

Organski Rankineov ciklus

Hinić, Vedran

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:591162>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for
permanent storage and preservation of digital
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

VEDRAN HINIĆ

ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS

ZAVRŠNI RAD

SPLIT, 2020.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO

ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS

ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

doc.dr.sc. Zdeslav Jurić

STUDENT:

Vedran Hinić

(MB:0171275106)

SPLIT, 2020.

SAŽETAK

Organski Rankineov ciklus (ORC) je posebna vrsta Rankineovog ciklusa u kojem se kao radni medij umjesto vode koristi neki organski fluid niže temperature vrelišta. Princip rada između klasičnog i organskog Rankineovog ciklusa se ne razlikuje, a glavna razlika je upotreba fluida drugačijih svojstava. Prema tome, izmijenjena toplina te ostali termodinamički parametri su drugačiji u ovom tipu procesa te će biti prikazani u ovom radu. Prikazano je kako radni fluid igra ključnu ulogu u radu ORC sustava te je obrađen način odabira organskog fluida. Primjenom ORC sustava moguće je dobiti toplinsku i električnu energiju iz jednog izvora topline.

Ključne riječi: Organski Rankineov ciklus, organski fluidi, sustav, energija, toplina.

ABSTRACT

Organic Rankine cycle is a special type of cycle which is using organic fluid with lower boiling temperature instead of water as working fluid. Working principle of classic Rankine and organic Rankine cycle are the same, main difference is in usage of different working fluid. By that, exchanged heat and other thermodynamical properties are different in this type of cycle and this will be shown in the paper. It is also shown how working fluid is the key in this type of cycle and how to choose the organic fluid. By using organic Rankine cycle, it is possible to get both heat and electrical energy from one source of heat.

Keywords: Organic Rankine cycle, organic fluids, system, energy, heat.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KLASIČNI RANKINEOV CIKLUS	2
2.1. PRINCIP RADA KLASIČNOG RANKINEOVOG POSTROJENJA.....	2
2.2. RANKINEOV CIKLUS	4
3. ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS(ORC)	7
3.1. PRINCIP RADA ORC POSTROJENJA	7
3.2. KARAKTERISTIKE ORGANSKIH FLUIDA	10
4. VRSTE ORGANSKOG RANKINEOVOG CIKLUSA	15
4.1. ORC S OTPADNOM TOPLINOM	16
4.2. ORC S GEOTERMALNOM TOPLINOM.....	16
4.3. ORC S BIOMASOM KAO IZVOROM TOPLINE	18
4.4. ORC SA SOLARNOM ENERGIJOM	20
4.5. PRIMJENA ORC-A NA BRODOVIMA.....	21
5. USPOREDBA KLASIČNOG I ORGANSKOG RANKINEOVOG CIKLUSA	23
5.1. PREDNOSTI I NEDOSTACI ORC-A.....	23
5.2. PREDNOSTI I NEDOSTACI KLASIČNOG RANKINEOVOG CIKLUSA	26
6. ZAKLJUČAK	27
LITERATURA	28
POPIS SLIKA	30

1. UVOD

Predmet završnog rada je Organski Rankineov ciklus (ORC). Klasična parno-turbinska postrojenja koriste izričito vodu kao radnu tvar pa takva postrojenja zahtijevaju visoke temperature kako bi se izvršila promjena agregatnog stanja vode u paru i time se dobio koristan rad. Razlog tome je specifični toplinski kapacitet vode koji govori koliko je potrebno izmijeniti topline kilogramu vode kako bi se temperatura promijenila za jedan stupanj celzijus. U svrhu toga postoje kotlovi pomoću kojih se ta promjena vrši ali oni imaju veliku stopu zagađenja jer se potrebna energija dobiva izgaranjem goriva koja su često loše kvalitete, a i sama količina potrebne energije je velika. Upotreba vode u ovom ciklusu pogodna je pri temperaturi oko 350 °C dok je upotreba organskog fluida pogodnija i za manje temperature. Potreba za niskotemperaturnim izvorima energije sve više je izražena zbog globalnog zatopljenja i zagađivanja okoliša.

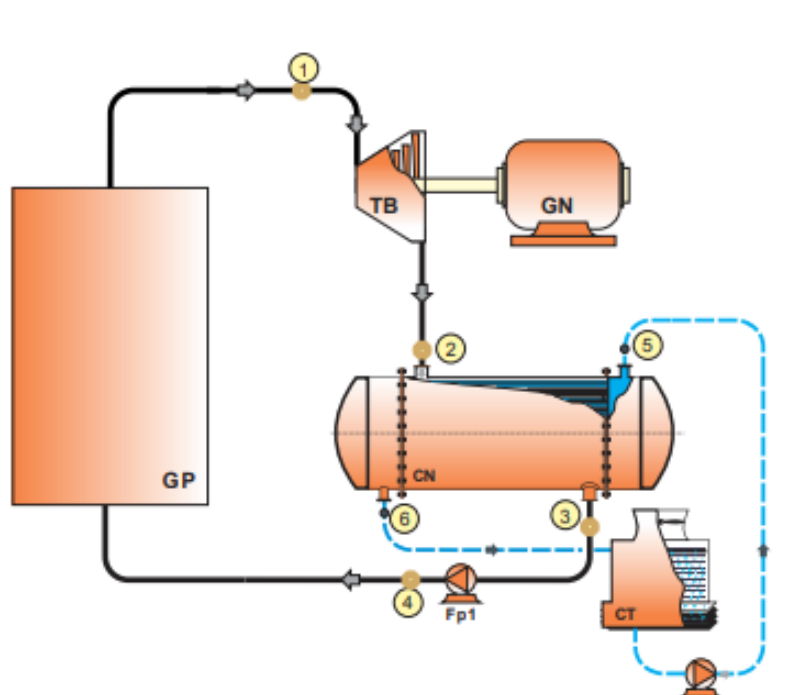
Cilj završnog rada je objasniti princip rada ORC-a te karakteristike organskih fluida. Također, u okviru rada cilj je istaknuti upotrebu organskih fluida čija je temperatura isparavanja znatno manja (u usporedbi s vodom kao radnoj tvari pri jednakim tlakovima), odnosno stopa zagađenja i potrebna energija se znatno smanjuju. Također, pozitivna je za ljudsko zdravlje jer korištenje organskog fluida uzrokuje znatno manju emisiju CO₂. Cilj rada je objasniti upotrebu nisko entalpijskih izvora topline kao što su biomasa, otpadna toplina, geotermalni izvori i sunčeva energija. Organski Rankineov ciklus je pokušaj proizvodnje iste količine energije uz manje zagađenje i utrošak energenata. ORC sustavi se koriste u raznim izvorima energije kao što su solarna, geotermalna, biomasa i otpadna toplinska energija. Veličina ORC postrojenja kreće se od nekoliko kilovata do velikih, megavatskih postrojenja.

Rad sadrži šest dijelova. Prvi dio rada je uvod u kojem se prikazuje predmet rada, ciljevi te struktura rada. U drugom dijelu rada pojašnjava se klasični Rankienov ciklus. Treći dio rada pojašnjava organski Rankienov ciklus. U četvrtom dijelu rada pojašnjavaju se vrste organskog Rankievog ciklusa. U okviru ovog dijela rada istaknuti će se ORC s otpadnom toplinom, geotermalnom toplinom, sa biomasom kao izvorom topline te vrućim uljem kao izvorom topline. U petom dijelu rada usporediti će se klasični Rankienov ciklus i ORC. Na kraju rada je zaključak u kojem se iznose spoznaje do kojih se došlo tijekom izrade završnog rada.

2. KLASIČNI RANKINEOV CIKLUS

2.1. PRINCIP RADA KLASIČNOG RANKINEOVOG CIKLUSA

U klasičnom Rankineovom ciklusu kao radna tvar se koristi voda pri čemu se toplinska energija, uz posredstvo radne tvari, pretvara u električnu. Kako bi se vodi promijenilo agregatno stanje iz tekućeg u plinovito najprije je istu potrebno zagrijati do stanja vrele kapljevine. Prosječni specifični toplinski kapacitet kapljevite vode iznosi približno $4,186 \text{ kJ}/(\text{kgK})$. Navedena veličina predstavlja količinu izmijenjene topline kako bi se jednom kilogramu vode temperatura promijenila za $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Nadalje, toplina potrebna za isparavanje jednog kilograma vode iz stanja vrele kapljevine do stanja suho zasićene pare iznosi $2\,500 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Na slici 1. prikazan je shematski prikaz klasičnog Rankienov ciklus [1].

