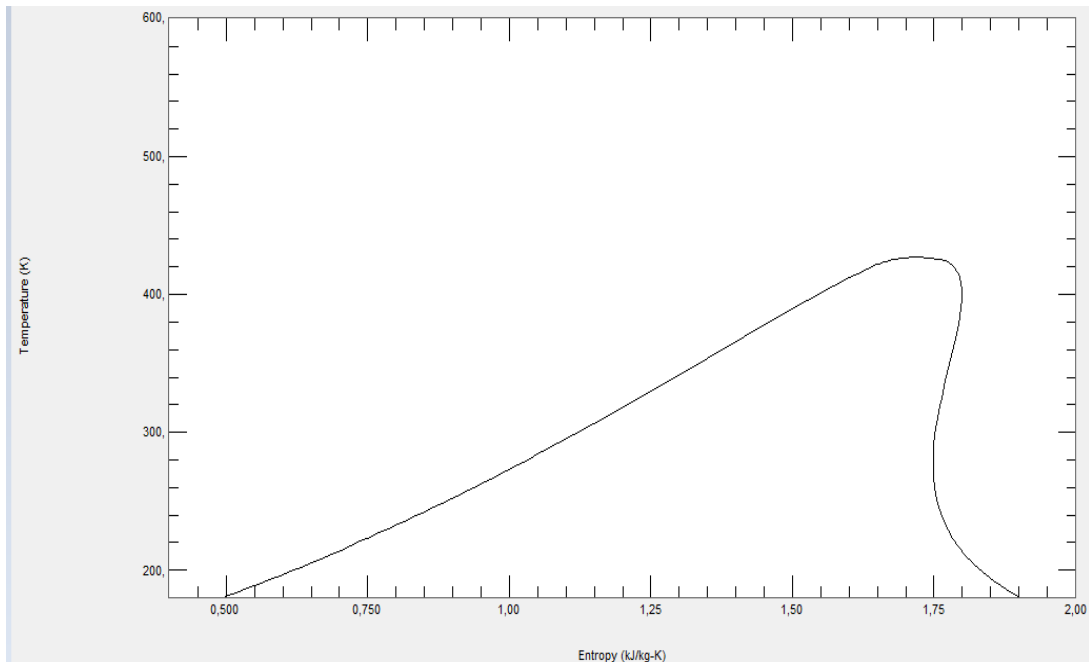
Slika 18. T-s dijagram za R134a

Na slici 18. se vidi da se radi o tvari čija je krivulja suhozasićene pare sa negativnim nagibom što ukazuje na to da je radnu tvar potrebno pregrijati prije ulaska u turbinu (iako manje nego što je to slučaj kod vode).

4.3 HFC245-fa

Spoj kemijskog imena 1,1,1,3,3-pentafluoropropan, također se koristi u rashladnim uređajima.

Pronađen je kao zamjena za R123, pošto zbog odsutnosti atoma klora ne djeluje štetno na ozonski omotač, što je regulirano Montrealskim protokolom po kojemu će se 2030. potpuno zabraniti njegova upotreba.



Slika 19. T-s dijagram za HFC-245fa

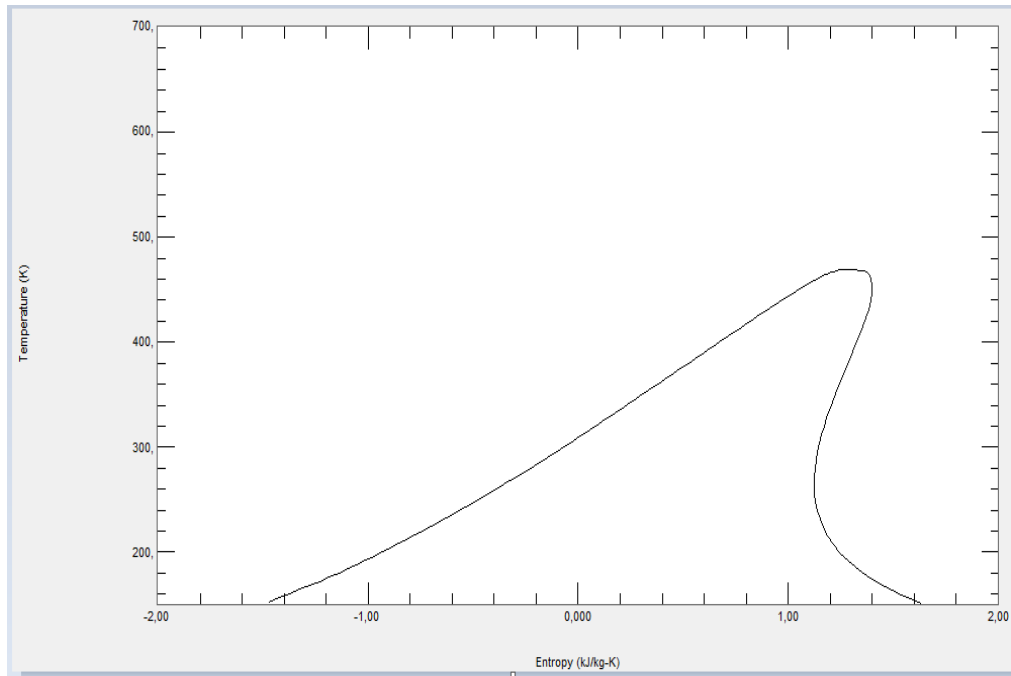
Tablica 4. Svojstva HFC245-fa [16]

