



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Įprastinio ir organinio Renkino ciklo kogeneracinių elektrinių
palyginamoji analizė**

Baigiamasis magistro projektas

Dovydas Maziliauskas

Projekto autorius

Prof. dr. Vytautas Dagilis

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Įprastinio ir Organinio Renkino ciklo kogeneracinių elektrinių palyginamoji analizė

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija 6211EX023

Dovydas Maziliauskas
Projekto autorius

Prof. dr. Vytautas Dagilis
Vadovas

Doc. dr. Liutauras Vaitkus
Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Dovydas Maziliauskas

Įprastinio ir Organinio Renkimo ciklo kogeneracinių elektrinių palyginamoji analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Dovydas Maziliauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei)	Dovydui Maziliauskui
Projekto tema	Įprastinio ir Organinio Renkino ciklo kogeneracinių elektrinių palyginamoji analizė (lietuvių kalba) Comparative Analysis of Conventional and Organic Rankine Cycle Cogeneration Plants (anglų kalba)
Darbo tikslas ir uždaviniai	Tikslas - atlikti nedidelės galios įprastinio ir Organinio Renkino ciklo kogeneracinių elektrinių palyginamąją analizę. Uždaviniai: <ol style="list-style-type: none">1. Išanalizuoti pagrindines nedidelės galios įprastinio Renkino ciklo problemas.2. Išanalizuoti pagrindinius nedidelės galios organinio Renkino ciklo privalumus.3. Atlikti abiejų ciklų termodinaminius skaičiavimus bei parinkti optimaliausią organinio Renkino ciklo darbinį fluidą.4. Atlikti įprastinio ir organinio Renkino ciklų šiluminius skaičiavimus.5. Atlikti įprastinio ir organinio Renkino ciklų ekonominius skaičiavimus.
Reikalavimai ir sąlygos	Apiforminimas pagal bendruosius reikalavimus / Papildomų reikalavimų nėra.
Vadovas	Prof. dr. Vytautas Dagilis (vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)
	2021-02-18 (data)

Dovydas Maziliauskas „Įprastinio ir Organinio Renkino ciklo kogeneracinių elektrinių palyginamoji analizė“. Magistro baigiamasis projektas. Vadovas prof. Dr Vytautas Dagilis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Energijos inžinerija (E300), Technologijos mokslai (Inžinerija)

Reikšminiai žodžiai: Renkino ciklas, organinis Renkino ciklas, kogeneracija, biomasės jėgainės, ekonominis vertinimas.

Kaunas, 2021. 62 p.

Santrauka

Šio baigiamojo magistro projekto tikslas yra atlikti dviejų tipų kogeneracinių jėgainių palyginamąją analizę. Analizė yra atliekama mažos galios kogeneracėms jėgainėms, kurių veikimo principas yra paremtas įprastiniu Renkino ciklu ir organiniu Renkino ciklu.

Pirmoje darbo dalyje yra analizuojamos pagrindinės problemos, su kuriomis susiduria mažos galios įprastinio Renkino ciklo kogeneracinės jėgainės. Remiantis literatūros šaltiniais yra analizuojama kokie faktoriai lemia žemą kogeneracinių jėgainių efektyvumą, kai yra taikomas įprastinis Renkino ciklas. Šioje dalyje yra analizuojami pagrindiniai organinio Renkino ciklo privalumai mažos galios kogeneracijoje ir kodėl esant žemai jėgainės galiai tokio tipo jėgainės yra efektyvesnės bei racionalesnės. Analizuojami pagrindiniai panašumai bei skirtumai tarp dviejų tipų jėgainių.

Antroje darbo dalyje yra nagrinėjamas kogeneracinio organinio Renkino ciklo potencialas Lietuvoje. Atliekama elektros ir šilumos rinkos apžvalga. Taip pat yra nagrinėjami ir kiti organinio Renkino ciklo technologijos taikymo būdai panaudojus atsinaujinančius energijos šaltinius.

Trečioje darbo dalyje yra atliekama literatūros analizė. Šioje dalyje yra atliekama organinio Renkino ciklo jėgainių dabartinės rinkos analizė. Aptariama kokio tipo organinio Renkino ciklo jėgainės yra plačiausiai naudojamos bei kokie faktoriai lėmė spartų rinkos vystymąsi. Taip pat yra nagrinėjami organinio Renkino ciklo darbiniai agentai bei kokie veiksniai įtakoja jų pasirinkimą. Šioje dalyje yra aptariama fluidų cheminės bei fizikinės savybės, kurios privalo atitikti tam tikrus gamtosauginius reikalavimus.

Ketvirtoje darbo dalyje yra atliekama palyginamoji analizė. Šioje dalyje yra atliekamas termodinaminių, šiluminių bei ekonominių parametrų vertinimas. Taip pat yra atliekamas optimaliausio bei efektyviausio organinio Renkino ciklo darbinio agento parinkimas. Atliekami šiluminiai skaičiavimai, kuriuose yra įvertinama abiejų kogeneracinių jėgainių pagaminami bei suvartojami elektros ir šiluminės energijos kiekiai. Remiantis šiluminių skaičiavimų dalimi yra atliekama ekonominė analizė, kurioje yra vertinamas abiejų kogeneracinių jėgainių pelningumas. Be to, yra atliekamas Europos Sąjungos struktūrinių fondų finansavimo įtaka viso projekto atsiperkamumui.

Dovydas Maziliauskas „Comparative Analysis of Conventional and Organic Rankine Cycle Cogeneration Plants“. Master's Final Degree Project. Supervisor prof. Dr. Vytautas Dagilis; Faculty of mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering (E300), Technological Science (Engineering)

Keywords: Rankine cycle, organic Rankine cycle, cogeneration, biomass power plant, economical evaluation.

Kaunas, 2021, 62 pages.

Summary

The aim of this final master's project is to perform a comparative analysis of two types of cogeneration power plants. Analysis is performed for low-power cogeneration plants, of which operating principle is based on conventional Rankine cycle and organic Rankine cycle.

The first part of the work analyzes the main problems faced by low-power s Rankine cycle cogeneration plants. Using scientific literature, it is analyzed what factors determine the low efficiency of cogeneration plants when the conventional Rankine cycle is applied. Also, this section analyzes the main advantages of the organic Rankine cycle in low-power cogeneration and the reasons why this type of power plant is more efficient and rational at at low to medium power ranges. The main similarities and differences between the two types of power plants are also analyzed. Other organic Rankine cycle applications using different types of renewable energy sources are also analyzed.

The second part of the work deals with the potential of the cogeneration organic Rankine cycle in Lithuania. An overview of the electricity and heat market is being carried out. Other applications of Organic Rankin cycle technology using renewable energy sources are also considered.

In the third part of the work, the analysis of the literature is performed. This section analyzes the current market for organic Rankine cycle power plants. It is discussed what type of organic Rankine cycle power plants are most widely used and what factors have led to the rapid development of the market. The working agents of the organic Rankine cycle and what factors influence their selection are also examined. This section discusses the chemical and physical properties of fluids, which must meet certain environmental requirements.

In the fourth part of the work, a comparative analysis is performed. In this part, the evaluation of thermodynamic, thermal and economic parameters is performed. The selection of the most optimal and effective organic Rankine cycle work agent is also performed. Thermal calculations are performed, in which the amounts of electricity and heat produced and consumed by both cogeneration power plants are estimated. Using the data of thermal calculations, an economic analysis is performed, in which the profitability of both cogeneration power plants is assessed. In addition, the impact of the European Union Structural Funds funding on the profitability of the whole project is performed.

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Mažos galios kogeneracija. Pagrindinės problemos ir jų sprendimas.....	13
1.1. Mažos galios kogeneracijos problemos taikant įprastinį Renkino ciklą	13
1.2. Mažos galios kogeneracija taikant organinį Renkino ciklą	16
2. Organinio Renkino ciklo kogeneracija. Jos potencialas Lietuvoje.....	22
2.1.1. Lietuvos kogeneracijos ir elektros sektoriaus apžvalga	23
2.2. ORC technologijos taikymas su atsinaujinančiais energijos šaltiniais.....	25
2.2.1. Biokuro ORC jėgainės.....	25
2.2.2. Saulės ORC jėgainės	27
2.2.3. Geoterminės ORC jėgainės	29
3. Literatūros analizė.....	32
4. Įprastinio Renkino ciklo ir organinio Renkino ciklo palyginamoji analizė	37
4.1. Kogeneracinių jėgainių termodinaminis vertinimas.....	37
4.1.1. Įprastinio Renkino ciklo termodinaminis vertinimas	37
4.1.2. Organinio Renkino ciklo termodinaminis vertinimas	40
4.2. Kogeneracinių jėgainių šiluminis vertinimas	42
4.2.1. Įprastinio Renkino ciklo jėgainė.....	42
4.2.2. Organinio Renkino ciklo jėgainė.....	44
4.3. Kogeneracinių jėgainių ekonominis vertinimas	45
4.3.1. Įprastinio Renkino ciklo kogeneracinė jėgainė	46
4.3.2. Organinio Renkino ciklo kogeneracinė jėgainė	50
Išvados	57
Literatūros sąrašas	59

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Prieš-kritinio ir virš-kritinio Renkino ciklo diagrama [13].	13
1.2 pav. Biokuro jėgainės elektros gamybos efektyvumas priklausomai nuo instaliuotos elektrinės galios [1].	14
1.3 pav. Garo turbinos parametrai esant skirtingiems galingumams [1].	14
1.4 pav. Garo turbinos sūkių (RPM) priklausomybė nuo jos galios bei garo soties temperatūros [16].	15
1.5 pav. Jėginių elektrinis efektyvumas priklausomai nuo garo parametrų [15].	16
1.6 pav. Drėgnojo fluido T-s diagrama [16].	17
1.7 pav. Sausojo fluido T-s diagrama [16].	17
1.8 pav. Vandens, benzeno ir MDM Renkino ciklo kreivė [16].	18
1.9 pav. ORC ir RC elektrinių efektyvumas priklausomai nuo apkrovos [17].	19
1.10 pav. Organinio Renkino ciklo jėgainės schema [18].	20
1.11 pav. BWR priklausomybė nuo darbinio agento soties temperatūros [18].	20
2.1 pav. Šilumos gamybos struktūra 2018 metais [19].	23
2.2 pav. Elektros energijos balansas 1999 - 2010 metais [22].	24
2.3 pav. Organinio Renkino ciklo biokuro jėgainės schema [18].	26
2.4 pav. Tiesioginis (schema kairėje) ir netiesioginis (schema dešinėje) garo generavimas S-ORC sistemoje [16].	27
2.5 pav. Ekonominis saulės organinio Renkino ciklo palyginimas su PV [32].	28
2.6 pav. S-ORC sistema su šilumos akumuliacijos talpa [32].	29
2.7 pav. Dvinarinės geoterminės jėgainės schema [33].	30
3.1 pav. Koreliacija tarp naftos kainos ir suminės ORC jėginių galios [3].	32
3.2 pav. Suminė instaliuota elektrinė galia pagal šalį ir pirminį energijos šaltinį [3].	33
3.3 pav. Jėgainės vidinė grąžo norma, priklausomai nuo jėgainės galios ir biokuro kainos. Iki kritinis ciklas [8].	33
3.4 pav. Jėgainės vidinė grąžo norma, priklausomai nuo jėgainės galios ir biokuro kainos. Virš kritinis ciklas [8].	34
3.5 pav. ORC biokuro jėgainės finansiniai srautai esant skirtingiems slėgio ciklams [8].	34
3.6 pav. Eksperimentinių mikro ORC jėginių palyginimas [11].	35
4.1 pav. Šilumos supirkimo kainos Vilniaus mieste. 2020 metais [35].	46
4.2 pav. Biokuro kogeneracinių jėginių specifinė investicijų kaina. [38].	47
4.3 pav. ORC jėgainės kainų priklausomybė nuo instaliuotos galios [41].	50
4.4 pav. ORC jėgainės kainų priklausomybė nuo instaliuotos galios [42].	51

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Organinių fluidų cheminio skilimo parametrai.	21
2.1 lentelė. Geoterminių jėgainių tipų palyginimai.....	30
4.1 lentelė. Kondensacinio režimo termodinaminių parametru lentelė.....	38
4.2 lentelė. Kogeneracinio režimo termodinaminių parametru lentelė.....	39
4.3 lentelė. Darbinių agentų parinkimas.	42
4.4 lentelė. RC jėgainės šiluminių skaičiavimų suvestinė	44
4.5 lentelė. ORC jėgainės šiluminių skaičiavimų suvestinė	45
4.6 lentelė. Biokuro kainos nurodytos Eur/tne.....	46
4.7 lentelė. RC kogeneracinės jėgainės atsiperkamumas (su parama).....	49
4.8 lentelė. ORC kogeneracinės jėgainės atsiperkamumas (be paramos).....	53
4.9 lentelė. ORC kogeneracinės jėgainės atsiperkamumas (su parama).....	54
4.10 lentelė. Įprastinio ir Organinio Renkino ciklo kogeneracinių jėgainių termodinaminių bei šiluminių vertinimų suvestinė.....	55
4.11 lentelė. Įprastinio ir organinio Renkino ciklo kogeneracinių jėgainių ekonominio vertinimo suvestinė	55

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

RC – Renkino ciklas;

ORC – organinis Renkino ciklas;

VERT - Valstybinė energetikos reguliavimo taryba;

CŠT – Centralizuotas šilumos tiekimas;

OAP – Ozono ardymo potencialas;

PAP – Pasaulinio atšilimo potencialas;

SIK – Specifinė investicijų kaina;

h - entalpija, kJ/kg;

s – entropija, J/kg*K;

η – naudingumo koeficientas, %;

V – Specifinis tankis, m³/kg;

p – slėgis, bar

T – temperatūra, °C

W – mechaninė galia, MW

Q – šiluminė galia, MW

I – išlaidos, Eur

P – pajamos, Eur

Išvadas

Energijos tvarumo iššūkis yra vienas iš svarbiausių tikslų, kurį žmonija turi pasiekti XXI amžiuje. Galima išskirti tris pagrindinius faktus norint suprasti dabartinę situaciją, susijusią su energijos gamyba pasaulyje.

Pirma, tikimasi, kad pasaulinis energijos poreikis, per ateinančius 30 metų, išaugs dėl gyvenimo būdo raidos išsivysčiusiose šalyse bei besivystančių šalių kylančio energetinio poreikio. Pasak Jungtinių Amerikos Valstijų Energetinės Informacijos Administracijos, numatyta, kad energijos suvartojimas visame pasaulyje, nuo 2018 iki 2050 metų išaugs iki 50 %, kur didžiausią prieaugį sudarys Azijos žemyno šalys [45]. Numatoma, kad energijos poreikis pastatams išaugs 65 %, o transportui – 40 %.

Antra, per pastaruosius dešimtmečius su energijos gamyba susijusių šiltnamio efektą sukeliančių dujų (pagrindė anglies dioksidas – CO₂) išmetimas pastoviai augo. Ši tendencija toliau išliks ir dar labiau sustiprės. Su energijos sektoriumi susijęs CO₂ dujų išmetimas buvo lygus $21.6 \cdot 10^9$ t/met. 1990 metais, o 2019 metais siekė iki $36.44 \cdot 10^9$ t/metus [46]. Pasak Jungtinių Amerikos Valstijų Energetinės Informacijos Administracijos, nuo 2018 iki 2050 metų, išmetamų CO₂ dujų kiekis kasmet augs po 0.6% ir 2050 metais pasieks $45 \cdot 10^9$ t/metus [47]. Autorių teigimu, šalyse, kurios priklauso Ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacijai (EBPO), išmetamų šiltnamių dujų prieaugis bus neigiamas ir mažesnis 0.2 % per metus. Tačiau besivystančios šalys, kurios nepriklauso EBPO, išmetamų dujų kiekį didins 1 % per metus.

Trečia, didžiausioji dalis energijos yra gaminama iš baigtinių pirminės energijos šaltinių – iškastinio kuro. Apie 80 % suvartojamos energijos yra gaunama iš anglies, gamtinių dujų bei naftos [48]. Viena iš pagrindinių problemų, kuri kyla nuo priklausomybės iškastiniam kurui, yra ta, kad šios rūšies kuras turi ribotą kiekį išteklių. Prognozuojama, kad esant tokiam vartojimo tempui, naftos bei gamtinių dujų ištekliai turėtų baigtis jau šiame amžiuje [49]. Autorių teigimu naftos resursų užteks apie 51 metus, gamtinių dujų – 53, o didžiausią likutinį resursą turi anglis – 114 metai.

Norint pasiekti energetinį tvarumą reikia užtikrinti ne tik augantį energijos poreikį, bet ir tuo pačiu sumažinti šiltnamio efektą keliančių dujų išmetimą kiekį bei sumažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro. Vienas iš metodų užtikrinančių tvarų energijos gamybos metodą yra biomasės kogeneracija.

Kogeneracija užtikrina ne tik pastovų elektros energijos generavimą, bet ir patenkina šiluminės energijos poreikį. Šis energijos gamybos metodas yra energetiškai tvarus ir išsprendžia prieš tai išvardintas pagrindines problemas.

Pirma, biokuras yra laikomas CO₂ neutraliu kuru. Augdama biomasė naudoja atmosferoje esančias CO₂ dujas ir jas išskiria tik oksidacijos reakcijos metu – augalui pūvant arba degant. Tai reiškia, kad nesudeginus biomasę, o ją palikus pūti, CO₂ dujų išmetimas nesumažėtų.

Antra, biokuras yra laikomas atsinaujinančiu energijos šaltiniu. Biokurui yra priskiriami šie šaltiniai:

1. Miško pramonės atliekos;
2. žemės ūkio atliekos;
3. nuotekų valymo dumblas;

4. komunalinės atliekos;
5. nuotekų valymo dumblas;
6. energetiniai augalai.

Visi išvardinti šaltiniai yra atsinaujinantys, nes jų susidarymas yra neišvengiamas dėl žmonijos veiklos pobūdžio. Kadangi biokuras yra atsinaujinantis energijos šaltinis, tai jo naudojimas sumažintų priklausomybę nuo iškastinio kuro, o ateityje leistų jo atsisakyti.

Vienas iš pagrindinių būdų, kaip yra generuojama elektros bei šiluminė energija iš biomasės, yra Renkino ciklo taikymas. Renkino ciklo veikimo principas yra paremtas tuo, kad biokuro katilė pagamintas garas yra tiekiamas į turbiną, kur plečiantis garui yra atliekamas mechaninis darbas, kuris generatoriaus pagalba yra paverčiamas elektros energija. Atidirbęs garas yra tiekiamas į kondensatorių, kuriame besikondensuodamas perduoda šiluminę energiją termofikatui, kuris yra tiekiamas galutiniam vartotojui. Tačiau, toks energijos generavimo metodas turi vieną trūkumą – kuo žemesnė jėgainės elektrinė galia, tuo mažesnis ciklo efektyvumas. Toks kogeneracijos metodas yra praktiškai netaikomas, kai jėgainės nominali elektrinė yra maža ir neviršija 5-8 MWel. Viena iš pagrindinių alternatyvų, kuri leistų taikyti mažos galios biomasės kogeneraciją yra organinis Renkino ciklas.

Darbo tikslas:

Atlikti nedidelės galios įprastinio ir Organinio Renkino ciklo kogeneracinių elektrinių palyginamąją analizę.

Uždaviniai:

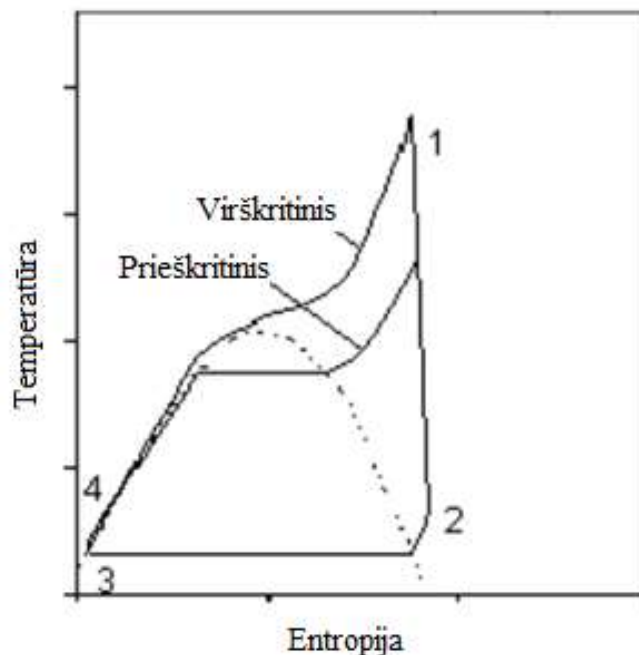
1. Išanalizuoti pagrindines nedidelės galios įprastinio Renkino ciklo problemas.
2. Išanalizuoti pagrindinius nedidelės galios organinio Renkino ciklo privalumus.
3. Atlikti abiejų ciklų termodinaminius skaičiavimus bei parinkti optimaliausią organinio Renkino ciklo darbinį fluidą.
4. Atlikti įprastinio ir organinio Renkino ciklų šiluminius skaičiavimus.
5. Atlikti įprastinio ir organinio Renkino ciklų ekonominius skaičiavimus.

1. Mažos galios kogeneracija. Pagrindinės problemos ir jų sprendimas.

1.1. Mažos galios kogeneracijos problemos taikant įprastinį Renkino ciklą

Įprastai aukštos elektros galios gamyboje yra taikomi dujų arba garo ciklai. Atviro ciklo dujų turbinos (dažnai naudojamos kartu su garo ciklu) yra plačiai taikomos ten, kur yra laisvai prieinamas pigus dujinis kuras. Garo ciklas, dar kitaip vadinamas Renkino ciklu, yra naudojamas tada, kai pagrindinis energijos šaltinis, dažniausiai kietasis kuras, turi būti naudojamas uždaro ciklo jėgainėse. Kadangi yra naudojamas iškastinis kuras, tai gaunami vandens garo termodinaminiai parametrai yra itin aukšti. Kuo aukštesni vandens garo termodinaminiai parametrai, tuo efektyviau dirba visa jėgainė. Pagal gaunamą garo temperatūrą ir slėgį jėgainės galima skirstyti į tris grupes [13]:

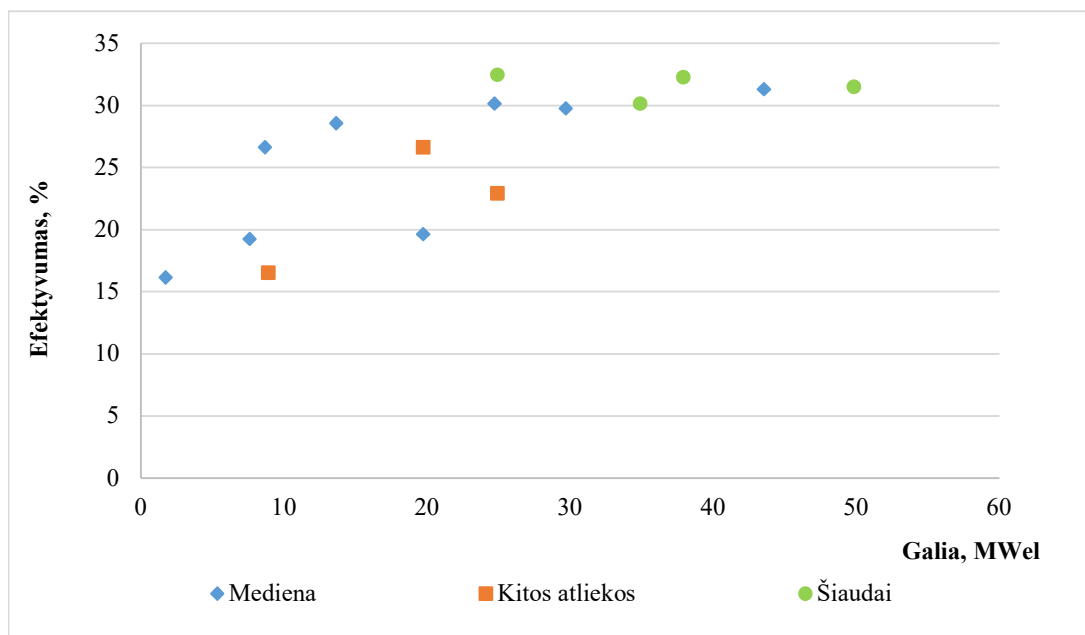
1. Įprastos, *prieškritinės jėgainės*, kur garo temperatūra gali siekti iki 820 K, o slėgis iki 16-17 MPa, kai kuro konversijos į elektros energiją koeficientas yra 38 %;
2. *Virš-kritinė jėgainė*, kurioje garo temperatūra gali siekti iki 870 K, o slėgis yra 22 – 24 MPa, o su konversijos koeficientu iki 45 %;
3. *Ultra virš-kritinė jėgainė*, kurioje garo temperatūra gali siekti iki 975 K, o slėgis yra didesnis nei 26 MPa. Tokios jėgainės gali pasiekti konversijos koeficientą iki 50 %



1.1 pav. Prieš-kritinio ir virš-kritinio Renkino ciklo diagrama [13].