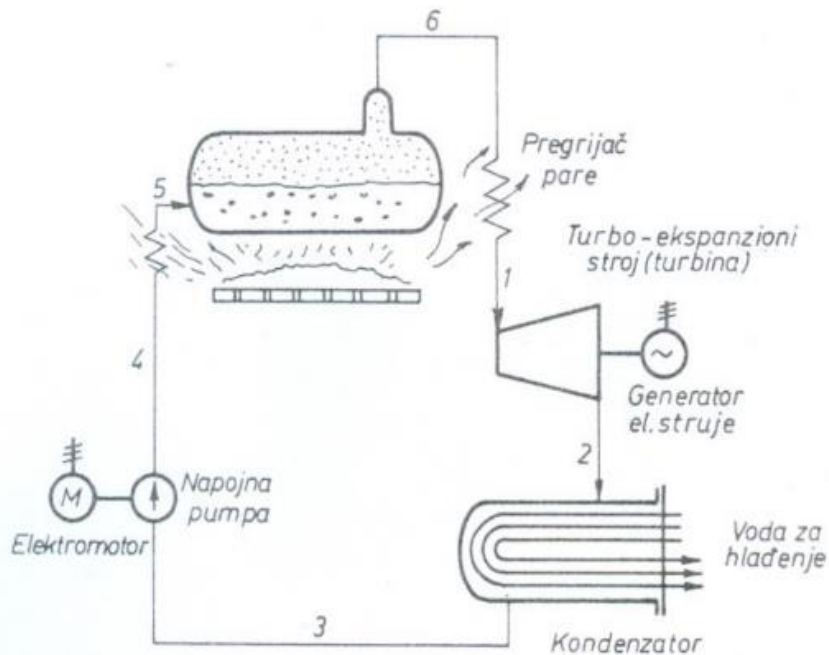


Slika 1. Shematski prikaz postrojenja klasičnog Rankineovog ciklusa [1]TB - turbina; GN- Generator; CN - kondenzator; Fp - pumpa; CT - rashladni toranj; GP - Generator pare.

Jedna od izvedbi klasičnog Rankineovog ciklusa je s pregrijavanjem pare iz razloga što tada para nakon prolaska kroz turbinu ostaje dovoljno suha te ne prelazi dozvoljen stupanj zasićenja koji iznosi oko 14% (udio vrele kapljevite vode u mokroj vodenoj pari) i nema štetnog utjecaja na lopatice turbine kao mokra vodena para s većim sadržajem vlage, te povećava stupanj djelovanja [2].

Postrojenje zasnovano na Rankineovom ciklusu sastoji se od:

- kotla,
- pregrijača pare,
- turbine,
- kondenzatora
- napojne pumpe [2].

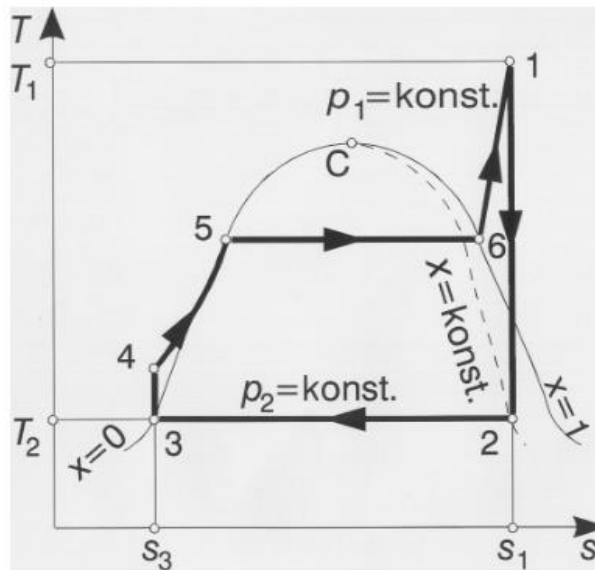


Slika 2. Postrojenje kojim se ostvaruje Rankienov ciklus [3]

Prema prikazu na slici 2. para se u kondenzatoru potpuno kondenzira tj na njegovom izlazu je u kapljevitom stanju, točka 3. Pomoću pumpe (napojna pumpa) kapljevita voda se iz kondenzatora dobavlja u kotao. Budući da je tekućina stanja 3 pothlađena kapljevina, ona se prvo predgrijava od stanja 4 do stanja 5. Nakon predgrijavanja radna tvar isparava (ključa) i kao suhozasićena vodena para, stanja 6. ulazi u pregrijač pare. Prije nego napusti kotao, suhozasićena para se pregrijava od stanja 6 do 1 i kao takva ulazi u turbinu. U turbini se obavlja adijabatska ekspanzija, pri čemu se, preko lopatica statora i rotora turbine, energija vode pretvara u rad na vratilu turbine. Voda izlazi iz turbine i odlazi u kondenzator, gdje se, kako je već rečeno, u potpunosti kondenzira. Time se Rankineov ciklus zatvara [3].

2.2. RANKINEOV CIKLUS

Kako bi se izbjegli visoki tlakovi, a opet postigla tražena temperatura, u ovoj vrsti procesa para se pregrijava u posebnom pregrijaču. Za ovaj proces se može reći kako je Braytonov proces u praksi jer se toplina dovodi i odvodi izobarno dok je kod Carnotova ciklusa izotermno (teoretska promjena stanja) [2].



Slika 3. T-s dijagram RC procesa [2]

Prema slici 3. para koja se prethodno pregrijava u zasebnom pregrijaču, proces 6 – 1, ulazi u turbinu gdje se energija radne tvari uz pomoć lopatica turbine pretvara u koristan rad na pogonskom vratilu. Nakon prolaska kroz turbinu, kako bi ciklus mogao biti ponovljen, para se kondenzira u kondenzatoru te takva dolazi na usis napojne pumpe. Napojna pumpa podiže radni tlak ukapljene pare na nešto veći od tlaka u kotlu (ovdje se misli na ukupni tlak koji je zbroj statičkog i dinamičkog tlaka, tlaka uzrokovanog promjenom visine stupca kapljevite radne tvari te savladavanju lokalnih otpora i otpora strujanja) kako bi se osigurao dostatan dotok radne tvari u kotao u kotao gdje ponovno radna tvar pregrijava. Rad napojne pumpe se u teoretskom razmatranju, s termodinamičkog stajališta može zanemariti jer je promjena (porast) entalpije u njoj zanemariv u usporedbu s promjenama entalpija u ostalim procesima ciklusa. Nakon što je radna tvar u potpuno isparila u kotlu te se u pregrijaču pare pregrijava, ona ulazi u turbinu i postupak se ponavlja. [2].

Proračun ovakvog sustava temelji se na poznavanju entalpije radnog fluida u karakterističnim točkama sustava te protočne mase fluida [2].

Energetski proračun ovakvog sustava glasi:

Dovedena toplina u sustav (kotao + pregrijač):

$$\dot{Q}_{dov} = \dot{m} \times (h_1 - h_4)[kW] \quad (1)$$

Snaga dobivena na vratilu turbine:

$$P_{turbina} = \dot{m} \times (h_1 - h_2)[kW] \quad (2)$$

Odvedena toplina u kondenzatoru:

$$\dot{Q}_{odv} = \dot{m} \times (h_2 - h_3)[kW] \quad (3)$$

Snaga potrebna za pogon napojne pumpe:

$$P_{pumpe} = \dot{m} \times (h_4 - h_3)[kW] \quad (4)$$

Prema Prvom zakonu termodinamike za protočne (otvorene) sustave, gdje je promjena entalpije u krajnjim točkama ciklusa jednaka, pa ukupna količina izmijenjene topline u ciklusu jednaka je neto (korisnom) radu ciklusa tj onom koji se dobiva na vratilu turbine:

$$\dot{Q}_{dov} + \dot{Q}_{odv} = P_{turbina} + P_{pumpa} = P^{neto} \quad (5)$$

Stupanj iskoristivosti ciklusa iznosi:

$$\eta_t = \frac{\text{dobiveno}}{\text{uloženo}} = \frac{P^{neto}}{\dot{Q}_{dov}} \quad (6)$$

Iz proračuna je vidljivo kako je, u svrhu povećanja stupnja iskoristivosti ovog ciklusa, potrebno dovoditi toplinu pri što većem tlaku, a odvoditi pri što manjem i osigurati temperaturnu razliku između radnog medija i medija kojim se hladi u kondenzatoru (oko 10 °C) vodeći pozornost o stupnju suhoće mokre pare na izlazu iz turbine u svrhu zaštite njenih lopatica.. Kod dovođenja topline ograničenje je konstrukcijska izvedba kotlova koji mogu podnijeti tlakove do određene granice, a kod odvođenja topline je to fluid s kojim odvodimo toplinu i činjenica da na njegovu temperaturu ne možemo utjecati.

Najčešće je to morska voda koja djeluje kao neograničeni spremnik topline koja je naravno, nepovratna [2].