Molarna masa / kgmol^{-1}	134,1
Temperatura trojne točke / K	171,1
Vrelište pri atmosferskim uvjetima / K	288,3
Kritična točka:	
Temperatura /K	427,2
Tlak /Mpa	3,65
Gustoća / kg m^{-3}	516,1
Područje primjene:	
Minimalna temperatura /K	171,1
Maksimalna temperatura /K	440
Maksimalni tlak / MPa	200
Maksimalna gustoća / kgm^{-3}	1648,8

Kako se radi o suhom fluidu (slika 19.) nije ga potrebno pregrijavati prije ekspanzije. Kritična temperatura je dovoljno visoka ($154\text{ }^{\circ}\text{C}$) a temperaturno područje primjene se kreće od $-102\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $167\text{ }^{\circ}\text{C}$ što ga čini prikladnim za niske temperaturne izvore topline. Kritični tlak od 36,5 bar omogućava konstrukciju u kojoj će tlak u kondenzatoru biti veći od atmosferskog.

4.4. n-pentan

Spoj kemijske formule C_5H_{12} pripada skupini nezasićenih ugljikovodika. Pri sobnim uvjetima to je bezbojna tekućina koja pliva na vodi i lako je zapaljiva zbog čega je potreban povećan oprez prilikom njegove upotrebe.



Slika 20. T-s dijagram za n-pentan

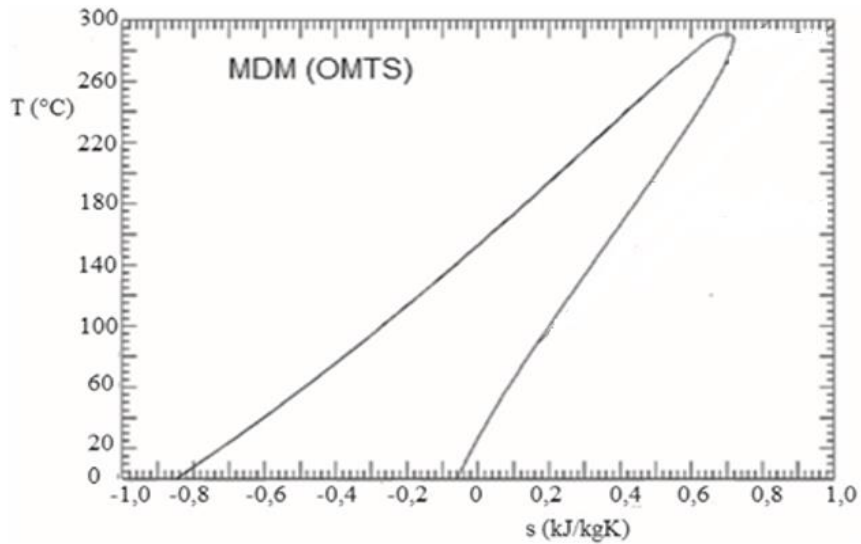
Tablica 5. Svojstva n-pentana [16]

Molarna masa / kgmol^{-1}	72,15
Temperatura trojne točke / K	143,5
Vrelište pri atmosferskim uvjetima / K	309,2
Kritična točka:	
Temperatura /K	469,7
Tlak /Mpa	3,37
Gustoća / kg m^{-3}	232
Područje primjene:	
Minimalna temperatura /K	143,5
Maksimalna temperatura /K	600
Maksimalni tlak / MPa	100
Maksimalna gustoća / kgm^{-3}	808,1

Iz priloženog T-s dijagrama se vidi da se radi o suhom fluidu , prema tome nije potrebno predgrijavanje prije ekspanzije. Također kritična temperatura je dovoljno visoka (197 °C) kako bi uopće mogli imat kapljevinu na temperaturi kondenzacije. Radno područje temperature seže do 327 °C što ga čini prikladnim za srednjetermperturne izvore topline , zato se i koristi kod toplijih geotermalnih izvora i CSP postrojenja. Kritični tlak je također puno viši od atmosferskog (33,7 bar) te ne posjeduje staklenička svojstva niti je štetan za ozonski omotač.

4.5. OMTS

Pripada skupini spojeva siloksani, poznat pod imenom oktametil ciklotrisiloksan (MDM), najčešće se koristi kod biomase kao izvora energije, dakle u CHP postrojenjima.



Slika 21. T-s dijagram OMTS radnog fluida [17]