Virš-kritinės bei ultra virš-kritinės Renkino ciklo jėgainės yra naudojamos nuo 200 MW iki 1300 MWel galiai generuoti ir pasiekia itin aukštą elektros gamybos efektyvumą. Tačiau, šis efektyvumas smarkiai sumažėja, kai elektrinė jėgainės galia yra iki kelių MWel. Didelės galios iki kritinės jėgainės gali pasiekti iki 38 %, o vidutinės galios jėgainės, kurių galia yra tarp 10 ir 60 MWel, elektrinis efektyvumas svyruoja nuo 27 % iki 33 % [1], tačiau kai elektrinė galia yra žemesnė nei 10 MW, jėgainės elektrinis efektyvumas ženkliai sumažėja. Šia tendenciją galima pamatyti 1.2 pateiktame

paveiksle, kuriame yra nurodomi biokuro kogeneracinių jėgainių elektros gamybos efektyvumas, priklausomai nuo nominalios elektrinės galios. Kai galios intervalas yra tarp 1 ir 5 MW, elektrinis biokuro kogeneracinės jėgainės efektyvumas nesiekia 20 %.



1.2 pav. Biokuro jėgainės elektros gamybos efektyvumas priklausomai nuo instaliuotos elektrinės galios [1].

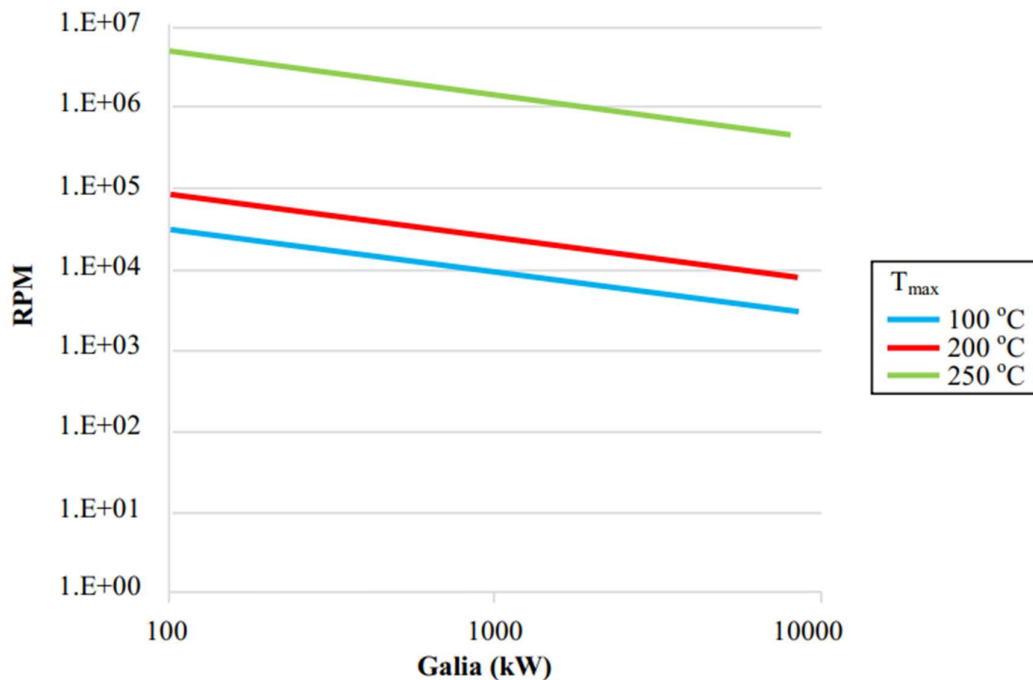
Didžiausią įtaką jėgainės efektyvumui daro naudingas turbinos darbas. Pagrindinis rodiklis nurodantis kaip efektyviai dirba turbina yra jos izoentropinis naudingumo koeficientas. Turbinos izoentropinis efektyvumas nusako kaip efektyviai turbina transformuoja garo potencinę energiją į mechaninę. Žemos galios turbinose šis izoentropinis efektyvumas yra mažesnis, nei palyginus su didesnės galios turbinomis (žr. 1.3 pav.)

Garo turbinos parametrai	Sistema		
	1	2	3
Nominali elektrinė galia, kW	500	3000	15000
Įrangos kaina, €/kW	668	401	392
Galutinė kaina įvertinus montavimą, €/kW	1136	682	666
Eksplotavimas ir priežiūra, €/kW	0.01	0.009	0.006
Turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas, %	52.5	61.2	78
Generatoriaus naudingumo koeficientas, %	94	94	96
Garų debitas, (t/h)	9,00	69	224
Įtekėjimo slėgis, bar	35	41	48
Įtekėjimo temperatūra, °C	290	300	350
Ištekėjimo slėgis, bar	3	10	10
Ištekėjimo temperatūra, °C	150	190	193

1.3 pav. Garo turbinos parametrai esant skirtingiems galingumams [1].

Pateiktoje lentelėje galime pamatyti, kad 3 MW elektrinės galios turbinos izoentropinis efektyvumas yra 61.2 %, o 15 MW galios turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas yra 78 %. Galime pamatyti ženklų skirtumą tarp šių dviejų turbinų, kuris siekia iki 18 %. 500 kW turbinos izoentropinis koeficientas yra dar mažesnis, ir palyginus su 15 MW galios turbina, skiriasi net 25,5 %. Dėl šios priežasties yra akivaizdu kodėl skiriasi skirtingų galių jėgainių elektrinis efektyvumas. Remiantis 1.3 lentelėje pateiktais duomenimis, žemesnės galios turbinos dirba neefektyviau bei jų santykiniai investiciniai kaštai yra didesni. Palyginus 500 kW ir 15 MW turbinas, specifinės išlaidos skiriasi beveik du kartus.

Verta paminėti, kad termodinaminės vandens savybės lemia tai, kad yra naudojamos daugiapakopės turbinos, kurioms reikia didelių investicinių kaštų bei sudėtingos jėgainės schematikos, kadangi garo išsiplėtimo metu, turbinoje susidaro kondensatas. Dėl šių ribojimų vanduo, kaip darbinis agentas, nėra tinkamas žemos temperatūros ir galios elektros energijos generavimui [16]. Kai yra generuojamas žemas galios kiekis, tai mažam tūriniam garo debitui turbinos įtekėjimui, yra reikalingos kelios garo įtekėjimo pakopos bei aukštas turbinos sukimosi greitis. Turbinos sūkių priklausomybė, nuo jos galios bei garo soties temperatūros yra pateikta 1.4 paveiksle.



1.4 pav. Garo turbinos sūkių (RPM) priklausomybė nuo jos galios bei garo soties temperatūros [16].

Šiame grafike galime pamatyti, kaip kinta turbinos sūkių skaičius per minutę, priklausomai nuo jos galios bei garo soties temperatūros. Kuo yra žemesnė turbinos galia, tuo yra didesnis reikiamas turbinos apsisukimų skaičius. Palyginus 1 MW bei 10 MW galios turbinas, kai vandens soties temperatūra yra 200 °C, yra matomas didelis skirtumas tarp turbinos sukimosi dažnių. 1 MW galios turbina sukasi iki 5 kartų dažniau, nei 10 MW galios turbina. Kadangi turbinos trinties nuostoliai

priklauso nuo jos sukimosi dažnių, o ši priklausomybė yra kvadratinė, tai padidėjęs sukimosi dažnis smarkiai padidina patiriamus trinties nuostolius.

Žemos galios kogeneracinių jėgainių elektrinis efektyvumas sumažėja dėl žemų garo termodinaminių savybių. Kadangi jėgainėse yra naudojamas biokuras (mediena, kurioje vandens kiekis gali sudaryti iki 50 % kuro masės), tai gaunama garo temperatūra prieš turbiną gali būti iki 430 °C [14]. Palyginus su aukštesnio potencialo garu, kurio slėgis ir temperatūra yra didesni, yra matomas skirtumas tarp jėgainių elektrinių efektyvumo. Kai garo slėgis yra iki 35 bar, o temperatūra 435 °C, tai šis efektyvumas gali pasiekti 27 %, tačiau su aukštesnio potencialo slėgio, kaip pavyzdžiui, iki kritiniu, kai garo temperatūra yra 540 °C, o slėgis 170 bar, tai maksimalus jėgainės efektyvumas gali būti iki 38 % [15].

Tipas	Garo slėgis, MPa	Garo temperatūra, °C	Ciklo efektyvumas, %
Vidutinis	3.5	435	27
Aukštas	9	510	33
Itin aukštas	13	535	35
Prieš-kritinis	17	540	38

1.5 pav. Jėgainių elektrinis efektyvumas priklausomai nuo garo parametrų [15].

Remiantis pateiktais duomenimis, galima daryti išvadą, kad vandens / garo Renkino ciklas nėra tinkamas metodas žemos galios biomasės kogeneracijos taikymui. Visų pirma, kuo mažesnė jėgainės galia, tuo mažesnis jos elektrinis efektyvumas, todėl garo Renkino ciklas yra tinkamas tik tada, kai yra generuojamas aukštas elektros energijos kiekis. Antra, jėgainės santykiniai investiciniai kaštai auga netiesiškai mažėjant instaliuotai elektrinės galiai, todėl tokio tipo jėgainės nėra ekonomiškai racionalios, kai elektrinė galia yra iki vieno ar kelių MWel. Trečia, naudojant biokurą įprastiniame Renkino cikle yra gaunamas iš dalies žemo potencialo garas. Todėl temperatūra bei slėgis nėra didelis, o tai taip pat sumažina elektrinį bei termodinaminį efektyvumą. Todėl gali pabrangti jėgainės kaina, kadangi turbinoje plečiantis garui susidaro kondensatas, kurį reikia papildomai kažkur nukreipti bei turbina privalo greičiau suktis, o tai žymiai padidina trinties nuostolius guoliuose.

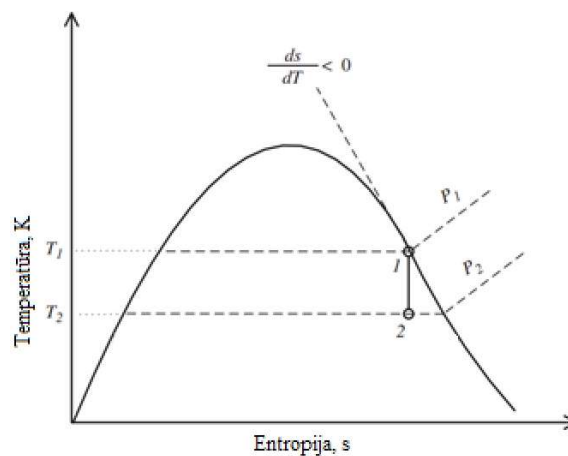
1.2. Mažos galios kogeneracija taikant organinį Renkino ciklą.

Pagrindinė alternatyva žemos galios kogeneracijai yra organinio Renkino ciklo taikymas. Šis ciklas yra labai panašus į įprastinį vandens / garo Renkino ciklą, tačiau pagrindinis skirtumas tarp šių technologijų yra ta, kad organinis Renkino ciklas kaip darbinį agentą taiko organinius fluidus, kurių termodinaminės bei fizinės savybės skiriasi nuo vandens garo, kuris yra naudojamas įprastiniame Renkino cikle. Organinio Renkino ciklo technologija nėra nauja, kadangi jau 1826 metais T. Hovardas atliko eksperimentus naudodamas eterį kaip darbo agentą. Remiantis šia idėja buvo pagaminta keletas ligroiną naudojančių variklių, tačiau tolimesnio susidomėjimo ši technologija nesulaukė. Tik 1936 metais buvo pastatyta pirmoji moderni jėgainė, kuri buvo paremta paprastu chloretano Renkino ciklu, kuris buvo šildomas saulės. Remiantis tuo pačiu principu 1960 metais buvo pastatytos kelios žemos temperatūros geoterminės jėgainės, kurių galia buvo 2.6 kWel ir 11 kWel.

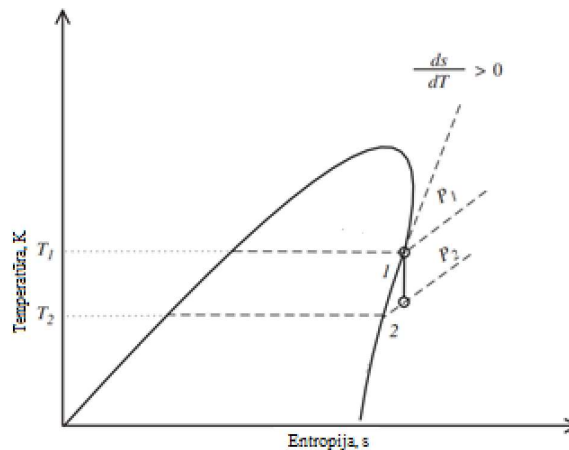
Vienas iš didžiausių šios sistemų privalumų yra didelis darbinį agentų pasirinkimas. Tai leidžia pasirinkti optimaliausią darbinį agentą, kuris atitiktų reikiamas termodinamines ciklo savybes ir leistų pasiekti efektyviausią elektros generavimo metodą. Parinktas darbinis agentas nulemia jėgainės termodinaminį ciklą, įrenginių (turbinos ir šilumokaičių) dydžius bei kainas, jėgainės schematiką. Verta paminėti, kad organiniai fluidai turi didesnę molekulinę masę, žemesnę kritinį slėgį bei temperatūrą ir šios savybės išsprendžia problemas, su kuriomis susiduria žemos galios turbinos, kurios jau buvo išvardintos.

Kitas organinių darbinį agentų privalumas yra tas, kad ORC sistemoje slėgis visada yra didesnis, nei atmosferinis. Tai reiškia, kad į sistemą nepatenka oras pro nesandarumus. Oras gali sukelti koroziją bei sumažinti šilumos mainų efektyvumą šilumokaičiuose (garintuve, rekuperatoriuje ar kondensatoriuje). Įprastinėse Renkino ciklo sistemose orui pašalinti yra taikomi deaeratoriai, kurie darbo metu vartoja energiją. Šių įrenginių išvengimas leidžia ne tik sumažinti jėgainės investicinius kaštus, bet ir sumažinti energijos sąnaudas dujų šalinimui iš sistemos.

Kita organinių darbo agentų savybė yra ta, kad jie yra „sausosios“ tipo fluidai, o įprastiniame Renkino cikle naudojamas vanduo yra „drėgnosios“ tipo. Šią savybę galime pamatyti 1.6 ir 1.7 paveiksluose.

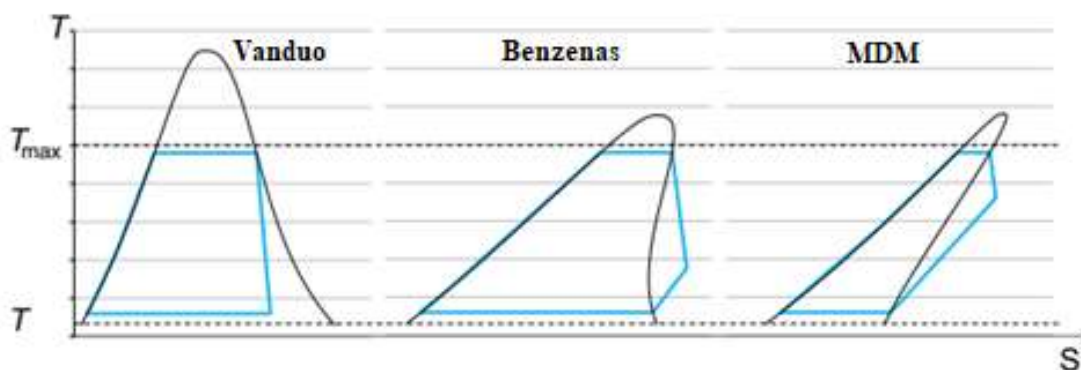


1.6 pav. Drėgnosios tipo fluideo T-s diagrama [16].



1.7 pav. Sausosios tipo fluideo T-s diagrama [16].

Šiose diagramose yra pavaizduotos drėgnojo ir sausojo fluideo T-s kreivės. Šios kreivės dar yra vadinamos sotumo kreivėmis. Jeigu prisotintų garų kreivės nuolydis visuose taškuose yra neigiamas $\frac{ds}{dT} < 0$, o tai reiškia, kad mažėjant soties temperatūrai, entropijos vertė didėja, skystis yra vadinamas drėgnuoju. Jei prisotintų garų kreivės nuolydis visuose taškuose yra teigiamas (nevertinant trumpo nuolydžio, kur yra neigiama už kritinio taško), tai mažėjant soties temperatūrai, entropijos vertė taip pat mažėja ir tada $\frac{ds}{dT} > 0$. Toks fluideo yra vadinamas sausuoju. Šių savybių reikšmė Renkino cikle, tiek įprastiniam, tiek organiniam, galime pamatyti 1.8 paveiksle, kuriame yra pavaizduoti Renkino ciklai vandeniui, benzenui bei MDM (organinis fluideo)



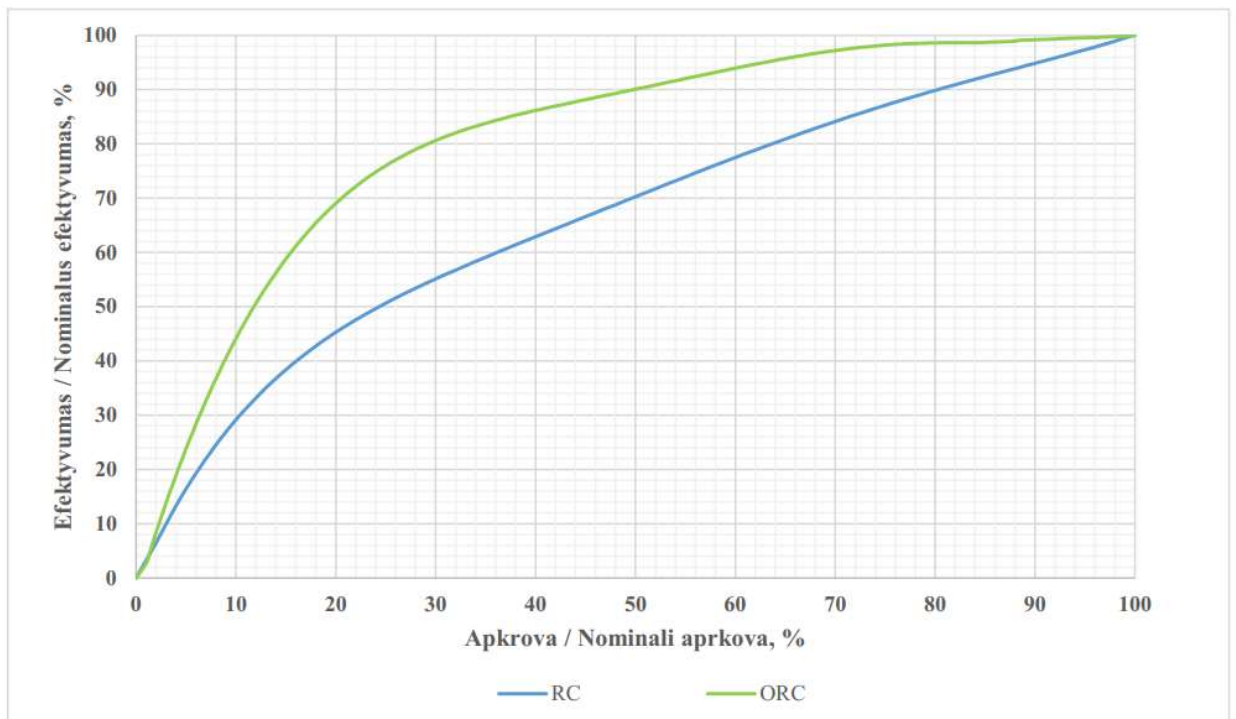
1.8 pav. Vandens, benzono ir MDM Renkino ciklo kreivė [16].

Šiame paveiksle yra pavaizduoti vandens (neorganinis fluideo), benzono ir MDM (organiniai fluideo) Renkino ciklai. Pagrindinis skirtumas tarp šių ciklų yra tas, kad vandens garo darbo kreivė yra po soties kreivės, o tai reiškia, kad besiplečiant garui turbinoje, dalis garo kondensuojasi ir virsta vandens lašeliais. Šio ciklo metu turbinos išėjime yra gaunamas dvifazis fluideo (gasas ir vandens lašeliai). Naudojant organinį fluideo su šia problema nėra susiduriama, nes organinio fluideo kreivė išsiplėtimo metu yra virš soties kreivės. Šiuo atveju organinis darbinis agentas turbinoje nesikondensuoja. Turbinos išėjime yra gaunamas ne dvifazis, o vienfazis perkaitintų organinių dujų srautas. Pagrindiniai privalumai naudojant organinį fluideo vietoje vandens [4]:

- Siekiant išvengti garo kondensacijos turbinoje, garą reikia perkaitinti;
- vandens kondensatas sukelia turbinos menčių koroziją;
- organinių fluideo turbinos yra paprastesnės ir pigesnės.

Kitas organinio Renkino ciklo jėgainių privalumas yra tas, kad jos yra lankstesnės ir jų elektrinis efektyvumas yra ženkliai didesnis esant dalinėms apkrovoms, palyginus su įprastinėmis Renkino ciklo jėgainėmis [17]. Jėgainės elektrinio efektyvumo priklausomybė nuo jos apkrovimo yra pavaizduota 1.9 paveiksle.

Pateiktame paveiksle galima pamatyti, kad ORC efektyvumas esant daliai apkrovai, yra daug aukštesnis, palyginus su įprastinio Renkino ciklo jėgainėmis. Aukštas elektrinės galios lankstumas leidžia efektyviai prisitaikyti prie momentinių elektros energijos kainų svyravimų. Jei pikinės elektros kaina yra aukštesnė, nei naktinė, tai būtų racionalu sumažinti elektros gamybos apimtį ir taip sumažinti kuro sąnaudas neprarandant efektyvumo.