Iz svega priloženog se može zaključiti kako upotreba vode kao radnog fluida u praksi funkcionira ali uz velika ograničenja i utrošak. Najveća prednost ovog sustava je dostupnost vode kao radnog fluida ali je prije upotrebe u ovu svrhu treba tretirati raznim kemikalijama zbog sadržaja u vodi kao što su kamenac i ostale štetne tvari. Kamenac u vodi predstavlja jedan od većih problema iz razloga što drastično smanjuje toplinsku vodljivost te može doći do preopterećenja konstrukcije kotla pod radnim tlakom. Upotreba organskog fluida u ovom slučaju eliminira kamenac i, kao što je već rečeno, štetni utjecaj na opremu sustava ujedno smanjujući količinu topline koju je potrebno dovesti.

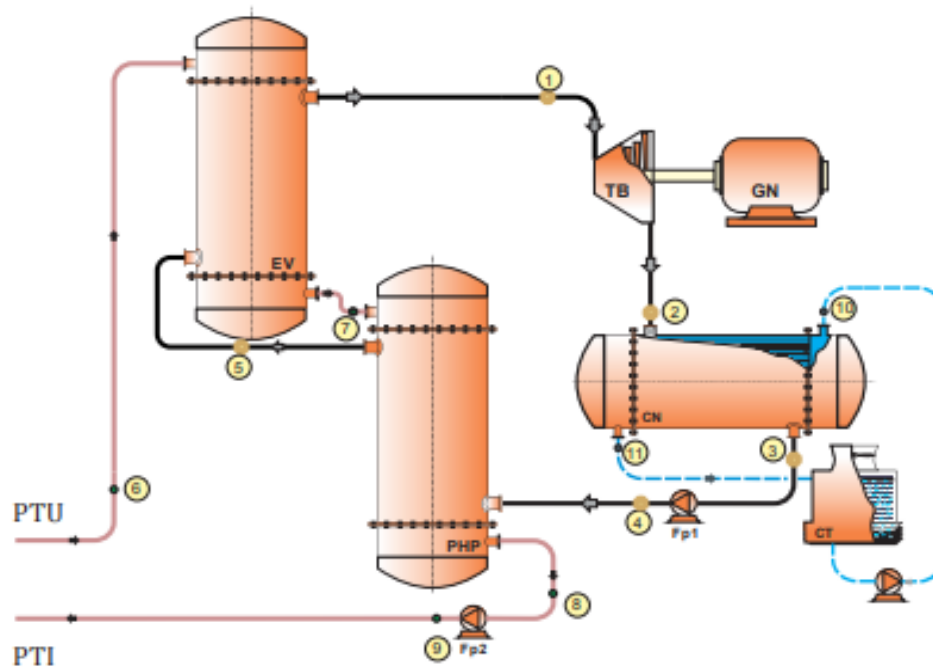
3. ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS (ORC)

Organski Rankineov ciklus (ORC) je varijacija Rankinovog ciklusa u kojem se umjesto vode kao radni medij 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 električnu energiju i može imati važnu ulogu u povećanju energetske učinkovitosti novih ili postojećih aplikacija [4].

3.1. PRINCIP RADA ORC POSTROJENJA

ORC proces ima isti princip rada i glavne komponente (isparivač, turbinu, kondenzator i pumpu) kao i klasičan Rankineov 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. Bitan faktor kod dizajniranja postrojenja je tlak pri kojem se dovodi toplina i tlak pri kojem se kondenzira fluid. Poznato je da su tlak i temperatura direktno ovisni jedan o drugome, odnosno proporcionalni su. Da bi dobili što veću korisnost u sustavu poželjna je što veća temperatura odnosno tlak na početku ekspanzije [2].

U Rankineovom 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. [4]



Slika 4. Osnovne komponente sustava zasnovanog na ORC-u [1]
TB - turbina; GN- Generator; CN - kondenzator; Fp - pumpa; CT - rashladni toranj;
CC –Konzentrator; EV- Isparivač; PHP- Zagrijač PTU - ulaz procesnog toka; PTI-
izlaz procesnog toka.

Slika 5. prikazuje komponente ORC-a namijenjenog za iskorištavanje izvora otpadne toplinske energije. Radni medij, pogonjen pumpom ulazi u zagrijač gdje se zagrijava, potom isparava u isparivaču te se konačno iskorištava za pogon turbine. Mehanički rad se može iskoristiti direktno za pogon stroja ili za pogon generatora električne energije. Nakon izlaska iz turbine, radni medij kondenzira u kondenzatoru i ponovno pogonjen pumpom ulazi u ciklus [1].

Glavna karakteristika ORC-a je korištenje niskotemperaturnih izvora energije za promjenu agregatnog stanja radnog medija, pri čemu se u njemu nakuplja potencijalna energija koja se kasnije pretvara u koristan rad. To ponajviše ovisi o vrsti fluida kojim se proces vrši. Dakle, karakteristika fluida, jedna je od stavki koja određuje kakav će proces biti i kolika snaga se može proizvesti na osovini turbine.

Temeljna razlika između ovih skupina je stanje fluida na izlasku iz turbine. T-s dijagram prikazuje izmijenjenu toplinu pa je on najprikladniji za usporedbu ovih vrsta fluida [2].

Mogućnost upotrebe različitih organskih fluida vrlo je važna, jer se otpadna toplinska energija oslobađa na različitim temperaturama, te se optimalan izbor radnog fluida pokazuje

kao vrlo važan korak. Problemi konvencionalnih postrojenja pri iskorištavanju niskotemperaturnih izvora toplinske energije kod ORC-a su riješeni upravo upotrebom organskog fluida umjesto vode. Učinkovitost ORC-a je manja od 24%, ovisno o temperaturi izvora toplinske energije, dok je kod parno-turbinskog Rankineovog ciklusa korisnost često veća od 30% [5].

S druge strane je klasični ciklus znatno kompleksniji, s većim brojem komponenata sustava. Budući se organski medij u većini slučajeva ne pregrijava, nije potreban bubanj za separaciju suhozasićene pare i vrele kapljevine niti pregrijač. Također, organski medij nije potrebno otplinjavati, jer ne otapa druge plinove kao što to čini voda [1].

3.2. KARAKTERISTIKE ORGANSKIH FLUIDA

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 [4].

Organski fluidi su karakterizirani nižom temperaturom isparavanja u odnosu na vodu, te imaju prednost u primjeni pri temperaturama nižim od 370 °C. Prva se odnosi na nagib desne granične krivulje koja kod vode ima negativan nagib, a kod organskih medija taj je nagib pozitivan, negativan ili približno izentropski, ovisno o odabranom fluidu. Druga se odnosi na veliku razliku entropije između stanja vrele kapljevine i nagib desne granične krivulje kod vode u odnosu na organske medije. U Rankineovom ciklusu se entropija generira zbog:

- pada tlaka uslijed trenja u cijevima,
- neizentropske ekspanzije u turbini,
- prijenosa topline uslijed konačne temperaturne razlike u komponentama sustava,
- neizentropske promjene stanja u napojnoj pumpi,
- mehaničkih gubitaka [1].

Linija suho zasićene pare kod organskih medija može imati tri oblika, te se u skladu s njima dijele na:

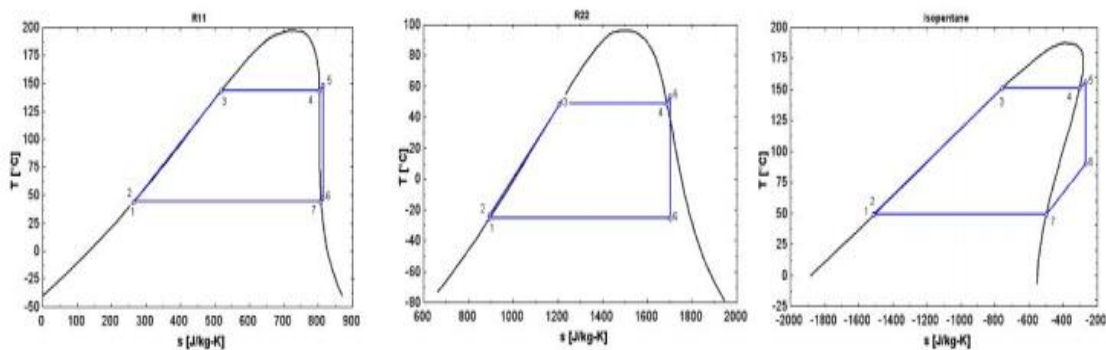
- suhe,
- izentropske i
- vlažne.