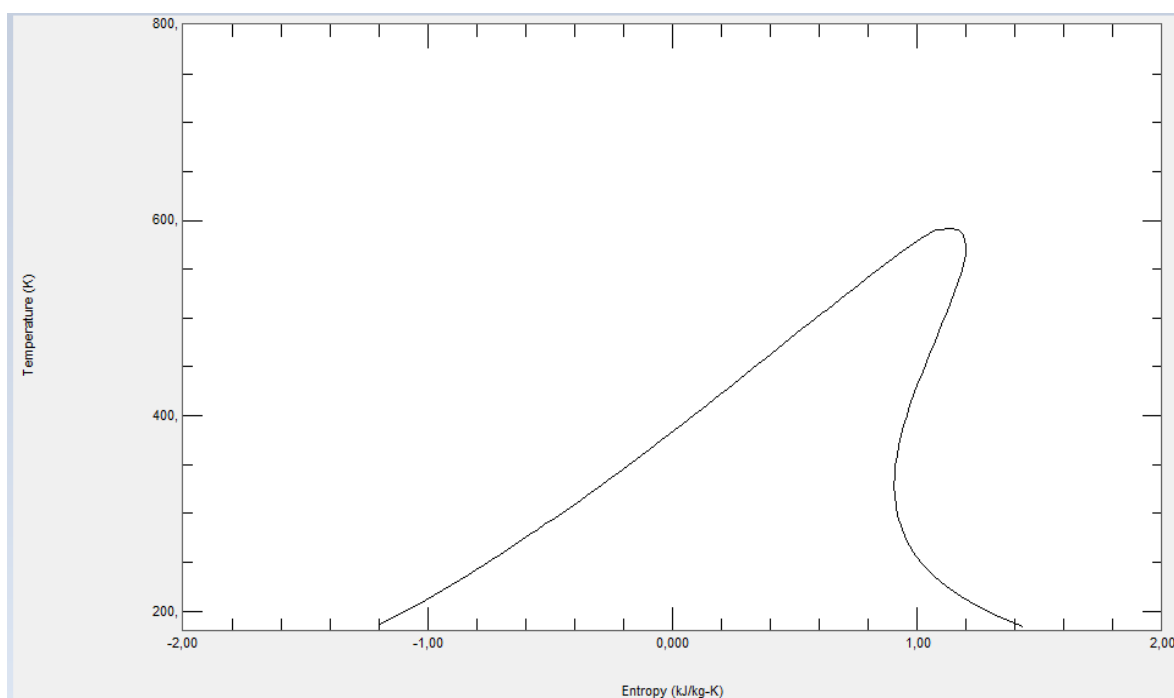
Tablica 6. Neka svojstva OMTS [17]

Molna masa / kgkmol^{-1}	$t_k/^\circ\text{C}$	p_k/bar
236,5	290,9	14,15

Radi se o suhom fluidu gdje nema potrebe za pregrijavanjem, usprkos nešto lošijim termodinamičkim osobinama ipak svoju primjenu nalazi iz razloga što nije zapaljiv niti je opasan za okoliš. Zbog čuvanja poslovne tajne vrlo je teško doći do nešto više podataka o ovoj radnoj tvari.

4.6 Toluen

Toluen ili metil-benzen spada u skupinu aromatskih ugljikovodika , pri normalnim uvjetima je bezbojna tekućina koja se ne miješa sa vodom.



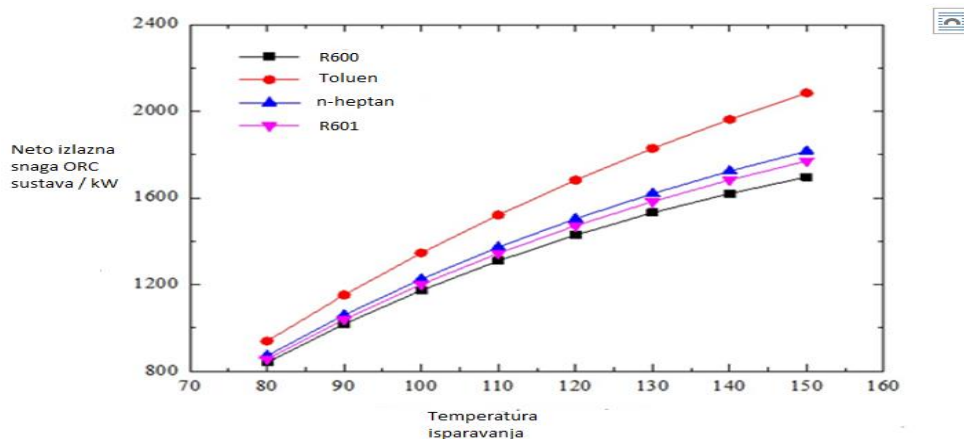
Slika 22. T-s dijagram za toluen

Tablica 7. Svojstva toluena [16]

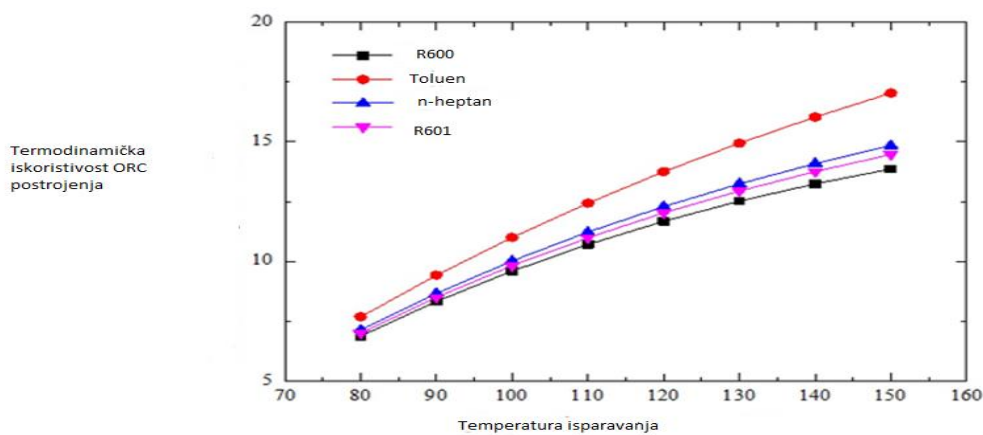
Molarna masa / kgkmol ⁻¹	92,14
Temperatura trojne točke / K	178
Vrelište pri atmosferskim uvjetima / K	383,8
Kritična točka:	
Temperatura /K	591,8
Tlak /MPa	4,126
Gustoća /kg m ⁻³	292,0
Područje primjene:	
Minimalna temperatura /K	178
Maksimalna temperatura /K	700
Maksimalni tlak / MPa	500
Maksimalna gustoća / kgm ⁻³	974,9