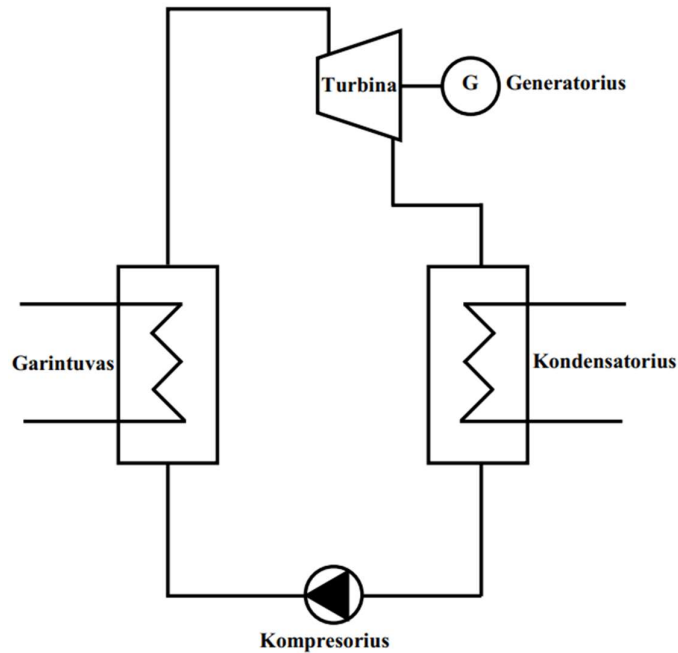


1.9 pav. ORC ir RC elektrinių efektyvumas priklausomai nuo apkrovos [17].

Kaip pavyzdį, palyginkime elektrinį efektyvumą, kai apkrovos lygis yra 50 %. Esant tokiai apkrovai ORC jėgainės elektrinis efektyvumas sumažėja 10 % nuo nominalios galios. Įprastinio Renkino ciklo atveju, kai apkrovos lygis sumažėja 50 % jėgainės elektrinis efektyvumas sumažėja 30 % nuo nominalios galios. Tai reiškia, kad įprastinėms jėgainėms gali būti ekonomiškai neracionalu sumažinti elektros energijos gamybos apimtį tam, kad būtų galima prisitaikyti prie sumažėjusių momentinių elektros kainų. Tuo tarpu ORC gali laisvai prisitaikyti prie elektros kainų svyravimų.

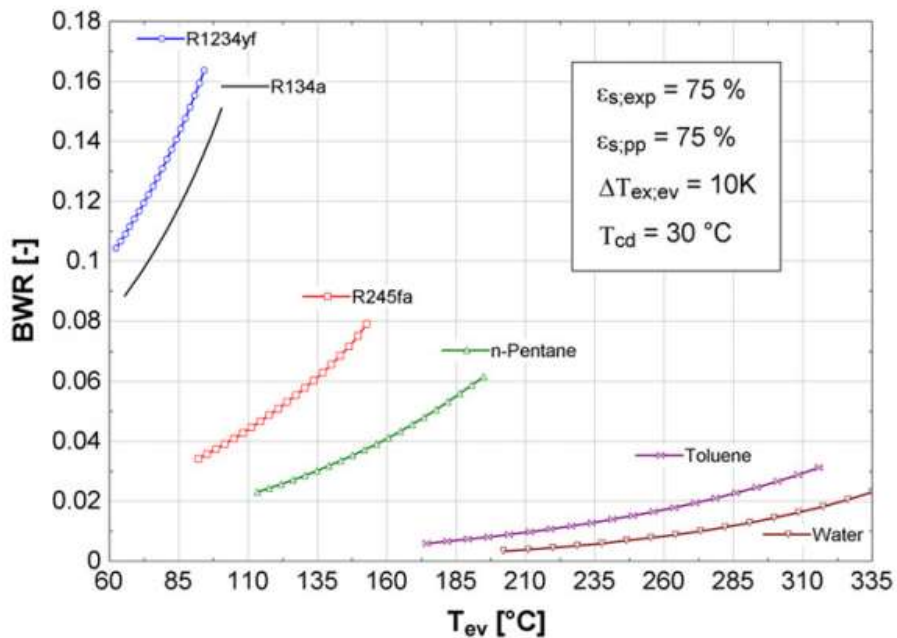
Nors ir ORC technologijos taikymas yra pranašesnis už įprastinį Renkino ciklą, kai elektros gamybos apimtys yra iki vieno ar kelių MWel, šis elektros energijos generavimo metodas taip pat turi ir keletą trūkumų, kurie riboja jo efektyvumą. Vienas iš pagrindinių ORC tipo jėgainių trūkumų galima išžvelgti 1.10 paveiksle.

Pateiktoje schemoje yra pavaizduota ORC tipo jėgainės išdėstymas. Vienas iš organinio Renkino ciklo trūkumų atsiranda dėl taikomo dvinarinio ciklo. Tai reiškia, kad šilumos nešėjas ir darbinis agentas yra atskirose sistemose. Degimo produktai išėję iš biokuro katilo atiduota šilumą pirmojo kontūro šilumokaityje, kuriame cirkuliuoja šilumos nešėjas (šiluminė alyva). Pašilusi šiluminė alyva tada yra tiekama į antrojo kontūro šilumokaitį (garintuvą), kuriame atiduoda šiluminę energiją ir išgarina darbinį agentą – organinį fluidą. Šiuo atveju yra naudojami du cirkuliaciniai siurbliai, o tai reiškia papildomas eksploatacines išlaidas dėl cirkuliacinio tepalo siurblio.



1.10 pav. Organinio Renkino ciklo jėginės schema [18].

Kitas ORC trūkumas yra tas, kad darbinio agento cirkuliaciniai siurbiai suvartoja daugiau energijos. Tradiciniame Renkino cikle siurblys suvartoja iš dalies mažą energijos kiekį, palyginus su gauta elektros energija. Tačiau ORC cikle negrįžtamieji procesai gali ženkliai sumažinti viso ciklo efektyvumą [18]. Santykis tarp siurblio sunaudojamos bei turbinos suvartojamos galios yra vadinamas *Back Work Ratio (BWR)*. Šio rodiklio priklausomybė nuo darbinio agento soties temperatūros yra pavaizduota 1.11 paveiksle.



1.11 pav. BWR priklausomybė nuo darbinio agento soties temperatūros [18].

Pateiktame grafike yra palyginami šeši darbiniai agentai. Penki iš jų yra organiniai (R1234yf, R134a, R245fa, n-pentanas, toluenas) ir vanduo. Šiame grafike galima pamatyti, kad reikiamas energijos kiekis vandens suslėgimui siurblyje nėra didelis ir santykis tarp sunaudojamos galios siurblyje ir sugeneruojamos turbinoje gali siekti iki 0.02 arba 2 %. Tačiau, organiniams fluidams šis rodiklis yra daug didesnis ir smarkiai išauga didėjant darbinio agento soties temperatūrai. N-pentato BWR koeficientas siekia 0.06 arba 6 %, kai fluideo soties temperatūra yra arti 200 °C ir BWR rodiklis yra 3 kartus didesnis nei vandens cikle.

Kitas organinio Renkino ciklo sistemos trūkumas yra dėl naudojamo organinio fluideo. Šiluminis stabilumas yra svarbi fluideo savybė, kuri apibrėžia jo galimybę struktūriškai nepakisti esant aukštai temperatūrai. Kaip taisyklę galima numatyti, kad kuo yra didesnis fluideo terminis stabilumas, tuo aukštesnėje temperatūroje šis gali dirbti [27]. Medžiagos terminė degradacija įvyksta tada, kai dėl aukštos temperatūros pradeda nutrūkti molekuliniai ryšiai ir dėl to susidaro naujosios medžiagos (skilimo produktai). Susidarę skilimo produktai turi kitas termodinamines savybes ir turi aukštesnę ar žemesnę soties temperatūrą, nei naudojamas darbinis agentas. Tiek žemesnės, tiek aukštesnės, soties temperatūros fluidai yra žalingi visai sistemai, nes sumažina sistemos efektyvumą bei saugumą. Žemos soties temperatūros fluidai padidina kondensacinį slėgį, sumažina kompresoriaus efektyvumą ir sumažina organinio fluideo pliūpsnio temperatūrą (žemiausia temperatūra, kurioje akimirksniu užsiliepsnoja garai). Aukštesnės soties temperatūros skilimo produktai padidina fluideo klampumą ir nepašalinus laiku gali sudaryti klampias nuosėdas. Dažnai naudojamas organinis fluideo Toluenas esant 360 °C temperatūrai skyla į dibenzilą, C1-difenilą, C2-difenilą, C1-fluoreną, ir C1-difenilmetaną. Priklausomai nuo organinio fluideo temperatūros, skiriasi skilimo produktų kiekis [29].

Organinių fluidų struktūrinis skilimas taip pat vyksta ir esant įprastomis darbinėmis sąlygomis, kai jų temperatūra yra iki 315 °C [28]. Pagrindinis kriterijus, apibrėžiantis šios degradacijos spartą, yra pusėjimo trukmė. Pusėjimo trukmė yra laiko tarpas, per kurį medžiagą sudarančių dalelių kiekis sumažėja perpus. Jos reikšmės, priklausomai nuo fluideo tipo, yra pateiktos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Organinių fluidų cheminio skilimo parametrai.

Fluidas	$t_{1/2}$, metai	$t_{0,5-1,0\%}$, dienos
n-pentanas	4,7	12,4
2-metilbutanas	2,8	7,5
2,2-dimetilpropanas	1,5	3,9
Toluenas	3,3	8,9
benzenas	350	926

Lentelėje yra pateikti du skilimo parametrai. $t_{1/2}$ yra pusėjimo trukmė arba laiko tarpas, per kurį suskyla pusę fluideo, o $t_{0,5-1,0\%}$ nurodo per kiek laiko skilimo produktų koncentracija padidėja nuo 0.5 iki 1 %. Remiantis pateiktais duomenimis galime matyti, kad sparčiausiai chemiškai degradoja 2,2-dimetilpropanas, kurio pusėjimo trukmė yra 1,5 metai. Didžiausiu terminiu stabilumu pasižymi benzenas, kurio pusėjimo laikas yra 350 metų. Nors ir visų fluidų pusėjimo trukmė yra daugiau nei

vieneri metai, cheminių junginių skilimas gali prasidėti ir už poros dienų, ką nurodo $t_{0,5-1,0\%}$ stulpelis. 2,2-dimetilpropano molekulėms pasiekus 315 °C temperatūrą pradeda skilinėti vos už kelių dienų.

Remiantis pateiktais duomenimis galima daryti išvadą, kad organinis Renkino ciklas yra tinkama alternatyva įprastiniam Renkino ciklui, kai generuojamas elektros energijos yra vieno ar kelių MWel galios. Dėl didelio organinių fluidų kiekio, ORC tipo sistemai galima parinkti optimaliausią darbinį agentą, kuris atitiktų reikiamus termodinaminius parametrus. Kadangi naudojami organiniai fluidai yra „sausos“ tipo, tai išsiplėtimo metu turbinoje darbinis agentas nesikondensuoja, o jos išėjime yra gaunamas perkaitintas garas. Todėl yra išvengiama turbinos menčių korozija, todėl galima naudoti pigesnes, paprastesnes konstrukcijas turbinas, tai sumažina jėgainės investicinius kaštus. Taip pat ORC ciklo jėgainės yra daug efektyvesnės, palyginus su įprastinėmis RC jėgainėmis, kai jos dirba daline apkrova. Sumažėjus jėgainės apkrovai 50 %, ORC jėgainė netenka tik 10% efektyvumo, kai tuo pačiu atveju garo ciklo jėgainė netenka 30 % efektyvumo. Tačiau organinio Renkino ciklo jėgainė turi ir keletą trūkumų. Vienas iš jų yra tas, kad naudojamas papildomas terminės alyvos kontūras, kuris padidina eksploatacinius jėgainės kaštus dėl papildomo cirkuliacinio siurblio. Taip pat būtina paminėti, kad darbinio agento siurblys ORC tipo jėgainėse yra mažiau efektyvus ir santykis tarp siurblio suvartojamos elektros galios ir gaunamos galios turbinoje, yra keletą kartų didesnis, nei įprastiniame Renkino cikle.

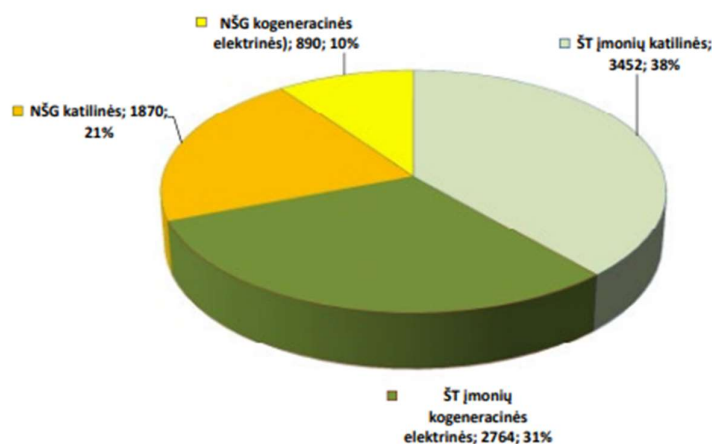
2. Organinio Renkino ciklo kogeneracija. Jos potencialas Lietuvoje.

Remiantis Turboden pateiktais duomenimis [24], Lietuvos Respublika yra vienintelė šalis, palyginus su kaimyninėmis šalimis, kurioje dar nėra naudojamos ORC tipo jėgainės. Kaip pavyzdžiui, Latvijoje, jėgainių skaičius yra 15, o jų bendra instaliuota galia siekia iki 17 MWel. Lenkijoje yra 10 veikiančių ir aktyvių ORC jėgainių, kurių bendra galia yra 14,6 MWel. Šiuo metu yra statomos dar 4, kurios bendrą instaliuotą galią padidins iki 19,1 MWel. Iš 30 įvardintų jėgainių, 29 naudoja biomasę kaip pirminį kurą, o viena jėgainė naudoja komunalines atliekas.

Tačiau, 2020 metais, AB „Kauno Energija“ su Valstybine energetikos reguliavimo taryba (VERT) suderino 605 tūkst. Eurų investiciją organinio Renkino ciklo turbinos įrengimui. Daugiau nei pusė investicijų bus padengiamos iš Europos Sąjungos struktūrinių fondų, o likusiąją dalį finansuos AB „Kauno Energija“. Bendrovė organinio Renkino ciklo pagrindu veikiančios turbinos pagalba numato gaminti elektros energiją saviems poreikiams. ORC įrenginio galia parenkama taip, kad visa įrenginyje pagaminta elektros energija galėtų būti sunaudojama nuosavoms reikmėms. Elektros linija, į kurią planuojamas pajungti ORC įrenginys, turi apie 540 kW nuolatinį elektros poreikį, todėl parinktas analogiškos 540 kW elektrinės galios ORC įrenginys. Atsižvelgiant į ORC įrangos efektyvumo diapazoną, tokios elektrinės galios ORC įrenginio šilumos poreikis sudarys apie 8-9 MW – tai apytiksliai atitinka vieno Bendrovės „Šilko“ katilinėje įrengto biokurą naudojančio katilo galią. Per metus planuojama pagaminti 2 747,52 MWh elektros energijos. AB „Kauno energija“ vartotojams ši investicija mažins šilumos kainą apie 0,004 ct/kWh [25].

2.1.1. Lietuvos kogeneracijos ir elektros sektoriaus apžvalga

Remiantis Lietuvos Šilumos Tiekėjų Asociacijos (LŠTA) duomenimis, 2018 metais 41 % tiekta šiluminės energijos į CŠT tinklus, buvo pagaminta būtent kogeneracinėse jėgainėse [19], iš kurių 10 % buvo pagaminta nepriklausomų šilumos gamintojų (NŠG) kogeneracinėse elektrinėse. Tačiau, pagamintos elektros energijos kiekis kogeneracinėse jėgainėse, kuris buvo tiekiamas į elektros tinklus nuosekliai mažėjo penkerius metus. Tam įtakos turėjo 2015 – ujų metų pabaigoje priimtas Valstybės nutarimas panaikinti elektros energijos supirkimo kvotas ir nebenustatyti remtinės elektros energijos, kuri buvo pagaminama kogeneracinėse jėgainėse deginant iškastinį kurą. Šį sprendimą lėmė tarpvalstybinių jungčių („LitPol Link“ ir „NordBalt“) eksploataavimo pradžia nuo 2016 metų bei didėjanti vėjo jėgainių ir biokuro elektrinių galia. Dėl šio sprendimo buvo sustabdyta Vilniaus trečioji termofikacinė elektrinė (TE-3), o Kauno bei Panevėžio termofikacinės elektrinės dirba cikliška ir atlieka tretinio elektros galios rezervo paslaugas.



2.1 pav. Šilumos gamybos struktūra 2018 metais [19].

Remiantis Valstybinės energetiko reguliavimo tarybos (VERT) „Lietuvos elektros energetikos sistemos patikimumo įvertinimo ataskaita už 2018 metus“ ataskaita [20], 2018 metais bendras elektros energijos suvartojimas Lietuvoje siekė 12.11 TWh ir paaugo 3.25 procentais, palyginus su 2017 metais. Elektros energijos importas ir eksportas padidėjo 11.37 ir 12.62 procentais. Priežastis kuri lėmė importo mąsto padidėjimą buvo dėl išaugusios elektros energijos importo iš Rusijos. Šis prieaugis, palyginus su 2017 metais, buvo 47.85 % arba 1.5 TWh. Eksporto kiekis paaugo, kadangi didesnis elektros kiekis buvo pradėtas eksportuoti į Latvijos rinką. Šis prieaugis, palyginus su 2017 metais buvo 59.59 % arba 0.135 TWh. Tačiau, per šį laikotarpį Lietuvoje pagaminamas elektros energijos kiekis sumenko 16.7 %, nuo 3.87 TWh nukrito iki 3.22 TWh [21]. Ataskaitoje nurodoma, kad elektros energijos importas 2018 m. Lietuvoje sudarė 96.77 % bendro elektros poreikio šalyje (2017 metais – 89.61 %). Šie skaičiai rodo vieną iš opiausių Lietuvos energetikos sektoriaus problemų – energetinis priklausomumas nuo kitų valstybių.

Nuo 2009 metų Lietuva nustojo eksploatuoti Ignalinos Atominę Elektrinę (IAE) ir pradėjo jos uždarymo darbus. Nutraukus IAE veiklą Lietuvoje drastiškai sumažėjo generuojamos elektros energijos kiekis. Remiantis Valstybine Kainų ir Energetikos Kontrolės Komisija (VKEKK), o dabar žinoma kaip VERT, „Elektros energijos rinkos stebėsenos ataskaita už 2010 metus“ ataskaita [22] galime matyti, kad IAE generuojamos elektros energijos kiekis 2009 sudarė 68 % sugeneruojamos elektros energijos kiekio Lietuvoje. Nutraukus elektros gamyba Ignalinos AE 2010 metais, jos sugeneruojamas elektros energijos kiekis pakito iš 10.85 TWh iki 0 TWh. Tam, kad užpildyti susidariusį elektros energijos vakuumą, buvo pradėtas jos importas iš kaimyninių šalių. 2009 metais elektros importas sudarė 4.25 % (0,68 TWh) elektros balanso dalies, o 2010 metais šis kiekis pakilo iki 55.58 % (7,13 TWh). Taip pat, kad kompensuoti šį susidariusį disbalansą išaugo ir vietinės gamybos apimtys. Labiausiai išaugo elektros generavimas kogeracinėse elektrinėse ir gamyba iš atsinaujinančių energijos šaltinių, prieaugis sudarė 40 % , palyginus su 2009 metų verte.

LIETUVOS ELEKTROS ENERGIJOS BALANSAS, TWh												
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Importas	0,62	0,14	0,20	0,30	0	0,13	1,09	1,54	1,17	1,68	0,68	7,13
Kitos elektrinės	0,06	0,10	0,07	0,15	0,18	0,37	0,42	0,39	0,41	0,27	0,43	0,4
Ignalinos AE	9,86	8,42	11,36	14,14	15,48	15,1	10,34	8,65	9,83	9,89	10,85	0
Hidroelektrinės (> 10 MW)	0,84	0,61	0,66	0,75	0,94	0,88	0,75	0,75	0,86	0,91	1,06	1,21
Termofikacinės elektrinės	2,73	2,26	2,58	2,64	2,8	2,85	3,2	2,57	2,63	2,63	2,64	3,63
AEI	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,07	0,07	0,10	0,27	0,26	0,34	0,46
Suvartojimas	7,24	6,91	7,24	7,51	7,94	8,45	8,82	9,20	9,55	9,88	9,16	9,22
Nuostoliai elektros tinkluose	1,33	1,28	1,42	1,43	1,41	1,27	1,23	1,09	1,12	1,02	0,97	0,99
Savos reikmės	1,62	1,44	1,55	1,67	1,66	1,61	1,23	1,15	1,20	1,21	1,25	0,44
Kruonio HAE užkrovimas	0,68	0,64	0,45	0,55	0,61	0,92	0,75	0,54	0,76	0,82	1,01	1,04
Eksportas	3,30	1,48	4,16	6,79	7,53	7,32	4,05	1,98	2,54	2,63	3,61	1,14

2.2 pav. Elektros energijos balansas 1999 - 2010 metais [22].

Tam, kad sukontroliuoti iškilusią energetinę priklausomybę, nuo užsienio valstybių, o ypač Rusijos, Lietuvos Respublika privalėjo diversifikuoti gaunamus energijos resursų šaltinius, kadangi tokia situacija kelia ne tik papildomas grėsmes energijos vartotojams, bet ir nacionaliniam valstybės saugumui. Lietuvos Respublikos Seimo 2012 metais išleistoje „Nacionalinės Energetinės Nepriklausomybės Strategijoje“ (NENS) [23] yra išvardinami ir iškeliami pagrindiniai tikslai, kurių siekdama Lietuva kryptingai judės energetinės nepriklausomybės link. Strategijoje svarbiausios numatytos priemonės pasiekti šiam tikslui buvo:

1. Gamtinių dujų sektoriuje: alternatyvių tiekimo šaltinių ir tiekimo būdo (suskystintų gamtinių dujų terminalas) bei tiekimo saugumo (vidinio dujų perdavimo tinklo vamzdynais stiprinimas) užtikrinimas;

2. Elektros energetikos sektoriuje: konkurencingų vidinių elektros gamybos pajėgumų (regioninė branduolinė (atominė) elektrinė Visagine) sukūrimas, elektros jungtys su Švedija (NordBalt) ir Lenkija (LitPol Link 1, LitPol Link)
3. Rinkos santykiams energetikoje sukurti: energetikos (elektros energetikos, gamtinių dujų ir šilumos sektorių) pertvarka pagal Trečiojo ES energetikos paketo nuostatas.

Taip pat svarbi priemonė pasiekti numatytam tikslui buvo elektros energijos gamyba iš atsinaujinančių energijos šaltinių bei kitų vietinių išteklių. NENS teigia, kad pirmenybė bus teikiama biomasę naudojančios kogeneracinėms elektrinėms bei vėjo energetikai. Iki 2020 metų yra žadama padidinti biokuro kogeneracinių elektrinių bendrą galią iki 355 MW. Pagrindinis elektros gamybos iš atsinaujinančių energijos išteklių plėtros kriterijus – konkurencinga, vartotojui prieinama kaina. Taip pat šioje strategijoje yra numatoma keisti senas katilines naujomis, efektyvesnėmis biokuro kogeneracinėmis elektrinėmis.