Na slici 5. prikazani su ORC ciklusi gdje je vidljiva upotreba organskih fluida sa različitim nagibom linije suhozasićene pare. Kod vlažnih fluida, kraj ekspanzije se nalazi u zoni mokre pare, što povećava rizik od erozije dijelova turbine. To je razlog zašto je i nagib desne granične krivulje pri izboru ove opcije nužno pregrijavanje radnog fluida što povećava cijenu postrojenja. Primjenom suhog ili izentropskog fluida, ekspanzija započinje iz stanja nagiba desne granične krivulje i na kraju ekspanzije, medij izlazi iz turbine u stanju pregrijane pare. Prednost ovakve promjene stanja u odnosu na medij s negativnim nagibom linije jest u činjenici da nije potrebno voditi računa o stanju radnog medija na kraju

ekspanzije, odnosno nema opasnosti od oštećenja dijelova radnog stroja zbog pojave kondenzacije.

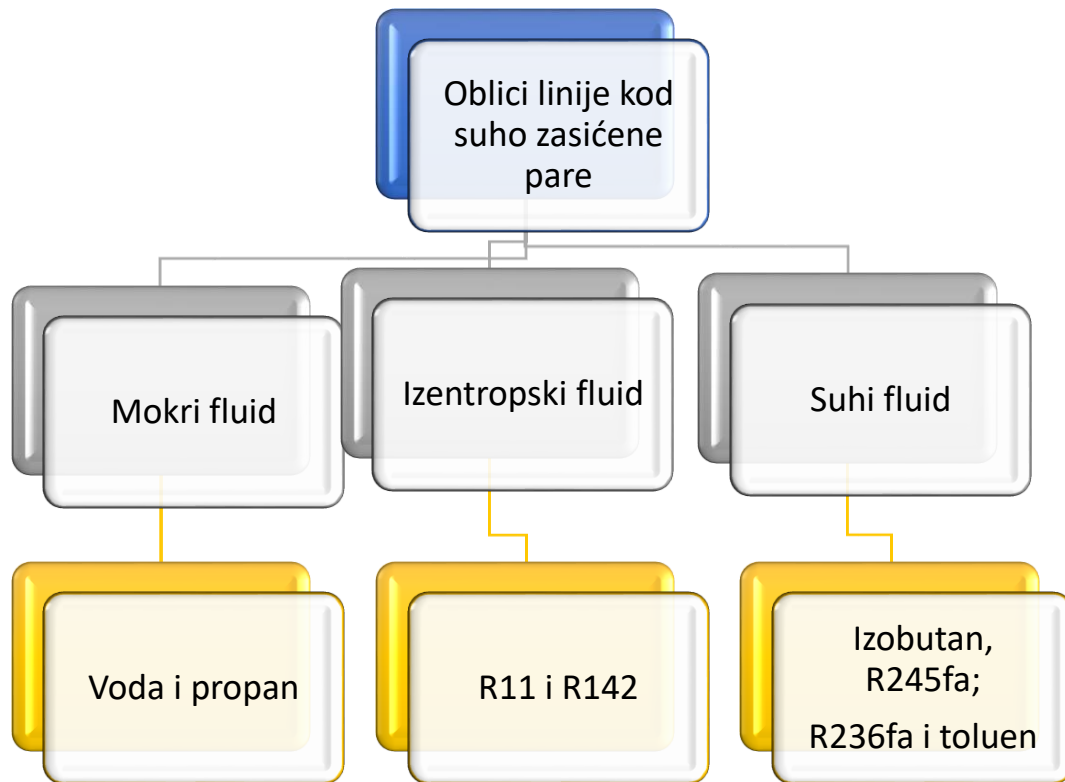
Prema slici 5.a. prvi dijagram pokazuje linije napetosti za mokre fluide. Nagib krivulje je pozitivan. Iz njega je vidljivo da, ukoliko u turbinu fluid uđe u suhozasićenom stanju, tokom entalpijskog pada pojaviti će se kapljevina koja može oštetiti lopatice turbine u smislu erozije lopatica zbog kavitacijskog i udarnog djelovanja kapljica vlage. Kako bi se to izbjeglo nužno je ovu vrstu fluida pregrijavati prije ulaska u turbinu kako bi se smanjio udio vodene faze u pari fluida. „Izentropski“ i „suhi“ fluidi pogodniji su za očuvanje opreme turbine. Kod „izentropskog“ fluida entalpijski pad u turbini prikazan je u drugom dijagramu na slici 5.b. Njegova linija zasićenja je ravna pa ako ova vrsta fluida uđe u turbinu u suhozasićenom stanju neće se pojaviti vlaga već će izaći u istom stanju.

„Suhi“ fluidi imaju negativni nagib krivulje zasićenja što je prikazano posljednjim dijagramom na slici 5.c i najpogodniji su u smislu očuvanja turbine. Kod pregrijavanja „izentropskih“ i „suhih“ fluida u svrhu povećanja stupnja djelovanja na izlazu iz turbine nalazi se fluid u obliku pregrijane pare pa bi se velika količina energije izgubila u okolinu. Tada se ugrađuje regenerator topline kako bi se dio te topline iskoristio [2].



Slika 5. Oblici linije suho zasićene pare a) „izentropski“ fluid, b) „mokri“ fluid, c) „suhi“ fluid [6]

U „mokre“ fluide spadaju voda i propan, u „izentropske“ ubrajaju se R11 i R142 dok se u „suhe“ svrstaju izobutan, R245fa, R236fa i toluen.



Slika 6. Oblici i linije kod suho zasićene pare [2]

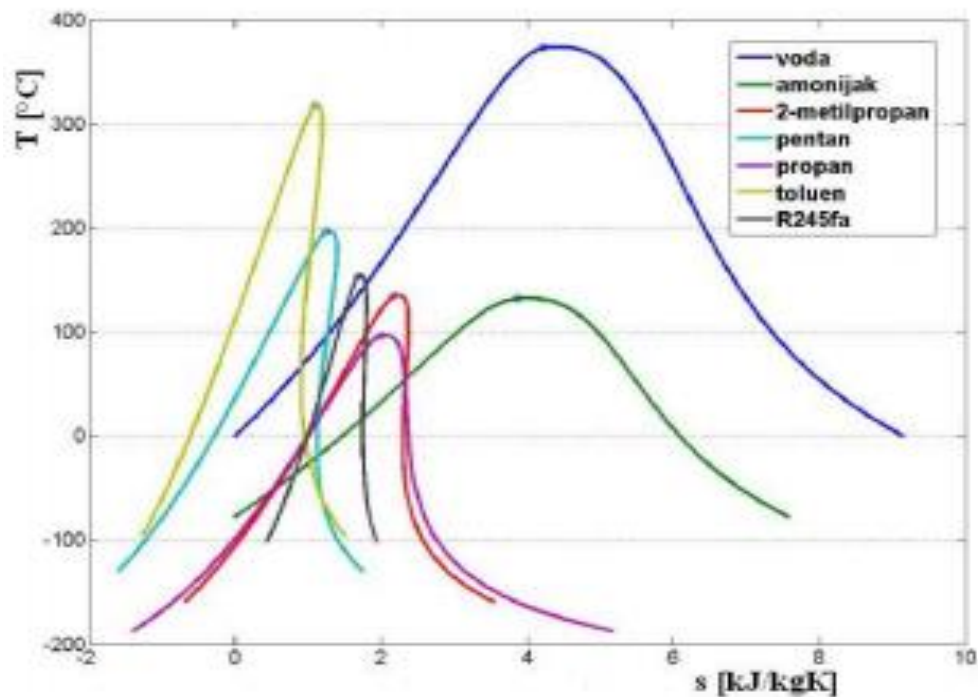
Prema slici 6. navedeni su samo neki od fluida koji se razmatraju za upotrebu u ORC-u. Dobar fluid koji će se primjenjivati u ORC mora zadovoljiti neke od kriterija, a to je da ima nizak specifični volumen, umjereni tlak u izmjenjivačima topline, nisku cijenu nabave, nisku toksičnost, nizak ODP (engl. *Ozone Depletion Potential*) i nizak GWP (engl. *Global Warming Potential*). Na samom početku korištene su organske tvari kao toluol (C_7H_8), pentan (C_5H_{12}), propan (C_3H_8) te ostali ugljikovodici [7].

S obzirom na kemijski sastav fluide općenito se mogu podijeliti na sljedeće skupine [4]:

1. Ugljikovodike,
2. Etere,
3. Alkohole,
4. Siloksane,
5. Fluorovodike,
6. Hlorofluorouglijike (CFC),
7. Hidrohlorofluorouglijike (HCFC),
8. Hidrofluorouglijike (HFC),
9. Hidrofluorolefine (HFO).