Slika 22. pokazuje da se radi o suhom fluidu gdje nema potrebe za pregrijanjem , kritična temperatura od $319\text{ }^{\circ}\text{C}$ je dovoljno visoka dakle fluid može preći u kapljevito stanje prilikom kondenzacije , može izdržati kao radni fluid temperaturu do $427\text{ }^{\circ}\text{C}$ stoga se može koristiti za temperature relativno visoke , gledane sa stajališta ORC-a . Kritični tlak od 41,3 bar je dovoljno visok kako bi konstruirali kondenzator gdje će pritisak biti veći od atmosferskog.

Pokazao se veoma pogodan kod 'recikliranja' otpadne topline plinske turbine . U znanstvenom radu [18] rađena je analiza i usporedba za R600 , Toluen , n-heptan i R601 kao radnih tvari ORC-a koji bi koristio otpadnu toplinu iz plinske turbine kako bi povećali njenu učinkovitost. Rezultati takvog istraživanja su dani na slikama 23. i 24.



Slika 23. [18] Ovisnost izlazne snage ORC-a koji koristi otpadnu toplinu plinske turbine o temperaturi isparavanja



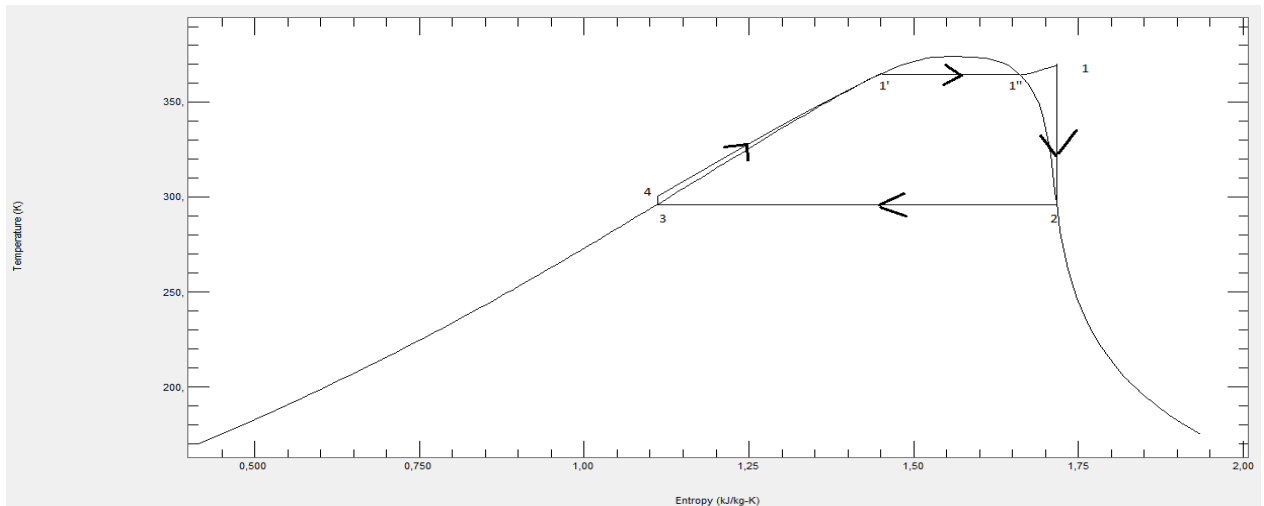
Slika 24. [18] Ovisnost termodinamičkog stupnja iskorištenja ORC-a koji koristi otpadnu toplinu plinske turbine o temperaturi isparavanja

5. Radne tvari u ORC procesu

Napravljen je jednostavan proračun termodinamičkog stupnja iskorištenja i BWR za ORC koji koriste sljedeće radne tvari HFC 134a , HFC 245fa , n-pentan i toluen pri definiranim uvjetima . Parametri radne tvari u pojedinoj točki dobivene su uz pomoć programa Nist Refprop Version 8.0 . Za dani proces vrijede sljedeći uvjeti i pojednostavljenja:

- Turbina radi u stacionarnom stanju
- Kompresija i ekspanzija se smatraju potpuno izentropskima
- Maksimalna temperatura sustava iznosi 100 °C a minimalna 20 °C
- Ekspanzija za HFC 134a ide do kraja , tj. završava u stanju vrele kapljevine , erozija lopatica turbine se ne dešava
- Kod suhих fluida radna tvar ekspanziju završava u pregrijanom stanju sa temperaturom 30 °C pri čemu se višak topline gubi u kondenzatoru
- Nema rekuperatora topline
- Toplina se gubi jedino u kondenzatoru
- Zanemaruje se pad tlaka