2016 metais kogeneracinėse elektrinėse buvo pagaminta 3,6 TWh šiluminės energijos, kuri sudarė 41% bendro CŠT sistemoje pagamintos šilumos energijos. Biomasę ir komunalines atliekas naudojančių kogeneracinių elektrinių galia Lietuvoje siekė 79 MW, tačiau Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimu Nr. 284 „Dėl Nacionalinės šilumos ūkio plėtros 2015–2021 metų programos patvirtinimo“ iki 2020 metų pabaigos buvo numatyta pastatyti didelio naudingumo 230 MW šiluminės galios ir 92 MW elektrinės galios biomasę bei atliekas deginančią Vilniaus kogeneracinę elektrinę bei 70 MW šiluminės galios ir 24 MW elektrinės galios komunalines atliekas deginančią Kauno kogeneracinę elektrinę.

Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakyme „Energijos Efektyvumo Ir Atsinaujinančių Išteklių Energijos Gamybos Ir Naudojimo Skatinimas“ 04.1.1-Lvpa-K-110 Priemonės „Nedidelės Galios Biokuro Kogeneracijos Skatinimas“ yra numatomas finansinis skatinimas mažų kogeneracinių elektrinių statyboms bei įrengimui [26]. Šiame įsakyme patvirtintas naujų didelio naudingumo biokuro kogeneracijos įrenginių įrengimas neviršijant 5 MW elektrinės galios, o visas nominalus šiluminis našumas nuo 1 MW iki 20 MW. Šia parama gali pasinaudoti šilumos tiekėjai arba potencialūs nepriklausomi šilumos gamintojai. Kaip jau buvo minėta, žemos galios elektros energijos generavimui optimaliausias metodas yra organinis Renkino ciklas. Tai reiškia, kad biokuro organinio Renkino ciklo kogeneracinės jėgainės yra puikus būdas šių investicijų panaudojimui. Su šia finansine parama yra skatinama statyti žemos galios kogeneracines jėgaines, kurių šiluminė galia yra tarp 1 ir 20 MW, o elektrinė galia neviršija 5 MW. Šia finansine parama gali pasinaudoti maži miestai, kurių šiluminės energijos poreikiai nėra dideli.

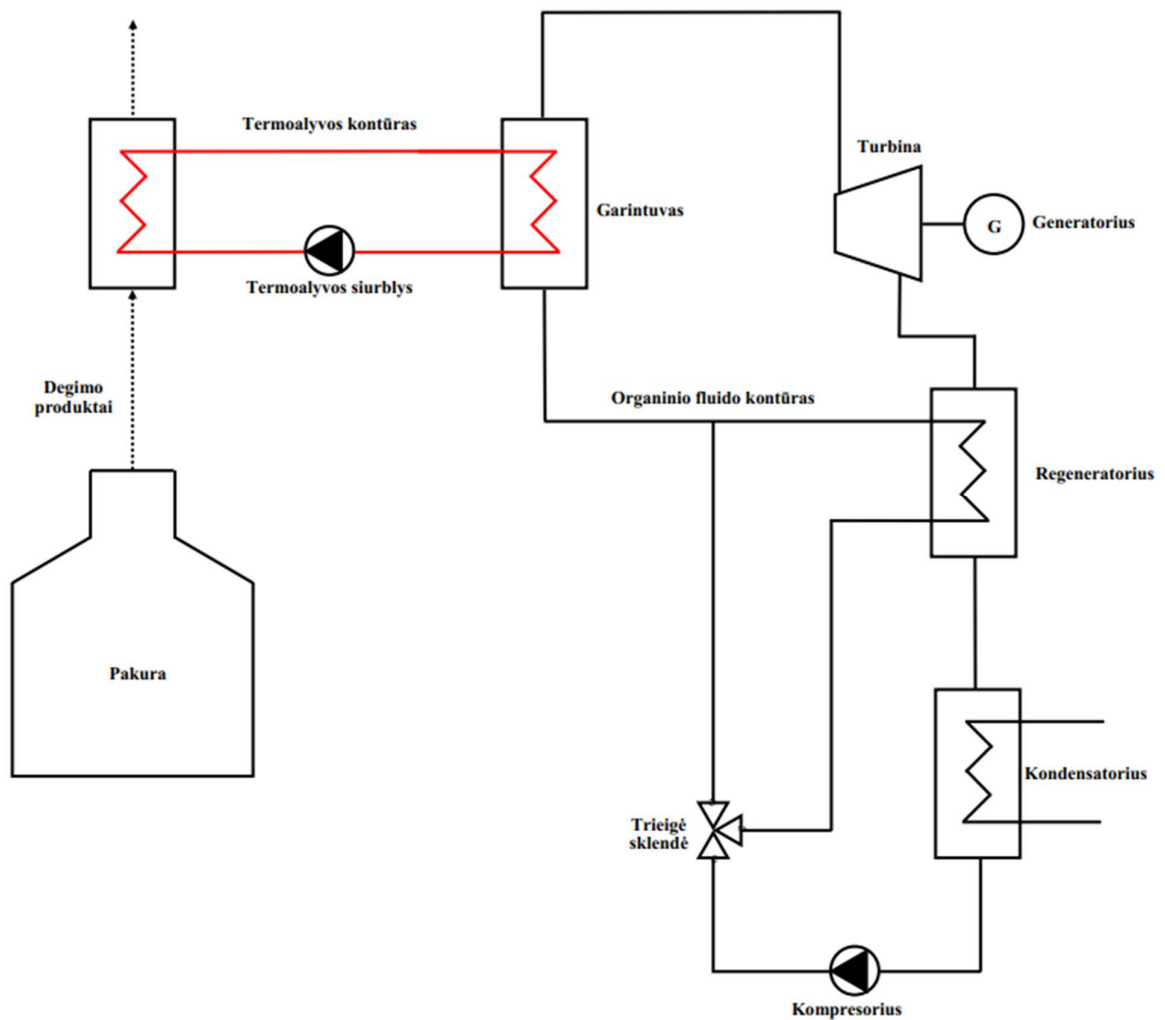
2.2. ORC technologijos taikymas su atsinaujinančiais energijos šaltiniais

2.2.1. Biokuro ORC jėgainės

Biomasė yra plačiai prieinama žaliava, kuri kaip atlieka susidaro žemės ūkio ir medienos pramonės sektoriuose. Naudojant šią žaliavą galima pasigaminti ne tik elektros energiją, bet ir šilumos. Šiluminė energija yra tiekama centralizuotais šilumos tiekimo (CŠT) tinklais ir parduodama galutiniais vartotojams. Biokuro privalumai yra:

- atsinaujinantis energijos šaltinis;
- žema kaina;
- biokuras yra vietinis išteklius.

Pagrindinis biokuro privalumas yra jo ekonominė nauda. Biokuro kaina yra apie 2 kartus mažesnė nei iškastinio kuro. Remiantis pateiktais VERT duomenimis [30], 2021 metų sausio mėnesį mažiausia biokuro kaina buvo 123,34 Eur/tne, o tuo tarpu gamtinės dujos kainavo 205 Eur/tne. Kita nauda, kurią teikia biokuras yra socialinė, kadangi jam pagaminti yra sukuriamos naujos darbo vietos, didinamas gyventojų užimtumas. Tarptautinė praktika rodo, kad 1 TWh energijos, pagamintos iš atsinaujinančių energijos išteklių, sukuria 1 tūkst. naujų darbo vietų. Taip pat mokesčiai (ypač pelno) pasilieka savivaldybių ir valstybės biudžetuose, o ne iškeliauja į kitos šalies biudžetą. Energetikos ekspertų skaičiavimais apie 70-80 % visos prognozuojamos biokuro kainos sudaro lėšos, kurios lieka Lietuvoje [31].



2.3 pav. Organinio Renkino ciklo biokuro jėgainės schema [18].

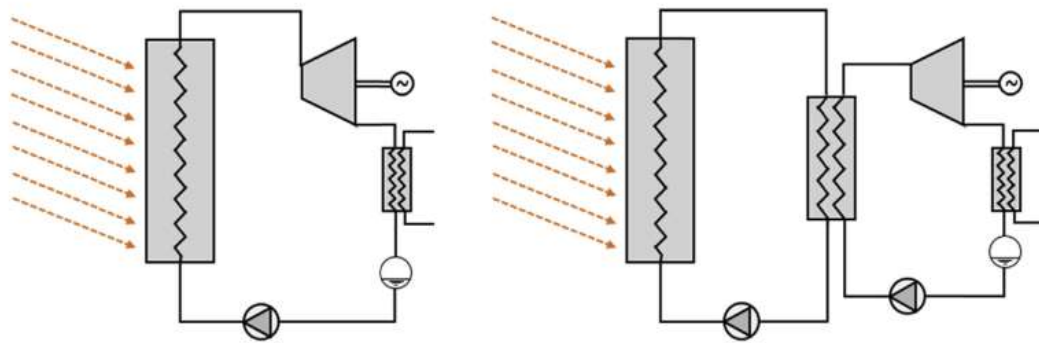
Paveiksle 2.3 yra pateikta biokuro kogeneracinės jėgainės schema, kuri taiko organinį Renkino ciklą. Kogeneracinės jėgainės veikimo principas – termo alyvos katile degimo produktai perduoda šiluminę energiją termo alyvai. Šilumos nešėjas gali būti pašildomas iki 320 °C temperatūros ir tiekiamas į garintuvą. Viename garintuvo kontūre cirkuliuoja terminė alyva, o kitame – organinis fluidas. Šiame šilumokaityje organinis fluidas yra išgarinamas. Dujinės būsenos organinis fluidas yra tiekiamas į turbiną, kurioje yra atliekamas mechaninis darbas ir generuojama elektros energija. Priešingai nei vandens garo turbinoje, iš turbinos išėjęs organinis fluidas yra perkaitintos dujinės fazės. Iš turbinos garas patenka į rekuperatorių, kuriame vėsdamas pašildo skystos fazės darbinį agentą. Jam atvėsus jis yra tiekiamas į kondensatorių, kuriame jis besikondensuodamas atiduoda slaptąjį garavimo šilumą ir sušildo į CŠT tinklus tiekiamą termofikacinį vandenį. Iš po kondensatoriaus gaunamas skystos fazės fluidas yra suslėgiamas cirkuliaciniame siurblyje ir tiekiamas į rekuperatorių. Pašildytas darbinis agentas tada yra tiekiamas į garintuvą ir ciklas yra kartojamas. Padidinti ciklo efektyvumui taip pat yra naudojami ekonomizeriai, kurie padeda pasisavinti didesnę šilumos kiekį iš degimo produktų.

2.2.2. Saulės ORC jėgainės

Saulės organinio Renkino ciklo (S-ORC) jėgainės naudoja saulės spinduliuotės energiją kaip šilumos šaltinį, kurią galima panaudoti elektros energijos gamybai. Saulės spinduliuotės energija yra įsisavinama pritaikius kolektorius. Šie kolektoriai yra labai plataus spektro, priklausomai nuo jų veikimo principo ar konfigūracijos. Kaip pavyzdžiui, kolektoriai gali būti:

- gradientinis druskos baseinas;
- plokštieji;
- vakuuminių vamzdžių;
- koncentruotos spinduliuotės kolektoriai;

Kolektoriuose gauta šiluminė energija yra perduodama šilumnešiui, kuris cirkuliuoja jų kontūru. Daugeliu atveju šis šilumnešis yra tarpinis, kuris perduoda savo šiluminę energiją garintuve darbiniam agentui. Tačiau, tiesioginis generavimas irgi yra įmanomas ir gali būti atliekamas, jei šis šilumnešis yra organinio Renkino ciklo darbo agentas. Šių sistemų konfigūracija yra pateikta 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Tiesioginis (schema kairėje) ir netiesioginis (schema dešinėje) garo generavimas S-ORC sistemoje [16].

Vidutinės bei didelės elektros galios generavimui yra naudojama dviejų kontūrų sistema. Šis sistema yra optimalesnė, nes vieno kontūro sistemai reikia didelio kiekio organinio fluido, kad būtų užpildyta kolektorių sistema. Taip pat verta paminėti, kad tokio tipo sistemoje slėgis yra sąlyginai didelis, todėl kolektoriai turi būti patvaresni, o tai reiškia didesnius investicinius kaštus. [16].

Viena iš pagrindinių problemų, su kuria susiduria saulės organinio Renkino ciklo sistema yra ta, kad saulės apšvieta yra nepastovi ir nuolatos kintanti. Dienos metu generuojamas elektros energijos kiekis yra didžiausias, o rytais bei vakarais – minimalus. Dėl šios priežasties generuojamas elektrinės galios kiekis nėra tolygus ar patikimas. Ši problema yra išsprendžiama taikant šiluminės energijos akumuliaciją. 2.6 paveiksle yra pateikta S-ORC sistema su šilumos akumuliacijos talpa. Šioje sistemoje yra naudojami paraboliniai-koncentruojantys saulės kolektoriai, kurie įkaitina sistemoje cirkuliuojantį šilumos nešėją – glicerolį. Šis glicerolis gali būti tiekiamas į garintuvą arba akumuliacinę talpą, kurioje šiluma yra kaupiama. Sumažėjus saulės spinduliuotei, akumuliacinė talpa kompensuoja šiuos pokyčius ir stabilizuoja generuojamą elektros energijos kiekį, į sistemą grąžindama šiluminę energiją.

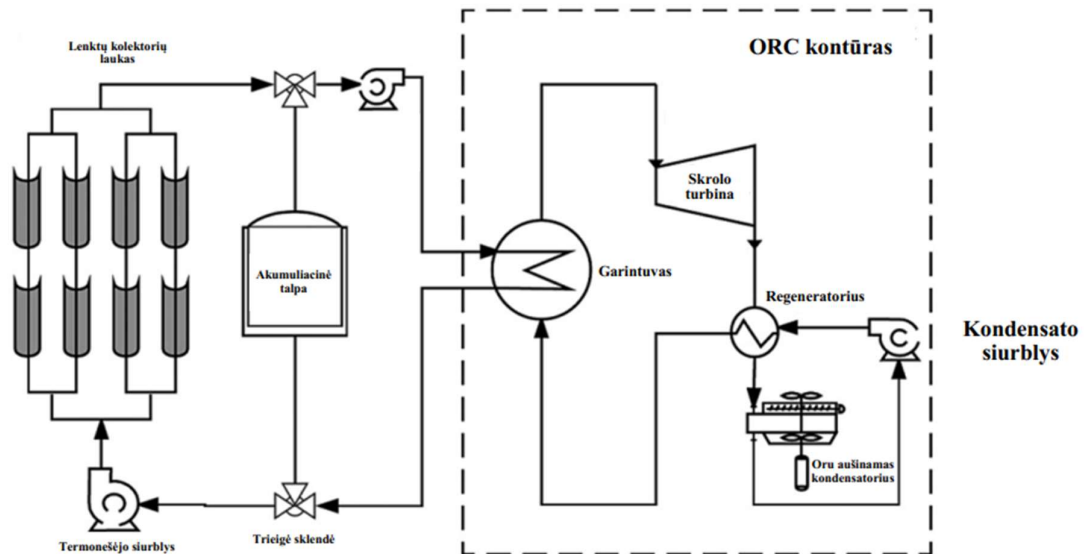
Generuojant elektros energiją fotovoltiniais saulės moduliai yra pasiekiamas didesnis efektyvumas, nei saulės organinio Renkino ciklo sistemose. O fotovoltinių saulės jėgainių savikaina yra beveik 3,5 kartus mažesnė. Kainų palyginimas yra pateiktas 2.5 paveiksle. Tačiau, S-ORC sistemos privalumas yra tas, kad tokio tipo sistema gali naudoti ekonomiškai pranašesnę energijos kaupimo metodą [32].

	s-ORC	PV	PV
Bendras kolektorių paviršiaus plotas, m ²	1029	508	1742
Sukauptos energijos tiekimas, h	9	0	3.6
Sugeneruota elektros energija per metus, MWh	246	117.4	246
CAPEX [Eur/kW]	5885	1731	6044
Palyginamoji elektros energijos kaina, Eur/kWh	0.19	0.12	0.26 ^a 0.21 ^b
Energetiniai nuostoliai, MWh	21.8 (šilumos)	1.5 (elektros)	155.4 (elektros)

^a - kai baterijos tarnavimo laikas yra 3 metai

^b - kai baterijos tarnavimo laikas yra 6 metai

2.5 pav. Ekonominis saulės organinio Renkino ciklo palyginimas su PV [32].



2.6 pav. S-ORC sistema su šilumos akumuliacinio talpa [32].

Fotovoltinių modulių elektros energijos kaupimas yra atliekamas su elektrocheminėmis baterijomis. Toks elektros energijos akumuliacinio būdas nėra racionalus, kadangi ličio baterijos yra sąlyginai brangios, o jų tarnavimo laikas yra apie 3 metai. Jeigu vertintume jėgainės tarnavimo laiką pagal fotovoltinius modulius, tai jos trukmė būtų apie 20-25 metai, o tai reiškia, kad per visą jėgainės gyvavimo laiką reikėtų šias baterijas keisti 6 – 8 kartus. Todėl, kai yra svarbu užtikrinti pastovų elektros energijos tiekimą į tinklus taikant elektros energijos akumuliacinį, saulės organinio Renkino ciklo jėgainė yra ekonomiškai pranašesnė nei fotovoltinė.

2.2.3. Geoterminės ORC jėgainės

Geoterminės jėgainės naudoja šiluminę energiją iš gilesnių žemės sluoksnių. Šios energijos šilumos nešėjas yra karštas geoterminis vanduo. Panaudojant geoterminio vandens šiluminį potencialą galima generuoti elektros energiją. Tačiau, geoterminio vandens fizikinės bei termodinaminės savybės nėra universalios, nes priklausomai nuo gręžinio geografinės vietos ar jo gylio, savybės ženkliai skiriasi [33]. Dėl šios priežasties yra naudojamos keletos tipų jėgainės.

Pagrindiniai parametrai, pagal kuriuos yra klasifikuojami geoterminis šilumos šaltiniai yra temperatūra, slėgis bei santykinis drėgnumas. Priklausomai nuo šių parametrų, yra naudojamos skirtingo tipo jėgainės. Jos yra: dvigubo pliūpsnio (*double flash*), sausojo garo, viengubo pliūpsnio (*single flash*) ir dvinarinės.

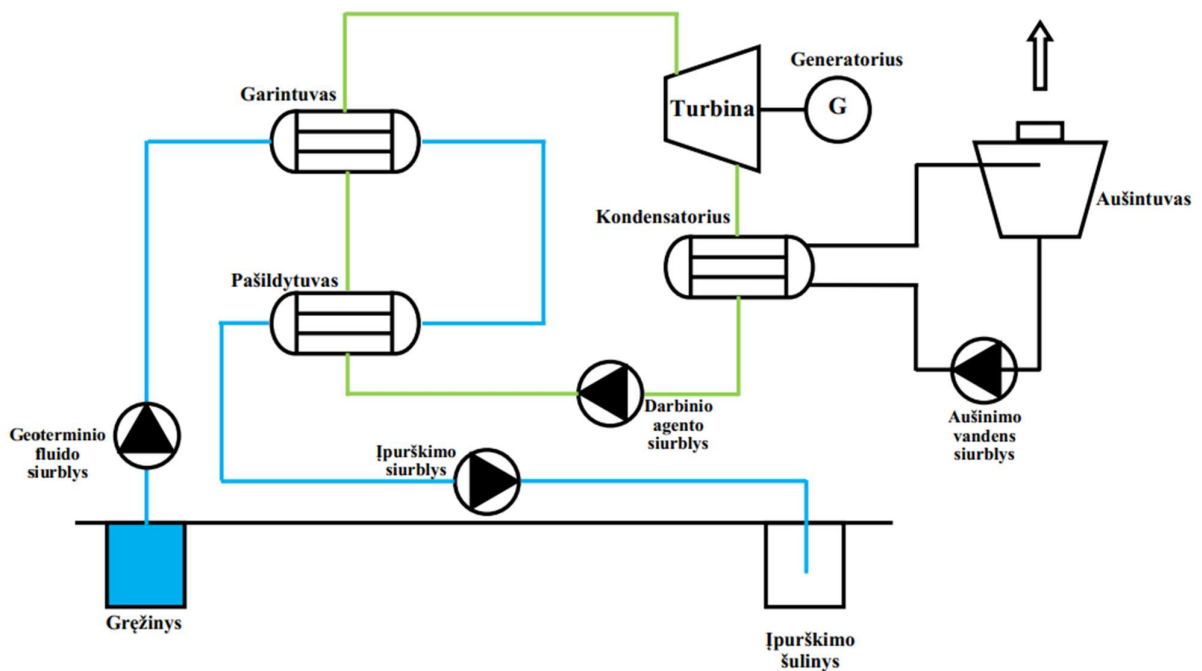
Jėgainės, kurios pritaiko vandens pliūpsnio „Flash“ principą (aukšto slėgio ir temperatūros vanduo patekęs į žemesnio slėgio aplinką akimirksniu išgaruoja) taikomos tada, kai geoterminis fluidas yra skystoje fazėje. Sauso garo tipo jėgainės naudoja sausąjį garą, susiformavusį jau žemės plutoje, ir naudojant tiesioginį ciklą iš jo yra gaminama elektros energija turbinoje. Dvinarinės jėgainės yra naudojamos tada, kai iš išgaunamas geoterminis fluidas yra žemo potencialo (temperatūrą nėra aukšta) ir skystosios fazės. Palyginimas tarp skirtingų tipų jėgainių yra pateikta 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Geoterminių jėgainių tipų palyginimai

Tipas	Šaltinio temperatūra (°C)	Naudingumo koef (%)	Jėgainės kaina ir sudėtingumas
Dvigubo pliūpsnio	240-320	35-45	Vidutinė/aukšta
Sausojo garo	180-300	50-65	Žema/vidutinė
Viengubo pliūpsnio	200-260	30-35	Vidutinė
Dvinarinė	125-165	25-45	Vidutinė/aukšta

Iš žemės išgautas žemos temperatūros geoterminis fluidas yra tiekiamas į pirmąjį šilumokaičio kontūrą. Šilumokaičio (garintuvo) antrame kontūre cirkuliuoja organinis fluidas, butano ar pentano angliavandenilis, yra išgarinamas ir tiekiamas į turbiną. Šioje turbinoje besiplėsdamas garas atlieka mechaninį darbą kaip ir įprastiniame Renkino cikle. Turbinos darbo ratą šis fluidas palieka sotaus arba perkaitinto garo fazėje ir yra tiekiamas į kondensatorių (oro aušintuve) ir grąžinamas atgal į išgarintuvą ciklo kartojimui. Tokio tipo jėgainės schema yra pateikta 2.7 paveiksle.

Esant žemo potencialo geoterminiam fluidui, kurio temperatūra nesiekia 150 °C, yra sudėtinga įdiegti „Flash“ tipo sistemą, kuri yra ekonomiškai efektyvi, todėl dvinarinės jėgainės yra vienintelis būdas išgauti elektros energiją iš žemo potencialo geoterminio fluído. Dėl šios priežasties ir yra naudojamas organinio Renkino ciklas. Remiantis 2008 metų duomenimis, dvinarinių jėgainių iš viso buvo 162 vienetai. Tai sudarė beveik 33 % visų dirbančių geoterminių jėgainių, tačiau jos sugeneravo tik 4 % elektros energijos. Bendra jų instaliuota galia buvo 373 MW [33].