Organski fluidi imaju tendenciju degradacije pri višim temperaturama pa dolazi do određenih kemijskih promjena. Stoga ograničenje tlaka i temperature je u karakteristikama fluida. Iako, primjenom nekih od organskih fluida visoki tlakovi dolaze u obzir, a to opet ovisi s svojstvima tog fluida. Nadalje, jedna od bitnih stavki pri odabiru radnog fluida je njegov utjecaj na okoliš. Danas postoje razne regulative kojima se štetan utjecaj po okoliš smanjuje na najmanju moguću mjeru pa se u skladu s time treba odabrati fluid s najboljim karakteristikama u smislu iskoristivosti i sa što manjim štetnim utjecajem po okoliš. ORC se, kao prihvatljiv proces za proizvodnju električne energije, istražuje još od 1970. godine. Na osnovu tih istraživanja kreirane su grupe organskih fluida po karakteristikama koje se iskazuju prilikom izvođenja procesa. Benzen, amonijak, R11, R12, R134a i R113 spadaju u „izentropske“ fluide i pokazali su se kao najbolji kao radni fluid u niskotemperaturnom procesu. ORC pogonjen geotermalnom energijom obično radi na temperaturama između 30 °C i 100 °C dok je tlak negdje oko 20 bar [2].

Na slici 7. prikazan je T-s dijagram promjene agregatnih stanja za vodu i neke druge radne fluide koji se koriste u ORC procesu.



Slika 7. T-s dijagram za vodu i druge radne fluide [4]

Iz slike 7. se uočava jasna razlika u promjeni entropije između krivulje zasićenja kapljevine i krivulje zasićenja pare za vodu i druge radne fluide. Organski fluide 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 [4].

4. VRSTE ORGANSKOG RANKINEOVOG CIKLUSA

Postoji više izvora energije kada se govori o niskotemperaturnim procesima. Otpadna toplina je najčešći izvor topline jer je ima u velikim količinama. Pri proizvodnji gotovo svega danas se otpadna toplina pušta u atmosferu čime se bespovratno gubi energija i zagađuje okoliš jer velik udio ispušnih plinova sadrže štetne plinove poput CO₂. Upravo ova energija je jedan od izvora za ORC čime se smanjuje emisija štetnih plinova. Biomasa je također jedan od izvora energije niske temperature, međutim gustoća biomase je mala što povećava troškove izgradnje postrojenja koje koriste biomasu. Geotermalni izvori energije zahtijevaju dvije bušotine, jedna koja će dovoditi vrelu vodu i druga u koju će se ta voda vraćati nakon što preda toplinu radnom fluidu. Ovo je relativno skupa izvedba zbog bušotina koje znaju biti duboke i do nekoliko stotina metara, donja granica temperature je 80 °C jer ispod toga proces ne bi bio isplativ dok je gornja oko 300 °C što je sasvim dovoljno za primjenu u ORC-u. ORC sa solarnom energijom ima određene nedostatke ali je koristan pogon za smanjenje potrošnje fosilnog goriva za postizanje energetske održivosti.

Što se tiče zaštite okoliša upotreba određenih fluida je ograničena Montrealskim sporazumom zbog njihovog potencijala za oštećivanje ozonskog omotača (ODP). S druge strane, zbog potencijala zagrijavanja okoliša, postavljena su određena ograničenja upotrebe Kyoto sporazumom. U skladu s navedenim, određeni organski mediji se više ne smiju koristiti, a dodatno je dogovoren postupni prestanak upotrebe određenih fluida u periodu 2020. do 2030. g. Pri procjeni organskih medija vezano za njihov potencijal zagrijavanja okoliša, oštećenja ozona i sigurnost upotrebe, moguće je koristiti ASHRAE klasifikaciju [1]. Kod izbora radnog fluida za ORC odabire se najpovoljniji. Pritom neki od postojećih organskih medija imaju izvrsna termodinamička svojstva, ali i značajan štetan utjecaj na okoliš, te ne mogu biti upotrijebljeni. Dakle, Organski Rankineov ciklus se, prema vrsti energije kojom se pogoni, može podijeliti na:

- ORC s otpadnom toplinom,
- ORC s geotermalnom toplinom,
- ORC s biomasom kao izvorom topline,
- ORC sa solarnim izvorom energije.

4.1. ORC S OTPADNOM TOPLINOM

Brojna postrojenja u industriji prilikom proizvodnje oslobađaju toplinu niske temperature. Radi se o velikim iznosima topline koja se najčešće ispušta u atmosferu uz prisutnost velikih emisija ugljikova (IV) oksida. Ove emisije se mogu smanjiti ukoliko otpadna toplina posluži za dobivanje električne energije. Otpadna toplina se koristi u svrhu transformacije radnog medija iz stanja kapljevine u stanje pare. Primjerice, industrije koje se bave proizvodnjom cementa i čelika imaju velik potencijal iskorištavanja otpadne topline. Unatoč visokom potencijalu i niskoj cijeni ORC tehnologije koja radi uz pomoć otpadne topline, samo 10% ORC elektrana u svijetu rade uz pomoć otpadne topline [8].

4.2. ORC S GEOTERMALNOM TOPLINOM

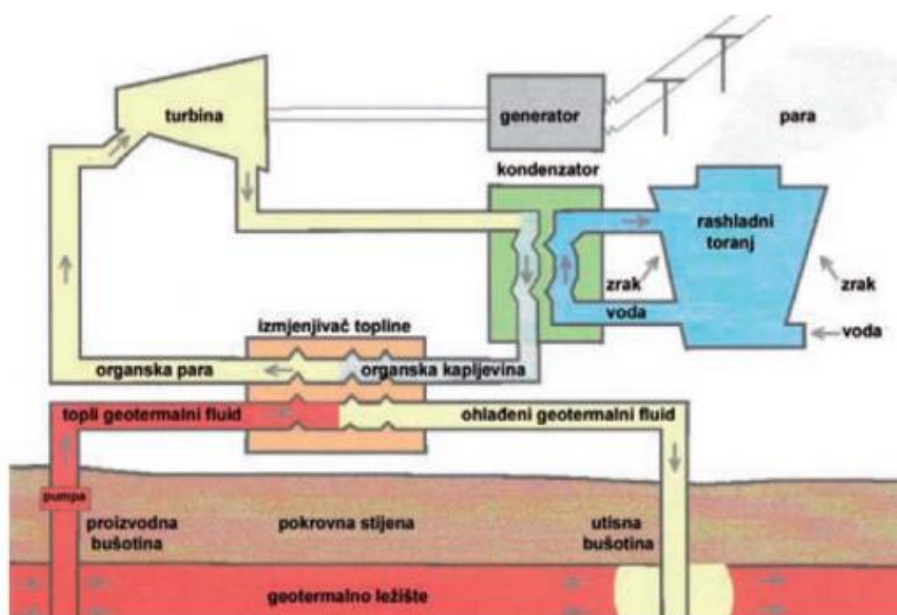
Geotermalna energija je izvor čiste energije, te ispunjava dva značajna čimbenika pri iskorištavanju energetske izvora, to su obnovljivost i održivost. Moguća podjela geotermalnih ležišta je prema termodinamičkim i hidrološkim osobinama te s obzirom na način ulaska i izlaska vode iz ležišta. Jedna od najvažnijih i najčešćih klasifikacija geotermalnih izvora se temelji na temperaturi geotermalnog fluida, koji služi kao prijenosnik topline s vruće stijene na površinu, tako da se geotermalni izvori dijele na: nisko temperature, srednje temperature i visoko temperature [9].

Geotermalna energija se može koristiti izravno, kao toplina, tj. bez daljnjih pretvorbi, što se naziva izravnim korištenjem, ili se uz određene gubitke može pretvoriti u neke druge oblike energije.

Prilikom proizvodnje električne energije potrebno je prvo toplinsku energiju pretvoriti u mehaničku, a nakon toga u električnu. Izravnim korištenjem resursi se koriste efikasnije nego pri proizvodnji električne energije, jer nema znatnih gubitaka kao kod pretvorbe toplinske energije u električnu. Geotermalne elektrane se mogu podijeliti na tri osnovna tipa:

- postrojenja sa suhom parom,
- postrojenja s isparavanjem (jednostrukim i dvostrukim) te
- binarna postrojenja [10].

Koji tip od navedenih će se instalirati ovisi o vrsti ležišta. Proizvodnja mehaničkog rada pomoću geotermalne energije zahtijeva paru za pogon turbina. Suha se para direktno odvodi u geotermalnu elektranu sa suhom parom, gdje ekspandira u turbini, obavljajući koristan mehanički rad za pogon električnog generatora. Za proizvodnju električne energije iz toplom vodom dominantnih geotermalnih ležišta, koriste se geotermalne elektrane s jednostrukim ili dvostrukim isparavanjem. Toplom vodom isparava se, u jednom ili dva isparivača, organski fluid te se nastala para odvodi u jednu ili dvije turbine. Ako ne postoje prirodna ležišta pare, ona se može proizvesti u vrućim suhim stijenama ili tzv. naprednim geotermalnim sustavima [10].