5.1 HFC134a



Slika 25. ORC proces koji koristi HFC 134a

Stanje 1:

$$T_1=373 \text{ K}$$

$$s_1=s_2=1,72 \text{ kJ/(kgK)}$$

$p_1=33,0$ bar

$h_1=445,5$ kJ/(kgK)

Stanje 2:

$$w_p = h_4 - h_3 = 230,8 - 227,3 = 3,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$T_2=293$ K

$$w_t = h_1 - h_2 = 445,5 - 409,7 = 35,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$s_2=1,72$ kJ/(kgK)

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{h_1 - h_4} = \frac{35,8 - 3,5}{445,5 - 230,8} = 0,150 = \mathbf{15,0\%}$$

$h_2=409,7$ kJ/(kgK)

$$BWR = \frac{w_p}{w_t} = \frac{3,5}{35,8} = 0,098 = \mathbf{9,8\%}$$

Stanje 3:

$s_3=1,1$ kJ/(kgK)

$h_3=227,3$ kJ/(kgK)

Stanje 4:

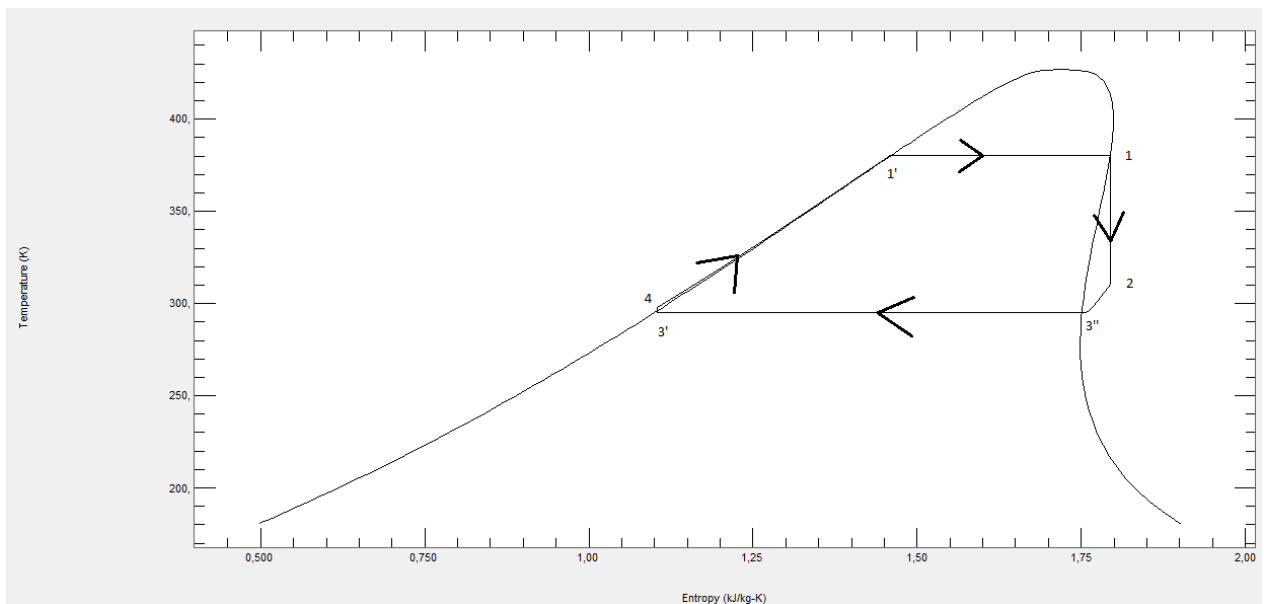
$T_4=295,3$ K

$p_4=p_1=33,0$ bar

$h_4=230,8$ kJ/kg

Stanje 1': $T_1=T_{1'}=364$ K

5.2 HFC245fa



Slika 26. ORC proces koji koristi HFC245fa

Stanje 1:

$$T_1=373 \text{ K}$$

$$s_1=1,79 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$h_1=474,2 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$p_1=12,6 \text{ bar}$$

Stanje 2:

$$w_t = h_1 - h_2 = 474,2 - 428,8 = 45,4 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2=303 \text{ K}$$

$$w_p = h_4 - h_{3'} = 226,4 - 225,7 = 0,7 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1=s_2$$

$$p_2=1,09 \text{ bar}$$

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{h_1 - h_4} = \frac{45,4 - 0,7}{474,2 - 226,4} = 0,180 = \mathbf{18,0 \%}$$

$$h_2=428,8 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$BWR = \frac{w_p}{w_t} = \frac{0,7}{45,4} = 0,015 = \mathbf{1,5\%}$$

Stanje 3:

$$T_3=293 \text{ K}$$

$$p_3=1,22 \text{ bar}$$

$$h_3=225,7 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$s_3=1,09 \text{ kJ/(kgK)}$$

Stanje 4:

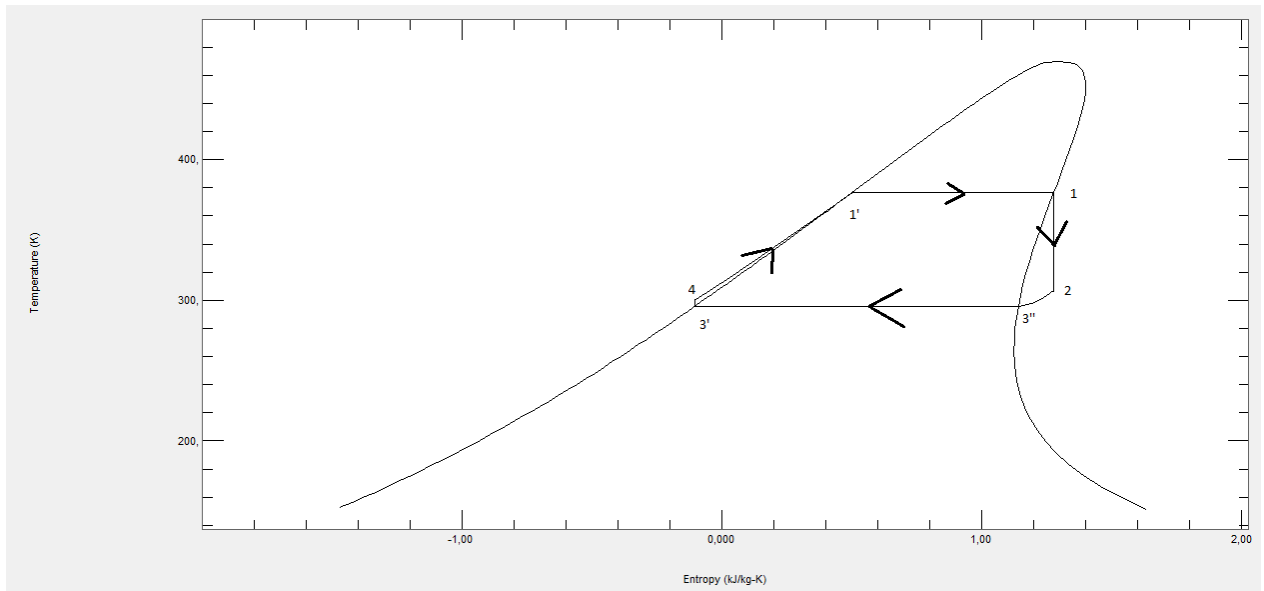
$$T_4=293,3 \text{ K}$$

$$p_4=p_1=12,6 \text{ bar}$$

$$s_4=s_3=1,09 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$h_4=226,4 \text{ kJ/kg}$$

5.3 n-pentan



Slika 27. ORC proces koji koristi n-pentan kao radnu tvar

Stanje 1:

$$T_1 = 373 \text{ K}$$

$$s_1 = 1,27 \text{ kJ}/(\text{kgK})$$

$$h_1 = 459,1 \text{ kJ/kg}$$

$$p_1 = 5,91 \text{ bar}$$

Stanje 2:

$$T_2 = 303 \text{ K}$$

$$s_2 = s_1$$

$$h_2 = 350,9 \text{ kJ/kg}$$

$$p_2 = 0,3 \text{ bar}$$

$$w_t = h_1 - h_2 = 459,1 - 350,9 = 108,2 \text{ kJ/kg}$$

$$w_p = h_4 - h_{3'} = -36,9 + 37,8 = 0,9 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{h_1 - h_4} = \frac{108,2 - 0,9}{459,1 + 36,9} = 0,216 = \mathbf{21,6\%}$$

Stanje 3:

$$T_3 = 293 \text{ K}$$

$$h_3 = -37,8 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = -0,125 \text{ kJ}/(\text{kgK})$$

$$p_3 = 0,56 \text{ bar}$$

$$BWR = \frac{w_p}{w_t} = \frac{0,9}{108,2} = 0,0083 = \mathbf{0,83\%}$$

Stanje 4:

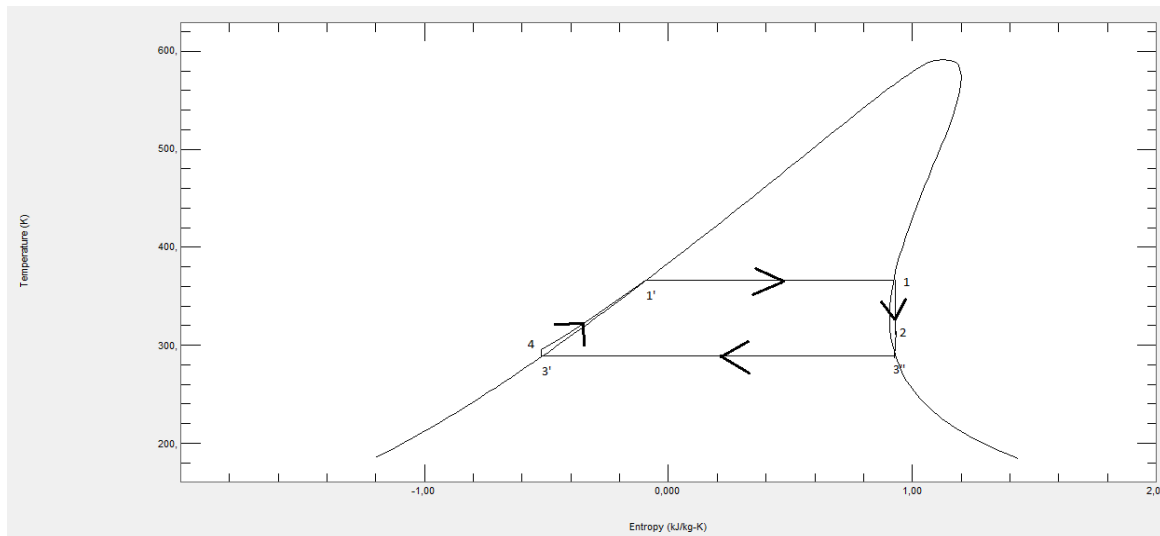
$$T_4 = 293,2 \text{ K}$$

$$h_4 = -36,9 \text{ kJ/kg}$$

$$p_4 = p_1 = 5,91 \text{ bar}$$

$$s_4 = s_3 = -0,125 \text{ kJ}/(\text{kgK})$$

5.4 Toluen



Slika 28. ORC proces koji koristi toluen kao radnu tvar

Stanje 1:

$$T_1 = 373 \text{ K}$$

$$h_1 = 346,3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 0,93 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$p_1 = 0,74 \text{ bar} = p_4$$

Stanje 2:

$$T_2 = 303 \text{ K}$$

$$s_2 = s_1 = 0,93 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$h_2 = 260,1 \text{ kJ/kg}$$

$$p_2 = 0,042 \text{ bar}$$

$$w_t = h_1 - h_2 = 346,3 - 260,1 = 86,2 \text{ kJ/kg}$$

$$w_p = h_4 - h_3 = -165,7 + 167 = 1,3 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{h_1 - h_4} = \frac{86,2 - 1,3}{346,3 + 165,7} = 0,166 = \mathbf{16,6\%}$$

Stanje 3:

$$T_3 = 293 \text{ K}$$

$$h_3 = -167,0 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = -0,49 \text{ kJ/(kgK)}$$

$$p_3 = 0,029 \text{ bar}$$

$$BWR = \frac{w_p}{w_t} = \frac{1,3}{86,2} = 0,015 = \mathbf{1,5\%}$$

Stanje 4:

$$s_4 = s_3 = -0,49 \text{ kJ/(kgK)}$$

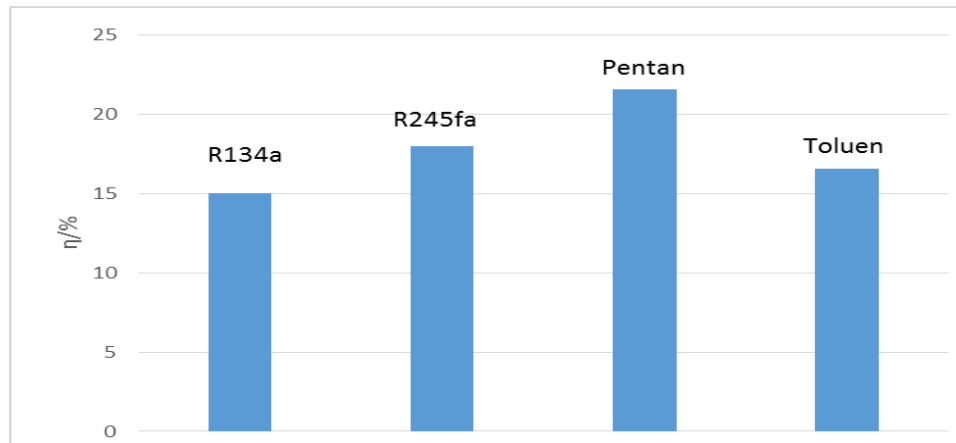
$$h_4 = -165,7 \text{ kJ/kg}$$

$T_4=293,7\text{ K}$

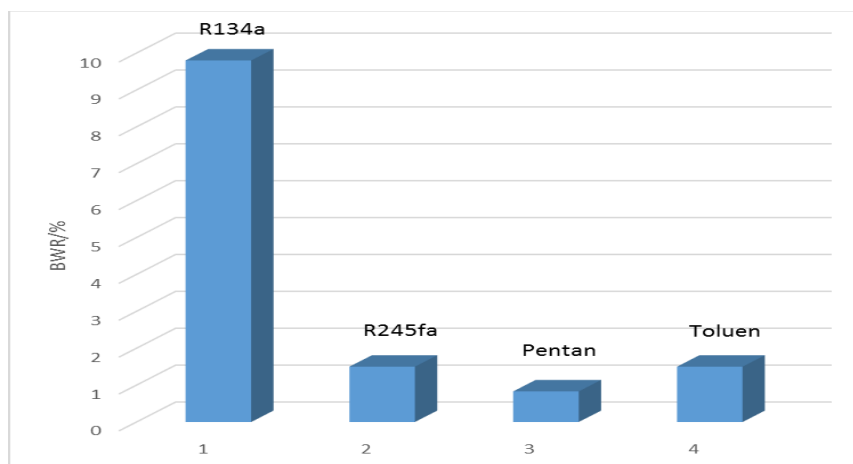
$p_4=p_1=0,74\text{ bar}$

5.5 Usporedba radnih tvari

Od četiri radne tvari za koje je napravljen jednostavan proračun pentan se pokazao kao fluid koji će pri definiranim uvjetima provođenja procesa ostvarivati najveću učinkovitost i najnižu vrijednost BWR.