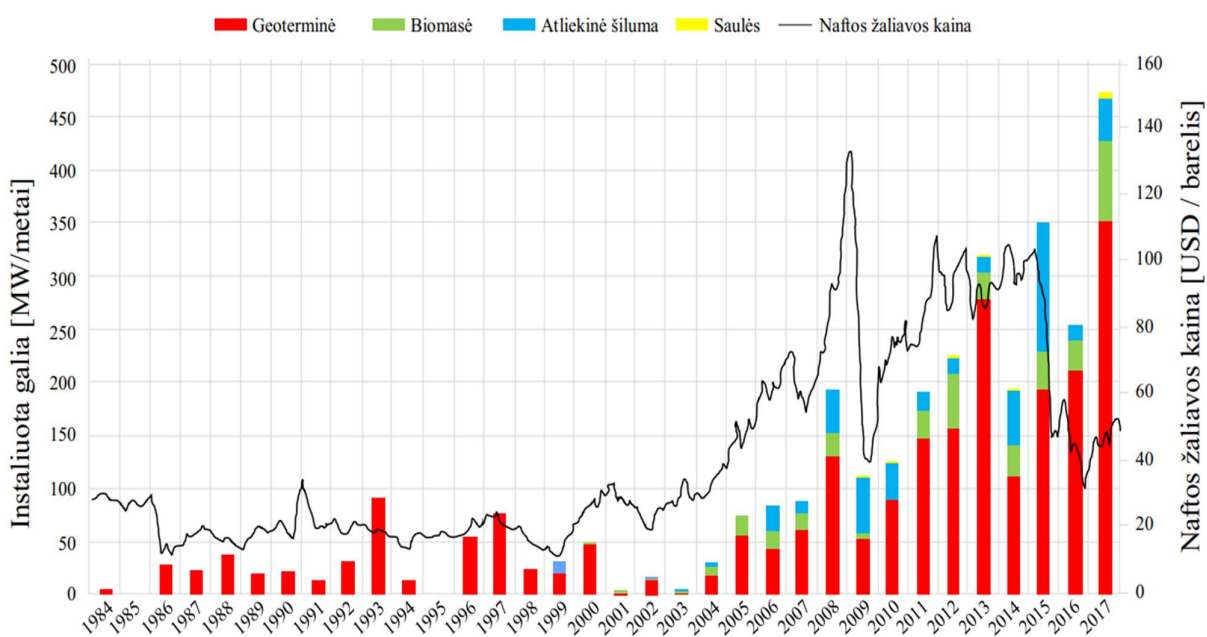


2.7 pav. Dvinarinės geoterminės jėgainės schema [33].

Išnagrinėjus visų skirtingų organinio Renkino ciklo jėgainių veikimo principus, galima daryti išvadą, kad dėl Lietuvos geografinės padėties, racionaliausias atsinaujinantis energijos šaltinis organiniam Renkino ciklui yra biomasė. Lietuva nepasižymi gausiais geoterminiais ištekliais, iš kurių būtų galima generuoti elektros energiją. Saulės organinio Renkino ciklo jėgainės yra iki 3,5 kartų brangesnės nei fotovoltiniai moduliai ir ekonomiškai pranašesnės tik tada, kai yra aktualus pastovus elektros tiekimas taikant energijos akumuliavimą. Biokuras pasižymi ne tik savo žema kaina, bet ir tai, kad biokuras yra vietinis kuras, kuris sukuria pridėtinę vertę šalies ekonomikai dėl sukuriamų darbo vietų.

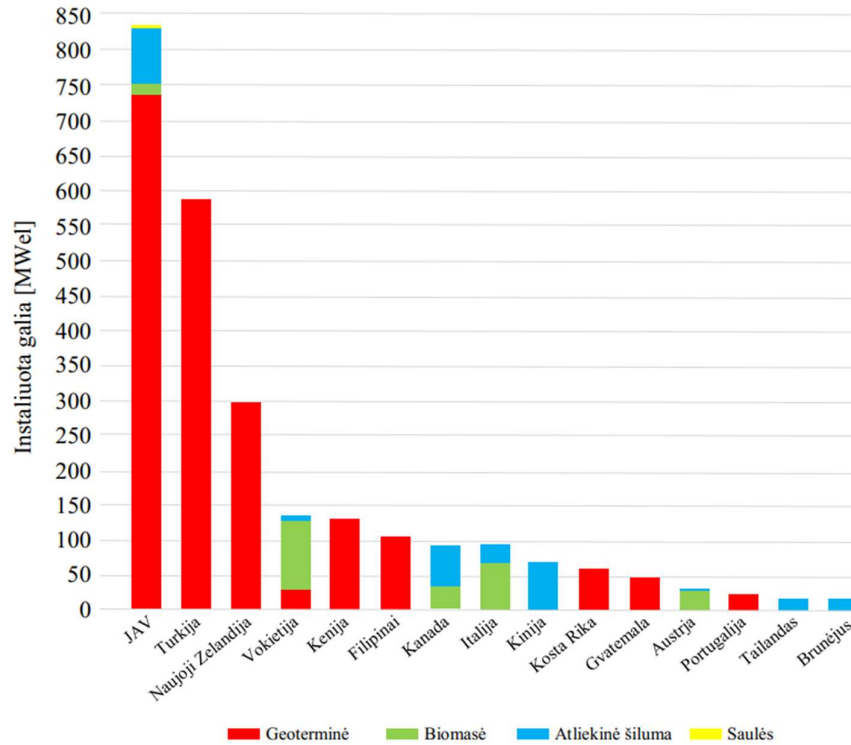
3. Literatūros analizė

Jėginių, kurios taiko organinį Renkino ciklą, pajėgumas yra nuo poros kW iki kelių MW galios geoterminių kogeneracinių elektrinių. Pasak Tartiere ir kitų autorių (2017), 2017 metais pasaulyje veikė 700 ORC tipo jėginių, kurias įrengė 27 skirtingos įmonės, o pačių jėginių suminė galia yra 2.7 GW [3]. Straipsnio autoriai teigia, kad pradinė ORC technologijos raida buvo menka, tačiau prasidėjus 1973 metų naftos krizei ir smarkiai išaugus naftos žaliavos kainai, buvo pradėta investuoti į alternatyvių energijos šaltinių plėtrą. Koreliaciją tarp naftos kainos ir instaliuotos ORC galios atitinkamais metais yra pavaizduota 3.1 paveiksle. Pateiktame paveiksle galime matyti, kad naftos kaina pradeda smarkiai augti nuo 2002 - 2003 metų ir patį aukščiausią tašką pasiekia 2008-2009 metais. Tuo pačiu laikotarpiu galima pamatyti ir tendencingą instaliuojamos ORC elektrinės galios augimą. Instaliuotos ORC elektrinės galios pikas sutampa su naftos kainos ir 2008-2009 metais siekia beveik 200 MWel. Tokią pačią tendenciją galima matyti ir 2009 – 2015 metų intervale, kai vėl kylanti naftos kaina verčia ieškoti kitų energijos šaltinių alternatyvų ir investuoti į ORC elektros gamybos technologiją.



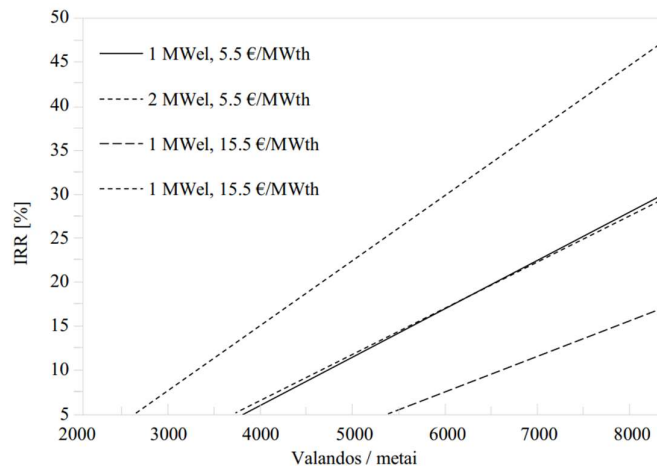
3.1 pav. Koreliacija tarp naftos kainos ir suminės ORC jėginių galios [3].

3.1 paveiksle galime pamatyti kokio tipo ORC jėgainės buvo statomos atitinkamais metais. Nuo 1984 iki 1998 metų, praktiškai visos statomos ORC jėgainės naudojo geotermine energija, kaip pirminį energijos šaltinį. Nuo 1999 metų buvo pradėta statyti atliekine šilumą ir biokurą naudojančios organinio Renkino ciklo jėgainės. Pagal didžiausius instaliuotus elektrinės galios pajėgumus Jungtinės Amerikos Valstijos yra pirmoje vietoje, o po jos išsidėsto Turkija ir Naujoji Zelandija (3.2 paveikslas). Šios trys šalys pasižymi gausiais geoterminės energijos resursais. Vokietijoje, Kanadoje, Italijoje ir Austrijoje organinio Renkino ciklo jėgainės yra statomos biomasės pagrindu dėl palankių ekonominių sąlygų bei gausių biokuro išteklių.

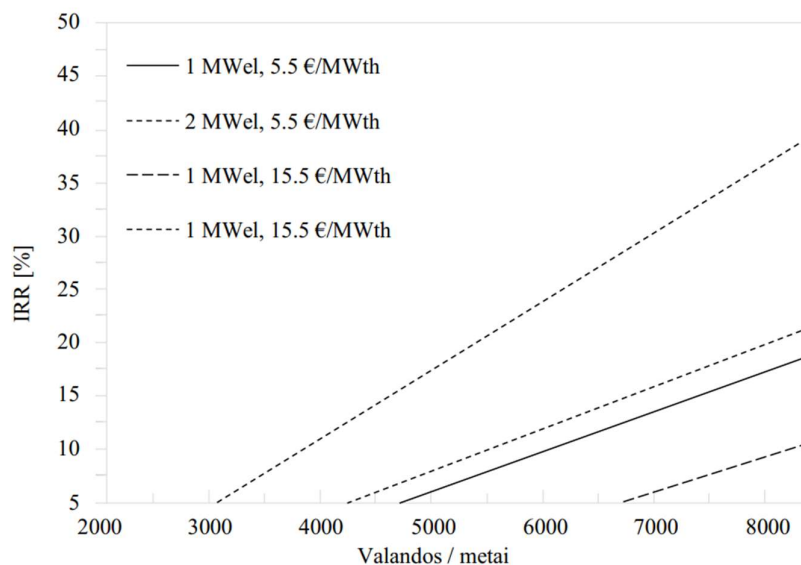


3.2 pav. Suminė instaliuota elektrinė galia pagal šalį ir pirminį energijos šaltinį [3].

Biomasę deginančios kogeneracinės jėgainės, kurios taiko organinį Renkino ciklą, yra technologiškai ir ekonomiškai perspektyvios esant vidutinei galiai (200 – 2000 kW_e) [8]. Straipsnio autoriai Marija Uris ir kiti, atliko palyginamuosius ekonominius skaičiavimus, kai buvo vertinamos 1 ir 2 MWe galios biokuro kogeneracinės jėgainės, kai nėra skiriamos papildomos ekonominės dotacijos. Šiame straipsnyje taip pat buvo palyginami dvi skirtingos ciklų konfigūracijos (iki kritinio ir virš kritinio slėgio ciklai). Gauti rezultatai yra pateikti 3.3 ir 3.4 paveiksluose. Pajamų ir išlaidų lentelė pateikta 3.5 paveiksle.



3.3 pav. Jėgainės vidinė grąžo norma, priklausomai nuo jėgainės galios ir biokuro kainos. Iki kritinis ciklas [8].



3.4 pav. Jėgainės vidinė gražos norma, priklausomai nuo jėgainės galios ir biokuro kainos. Virš kritinis ciklas [8].

Ciklas	Galia	Elektra	Šiluma	Kuro išlaidos (5.5 €/MWhth)	Kuro išlaidos (15.5 €/MWhth)	Priežiūra	Administracinės išlaidos
	MWe	k€	k€	k€	k€	k€	k€
Prieš kritinis	1	300	1862	277.7	782.5	250	60
Virš kritinis	1	300	1344	212.9	600	250	60
Prieš kritinis	2	600	3724	555.3	1565	250	60
Virš kritinis	2	600	2856	425.8	1200	250	60

3.5 pav. ORC biokuro jėgainės finansiniai srautai esant skirtingiems slėgio ciklams [8].

Straipsnio autoriai išvadose teigia, kad didesnis virš kritinio slėgio elektrinis efektyvumas sumažina šiluminės energijos gamybą, dėl ko sumažėja jėgainės pelningumas, palyginus su iki kritiniu ciklu. Pelningumas sumažėja todėl, nes pagrindinis pajamų šaltinis yra šiluminės energijos pardavimas. Taip pat iš pateiktų grafikų galima daryti išvadas, kad kuo didesnė jėgainės elektrinė galia, tuo didesnė vidinė gražos norma ir investicija į ORC jėgainę greičiau atsiperka. Esant iki kritiniam ciklui vidinė gražos norma (IRR) yra 30 %, kai jėgainės elektrinė galia yra 2 MWe, o biokuro kaina – 15.5 Eur/MWh. Palyginus su 1 MWe galios jėgaine ir esant tai pačiai biokuro kaina, vidinė gražos norma yra tik 16.5 %.

Nepaisant to, kad aukštos galios kogeneracija yra brandi technologija, kuri yra plačiai taikoma, mažoji ir mikro kogeneracija kenčia nuo nepalankių ekonominių ir technologinių sąlygų. Kogeneracinių sistemų mažinimas ne tik pablogina efektyvumo rodiklius, bet ir išaugina santykinę sistemos kainą (Eur/kW). Mikro galios kogeneracijos technologijos (1-100 kWe) rinka nėra didelė ir 2017 metais bendra instaliuota galia buvo tik 4.95 MW [9]. Straipsnio autoriai teigia, kad mikro galios kogeneracinių jėgainių santykiniai kaštai negali viršyti 3500 Eur/kW esant 5 – 10 kW elektros galiai bei 2500 Eur/kW, kai jėgainės galia yra 10-100 kW. Mikro ORC kogeneracinės sistemos gali būti tinkamos naudoti komerciniuose pastatuose, tokiuose kaip ligoninės, mokyklos, pramoninės patalpos, biurų pastatų blokai ir vieno ar daugiabučių namų pastatai. Šios sistemos gali padėti pasiekti daugelį energetinės ir socialinės politikos tikslų, įskaitant šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo

mažinimą, didesnę energetinį saugumą, todėl šių sistemų paklausa ir poreikis ateityje tik didės [10]. Vienas iš pagrindinių faktorių, ribojančių ORC mikro kogeneracinių jėgainių plėtrą yra komerciškai prieinamų šiluminių variklių trūkumas bei sąlyginai žemas izoentropinis naudingumo koeficientas, kas lemia žemą elektrinį efektyvumą (3.6 pav.) [11].

Šilumos šaltinis	Šaltinio temperatūra, °C	Galia, kW	ORC η_{el} , %
Biokuro katilas	130-155	1.3-2.5	4.8-7.3
Gamtinių dujų katilas	148-155	2.28	5
Elektrinis termoalyvos katilas	124	6.32	4.9
Elektrinis termoalyvos katilas	120	6.2	7.9
Elektrinis termoalyvos katilas	100	1.89	3.85
Elektrinis termoalyvos katilas	120	1.66	4.4
Elektrinis termoalyvos katilas	135	7.3	7.7
Gamtinių dujų katilas	165	5.6	8.8
Garų katilas	135	0.84	4.66
Biokuro katilas	128.9	0.86	3.78
Biokuro katilas	200	2.12	6.5

3.6 pav. Eksperimentinių mikro ORC jėgainių palyginimas [11].

Mažos galios ORC tipo jėgainės taip pat gali būti taikomos išnaudoti atliekinę šilumą. Du pagrindiniai šios sistemos privalumai yra jos paprastumas bei sistemos komponentų prieinamumas [12]. ORC sistema naudoja keturis pagrindinius komponentus: garintuvą, išsiplėtimo įrenginį (turbinos arba kiti šiluminiai varikliai), kondensatorių ir siurbli. Įprastai ORC jėgainėse yra taikomas ir rekuperatorius, tačiau straipsnio autoriai Sylvain Quoilin ir kiti teigia, kad šis komponentas neturi būti naudojamas atliekinės šilumos utilizavimo sistemose, kadangi šių sistemų tikslas yra sugeneruoti kuo įmanoma daugiau elektrinės galios, o ne pasiekti maksimalų ciklo efektyvumą. Šiluminio variklio dydis bei reikiamas šilumokaičio plotas priklauso darbinio agento parametru, todėl yra rekomenduojama naudoti fluidus su aukštu garų tankiu. Fluidai su aukšta kritine temperatūra arba didele virimo temperatūra, tokie kaip toluenas arba silikoninė alyva, yra naudojami esant aukštos temperatūros atliekinės šilumos šaltiniuose (temperatūra yra arti 300 oC). Angliavandeniliai arba šaldalai (R227ea, R123, R245fa ir HFE7000) yra pakankamai geri darbo agentai esant vidutinei arba žemai šilumos šaltinio temperatūrai (temperatūra žemesnė nei 200 oC) [12].

Galimybė pasirinkti darbinį agentą, priklausomai nuo šilumos šaltinio potencialo ar pačios jėgainės dydžio, turi daug pranašumų [4]:

1. efektyvesni turboagregatai;
2. vakuumas praktiškai nereikalingas kondensatoriuje;
3. didesnis jėgainių efektyvumas, palyginus su įprastu garo Renkino ciklu ar dujiniu Braitonu ciklu, kai šilumos šaltinis nesiekia 400 °C, o elektros galios gamybos pajėgumai yra mažesni nei 20 MW.

Tinkamo organinio fluideo parinkimas yra labai svarbus procesas, nes nuo jo priklauso sistemos termodinaminis efektyvumas, sistemą sudarančių elementų dydis ar turbinos parametrai. Taip pat nuo fluideo priklauso jėgainės saugumas, tvarumas bei ekonomiškumas. Skirtingai nei kiti

termodinaminiai ciklai, darbo agento parinkimas ORC sistemai yra sunkesnis dėl dviejų pagrindinių priežasčių [5]:

1. Kadangi organinis Renkino ciklas gali būti plačiai kur taikomas, tai šilumos šaltinių temperatūros gali ženkliai skirtis. Nuo žemos temperatūros šaltinių, kurie nesiekia 80 oC iki 500 oC temperatūros kuri yra pasiekama deginant biomasę.
2. Nevertinant fluidų, kurių kritinės temperatūros gali būti per žemos arba per aukštos, šimtai skirtingų fluidų gali būti naudojami kaip darbo agentai ORC tipo jėgainėse. Šį platų darbo agentų spektrą sudaro: anglevandeniliai, aromatiniai anglevandeniliai, eteriai, perfluorangliavandeniliai, freonai, alkoholiai, siloksanai.

Parenkant tinkamą darbo agentą yra daug kriterijų, įskaitant ir termodinaminį atitikimą, kaip pavyzdžiui: šilumos šaltinio temperatūrą bei reikiamą temperatūrą kondensatoriuje [6]. Taip pat reikia įvertinti galimą darbinio agento poveikį aplinkai. Kadangi naudojami fluidai yra organiniai, tai didelė jų dalis pasižymi savybę ardyti ozono sluoksnį (Ozono ardymo potencialas - OAP) bei daryti neigiamą įtaką pasauliniam atšilimui (pasaulinio atšilimo potencialas – PAP). Pasak Roberto A., pagrindiniai fluido parinkimo kriterijai turi būti:

- Kritinė tempera turi būti aukštesnė, nei aplinkos, kad vyktų kondensacijos procesas;
- Lydymosi temperatūra turi būti žemesnė, nei aplinkos, kad darbo agentas neužšaltų sustojimo metu;
- Soties slėgis kondensatoriuje turi būti didesnis nei atmosferinis, kad nesusidarytų vakuumas ir oras nepatektų į sistemą;
- Darbinio agento OAP yra lygus nuliui (OAP yra vertinamas R11 atžvilgiu, kaip ir nurodo Montrealio Protokolas);
- PAP turi būti žemesnis nei 200.

Organinio Renkino ciklo jėgainės elektrinis efektyvumas smarkiai priklauso nuo generatorių sukančio šiluminio variklio izoentropinio naudingumo koeficiento. Kadangi ORC technologija gali būti taikoma įvairiose termodinaminėse aplinkose, universaliai idealaus variklio nėra [7]. Tam, kad jėgainė dirbtų kiek įmanoma efektyviau, reikia parinkti optimaliausią plėtimosi įrenginį. Pagal veikimo principą šie įrenginiai yra grupuojami į dvi kategorijas: turboagregatus ir tūrinius. Fuhaid Alshammari ir kiti, teigia, kad mažos galios sistemose racionaliausia yra naudoti tūrinio išsiplėtimo variklius. Kai elektrinė galia yra 1 – 5 kW našiausi yra Skrolo tipo varikliai. Esant 5-50 kW elektrinei galiai našiausiai dirba sraigtinis variklis. Turboagregatai, dėl savo aukštos kainos ir mažesnio izoentropinio efektyvumo koeficiento esant žemai galiai, racionaliausia yra naudoti aukštos elektrinės galios jėgainėse.

4. Įprastinio Renkino ciklo ir organinio Renkino ciklo palyginamoji analizė

4.1. Kogeneracinių jėginių termodinaminis vertinimas

4.1.1. Įprastinio Renkino ciklo termodinaminis vertinimas

Kondensacinis režimas

Įprastinio Renkino ciklos jėgainės termodinaminiai parametrai esant kondensaciniam jėgainės režimui yra:

- Garo temperatūra prieš turbiną $T_1 = 430 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Garo slėgis prieš turbiną $p_1 = 48 \text{ bar}$;
- Garo kondensacijos $p_k = 0.05 \text{ bar}$;
- Garo turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas $\eta_{\text{turb}} = 0.7$
- Siurblio izoentropinis naudingumo koeficientas $\eta_{\text{siurb}} = 0.8$

Termodinaminių parametrų nustatymui yra naudojama Engineering Equation Solver programinė įranga.

Garų entalpija pirmajame taške, prieš jam patenkant į turbiną yra:

$$h_1 = 3272 \text{ kJ/kg}$$

Garų entalpija turbinos išėjime yra apskaičiuojama iš balanso lygties:

$$h_1 - h_2 = (h_1 - h_{2s}) \cdot \eta_{\text{turb}} \quad (1)$$

čia: h_{2s} – izoentropinio proceso pabaigoje likusi entalpija, kJ/kg.

Entalpija h_{2s} yra apskaičiuojama iš formulės:

$$h_{2s} = h_{2f} + \frac{s_{2s} - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} (h_{2g} - h_{2f}) \quad (2)$$

čia: s_{2s} – entropija izoentropinio proceso pabaigoje J/kg*K, s_{2f} – kondensato entropija prieš siurbliu J/kg*K, h_{2g} – sotaus garų entalpija esant kondensaciniam slėgiui J/kg*K, h_{2f} – sotaus skysčio entalpija esant kondensaciniam slėgiui kJ/kg, h_{2g} – sotaus garų entalpija esant kondensaciniam slėgiui kJ/kg.

Pagal 2 formulę yra apskaičiuojama entalpija izoentropinio proceso pabaigoje:

$$h_{2s} = 137.7 + \frac{6774 - 476.1}{8393 - 476.1} (2561 - 137.7) = 2065 \text{ kJ/kg}$$

Iš 1 formulės išvedame formulę apskaičiuoti garų entalpiją turbinos išėjime h_2 :

$$h_2 = h_1 - (h_1 - h_{2s}) \cdot \eta_{\text{turb}} \quad (3)$$

Panaudojus 3 formulę gauname, kad garų entalpija turbinos išėjime yra:

$$h_2 = 3272 - (3272 - 2065) \cdot 0.7 = 2427 \text{ kJ/kg}$$

Kondensacinio ciklo termodinaminis efektyvumas yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta_{T.kon} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2f})}{h_1 - h_3} \quad (4)$$

čia: h_3 – kondensato entalpija po siurblio kJ/kg.