Slika 8. Geotermalna elektrana sa suhom parom - ORC

Na nižim temperaturnim razinama para za pogon turbina može se dobiti posredno, isparavanjem fluida koji imaju nižu točku ključanja od vode. Ciklus je poznat kao Organski Rankineov ciklus (ORC) pošto su na samom početku korištene organske tvari kao toluol (C_7H_8), pentan (C_5H_{12}), propan (C_3H_8) te ostali ugljikovodici (Slika 8) [10].

4.3. ORC S BIOMASOM KAO IZVOROM TOPLINE

ORC s biomasom najviše se isplati koristiti lokalno. Gustoća energije biomase je puno manja od često korištenih fosilnih goriva što bi značilo visoke cijene transporta u slučaju opskrbe udaljenijih postrojenja. U postrojenju sa biomasom, ulje se koristi kao posrednik između komore gdje izgara biomasa i radnog medija, odnosno, ulje prenosi toplinsku energiju na radni medij u procesu. Radni medij prolazi kroz kondenzator pri temperaturi od oko 90°C te predaje toplinu vodi koja kasnije služi za potrebe grijanja [4].

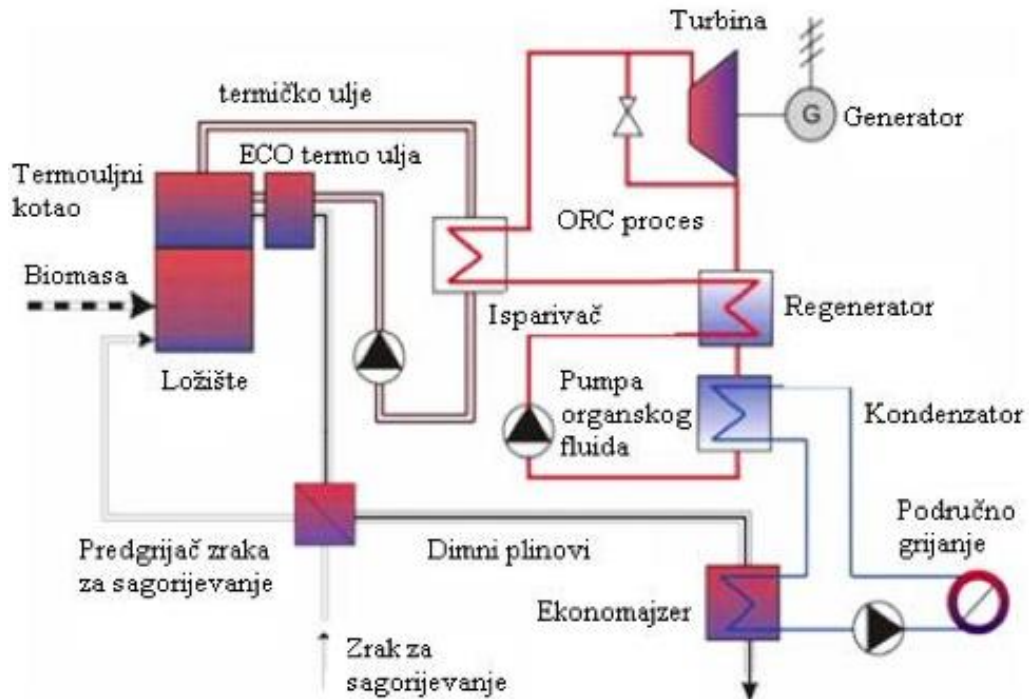
Kod kogeneracijskih niskoentalpijskih ORC postrojenja (ulazni energent je biomasa) koristi se međukrug termičkog ulja koje služi kao medij posrednik između topline dobivene sagorijevanjem biomase i radnog fluida. Naime, kod visokih temperatura, voda i para zahtijevaju i odgovarajući visoki radni tlak, koji je kod sistema s termičkim uljem, zahtijevana temperatura od minimalno 300°C.

U industrijskoj 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 sustave. S druge strane ovakva izvedba dovodi do više cijene postrojenja zbog nužnosti ugradnje izmjenjivača topline cirkulacijskih pumpi i cjevovoda sa armaturom i mjernom opremom i složenije je izvedbe.

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 predaje toplinu radnom mediju (organskom fluidu) te on isparava (uz najčešće njegovo prethodno predgrijavanje u regeneratorskom);
2. Organska para ekspandira u turbini, gdje se kinetička energija pare pretvara u mehanički rad, a mehanički rad 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 [4].



Slika 9. ORC s biomasom [4]

Kao što se sa slike 9. 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 primjeni potreban je visok temperaturni nivo, a postizanje tog režima s parom i vodom tehnički je zahtjevno. [4]

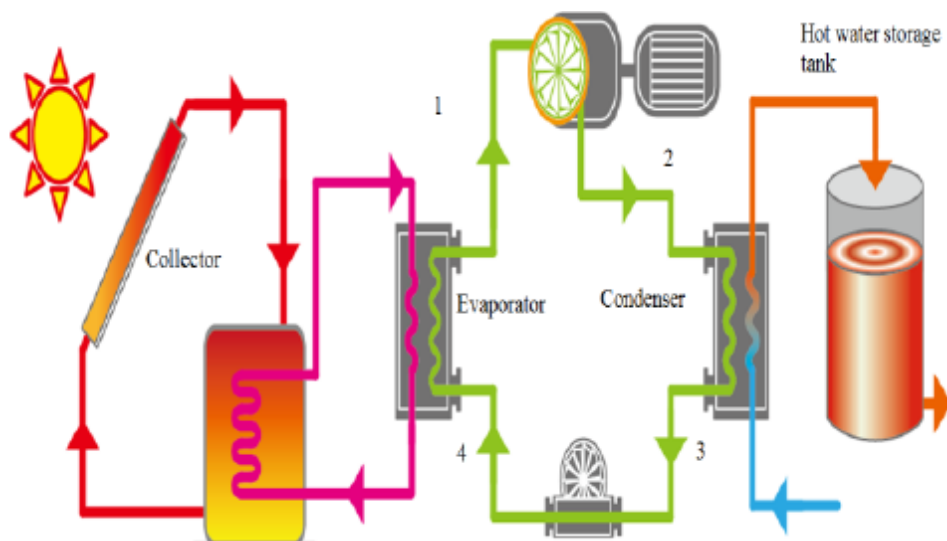
4.4. ORC SA SOLARNOM ENERGIJOM

Iako ima nekoliko nedostataka, ORC sustav s upotrebom solarne energije koristan je za smanjenje potrošnje fosilnih goriva u svrhu postizanja energetske održivosti. Nedostaci upotrebe ovih sustava su sljedeći:

- visoki troškovi ulaganja,
- veliki zahtjev za postavljanje,
- ovisi o vremenskim uvjetima,
- manja učinkovitost,
- loše karakteristike performanse i
- još uvijek nedovoljno razvijena tehnologija.

Međutim, ORC male veličine mogu se široko koristiti u raznim primjenama kao što su proizvodnja električne energije u kućama ili toplinskim crpkama s termičkim pogonom. Trenutno 1,6 milijardi ljudi diljem svijeta još uvijek nema pristup električnoj energiji, stoga ovaj način je vrlo pogodan upravo za kućanstva [11].

Odabir organskog radnog fluida za solarni Rankine ciklus igra važnu ulogu u ukupnoj učinkovitosti sustava. Sunčev ORC sustav može raditi sa zasićenom parom ili uz stalno pregrijavanje od nekoliko stupnjeva Celzija, ovisno o svojstvima tekućine [12].



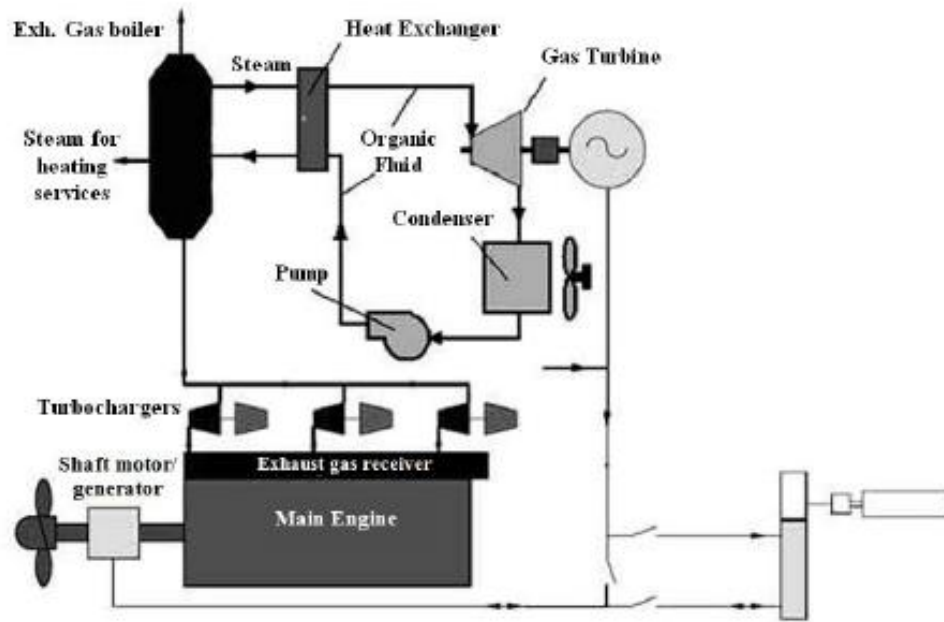
Slika 10. Shematski prikaz solarnog ORC-a [12]

Princip rada na slici 10. objašnjava se tako da dobivena topla voda pomoću solarnog kolektora prolazi kroz isparivač. Radna tekućina ORC se crpi i prolazi kroz isparivač gdje mijenja svoju fazu. Radni fluid na izlazu iz turbine kondenzira se hladnom vodom koja se dovodi iz slavine i vraća se u cirkulacijsku pumpu kako bi se započeo ponovljeni ciklus [12].