Slika 29. Usporedba stupnja iskorištenja za četiri radne tvari




Slika 30. Usporedba BWR (Back Work Ratio) za četiri radne tvar

6. Zaključak

ORC tehnologija pokazuje veliki potencijal da u budućnosti postane jedno od bitnih metoda iskorištavanja obnovljivih izvora energije ali i unapređenja postojećih tehnologija pogonjenih na konvencionalna (fosilna) goriva. Jedno od najvećih prednosti je što koristi toplinu koja bi se inače bacila i toplinu izvora koja se klasičnim metodama ne može iskoristiti kao što su geotermalna , solarna i energija biomase. Termodinamički stupanj iskorištenja , do kojeg se uglavnom dolazi simulacijama u softverskim paketima , je tek prvi od kriterija koji moraju biti zadovoljeni i sam za sebe nipošto nije mjerodavan podatak za odluku hoće li se radna tvar koristiti u danim uvjetima ili neće . Ogroman je broj potencijalnih radnih fluida koje se mogu koristiti . Kako dana radna tvar mora zadovoljavati sve strože ekološke norme poput niskog stakleničkog efekta i utjecaja na ozonski omotač , mora biti sigurna za rad i rukovanje , ne smije biti zapaljiva , mora biti lako dostupna i niske cijene te još niz drugih kriterija koje se odrede konkretno na samoj izvedbi postrojenja praktičnu primjenu je našlo svega 5,6 radnih tvari od koje su neke ukratko opisane u ovome radu.

7. Literatura

- [1] R. Budin, A. Mihelić-Bogdanić, Osnove tehničke termodinamike, Zagreb, Školska knjiga, 1990.
- [2] Dorić Vicko , Konstrukcija turboekspandera za Organski Rankine Ciklus , Fakultet strojarstva i brodogradnje , Diplomski rad , Zagreb , 2014
- [3] <https://www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology> (pristup 15.08.2019.)
- [4] Porić Laris , Upotreba Rankineova ciklusa sa organskim fluidom za iskorištavanje geotermalne energije , Završni rad , Veleučilište u Karlovcu , Karlovac , 2016.
- [5] Gomboč Josip , Regulacija razine radne tvari u ORC postrojenju , Završni rad , Fakultet strojarstva i brodogradnje , Zagreb , 2015.
- [6] Kamvar Darvish , Farideh Atabi , Mehdi Aliehvaei , Marc A. Rosen Selection of optimum working fluid for Organic Rankine Cycles by Exergy and Exergy-Economic Analyses , Sustainability , November 2015.
- [7] Nurdin Čehajić , Suad Halilčević , Izudin Softić , Primjena Organskog Rankinovog ciklusa (ORC) i prikladni radni fluidi , ISSN 1846-6168 , UDK 66.021.4
- [8] Budimir Ana , Energetski potencijal biomase Pajasena , Diplomski rad , Agronomski fakultet , Zagreb , Listopad 2018.
- [9] Sylvain Quoilin , Martin Van Den Broek , Se'bastien Declaye , Pierre Dewallef , Vincent Lemort , Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems , 2013.
- [10] <http://www.energetika-net.com/vijesti/obnovljivi-izvori-energije/krenula-prva-hrvatska-geotermalna-elektrana-27857> (pristup 15.08.2019.)
- [11] Longin Diego , Optimizacija Organskog Rankineovog ciklusa u geotermalnim elektranama s binarnim ciklusom , Diplomski rad , Rudarsko-geološki naftni fakultet , Zagreb , 2018.
- [12] Daraboš Boris , Projektiranje i izgradnja solarne elektrane "Solvis 2 " , Završni rad br. 379/EL/2016 , Sveučilište Sjever , odjel Elektrotehnika , Varaždin , Rujan 2016.
- [13] Emily Spayde and Pedro J. Mago , Evaluation of solar-powered organic Rankine cycle using dry organic working fluid , Cogent engineering (2015.)
- [14] Bahaa Saleh , Gerald Koglbauer , Martin Wendland , Johann Fischer , Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles , Elsevier , 2005.
- [15] Fredy Velez , Farid Chejne , Ana Quijano , Thermodynamic analysis of R134a in a Organic Rankine Cycle for power generation from low temperature sources , Dyna 2014.
- [16] Nist Refprop , Version 8.0
- [17] N.Čehajić , S. Eljšan , S. Halilčević , J. Fejzić , Okolinski i termodinamički prihvatljivi radni fluidi u Organskom Rankinovom ciklusu za upotrebu biomase , SIGURNOST 61 (1) 1-13 (2019)

[18] Wei Liu , Xiaoyun Zhang , Ningbo Zhao , Chunying Shu , Shanke Zhang , Zhengjun Ma and Jun Han , Performance analysis of organic Rankine cycle power generation SAGE system for intercooled cycle gas turbine , Advances in Mechanical engineering , 2018.

8. Životopis

Vladimir Cvjetojević [REDACTED] 2011. godine upisuje srednju školu Gimnazija Požega smjer prirodoslovno-matematički. 2015. upisuje Prirodoslovno-matematički fakultet smjer Kemija ali zbog shvaćanja da ga u životu zanima praktična primjena odluči upisati Tehnički fakultet i tako odlučuje upisati Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu smjer Kemijsko inženjerstvo akademske godine 2016./2017.