Entalpijos pokytis 3 taške yra apskaičiuojamas iš lygties:

$$h_3 = h_{2f} + \frac{V_{2f} \cdot \Delta p}{\eta_s} \quad (5)$$

Čia: V_{2f} – vandens specifinis tankis prie kondensacijos slėgio m^3/kg , Δp – sukuriamas slėgio pokytis siurblyje Pa, η_s – siurblio izoentropinis naudingumo koeficientas.

Pagal 5 formulę yra kondensato entalpija po siurblio:

$$h_3 = 137.7 + \frac{0.001005 \cdot (48 - 0.05) \cdot 10^5}{0.8 \cdot 100} = 143.7 \text{ kJ/kg}$$

Tada, pagal 4 formulę yra apskaičiuojamas ciklo termodinaminis efektyvumas:

$$\eta_{T.kon} = \frac{(3272 - 2427) - (143.7 - 137.7)}{3272 - 143.7} = 0.268$$

4.1 lentelė. Kondensacinio režimo termodinaminių parametų lentelė.

Parametras	Reikšmė
Garų entalpija pirmajame taške h_1 , kJ/kg	3272
Garų entalpija izoentropinio proceso pabaigoje h_{2s} , kJ/kg	2065
Sotaus skysčio entalpija esant kondensaciniam slėgiui h_{2f} , kJ/kg	137.7
Sotaus garų entalpija esant kondensaciniam slėgiui h_{2g} , kJ/kg	2561
Garų entalpija turbinos išėjime h_2 , kJ/kg	2427
Kondensato entalpija po siurblio h_3 , kJ/kg	143.7
Garų entropija pirmajame taške s_1 , J/kg*K	6774
Garų entropija izoentropinio proceso pabaigoje s_{2s} , J/kg*K	6744
Sotaus skysčio entropija esant kondensaciniam slėgiui s_{2f} , J/kg*K	476.1
Sotaus garų entropija esant kondensaciniam slėgiui s_{2g} , J/kg*K	8393
Vandens specifinis tankis V_{2f} , m^3/kg	0.001005
Sukuriamas slėgio pokytis siurblyje Δp , bar	47.95
Turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas η_{turb} , %	70
Siurblio izoentropinis naudingumo koeficientas η_s , %	80
Termodinaminis ciklo efektyvumas kondensaciniu režimu $\eta_{T.kon}$, %	26.8

Kogeneracinis režimas

Įprastinio Renkino ciklos jėgainės termodinaminiai parametrai esant kogeneraciniam režimui yra panašūs kaip ir kondensacinio, tačiau vietoje kondensacinio slėgio bus vertinamas ekstraktinis (kogeneracinis).

- Garo temperatūra prieš turbiną $T_1 = 430$ °C;
- Garo slėgis prieš turbiną $p_1 = 48$ bar;
- Garo ekstraktinis (kogeneracinis) slėgis $p_e = 0.8$ bar;
- Garo turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas $\eta_{\text{turb}} = 0.7$
- Siurblio izoentropinis naudingumo koeficientas $\eta_{\text{siurb}} = 0.8$

Naudojantis 2 formule yra apskaičiuojama izoentropinio proceso pabaigoje esanti entalpija, kogeneracinio režimo metu:

$$h_{2s,k} = 391.7 + \frac{6774 - 1233}{7434 - 1233} (2665 - 391.7) = 2423 \text{ kJ/kg}$$

Pagal 3 formulę apskaičiuojame garo entalpiją turbinos išėjime kogeneracinio režimo metu:

$$h_{2,k} = 3272 - (3272 - 2423) \cdot 0.7 = 2678 \text{ kJ/kg}$$

Entalpijos pokytis siurblyje:

$$h_{3,k} = 391.7 + \frac{0.001038 \cdot (48 - 0.8) \cdot 10^5}{0.8 \cdot 100} = 397.8 \text{ kJ/kg}$$

Tada, pagal 4 formulę yra apskaičiuojamas ciklo termodinaminis efektyvumas esant kogeneraciniam ciklui:

$$\eta_{T,k} = \frac{(3272 - 2678) - (397.8 - 391.7)}{3272 - 397.8} = 0.204$$

Iš gautų rezultatų galima matyti, kad kogeneracinio ciklo metu jėgainės termodinaminis efektyvumas yra mažesnis 6.4 %. Tai parodo, kad kogeneracinio ciklo metu elektros gamybos apimtys yra mažesnės.

4.2 lentelė. Kogeneracinio režimo termodinaminių parametų lentelė.

Parametras	Reikšmė
Garų entalpija pirmajame taške h_1 , kJ/kg	3272
Garų entalpija izoentropinio proceso pabaigoje h_{2s} , kJ/kg	2423
Sotaus skysčio entalpija esant kondensaciniam slėgiui h_{2f} , kJ/kg	391.7
Sotaus garų entalpija esant kondensaciniam slėgiui h_{2g} , kJ/kg	2665
Garų entalpija turbinos išėjime h_2 , kJ/kg	2678
Kondensato entalpija po siurblio h_3 , kJ/kg	397.8
Garų entropija pirmajame taške s_1 , J/kg*K	6774
Garų entropija izoentropinio proceso pabaigoje s_{2s} , J/kg*K	6744

Sotaus skysčio entropija esant kondensaciniam slėgiui s_{2f} , J/kg*K	1233
Sotaus garo entropija esant kondensaciniam slėgiui s_{2g} , J/kg*K	7434
Vandens specifinis tankis V_{2f} , m ³ /kg	0.001038
Sukuriamas slėgio pokytis siurblyje Δp , bar	47.2
Turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas η_{turb} , %	70
Siurblio izoentropinis naudingumo koeficientas η_s , %	80
Termodinaminis ciklo efektyvumas kodensaciniu režim $\eta_{T.kon}$, %	20.45

4.1.2. Organinio Renkino ciklo termodinaminis vertinimas

4.1.2.1. Optimalaus darbinio agento parinkimas

Optimaliausio darbinio agento parinkimas yra itin svarbus aspektas organinio Renkino ciklo jėgainės efektyviam darbui. Nuo fluido termodinaminių savybių priklauso jėgainės termodinaminis efektyvumas. Šiame darbe bus atliekami termodinaminiai skaičiavimai, pagal kuriuos bus parinktas optimaliausias fluidas tokio tipo jėgainei. Nagrinėjami darbiniai agentai yra:

1. Toluenas
2. MM (heksametildisiloksanas)
3. R141
4. N-Pentanas
5. R123
6. R600 (Butanas)

Visi išvardinti fluidai yra naudojami organinio Renkino ciklo jėgainėse, tačiau jų darbinės sąlygos yra skirtingos. Toluenas su MM yra naudojami aukštos temperatūros kogeneracinėse jėgainėse, kur darbiniai agentai gali pasiekti iki 300 °C temperatūra, o fluidai tokie kaip butanas, R123 yra naudojami, kur yra žemas šilumos šaltinio potencialas arba jėgainė gamina tik tais elektros energiją.

Pagrindinis kriterijus, pagal kurį bus parenkamas darbinis agentas, yra ciklo termodinaminis efektyvumas. Kadangi šiame darbe yra palyginamos kogeneracinės jėgainės, tai taip pat yra aktualu ir pakankama fluido kondensacijos temperatūra prie slėgio, kuris yra didesnis nei atmosferinis. Fluido soties temperatūra turi būti panaši į įprastinio Renkino ciklo jėgainės, kuri dirba kogeneraciniu režimu tam, kad galėtų aprūpinti CŠT sistemą termofikatu.

Šios dalies skaičiavimams atlikti buvo naudojama Engineering Equation Solver programinė įranga.

Toluenas.

- Tolueno temperatūra prieš turbiną $T_1 = 300$ °C;
- Tolueno slėgis prieš turbiną $p_1 = 30$ bar;
- Tolueno kogeneracinis slėgis $p_e = 1.1$ bar;
- Organinio Renkino ciklo turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas $\eta_{turb} = 0.85$
- Kompresoriaus izoentropinis naudingumo koeficientas $\eta_{siurb} = 0.85$

Turbinos įtekėjime tolueno entalpija ir entropija, prie duotų sąlygų yra:

$$h_1 = 659.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = 1.33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Naudojantis 3 formule yra apskaičiuojamas darbinio agento entalpija turbinos išėjime (2 taškas).

$$h_2 = 659.7 - (659.7 - 533.7) \cdot 0.85 = 552.6 \text{ kJ/kg}$$

Turbinos išėjime perkaitintų garų temperatūra yra:

$$T_2 = 225 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Naudojantis 5 formule yra apskaičiuojamas entalpijų pokytis dėl suslėgimo:

$$h_4 = 5.44 + \frac{0.001288 \cdot (20 - 1.1) \cdot 10^5}{0.85 \cdot 1000} = 8.308 \text{ kJ/kg}$$

Pagal 4 formulę apskaičiuojamas ciklo termodinaminis efektyvumas:

$$\eta_{T.orc} = \frac{(659.7 - 552.6) - (8.308 - 5.44)}{659.7 - 8.308} = 0.16$$

Pagal duotus parametrus gauname, kad viso ciklo efektyvumas yra tik 16 %, kai įprastinio Renkino ciklo termodinaminis efektyvumas yra 26.8 % kondensaciniu režimu ir 20.4 % kogeneraciniu režimu. Organinio Renkino ciklo jėgainėse yra naudojami regeneratoriai, kurie padidina viso ciklo efektyvumą. Regeneratoriaus skaičiavimams atlikti yra priimta, į regeneratorių tiekiamas atidirbęs garas atvėsta iki temperatūros, kuri yra 10 °C didesnė, nei kondensato temperatūra, kuri mūsų atveju yra 113 °C. Pagal šiluminio balanso lygtį yra apskaičiuojama kondensato temperatūra iš po regeneratoriaus:

$$h_2 - h_2' = h_4' - h_4 \quad (6)$$

Čia: h_2' - regeneratoriuje atvėsusio darbinio agento entalpija kJ/kg

$$h_4' = h_2 - h_2' + h_4 = 552.6 - 273.71 + 8.308 = 287.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tada, termodinaminis ciklo efektyvumas panaudojus regeneratorių yra:

$$\eta_{T.orc.reg} = \frac{(659.7 - 552.6) - (8.308 - 5.44)}{659.7 - 287.2} = 0.279$$

Rekuperatoriaus taikymas šioje sistemoje ciklo termodinaminį efektyvumą padidina iki 28 %.

Analogiški skaičiavimai yra pritaikyti ir kitiems, pasirinktiems darbiniais agentams. Skaičiavimų rezultatai bei pagrindiniai parametrai yra pateikti 4.3 lentelėje

4.3 lentelė. Darbinių agentų parinkimas.

	Toluenas	MM	R141b	n-Pentanas	R123	R600
h_1 , kJ/kg	659.7	920.4	536.6	947.4	567	1229
h_2 , kJ/kg	552.6	854.2	482.9	859.7	533.8	1176
h_{2s} , kJ/kg	533.7	842.6	473.4	844.3	527.9	1167
h_3 , kJ/kg	364.8	595.3	336.1	471.8	435.9	711.3
h_{3f} , kJ/kg	5.444	403.5	144.2	167	295	438.1
h_4 , kJ/kg	8.308	408.5	146.8	167	297.2	442.2
h_{4f} , kJ/kg	287.2	695.2	327	601.2	418.2	907.3
P_1 , bar	30	30	30	30	30	30
P_2 , bar	1.1	1.1	5	5	6	13
T_1 , °C	300	300	300	300	300	300
T_{2s} , °C	214.7	233.4	226	249.6	192.2	271.7
T_2 , °C	224.9	239.1	234.8	255.4	198.5	275
T_3 , °C	113.3	103.1	86.89	92.74	88.27	91.92
T_4 , °C	114.1	104.7	88.91	94.45	90	93.65
η_T , %	16	11.94	13.1	10.62	11.5	6.19
$\eta_{T.reg}$, %	28	27.14	24.37	23.77	20.86	15.14

Iš gautų duomenų galima daryti išvadą, kad didžiausią termodinaminį efektyvumą galima pasiekti naudojant tolueną. Duotomis sąlygomis šis efektyvumas yra 28 %. Mažiausias ciklo efektyvumas būtų pasiekiamas su butanu (R600) – 15.14 %. Kadangi aukščiausias efektyvumas yra pasiekiamas taikant tolueną, tai tolimesniuose skaičiavimuose bus vertinama organinio Renkino ciklo kogeneracinė jėgainė, kurios darbinis agentas – toluenas.

4.2. Kogeneracinių jėgainių šiluminis vertinimas

4.2.1. Įprastinio Renkino ciklo jėgainė

Praeitame skyrelyje buvo apskaičiuoti įprastinio Renkino ciklo jėgainės kondensacinio bei kogeneracinio ciklo efektyvumai. Tam, kad atlikti šiluminius skaičiavimus reikia įvertinti ciklo vidutinį termodinaminį efektyvumą tiek šildymo, tiek nešildymo sezono metu.

Šildymo sezono metu vidutinis termodinaminis efektyvumas yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta_T^{\check{z}} = d_{1\check{z}} \cdot \eta_{TK} + d_{2\check{z}} \cdot \eta_T \quad (7)$$

Čia: $d_{1\check{z}}$ – ekstrakcinio garo dalis šildymo sezono metu, $d_{2\check{z}}$ – kondensatorių pasiekiančio garo dalis šildymo sezono metu. Šiuo atveju priimta, kad $d_{1\check{z}} = 0.8$, o $d_{2\check{z}} = 0.2$.

Šildymo sezono metu vidutinis termodinaminis efektyvumas yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta_T^v = d_{1v} \cdot \eta_{TK} + d_{2v} \cdot \eta_T \quad (8)$$

Čia: d_{1v} – ekstrakcinio garo dalis nešildymo sezono metu, d_{2v} – kondensatorių pasiekiančio garo dalis nešildymo sezono metu. Šiuo atveju priimta, kad $d_{1v} = 0.15$, o $d_{2v} = 0.85$.

Pagal 7 formulę yra apskaičiuojamas vidutinis termodinaminis efektyvumas šildymo sezono metu:

$$\eta_T^{\check{z}} = 0.8 \cdot 0.204 + 0.2 \cdot 0.268 = 0.217$$

Pagal 8 formulę yra apskaičiuojamas vidutinis termodinaminis efektyvumas nešildymo sezono metu:

$$\eta_T^v = 0.15 \cdot 0.204 + 0.85 \cdot 0.268 = 0.258$$

Pagrindiniai duomenys, pagal kuriuos bus atliekami šiluminiai jėgainės skaičiavimai:

- Jėgainės elektrinė galia – 2 MW_{el};
- Elektros suvartojimas savoms reikmėms – 4 %;
- Konversijos nuostoliai – 3 %.

Mechaninę ciklo galia yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$W_M = \frac{N_{el}}{\eta_m \cdot \eta_e} = \frac{2}{0.97 \cdot 0.96} = 2.15 \text{ MW} \quad (9)$$

Gauname, kad ciklo mechaninė galia turbinoje yra 2.15 MW. Apskaičiavus mechaninę ciklo galią reikia įvertinti elektrinės gaminamą šiluminę energiją kondensatoriuje. Tai yra įvertinama tiek šildymo, tiek nešildymo sezono metu. Išskiriama šiluminė galia kondensatoriuje yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$Q_K = \frac{W_M}{\eta_T} - W_M \quad (10)$$

Taikant 10 formulę kondensatoriaus galia šildymo sezono metu yra:

$$Q_K^{\check{z}} = \frac{W_M}{\eta_T^{\check{z}}} - W_M = \frac{2.15}{0.217} - 2.15 = 7.75 \text{ MW}$$

Analogiškai yra paskaičiuojamas ir nešildymo sezono metu:

$$Q_K^v = \frac{W_M}{\eta_T^v} - W_M = \frac{2.15}{0.258} - 2.15 = 6.18 \text{ MW}$$

Taip pat reikia įvertinti kondensaciniame ekonomaizeryje atgaunama šilumos dalį. Šiame darbe yra priimta, kad jame yra atgaunama 20 % viso ciklo šiluminės energijos.

$$Q_{KE} = \frac{Q_K + W_M}{1 - \eta_{KE}} - Q_K - W_M \quad (11)$$

Naudojantis 11 formule apskaičiuojamas atgaunamas šilumos kiekis šildymo bei nešildymo sezono metu:

$$Q_{KE}^{\dot{z}} = \frac{7.75 + 2.15}{1 - 0.2} - 7.75 - 2.15 = 2.48 \text{ MW}$$

$$Q_{KE}^v = \frac{6.18 + 2.15}{1 - 0.2} - 6.18 - 2.15 = 2.08 \text{ MW}$$

4.4 lentelė. RC jėgainės šiluminių skaičiavimų suvestinė

	Šildymo sezonas	Nešildymo sezonas
Vidutinis termodinaminis efektyvumas, %	21.7	25.8
Mechaninė ciklo galia W_M , MW	2.15	2.15
Kondensatoriuje išsiskirianti šiluminė galia Q_K , MW	7.75	6.18
Ekonomaizeryje atgaunama šiluminė galia Q_{KE} , MW	2.48	2.08
Bendra jėgainės šiluminė galia Q_V , MW	12.38	10.41

4.2.2. Organinio Renkino ciklo jėgainė

Pagrindiniai duomenys, pagal kuriuos bus atliekami šiluminiai jėgainės skaičiavimai:

- Jėgainės elektrinė galia – 2 MW_{el};
- Elektros suvartojimas savoms reikmėms – 7 %;
- Konversijos nuostoliai – 3 %.

ORC šiluminiai skaičiavimai yra atliekami analogiškai kaip ir įprastinio Renkino ciklo jėgainei. Tačiau, vienas skirtumas yra tas, kad ORC jėgainė visada dirba kogeneraciniu režimu, tiek žiemos metu, tiek vasaros. Tai reiškia, kad vidutinis ciklo termodinaminis efektyvumas išlieka visus metus toks pats:

$$\eta_T^{\dot{z}} = \eta_T^v = \eta_{T.orc.reg} = 0.279$$

Tada, mechaninė ciklo galia yra apskaičiuojama pagal 9 formulę:

$$W_M = \frac{2}{0.93 \cdot 0.97} = 2.22 \text{ MW}$$

Taikant 10 formulę kondensatoriaus galia:

$$Q_K = \frac{W_M}{\eta_T} - W_M = \frac{2.22}{0.279} - 2.22 = 5.73 \text{ MW}$$

Kondensaciniame ekonomaizeryje atgaunama šilumos dalis:

$$Q_{KE} = \frac{5.73 + 2.22}{1 - 0.2} - 5.73 - 2.22 = 2 \text{ MW}$$

4.5 lentelė. ORC jėgainės šiluminių skaičiavimų suvestinė

	Kogeneracinis režimas
Vidutinis termodinaminis efektyvumas, %	27.9
Mechaninė ciklo galia W_M , MW	2.22
Kondensatoriuje išsiskirianti šiluminė galia Q_K , MW	5.73
Ekonomaizeryje atgaunama šiluminė galia Q_{KE} , MW	2
Bendra jėgainės šiluminė galia Q_V , MW	9.95

4.3. Kogeneracinių jėgainių ekonominis vertinimas

Ekonominiam vertinimui atlikti bus naudojami rezultatai gauti šiluminių skaičiavimų dalyje. Pagrindinis rodiklis, pagal kurį bus atliekamas ekonominis vertinimas, yra kogeneracinių jėgainių atsipirkimo laikas pagal diskontuotus pinigų srautus. Šioje dalyje bus vertinamos pastoviosios, kintamosios išlaidos, jėgainių specifiniai investiciniai kaštai. Taip pat bus vertinama finansinės paramos įtaką viso projekto atsipirkimo laikui.

Šiems skaičiavimams atlikti yra priimta, kad tiek RC, tiek ORC kogeneracinių jėgainių darbo valandų kiekis yra vienodas. Šiame darbe priimta, kad šildymo sezono trukmė trunka 180 dienų, o nešildymo sezono trukmė trunka 185 d. Vadinasi, jėgainių darbo laikas valandomis yra:

- Šildymo sezonas – 4320 h.
- Nešildymo sezonas – 4400 h

Skaičiavimams atlikti reikia įvertinti elektros pardavimo kainą, šiluminės energijos pardavimo kainą bei biokuro įsigijimo kainą.

Elektros energijos pardavimo kaina

2019 m. rugsėjo 2 d. organizuojamam pirmajam technologiškai neutraliam aukcionui VERT nustatė elektros energijos iš atsinaujinančių išteklių didžiausiąją kainą – 48,93 Eur/MWh ir atskaitinę kainą – 45,07 Eur/MWh [34]. Pagal šias kainas gamintojo maksimalus galimas siūlyti kainos priedas sudarys 3,86 eurų už 1 MWh. Remiantis Lietuvos Respublikos ministerijos duomenimis priimsiu, kad elektros pardavimo kaina yra vidurkis tarp atskaitinės kainos bei didžiausios leidžiamos. Vadinasi elektros supirkimo kaina yra:

$$K_{el} = \frac{48.93 + 45.07}{2} = 47 \text{ Eur/MWh}$$

Šilumos energijos supirkimo kainos

Šilumos energijos supirkimo kaina priklauso nuo miesto, kuriame bus statoma kogeneracinė jėgainė. Šiuo atveju bus priimta, kad jėgainės bus vertinamos Vilniaus miesto savivaldybėje. Parduodamos šiluminės energijos kainai nustatyti yra naudojamos VERT pateiktai duomenimis 2020 metais [35]. Vertinant šilumos pardavimo kainas buvo priimta, kad šildymo sezonas trunka nuo lapkričio iki

balandžio mėnesio, o nešildymo sezonas gegužės – spalio mėnesiai. Vilniaus miesto šilumos supirkimo kainų vidurkiai, 2020 metais, yra pavaizduoti 4.1 paveiksle.

Sausis	Vasaris	Kovas	Balandis	Gegužė	Birželis	Liepa	Rugpjūtis	Rugsėjis	Spalis	Lapkritis	Gruodis
euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh	euro ct/kWh
2,79	2,67	2,61	2,27	1,54	1,38	1,25	1,2	1,2	2,15	2,37	2,45

4.1 pav. Šilumos supirkimo kainos Vilniaus mieste. 2020 metais [35].

Remiantis pateiktais duomenimis šilumos energijos supirkimo vidutinė kaina yra:

- Šildymo sezono metu – 25.3 Eur/MWh
- Nešildymo sezono metu – 14.5 Eur/MWh

Biokuro įsigijimo kaina

Biokuro įsigijimo kaina yra nustatyta remiantis VERT nurodytomis faktinėmis biokuro biržos kainomis 2020 metais [36]. Šios kainos yra pateiktos 4.6 lentelėje.

4.6 lentelė. Biokuro kainos nurodytos Eur/tne.

Sausis	Vasaris	Kovas	Balandis	Gegužė	Birželis	Liepa	Rugpjūtis	Rugsėjis	Spalis	Lapkritis	Gruodis
138,8	138,21	133,7	113,5	100,41	104,33	108,5	101,66	105,19	112,2	117,66	109,65

Remiantis pateiktais duomenimis yra nustatoma vidutinė metinė biokuro kaina, kuri šiuo atveju yra 113.2 Eur/tne arba 9.75 Eur/MWh.