Kako bi učinkovitost sustava bila optimalna, potreban je određen raspon rada tlaka za razne radne fluide.

4.5. PRIMJENA ORC-A NA BRODOVIMA

ORC je već dobro uspostavljeni oblik proizvodnje energije iz niskotemperaturnih izvora. Može se reći da je relativno nov na morskom tržištu. Vodeći pružatelj rješenja u pomorskoj industriji već su se angažirali o zajedničkom razvoju, tržištu i distribuciji proizvoda kombiniranog ciklusa primjerice kod pomorskih motora u kojima se ORC koristi kao sustav za povrat otpadne topline. Otpadna toplina porivnog motora već je poznata kao izvor velike količine energije koja se može iskoristiti u razne svrhe, kao recimo proizvodnju slatke vode u vakuumskim evaporatorima. Ipak, najčešće se koristi za proizvodnju pare dok je brod u plovidbi kako bi se povećala ekonomičnost broda. U slučaju proizvodnje vodene pare, nužno je da opterećenje porivnog stroja bude što veće zbog velike količine energije koja je potrebna za proizvesti paru. Uporabom ORC-a, potrebna je puno manja količina topline za iste rezultate. Prema slici 11, vidljivo je da se ORC konstrukcijski bitno ne razlikuje od klasičnog RC-a što ide u prilog ekonomičnosti. ORC se na brodovima koristi za proizvodnju električne energije. Otpadna toplina porivnog stroja, sadržana u ispušnim plinovima koristi se kao sredstvo za promjenu agregatnog stanja organskog fluida iz zasićene tekućine u zasićenu paru (ovisi o vrsti sustava ORC-a). Zbog znatno manje potrebne topline za promjenu agregatnog stanja organskog fluida ona se može izvršiti pri manjem opterećenju porivnog stroja. Turbina koju pogoni organski fluid prilikom ekspanzije spojena je na generator električne struje. Nakon ekspanzije organski fluid mora se vratiti u početno stanje kako bi se ciklus ponovio pa je potreban kondenzator. U kondenzatoru se organski fluid vraća u kapljevito stanje. Nedostatak ovakvog sustava na brodu je skladištenje i tretiranje organskog fluida u usporedbi s vodom koja se lako skladišti i dostupna je.



Slika 11. Integracija ORC sustava u brod [15]

Ukupna ušteda energije ORC sustava primjerice u sustav kontejnerskih brodskih elektrana može doseći i do 17,1%. [15].

Energetski proračun navedenog sustava glasi:

Dovedena toplina u sustav (kotao + pregrijač):

$$\dot{Q}_{dov} = \dot{m} \times (h_1 - h_4)[kW] \quad (7)$$

Bruto (ukupno) dobivena snaga na vratilu turbine:

$$P_{turbina} = \dot{m} \times (h_1 - h_2)[kW] \quad (8)$$

Odvedena toplina u kondenzatoru:

$$\dot{Q}_{odv} = \dot{m} \times (h_2 - h_3)[kW] \quad (9)$$

Snaga potrebna za pogon napojne pumpe:

$$P_{pumpa} = \dot{m} \times (h_3 - h_4)[kW] \quad (10)$$

Stupanj iskoristivosti ciklusa iznosi:

$$\eta_t = \frac{\text{dobiveno}}{\text{uloženo}} = \frac{P_{\text{neto}}}{\dot{Q}_{\text{dov}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{dov}} - \dot{Q}_{\text{odv}}}{\dot{Q}_{\text{dov}}} \quad (11)$$

5. USPOREDBA KLASIČNOG I ORGANSKOG RANKINEOVOG CIKLUSA

5.1. PREDNOSTI I NEDOSTACI ORC-A

ORC je u prednosti nad klasičnim RC zbog mogućnosti korištenja niskotemperaturnih izvora. ORC je moguće primjenjivati u kombinacijama sa drugim tehnologijama. U kućanstvu i industriji ističe se tri-generacijska elektrana kao moguće rješenje, odnosno to su mjesta gdje je velika potražnja za niskotemperaturnim hlađenjem/grijanjem i mala potreba za električnom energijom. Ovdje se prije svega misli na primjenu solarnih termalnih kolektora gdje svaki višak više temperature odlazi u ORC za proizvodnju električne energije koja se djelomično koristi za reverznu osmozu kako bi se dobila pitka voda [13].

Prednost korištenja ORC tehnologije temelji se na činjenici da su potrebni niski radni pritisci u odnosu na druge termodinamičke cikluse u odnosu na klasičan Rankin-ov ciklus. 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 globalnog povećanja emisije štetnih (stakleničkih) plinova nastalih uglavnom procesom sagorijevanja fosilnih goriva uzrokujući efekt staklenika, pojavu ozonskih rupa, zagađenje voda, zemlje i oštećenje šuma [13].

Prednosti ORC tehnologije su:

1. Proces se odlikuje relativno visokom iskoristivosti na nižim opterećenjima što predstavlja prednost kod pogona kogeneracijskog postrojenja u režimu kojem slijedi potrošnja toplinske energije;
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 klasifikacijskog društva;
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;

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 [4].

Termodinamička svojstva su od ključne važnosti u procesu projektiranja postrojenja baziranog na ORC-u, jer se mora postići optimalno iskorištenje raspoložive toplinske energije. Ovo su najvažniji zahtjevi sustav:

- Ukupna učinkovitost procesa treba biti što veća za zadani toplinski izvor i rashladni medij,
- Tlak kondenzacije treba biti veći od tlaka okoliša radi izbjegavanja problema u slučaju propuštanja na dijelovima opreme,
- U podkritičnom ORC-u, tlak u isparivaču mora biti niži od kritičnog tlaka za radni fluid.
- Manji specifični volumen (veća gustoća) rezultira manjim volumnim protokom fluida, što je poželjno jer su komponente postrojenja manjih dimenzija i prema tome kompaktnije, te je sustav u cjelini jeftiniji. Pored toga, manji specifični volumen rezultira manjim padom tlaka u komponentama sustava u odnosu na fluid s većim specifičnim volumenom, te je u ciklusu potrebna pumpa manje snage. Ovo u konačnici rezultira većim korisnim radom, jer se manji dio snage troši na pogonjenje komponenata sustava.

Uz veću promjenu specifične entalpije pri ekspanziji u turbini, veći je i korisni rad u ciklusu. Kod radnog fluida s većim koeficijentima prijelaza i provođenja topline, prijenos topline s toplinskog izvora na rashladni medij je intenzivniji. Kod fluida s većim toplinskim kapacitetom u kapljevitaj fazi potrebna je veća energija za zagrijavanje pri istim početnim i krajnjim temperaturama, što rezultira manjim masenim protokom radnog medija. Toplinska i kemijska stabilnost je vrlo bitna, jer se od radnog medija očekuje da bude stabilan i da njegova upotreba ne rezultira emisijom toksičnih i nestabilnih komponenti.

Što se tiče isplativosti pri konstruiranju turbine, od iznimne važnosti su omjer tlaka na ulazu i izlazu, te promjena entalpije i gustoće. U Rankineovom ciklusu s vodom kao radnim medijem, omjer tlakova i promjena entalpije su vrlo veliki u odnosu na ORC. Zato se koriste turbine s više turbinskih stupnjeva (višestupnjevana ekspanzija), jer se na takav način smanjuju eksergijski gubici i u konačnici povećava korisni rad. S druge strane, promjena entalpije i omjer tlakova kod ORC-a su značajno manji, te su dovoljne turbine s jednim ili dva stupnja ekspanzije. Takve turbine su znatno jeftinije, a ako se k tome uzme u obzir i velika gustoća organskih fluida, koja rezultira smanjenjem svih komponenata sustava uključujući i turbinu, može se zaključiti da primjena postrojenja zasnovanih na ORC-u rezultira značajnim smanjenjem investicije. Dodatna pozitivna karakteristika ORC-a je bitno jednostavnija realizacija sustava upravljanja u odnosu na sustave koji koriste Rankineov ciklus s vodom [1].