4.3.1. Įprastinio Renkino ciklo kogeneracinė jėgainė

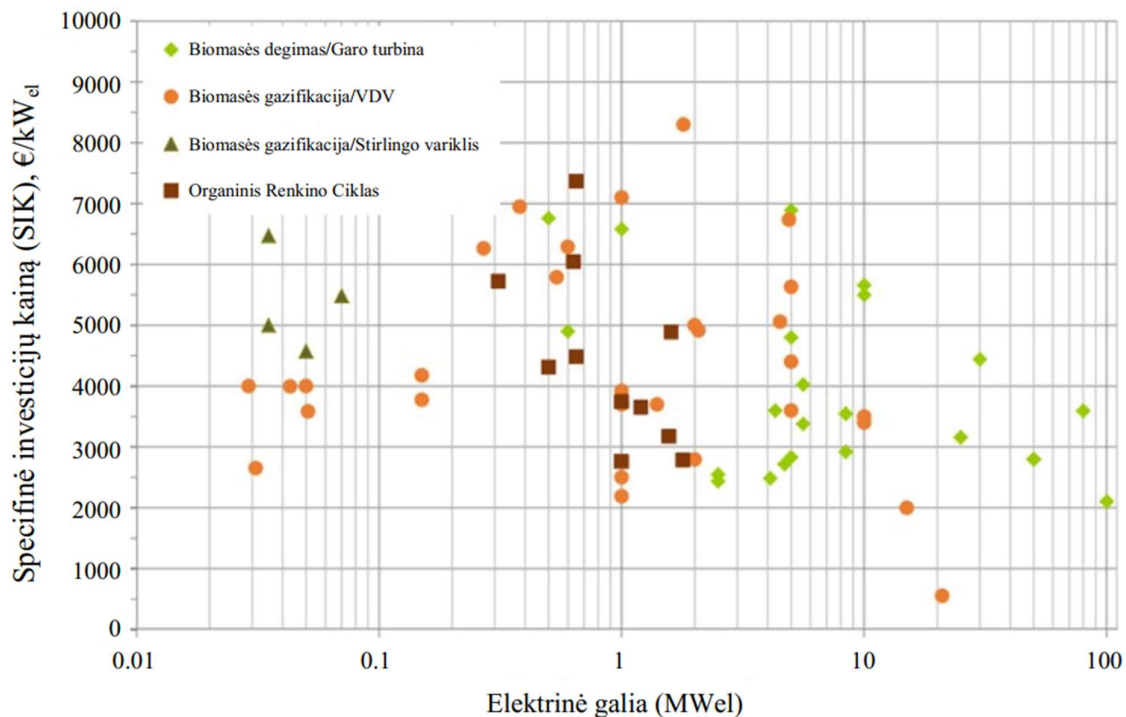
Pagrindinis rodiklis nurodantis galutinę jėgainės kainą yra specifinė investicijų kaina (SIK). Šis rodiklis parodo reikiamą investicijų kiekį 1 kW elektros energijos gamybos šaltiniui pastatyti. Didžiausia įtaką šio rodiklio dydžiui daro nominali jėgainės galia, t.y, kuo yra didesnė jėgainės elektrinė galia, tuo yra mažesnis SIK. Tam, kad nustatyti RC kogeneracinės jėgainės kainą, yra naudojami literatūros šaltiniai. Kadangi mokslinėje literatūroje skiriasi pateikta SIK vertė, tai tam, kad pasiekti tikslesnį rezultatą, yra vertinamas skirtingų šaltinių vidurkis.

Literatūros šaltinyje, kuriame yra atliekama biomasės elektrinės gyvenimo ciklo išlaidų analizė, taikant Monte Carlo simuliaciją, nurodo, kad biomasės kogeneracinės jėgainės specifinė investicijų kaina yra 3555 Eur/kWe [37].

Kitas literatūros šaltinis, kuriame yra atliekama dabartinės situacijos bei ateities perspektyvų vertinimas elektros gamybos rinkoje iš biomasės [38], nurodo, kad SIK, priklausomai nuo galutinės instaliuotos elektrinės galios, gali svyruoti nuo 2500 Eur/kWe iki 7000 Eur/kWe. Pilna šios analizės kainų suvestinė yra pateikta 4.2 paveiksle.

Literatūros šaltinyje, kuriame yra atliekamas subsidijų įtaka galutinei biokuro elektros energijos kainai, nurodo, kad 1 MW galios kogeneracinės jėgainės SIK yra 7500 Eur/kWe [39].

Kitame literatūros šaltinyje, kuriame yra analizuojama elektros energijos gamyba iš biomasės, nurodo, kad specifinė investicijų kaina gali svyruoti nuo 3500 iki 6000 Eur/kWe [40].



4.2 pav. Biokuro kogeneracinių jėgainių specifinė investicijų kaina. [38]

Remiantis nurodytais literatūros šaltiniais yra apskaičiuojama vidutinė specifinių investicijų kaina įprastinio Renkino ciklo kogeneracinei jėgainei.

$$SIK_{RC} = \frac{3555 + 2500 + 7000 + 7500 + 3500 + 6000}{6} = 5000 \text{ Eur/kWe} \quad (12)$$

Apskaičiavus SIK galima įvertinti viso projekto investicinius kaštus.

$$I_{RC} = SIK_{RC} \cdot N_{el} = 5000 \cdot 2 \cdot 10^3 = 10\,000\,000 \text{ Eur} \quad (13)$$

Įvertinus investicinius kaštus reikia įvertinti patiriamas išlaidas. Išlaidos susideda iš dviejų dedamųjų – pastoviųjų bei kintamųjų. Pagrindinės išlaidos biokuro kogeneracinese jėgainėse yra:

- Kuro sąnaudos;
- eksploatacinės bei remonto sąnaudos (*Operation & Maintenance*);
- palūkanų grąžinimas.

Išlaidos kurui:

$$I_{Kuras} = (4320 \cdot (Q_V^Z) + 4440 \cdot (Q_V^V)) \cdot 9.75 \quad (14)$$

$$I_{Kuras} = (4320 \cdot (12.38) + 4400 \cdot (10.41) \cdot 9.75) = 0.96 \text{ mln. Eur/met}$$

Išlaidos eksploatacijai bei remontams:

Išlaidos eksploatacijai bei remontams yra skaičiuojamos nuo galutinės projekto vertės. Biokuro kogeneracinėms jėgainėms, kurios taiko įprastinį Renkino ciklą, yra laikoma, kad eksploatacinės sąnaudos yra apie 5-7 % nuo investicinių kaštų.

$$I_{O\&M} = I_{RC} \cdot 5 \% = 10\,000\,000 \cdot \frac{5}{100} = 0.5 \text{ mln. Eur/met} \quad (15)$$

Ilgalaikiai finansiniai įsipareigojimai bankui:

Atliekant ekonominius skaičiavimus yra priimta, kad banko paskola padengs visus investicinius kaštus. Banko palūkanų norma yra 7 %, o trukmė – 20 metų. Metiniai įsipareigojimai bankui yra apskaičiuojami pagal formulę:

$$I_{BANK} = \frac{j(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \cdot I_{RC} \quad (16)$$

Čia: j – banko palūkanų norma, n – banko paskolos trukmė, metai.

Pagal 16 formulę apskaičiuojam išlaidas bankui:

$$I_{BANK} = \frac{0.07(1+0.07)^{20}}{(1+0.07)^{20} - 1} \cdot 10 = 0.94 \text{ mln. Eur/met}$$

$$I_{VISO} = 0.96 + 0.5 + 0.94 = 2.4 \text{ mln. Eur/met}$$

Gauname, kad metinė įprastinio Renkino ciklo jėgainės išlaidos yra 2.4 mln. Eur.

Kogeneracinės jėgainės pajamos

Pagrindinės jėgainės pajamos yra generuojamos iš elektros energijos bei šiluminės energijos pardavimo.

Pajamos iš elektros energijos pardavimo:

$$P_{el.} = 1.86 \cdot 8720 \cdot 47 = 0.76 \text{ mln. Eur/met}$$

Pajamos iš šiluminės energijos pardavimo:

$$P_{\check{s}il.}^{\check{z}} = 4320 \cdot (7.75 + 2.48) \cdot 25.3 = 1.1 \text{ mln. Eur/met}$$

$$P_{\check{s}il.}^V = 4400 \cdot (6.18 + 2.08) \cdot 14.5 = 0.527 \text{ mln. Eur/met}$$

Metinės jėgainės pajamos:

$$P_{VISO} = 0.76 + 1.1 + 0.527 = 2.4 \text{ mln. Eur/met}$$

Pajamų – išlaidų balansas:

$$P_{Bal} = 2.4 - 2.4 = 0 \text{ mln. Eur/met}$$

Rezultatuose gauname, kad pajamų-išlaidų balansas yra nulinis. Tai reiškia, kad šis projektas nėra pelningas ir rentabilus. Tačiau, Europos Sąjungos struktūriniai fondai bei vyriausybė, siekdami užtikrinti efektyvesnę energijos gamybą ir paskatinti didesnę atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą šilumos ūkio sektoriuje, centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje, skiria finansinę paramą nedidelės galios biokuro kogeneracinėms elektrinėms įrengti.

Įvertinant šią paramą yra priimta, kad 60 % investicinių kaštų bus padengiami iš Europos Sąjungos struktūrinių fondų, o likusieji 40 % bus padengiami banko paskola. Įvertinus ES paramą gaunama, kad metiniai išsipareigojimui bankui yra:

$$I_{BANK.60\%} = \frac{0.07(1 + 0.07)^{20}}{(1 + 0.07)^{20} - 1} \cdot 4 = 0.378 \text{ mln. Eur/met}$$

Tada, metinės išlaidos jėgainės eksploatavimui yra:

$$I_{VISO.60\%} = 0.96 + 0.5 + 0.378 = 1.84 \text{ mln. Eur/met}$$

O pajamų išlaidų balansas:

$$P_{Bal.60\%} = 2.4 - 1.84 = 0.56 \text{ mln. Eur/met}$$

Kogeneracinės jėgainės rentabilumas yra vertinamas pagal diskontuotus pinigų srautus. Diskontuoti pinigų srautai yra apskaičiuojami pagal formulę:

$$P_{Disk} = \frac{P_{Bal.60\%}}{(1+r)^1} + \frac{P_{Bal.60\%}}{(1+r)^2} \dots \frac{P_{Bal.60\%}}{(1+r)^n} \quad (17)$$

Čia: r – diskonto norma, priimta, kad ji yra 7 %, n – metai.

4.7 lentelė. RC kogeneracinės jėgainės atsiperkamumas (su parama)

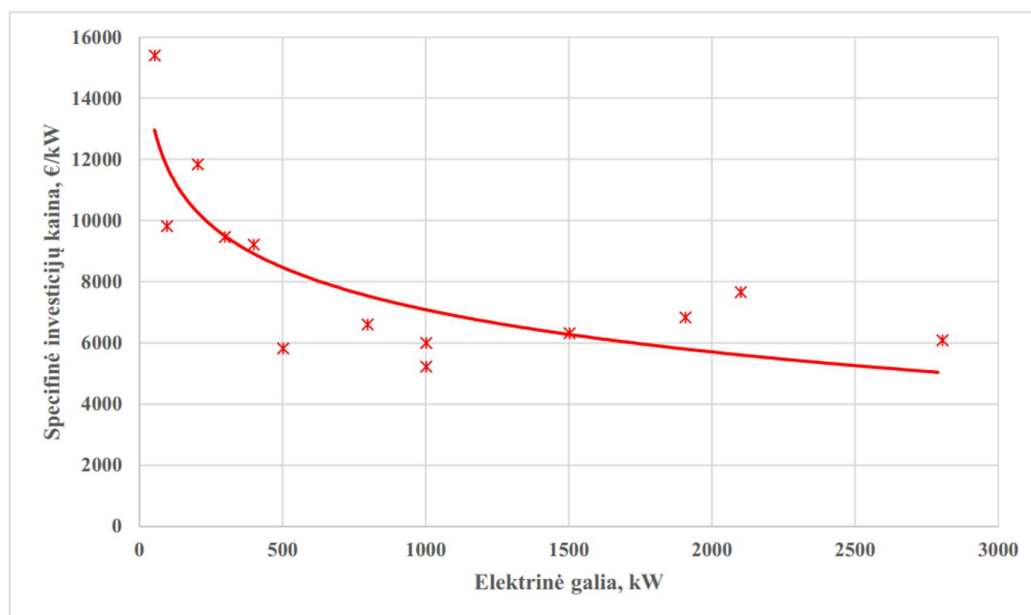
Metai	Investicijos, M€	Pajamos, M€	Išlaidos, M€	Išlaidos bankui, M€	P pinigų srautai, M€	Diskontuoti pinigų srautai, M€	Nepadengti kaštai, M€	IRR, %
0	-4					-4	-4,00	
1		2,4	1,46	0,378	0,562	0,525	-3,47	-87
2		2,4	1,46	0,378	0,562	0,491	-2,98	-58
3		2,4	1,46	0,378	0,562	0,459	-2,53	-38
4		2,4	1,46	0,378	0,562	0,429	-2,10	-25
5		2,4	1,46	0,378	0,562	0,401	-1,70	-17
6		2,4	1,46	0,378	0,562	0,374	-1,32	-11
7		2,4	1,46	0,378	0,562	0,350	-0,97	-7
8		2,4	1,46	0,378	0,562	0,327	-0,64	-4
9		2,4	1,46	0,378	0,562	0,306	-0,34	-2
10		2,4	1,46	0,378	0,562	0,286	-0,05	0

11		2,4	1,46	0,378	0,562	0,267	0,21	1
12		2,4	1,46	0,378	0,562	0,250	0,46	2
13		2,4	1,46	0,378	0,562	0,233	0,70	3
14		2,4	1,46	0,378	0,562	0,218	0,91	3
15		2,4	1,46	0,378	0,562	0,204	1,12	4
16		2,4	1,46	0,378	0,562	0,190	1,31	4
17		2,4	1,46	0,378	0,562	0,178	1,49	5
18		2,4	1,46	0,378	0,562	0,166	1,65	5
19		2,4	1,46	0,378	0,562	0,155	1,81	5
20		2,4	1,46	0,378	0,562	0,145	1,95	5

Rezultatuose gauname, kad 2 MW elektrinės galios biokuro kogeneracinė jėgainė, kuri naudoja įprastinį Renkino ciklą nėra rentabili be Europos Sąjungos paramos. Pirmuoju atveju, kai nėra vertinama Europos Sąjungos parama jos pajamų-išlaidų balansas yra nulinis. Antruoju atveju pajamų-išlaidų balansas yra teigiamas, o jėgainės atsiperka per 11 metų. Viso projekto vidinė gražos norma, per 20 metų, yra 5 %.

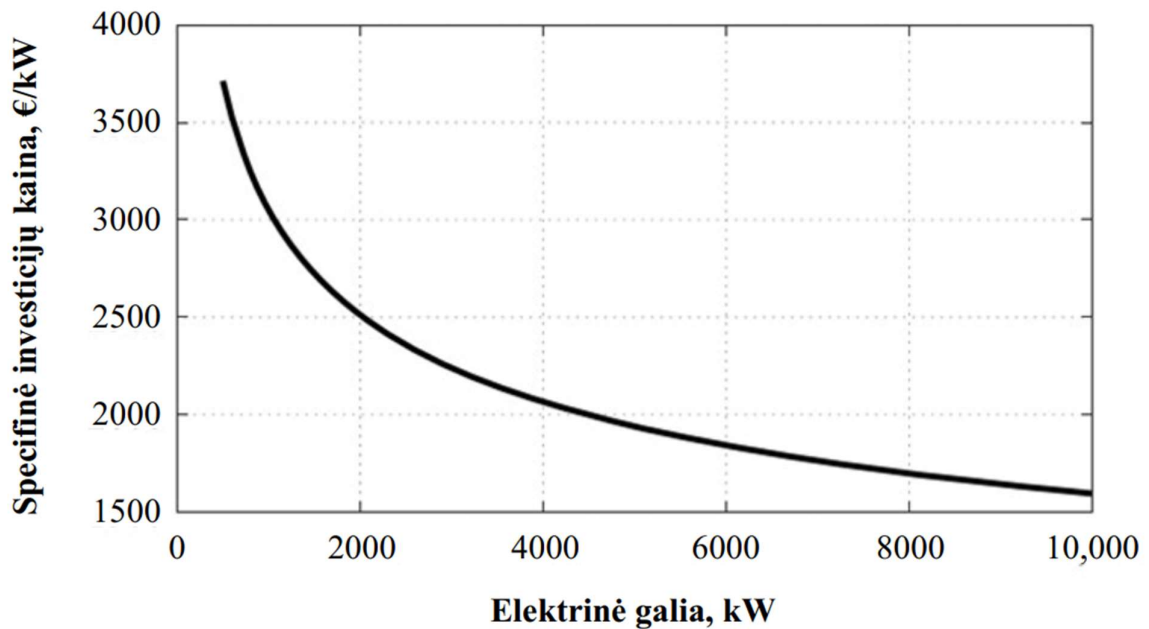
4.3.2. Organinio Renkino ciklo kogeneracinė jėgainė

ORC jėgainės skaičiavimai yra atliekami analogiškai, kaip ir įprastinio Renkino ciklo. SIK dydis yra nustatomas tokiu pačiu būdu – naudojantis literatūriniais šaltiniais ir iš jų išvedant vidurkio reikšmę.



4.3 pav. ORC jėgainės kainų priklausomybė nuo instaliuotos galios [41].

Literatūros šaltinyje, kuriame yra analizuojama elektros gamyba iš biomasės Vokietijoje [41] pateikia specifinių investicijų kainą ORC jėgainės pastatymui, priklausomai nuo instaliuotos elektrinės galios. Ši priklausomybė yra pateikta 4.3 paveiksle. Šis šaltinis teigia, kad 2 MW galios ORC kogeneracinės jėgainės SIK yra apie 5800 Eur/kWel.



4.4 pav. ORC jėgainės kainų priklausomybė nuo instaliuotos galios [42]

Kitame literatūros šaltinyje, kur yra analizuojama optimaliausia organinio Renkino ciklo kogeneracinė jėgainė, kur reikia užtikrinti karšto vandens tiekimą į CŠT tinklus [42] nurodo specifinių investicijų kainų priklausomybę, kuri yra pateikta 4.4 paveiksle. Autoriai nurodo, kad 2 MW galios ORC jėgainės SIK yra 2500 Eur/kW_{el}.

Prieš tai aptartame literatūros šaltinyje [38] yra nurodyta ir organinio Renkino ciklo jėgainės specifinė investicijų kainą 4.1 paveiksle. Šaltinyje nurodyta, kad 2 MW galios ORC tipo jėgainės SIK yra apie 2850 Eur/kW_{el}.

Literatūros šaltinyje, kuriame yra atliekama organinio Renkino ciklo jėgainių investicijų poreikis [43] yra nurodoma, kad vienapakopių - regeneratyvių ORC jėgainių SIK yra ribose tarp 3450 Eur/kW_{el} ir 4571 Eur/kW_{el}.

Remiantis šiais literatūros šaltiniais yra apskaičiuojama organinio Renkino ciklo jėgainės specifinė investicijų kaina:

$$SIK_{ORC} = \frac{5800 + 2500 + 2850 + 3450 + 4571}{5} = 3800 \text{ Eur/kW}_{el}$$

Įvertinus SIK yra apskaičiuojamas investicijų poreikis:

$$I_{ORC} = SIK_{ORC} \cdot N_{el} = 3800 \cdot 2 \cdot 10^3 = 7\,600\,000 \text{ Eur}$$

Išlaidos kurui

$$I_{Kuras} = 8720 \cdot 9.95 \cdot 9.75 = 0.846 \text{ mln. Eur/met}$$

Išlaidos eksploatacijai bei remontams:

Išlaidos eksploatacijai bei remontams yra skaičiuojamos nuo galutinės projekto vertės. ORC tipo jėgainėse eksploatacinės išlaidos yra mažesnės nei RC, nes praktiškai nereikalauja priežiūros, o personalo poreikis yra minimalus. Literatūros šaltinyje [44] yra nurodyta, kad išlaidos eksploatacijai bei remontams yra apie 3 % nuo bendrų investicinių kaštų.

$$I_{O\&M} = I_{ORC} \cdot 3\% = 7\,600\,000 \cdot \frac{3}{100} = 0.23 \text{ mln. Eur/met}$$

Ilgalaikiai finansiniai įsipareigojimai bankui:

Sąlygos yra tos pačios kaip ir įprasto Renkino ciklo jėgainei. Ilgalaikių įsipareigojimų dydis bankui yra:

$$I_{BANK} = \frac{0.07(1 + 0.07)^{20}}{(1 + 0.07)^{20} - 1} \cdot 7.6 = 0.72 \text{ mln. Eur/met}$$

Suminės išlaidos neįvertinus ES paramos:

$$I_{VISO} = 0.846 + 0.23 + 0.72 = 1.8 \text{ mln. Eur/met}$$

ORC kogeneracinės jėgainės pajamos:

Pajamos iš elektros energijos pardavimo:

$$P_{el.} = 1.80 \cdot 8720 \cdot 47 = 0.74 \text{ mln. Eur/met}$$

Pajamos iš šiluminės energijos pardavimo:

$$P_{\text{šil.}}^{\text{ž}} = 4320 \cdot (5.73 + 2) \cdot 25.3 = 0.84 \text{ mln. Eur/met}$$

$$P_{\text{šil.}}^{\text{V}} = 4400 \cdot (5.73 + 2) \cdot 14.5 = 0.49 \text{ mln. Eur/met}$$

Metinės jėgainės pajamos:

$$P_{VISO} = 0.74 + 0.84 + 0.49 = 2.07 \text{ mln. Eur/met}$$

Išlaidų pajamų balansas:

$$P_{Bal} = 2.07 - 1.8 = 0.274 \text{ mln. Eur/met}$$

4.8 lentelė. ORC kogeneracinės jėgainės atsiperkamumas (be paramos).

Metai	Investicijos, M€	Pajamos, M€	Išlaidos, M€	Išlaidos bankui, M€	Pinigų srautai, M€	Diskontuoti pinigų srautai, M€	Nepadengti kaštai, M€	IRR, %
0	-7,6					-7,6	-7,60	
1		2,07	1,076	0,72	0,274	0,256	-7,34	-97
2		2,07	1,076	0,72	0,274	0,239	-7,10	-80
3		2,07	1,076	0,72	0,274	0,224	-6,88	-64
4		2,07	1,076	0,72	0,274	0,209	-6,67	-52
5		2,07	1,076	0,72	0,274	0,195	-6,48	-43
6		2,07	1,076	0,72	0,274	0,183	-6,29	-36
7		2,07	1,076	0,72	0,274	0,171	-6,12	-31
8		2,07	1,076	0,72	0,274	0,159	-5,96	-27
9		2,07	1,076	0,72	0,274	0,149	-5,81	-23
10		2,07	1,076	0,72	0,274	0,139	-5,68	-21
11		2,07	1,076	0,72	0,274	0,130	-5,55	-19
12		2,07	1,076	0,72	0,274	0,122	-5,42	-17
13		2,07	1,076	0,72	0,274	0,114	-5,31	-15
14		2,07	1,076	0,72	0,274	0,106	-5,20	-14
15		2,07	1,076	0,72	0,274	0,099	-5,10	-13
16		2,07	1,076	0,72	0,274	0,093	-5,01	-12
17		2,07	1,076	0,72	0,274	0,087	-4,92	-11
18		2,07	1,076	0,72	0,274	0,081	-4,84	-10
19		2,07	1,076	0,72	0,274	0,076	-4,77	-10
20		2,07	1,076	0,72	0,274	0,071	-4,70	-9

Gauname, kad be ES paramos, organinio Renkino ciklo kogeneracinė jėgainė turi teigiamą išlaidų – pajamų balansą, tačiau jis yra per mažas, kad šis projektas būtų rentabilus ir atsiperktų.