5.2. PREDNOSTI I NEDOSTACI KLASIČNOG RANKINEOVOG CIKLUSA

Glavna razlika između RC i ORC je radni fluid koji se koristi. U Rankineovom 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 [4]. Teorijski kružni proces u parnim postrojenjima je poznati Rankineov kružni proces čiji je stupanj iskorištenja toliko viši koliko je veći toplinski pad u parnom stroju, odnosno parnoj turbini, tj. koliko su viši tlak i temperatura dovedene pare u stroju i koliko je niži tlak odvedene pare iz stroja [4].

Regenerativno predgrijavanje u praksi je izvedeno tako da se kroz predgrijače ne provodi čitava radna para, već se iza svakog stupnja odvaja samo onoliki dio pare koji će pri svojoj potpunoj kondenzaciji upravo namiriti potrebu topline dotičnih predgrijača. Ovako nastali kondenzati odvođe se s glavnim kondenzatom u skupni napojne crpke i vraćaju u kotao. Ako je para još i pregrijana, može se postići da pri ekspanziji u turbinama ostaje u području pregrijane pare. Katkada se uključuje i međupredgrijanje pare iza drugog ili trećeg stupnja turbine [14].

Termodinamička učinkovitost Rankineovog ciklusa s vodom značajno opada s temperaturom, te on postaje neekonomičan na temperaturama nižim od 370 °C, uz istodobni porast opasnosti od erozije turbinskih lopatica budući da udio kapljevite faze raste jer se ekspanzija odvija dublje u zoni mokre pare. Zbog toga se konvencionalna postrojenja uglavnom koriste za iskorištavanje toplinske energije iz izvora na visokim temperaturama i u velikim centraliziranim sustavima proizvodnje električne energije. Niskotemperaturne izvore toplinske energije moguće je iskorištavati primjenom postrojenja baziranih na Organskom Rankineovom Ciklusu (ORC) koja omogućuju pretvorbu toplinske energije iz izvora na relativno niskim temperaturama u području 80 – 370 °C, u mehanički rad i/ili u električnu energiju. Pritom se kao radni medij u ciklusu koriste organski fluidi, između ostalih i ugljikovodici, te mediji koji se koriste i u rashladnim sustavima [1].

6. ZAKLJUČAK

U klasičnom Rankineovom ciklusu kao fluid se koristi voda pri čemu se toplinska energija pretvara u električnu. Kako bi se vodi promijenilo agregatno stanje iz tekućeg u plinovito potrebna je znatna količina energije zbog njenog specifičnog toplinskog kapaciteta. ORC proces ima isti princip rada i glavne komponente kao i klasičan Rankineov ciklus. Razlike se uglavnom odnose na korišteni radni fluid u ciklusu, termodinamičke osobine radnog fluida i temperaturu izvora topline. Što se tiče fluida koji u Rankineovom ciklusu koristi se samo voda, dok postoje stotine različitih radnih fluida koji se mogu koristiti u ORC ciklusu.

Organski fluidi su karakterizirani nižom temperaturom isparavanja u odnosu na vodu te imaju prednost. Dobar fluid koji će se primjenjivati u ORC mora imati nizak specifični volumen, umjereni tlak u izmjenjivačima topline, nisku cijenu nabave i nisku toksičnost. Upotreba određenih fluida je ograničena Montrealskim sporazumom zbog njihovog potencijala za oštećivanje ozonskog omotača. Zbog potencijala zagrijavanja okoliša, postavljena su određena ograničenja upotrebe.

Postoji više izvora energije kada se govori o niskotemperaturnim procesima. Otpadna toplina je najčešći izvor topline jer je ima u velikim količinama. Geotermalni izvori energije zahtijevaju dvije bušotine, jedna koja će dovoditi vrelu vodu i druga u koju će se ta voda vraćati nakon što preda toplinu radnom fluidu. Organski Rankineov ciklus se, prema vrsti energije kojom se pogoni, može podijeliti na ORC s otpadnom toplinom, s geotermalnom toplinom, s biomasom kao izvorom topline i ORC sa solarnim izvorom energije.

ORC je pogodan za iskorištavanje niskotemperaturnih izvora topline jer ima radni fluid nižeg vrelišta kao što je otpadna industrijska topline, geotermalnih izvora, solarne energije i energije iz biomase. Pogodan je za smanjenje potrošnje električne energije u industriji te dobivanje čiste energije iz obnovljivih izvora, kroz iskorištavanje otpadne topline iz proizvodnih pogona ili iz kotlovnica pri grijanju zgrada. ORC je prepoznat kao tehnologija koja bi mogla imati značajnu ulogu pri ostvarenju postavljenih ciljeva vezano za smanjenje upotrebe fosilnih goriva i emisija stakleničkih plinova.

LITERATURA

- [1] Sedić, A., (2017) Integracija otpadne topline i obnovljivih izvora energije u postrojenju atmosferske destilacije nafte, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb,
- [2] Prelec, Z. Energetski sustavi, <https://docplayer.gr/52603087-Energetski-sustavi-za-proizvodnju-elektricne-i-toplinske-energije.html> (01.08.2020)
- [3] Vrste i podjela parnih turbina, <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:CdXcXxd3DkwJ:marjan.fesb.hr/fbarbir/PDFs%2520Termoenergetska%2520postrojenja/06%2520Parne%2520turbine%20i%2520postrojenja.pdf+%&cd=4&hl=hr&ct=clnk&gl=hr> (18.07.2020)
- [4] Čehajić, N., Halilčević, S., & Softić, I. (2014). Primjena organskog Rankinog ciklusa (ORC) i prikladni radni fluidi. Tehnički glasnik, 8(3), 229-237.
- [5] Quoilin S, Van Den Broek M, Declaye S, Dewallef P, Lemort V. (2013) Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 22:168-86.
- [6] Quoilin, S. (2011) Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications. Energy systems research unit aerospace and mechanical engineering department. University of Liège.
- [7] Mustapić, N. Guzović, Z., Staniša B., Energetski strojevi i sustavi, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.
- [8] Organski Rankinog ciklus, https://hr.wikipedia.org/wiki/Organski_Rankinog_ciklus, (01.08.2020)
- [9] Geotermalna energija, <http://e-learning.gornjogradska.eu/energijaekologijaengleski-ucenici/8-geotermalna-energija/>, (02.08.2020)
- [10] Načini pretvorbe geotermalne energije u električnu energiju, <https://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/69-nacini-pretvorbe-geotermalne-energije-u-elektricnu-energiju?showall=1>, (02.08.2020)
- [11] Quoilin, S. Orosz, M. Hemond, H. Lemort, V. Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankin cycle for remote power generation,” Solar Energy, vol. 85, pp. 955-966, 2011.
- [12] Baral, S. Kyung Chun K., Simulation, validation and economic analysis of solar powered organic rankine cycle for electricity generation, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 3, No. 1;2015;62-67.

- [13] Sylvain Quoilin, Martijn Van Den Broek, Sébastien Declaye, Pierre Dewallef, Vincent Lemort, Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 22, June 2013, Pages 168-186.
- [14] Petric, N. Vojnović, I. Martinac, V., Tehnička termodinamika 2. Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu Split, 2007.
- [15] [https://www.researchgate.net/figure/Integration-of-Organic-Rankine-Cycle-in-a-Ship-Fundamentals-Application-of-Gas_fig4_283732724\(04.09.2020\)](https://www.researchgate.net/figure/Integration-of-Organic-Rankine-Cycle-in-a-Ship-Fundamentals-Application-of-Gas_fig4_283732724(04.09.2020))

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz postrojenja klasičnog Rankineovog ciklusa [1].....	2
Slika 2. Postrojenje kojim se ostvaruje Rankienov ciklus [3].....	3
Slika 3. T-s dijagram RC procesa [2]	4
Slika 4. Osnovne komponente sustava zasnovanog na ORC-u [1]	8
Slika 5. Oblici linije suho zasićene pare a) „izentropski“ fluid, b) „mokri“ fluid, c) „suhi“ fluid [6].....	11
Slika 6. Oblici i linije kod suho zasićene pare [2]	12
Slika 7. T-s dijagram za vodu i druge radne fluide [4].....	14
Slika 8. Geotermalna elektrana sa suhom parom - ORC.....	17
Slika 9. ORC s biomasom [4].....	19
Slika 10. Shematski prikaz solarnog ORC-a [12].....	20
Slika 11. Integracija ORC sustava u brod [15].....	22