Įvertinus ES sąjungos paramą, kuri siekia 60 % viso projekto investicijų sumos, gauname, kad metiniai įsipareigojimai bankui yra:

$$I_{BANK.60\%} = \frac{0.07(1 + 0.07)^{20}}{(1 + 0.07)^{20} - 1} \cdot 3 = 0.287 \text{ mln. Eur/met}$$

Tada, metinės išlaidos jėgainės eksploatavimui yra:

$$I_{ISO.60\%} = 0.846 + 0.23 + 0.287 = 1.363 \text{ mln. Eur/met}$$

Išlaidų pajamų balansas:

$$P_{Bal} = 2.07 - 1.363 = 0.707 \text{ mln. Eur/met}$$

ORC kogeneracinės jėgainės atsiperkamumo skaičiavimų rezultatai pateikti 4.9 lentelėje.

4.9 lentelė. ORC kogeneracinės jėgainės atsiperkamumas (su parama)

Metai	Investicijos, M€	Pajamos, M€	Išlaidos, M€	Išlaidos bankui, M€	Pinigų srautai, M€	Diskontuoti pinigų srautai, M€	Nepadengti kaštai, M€	IRR, %
0	-3					-3	-3,00	
1		2,07	1,076	0,287	0,707	0,661	-2,34	-78
2		2,07	1,076	0,287	0,707	0,618	-1,72	-42
3		2,07	1,076	0,287	0,707	0,577	-1,14	-21
4		2,07	1,076	0,287	0,707	0,539	-0,61	-9
5		2,07	1,076	0,287	0,707	0,504	-0,10	-1
6		2,07	1,076	0,287	0,707	0,471	0,37	4
7		2,07	1,076	0,287	0,707	0,440	0,81	7
8		2,07	1,076	0,287	0,707	0,411	1,22	9
9		2,07	1,076	0,287	0,707	0,385	1,61	11
10		2,07	1,076	0,287	0,707	0,359	1,97	12
11		2,07	1,076	0,287	0,707	0,336	2,30	13
12		2,07	1,076	0,287	0,707	0,314	2,62	13
13		2,07	1,076	0,287	0,707	0,293	2,91	14
14		2,07	1,076	0,287	0,707	0,274	3,18	14
15		2,07	1,076	0,287	0,707	0,256	3,44	14
16		2,07	1,076	0,287	0,707	0,239	3,68	15
17		2,07	1,076	0,287	0,707	0,224	3,90	15
18		2,07	1,076	0,287	0,707	0,209	4,11	15
19		2,07	1,076	0,287	0,707	0,195	4,31	15
20		2,07	1,076	0,287	0,707	0,183	4,49	15

Įvertinus Europos Sąjungos paramą, kuri siekia iki 60 % viso projekto vertės, gauname, kad organinio Renkino ciklo jėgainės atsipirkimas yra per šešerius metus, nevertinant jėgainės statybų trukmės. Viso projekto vidinė gražos norma yra 15 %.

4.10 lentelė. Įprastinio ir Organinio Renkino ciklo kogeneracinių jėgainių termodinaminių bei šiluminių vertinimų suvestinė.

Rodiklis	Įprastas Renkino ciklas	Organinis Renkino ciklas
Termodinaminiai rodikliai		
Vidutinis termodinaminis efektyvumas kondensaciniu režimu, %	25.8	-
Vidutinis termodinaminis efektyvumas kogeneraciniu režimu, %	21.7	27.9
Šiluminiai rodikliai		
Kondensatoriuje išsiskirianti šiluminė galia, kondensaciniu režimu, MW	6.18	-
Kondensatoriuje išsiskirianti šiluminė galia, kogeneraciniu režimu, MW	7.75	5.73
Kond. ekonomizaizeryje atgaunama šiluminė galia, kondensaciniu režimu, MW	2.08	-
Kond. ekonomizaizeryje atgaunama šiluminė galia, kogeneraciniu režimu, MW	2.48	2
Bendra šiluminė galia kondensaciniu režimu, MW	10.41	-
Bendra šiluminė galia kogeneraciniu režimu, MW	12.38	9.95

4.11 lentelė. Įprastinio ir organinio Renkino ciklo kogeneracinių jėgainių ekonominio vertinimo suvestinė

Rodiklis	Įprastas Renkino ciklas	Organinis Renkino ciklas
Nominali elektrinė galia, MW	2	2
Išlaidos		
Specifinė investicijų kaina, Eur/kWel	5000	3800
Reikiamas investicijų kiekis, mln. Eur	10	7.6
Išlaidos kurui, mln. Eur	0.96	0.846
Išlaidos eksploatacijai, mln. Eur	0.5	0.23
Išlaidos bankui (be paramos), mln. Eur	0.94	0.72
Išlaidos bankui (su parama), mln. Eur	0.378	0.287
Suminės išlaidos (be paramos), mln. Eur	2.4	1.8
Suminės išlaidos (su parama), mln. Eur	1.84	1.363

Pajamos		
Pajamos iš elektros energijos pardavimo, mln. Eur	0.76	0.74
Pajamos iš šiluminės energijos pardavimo, mln. Eur	1.63	1.33
Suminės metinės pajamos, mln. Eur	2.4	2.07
Pelnas		
Metinis pelnas (be paramos), mln. Eur	0	0.274
Metinis pelnas (su parama), mln. Eur	0.56	0.707
Atsiperkamumas		
Atsiperkamumas (be paramos), metai	Neatsiperka	Neatsiperka
Atsiperkamumas (su parama), metai	11	6
Vidinė gražos norma, 20 metų laikotarpiui, %	5	15

Svarbiausias faktorius, lemiantis jėgainių atsiperkamumą yra gaunama finansinė parama. Negavus finansinės paramos, tiek organinio Renkino ciklo jėgainė, tiek įprasto Renkino ciklo jėgainė yra nerentabilios. RC jėgainės metinis pajamų-išlaidų balansas yra neigiamas, o ORC yra per mažas, kad atsipirktų per visą jos gyvavimo laikotarpį. Iš Europos Sąjungos gavus finansinę paramą, kuri siekia iki 60 % viso projekto investicijų, o 40 % būtų dengiama banko paskola, yra gaunama, kad RC tipo jėgainės atsipirktų per 11 metų, o vidinė gražos norma, per 20 metų, yra 5 %. Tuo tarpu, organinio Renkino ciklo jėgainė atsiperka per 6 metus, o per 20 metų vidinė gražos norma siekia 15 %. Nors ir įprastinio Renkino ciklo jėgainė generuoja didesnę pajamų, dėl didesnio kiekio parduodamos šiluminės energijos, tokio tipo jėgainės išlaidos yra per didelės. Didžioji dalis išlaidų yra dėl finansinių įsipareigojimų bankui. RC tipo kogeneracinės jėgainės investiciniai kaštai siekia iki 10 mln. Eurų, o tuo tarpu, organinio Renkino ciklo jėgainės investiciniai kaštai yra mažesni – 7,6 mln. Eurų. Taip pat verta atkreipti dėmesį, kad ORC tipo jėgainės eksploataciniai kaštai yra mažesni. Šiuo atveju jie siekia iki 0.23 mln. Eurų per metus, kai RC tipo jėgainės išlaidos yra 0,5 mln. Eurų. Viena iš priežasčių yra ta, kad organinio Renkino ciklo jėgainei reikia mažesnio kiekio aptarnaujančio personalo, kas yra nurodoma literatūros šaltinyje [44]. Taip pat eksploataciniai kaštai yra mažesni dėl to, kad tokio tipo jėgainėse nereikia vandens paruošimo sistemų, be ko negalėtų dirbti Renkino ciklo jėgainės.

Remiantis gautais rezultatais ir palyginus įprastinio Renkino ciklo jėgainę su organinio Renkino ciklo jėgaine, galima daryti išvadą, kad ekonomiškai naudingesnis ir praktiškesnis nedidelės kogeneracijos metodas yra taikant organinį Renkino ciklą.

Išvados

1. Baigiamajame projekte buvo išanalizuotos pagrindinės problemos, su kuriomis susiduria žemos galios kogeneracinės jėgainės, kurios taiko įprastinį Renkino ciklą. Pirma, mažos galios jėgainėse yra naudojamas žemo potencialo garas. Renkino ciklo efektyvumas priklauso nuo į turbiną tiekiamo garo temperatūros bei slėgio. Didėjant garo temperatūrai ir slėgiui, didėja viso ciklo efektyvumas. Žemos galios jėgainėse yra naudojamas žemo ar vidutinio potencialo garas, kuris neleidžia pasiekti aukštą termodinaminį efektyvumą. Antra, žemos galios turbinų izoentropinis naudingumo koeficientas yra mažas. Literatūros šaltiniuose yra nurodyta, kad kuo žemesnė turbinos galia, tuos prastesnis jos izoentropinis naudingumo koeficientas. Kaip pavyzdžiui, 500 kW turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas yra tik 52.5 %, o 3 MW yra 61.2 %. Vadinasi, kuo yra mažesnė jėgainės elektrinė galia, tuo žemesnis turbinos izoentropinis naudingumo koeficientas. Iš išvardintų problemų galima daryti išvadą, kad kuo yra žemesnė įprastinio Renkino ciklo jėgainės galia, tuo mažesnis jos visas efektyvumas.
2. Šiame baigiamajame projekte buvo išanalizuoti pagrindiniai organinio Renkino ciklo pranašumai. Pirma, didelis darbinų agentų pasirinkimas. Didelis organinių fluidų spektras leidžia pasirinkti optimaliausia darbinį agentą, kuris atitiktų reikiamas ciklo savybes. Priklausomai nuo pasirinkto darbinio agento, keičiasi ir ciklo termodinaminis efektyvumas. Kitas organinio Renkino ciklo privalumas yra tai, kad naudojami darbiniai agentai yra sausojo tipo. Vadinasi, kad besiplečiantis garas turbinoje nesikondensuoja ant turbinos mentelių paviršiaus, o tai reiškia, kad turbinos yra paprastesnės konstrukcijos, efektyvesnės bei pigesnės. Verta paminėti, kad ORC sistemose slėgis yra didesnis nei atmosferinis, o tai leidžia atsisakyti įrenginių, kurių paskirtis yra pašalinti iš fluideo oro priemaišas. Kitas ORC jėgainių privalumas yra tas, kad jų darbas dalinėmis apkrovomis yra našesnis bei efektyvesnis, nei RC jėgainių. Tai leidžia sumažinti jėgainės galią nepraradus efektyvumo, kai momentinė elektros energijos pardavimo kaina pasidaro per maža ir ją gaminti yra nuostolinga.
3. Baigiamojo projekto ketvirtoje dalyje buvo atliekamas optimaliausio darbinio agento parinkimas. Iš viso buvo vertinami 6 darbiniai agentai su skirtingomis termodinaminėmis savybėmis: Toluenas, MM (heksametyldisloksanas), R141b, n-Pentanas, R123 ir R600 (Butanas). Pagal užsibrėžtas sąlygas atlikus termodinامينius skaičiavimus gauname, kad didžiausias ciklo efektyvumas yra pasiekiamas su toluenu, 28 %. Žemiausias ciklo efektyvumas yra pasiekiamas su butanu, kuris būtų tik 15.14 %. Vadinasi, optimaliausias ciklo efektyvumas būtų pasiekiamas naudojant tolueną. Ketvirtoje dalyje taip pat buvo įvertinamas įprastinio Renkino ciklo termodinaminis efektyvumas. Pagal užsiduotą sąlygą yra gaunama, kad kogeneracinio ciklo metu termodinaminis efektyvumas yra 20.45 %, o kondensaciniu – 26.8 %.
4. Atlikus įprastinio Renkino ciklo bei organinio Renkino ciklo šiluminius skaičiavimus gauname, kad 2 MWel jėgainių šiluminė galia būtų 10 MW, organinio Renkino ciklo atveju, ir 12.38 MW įprastinio Renkino ciklo atveju, esant kogeneraciniam režimui. Tai reiškia, kad įprastinio Renkino ciklo jėgainei reikia daugiau šiluminės energijos tam, kad pagaminti tokį patį kiekį elektros, kaip ir organinio Renkino ciklo jėgainei.

5. Atliekant ekonominę analizę buvo įvertinta abiejų jėgainių instaliaciniai bei eksploatavimo kaštai. Remiantis literatūriniais šaltiniais buvo apskaičiuota specifinė investicijų kaina 2 MW_{el} galios jėgainėms. Gavome, kad organinio Renkino ciklo jėgainės specifinė investicijų kaina yra 3800 €/kW, o įprastinio Renkino ciklo yra 5000 €/kW. Galutinė 2 MW_{el} ORC jėgainės kaina yra 7.6 mln. Eurų, o RC – 10 mln. Eurų. Šioje darbo dalyje buvo vertinamos generuojamos pajamos iš šilumos bei elektros energijos pardavimo. Didesnį kiekį pajamų generuoja įprastinio Renkino ciklo jėgainė, per metus gaunanti 2.4 mln. Eurų. Tuo tarpu, organinio Renkino ciklo jėgainė generuoja tik 2.07 mln. Eurų per metus. Buvo atsižvelgta ir į patiriamas išlaidas. Išlaidos susidėjo iš trejų dedamųjų: išlaidos kurui, išlaidos eksploatacijai ir aptarnavimui bei ilgalaikių įsipareigojimų bankui. Buvo gauta, kad RC tipo jėgainė patiria 2.4 mln. Eurų išlaidų, per metus, kai ORC 1.8 mln. Eurų. Įvertinus pajamų-išlaidų balansą gauname, kad RC tipo jėgainė dirba nepelningai, nes pajamų-išlaidų balansas lygus nuliui. Tuo tarpu, ORC tipo jėgainė dirba pelningai, per metus generuodama 0.274 mln. Eurų. Nors jėgainė dirba pelningai, pelno marža yra pernelyg maža, kad investicijos atsipirktų per 20 jėgainės eksploatavimo metų. Tačiau, Europos Sąjungos struktūriniai fondai finansuoja mažos galios kogeneracinių jėgainių statybą, o paramos dydis siekia iki 60 % visų investicinių kaštų. Įvertinus ES paramą yra gaunama, kad RC jėgainė atsipirks per 11 metų, o ORC tipo jėgainė per 6 metus. RC jėgainės vidinė grąžos norma yra 5 %, o ORC – 15 %. Atlikus ekonominį vertinimą galima daryti išvadą, kad optimaliausias mažosios kogeneracijos metodas yra taikant organinį Renkino ciklą, nes tokio tipo jėgainės ekonominiai rodikliai yra geresni, nei įprastinio Renkino ciklo jėgainė.

Literatūros saraksts

1. IEA-ETSAP & IRENA. (2015). *Biomass for Heat and Power. Technology Brief*. [žiūrēta 2020-05-04]. Prieiga per internetu: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_E05_Biomass-for-Heat-and-Power.pdf
2. Darrow, K., Tidball, R., Wang, J. & Hampson, A. (2017). *Catalog of CHP Technologies*. [žiūrēta 2020-05-04]. Prieiga per internetu: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies.pdf
3. Tartiere, T. & Astolfi, M. (2017). A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia*, 129, 2-9 [žiūrēta 2020-05-05]. Prieiga per internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217340286?via%3Dihub>
4. Tchanche, B., Lambrinos, G., Frangoudakis, A. & Papadakis, G. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3963–3979 [žiūrēta 2020-05-05]. Prieiga per internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111002644>
5. Junjiang, B. & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 325-342 [žiūrēta 2020-05-05]. Prieiga per internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113001998>
6. Agromayor, R. & Nord, L. (2017). Fluid selection and thermodynamic optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery applications. *Energy Procedia*, 129, 527-53 [žiūrēta 2020-05-05]. Prieiga per internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217340948>
7. Alshammari, F., Usman, M. & Pesyridis, A. (2018). *Expanders for Organic Rankine Cycle Technology*. [žiūrēta 2020-05-05]. Prieiga per internetu: https://www.researchgate.net/publication/328791945_Expanders_for_Organic_Rankine_Cycle_Technology
8. Linares, J., Mas, M., U. & Pinilla, E., M., A. (2014). Techno-economic Feasibility Assessment of a Biomass Cogeneration Plan Based on an Organic Rankine Cycle. *Renewable Energy*, 66, 707-713 [žiūrēta 2020-05-05]. Prieiga per internetu: https://www.researchgate.net/publication/268509436_Techno-economic_Feasibility_Assessment_of_a_Biomass_Cogeneration_Plan_Based_on_an_Organic_Rankine_Cycle
9. Tocci, L., Pal, T., Pasmazoglou, I. & Franchetti, B. (2017). Small scale Organic Rankine Cycle (ORC): A techno-economic review. *Energies*, 10(4) [žiūrēta 2020-05-08]. Prieiga per internetu: https://www.researchgate.net/publication/315576101_Small_scale_Organic_Rankine_Cycle_ORC_A techno-economic_review
10. Maghanki, M., Ghobadian, B., Najafi, G. & Galogah, R. (2013). Micro combined heat and power (MCHP) technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 510-524

- [žiūrėta 2020-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211300498X>
11. Carraro, G., Bori, V., Lazzaretto, A., Toniato, G. & Danieli, P. (2020). Experimental investigation of an innovative biomass-fired micro-ORC system for cogeneration applications. *Renewable Energy*. 161, 1226-1243 [žiūrėta 2020-10-10]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/342866891_Experimental_investigation_of_an_innovative_biomass-fired_micro-ORC_system_for_cogeneration_applications
 12. Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B. & Lemort, V. (2011). Thermo-Economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering*, 31, 2885-2893 [žiūrėta 2020-10-10]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431111002663>
 13. Zhang, D. (2013). *Ultra-Supercritical Coal Power Plants: Materials, Technologies and Optimisation*. Philadelphia. Woodhead Publishing.
 14. Gimelli, A. & Luongo, A. (2014) Thermodynamic and Experimental Analysis of a Biomass Steam Power Plant: Critical Issues and their Possible Solutions with CCGT Systems. *Energy Procedia*. 45, 227-236 [žiūrėta 2020-10-12]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214000265>
 15. Zhang, Z., Zhengfei, Hu. & Schmauder, S. (2018). *Fatigue Behavior of 9–12% Cr Ferritic-Martensitic Steel*.
 16. Macchi, E. ir Astolfi, M. (2016). *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. Woodhead Publishing.
 17. Welch, M. (2015) *Improving the flexibility and efficiency of gas turbine-based distributed power plants*. [žiūrėta 2020-10-12]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/286268430_Improving_the_flexibility_and_efficiency_of_gas_turbine-based_distributed_power_plants
 18. Quoilin, S., Broek, M., V., D., Declaye, S., Dewallef, P. & Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168-186 [žiūrėta 2020-10-13]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000592#!>
 19. Lietuvos Šilumos Tiekėjų Asociacija. (2019). *Šilumos tiekimo bendrovių 2018 metų ūkinės veiklos apžvalga*. Vilnius: UAB „Baltijos kopija“
 20. Valstybinė energetikos reguliavimo taryba. (2019). *Lietuvos elektros energetikos sistemos patikimumo įvertinimo ataskaita už 2018 metus*. Vilnius.
 21. Valstybinė energetikos reguliavimo taryba (2019). *Lietuvos Respublikos elektros energijos ir gamtinių dujų rinkų metinė ataskaita Europos Komisijai*. Vilnius.
 22. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. (2011). *Elektros energijos rinkos stebėsenos ataskaita už 2010 metus*. Vilnius.

23. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija (2012). *Nacionalinė energetikos nepriklausomybės strategija*. Vilnius.
24. Turboden. (2020). *ORC World map*. [žiūrėta 2021-01-12]. Prieiga per internetą: <https://www.turboden.com/references>
25. VERT: (2020). *AB „KAUNO ENERGIJA“ INVESTUOJA Į ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBĄ IŠ BOKURO* [žiūrėta 2021-01-25]. Prieiga per internetą: <https://www.vkekk.lt/Puslapiai/naujienos/2020-metai/2020-birzelis/2020-06-04/ab-kauno-energija-investuoja-i-elektros-energijos-gamyba-is-biokuro.aspx>
26. Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija (2021). *Nedidelės galios biokuro kogeneracijos skatinimas* [žiūrėta 2021-01-25]. Prieiga per internetą: https://www.esinvesticijos.lt/lt//finansavimas/patvirtintos_priemones/nedideles-galios-biokuro-kogeneracijos-skatinimas
27. Pasetti, M., Invernizzi, C. & Iora, P. (2014). Thermal stability of working fluids for organic Rankine cycles: An improved survey method and experimental results for cyclopentane, isopentane and n-butane. *Applied Thermal Engineering*, 73. 762–772 [žiūrėta 2021-04-05]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431114006796>
28. Andersen, W. & Bruno, T. (2005). Rapid Screening of Fluids for Chemical Stability in Organic Rankine Cycle Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(15) [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/231372989_Rapid_Screening_of_Fluids_for_Chemical_Stability_in_Organic_Rankine_Cycle_Applications
29. Cole, R., L., Demirgrian, J., C. & Allen, J., W. *Predicting Toluene Degradation in Organic Rankine-Cycle Engine*. [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1987-9075>
30. VERT. *Vidutinė šalies kuro (žaliavos) kaina*. [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: <https://www.vert.lt/siluma/Puslapiai/kuro-ir-perkamos-silumos-kainos/vidutine-salies-kuro-zaliavos-kaina.aspx>
31. Gurklienė, R. (2014). *Biokuro panaudojimas Lietuvos šilumos ūkyje – nauda ir ateitis*. [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: http://www.darnistatyba.lt/biokuro-panaudojimas-lietuvos-silumos-ukyje-nauda-ir-ateitis/?fbclid=IwAR1O5rkMsdu6vxSaKMR0w3aU0eA6JF4e9rNpPodc_flEpgIZqBOQIZ54EhM
32. Patil, V., R., Biradar, V., I., Shreyas, R., Garg, P., Orosz, M., S. & Thirumalai, N., C. (2017). Techno-economic comparison of solar organic Rankine cycle (ORC) and photovoltaic (PV) systems with energy storage. *Renewable Energy*, 113, 1250-1260 [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117306110>
33. DiPippo, R. (2012). *Geothermal power plants: principles, applications case studies and environmental impact*. Elsevier. Oxford.

34. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. (2019). *Kaip nustatomos kainos?* [žiūrėta 2021-04-07]. Prieiga per internetą: <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys-3/atsinaujinantys-energijos-istekliai/aukcionai/kaip-nustatomos-kainos>
35. VERT. (2020). *Perkamos šilumos kaina pagal cšt sistemas 2020 m.* [žiūrėta 2021-04-07]. Prieiga per internetą: <https://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/Perkamos-silumos-kaina-pagal-CST-sistemas-2020-m.aspx>
36. VERT. (2020). *Faktinė biokuro biržos (skiedru) kaina (2017–2019 m.).* [žiūrėta 2021-04-07]. Prieiga per internetą: [https://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/Faktin%C4%97%20biokuro%20bir%C5%BEos%20\(skiedr%C5%B3\)%20kaina%20\(2017%E2%80%932019%20m.\)/Faktine-biokuro-birzos-\(skiedru\)-kaina-\(2017%E2%80%932019-m-\)-.aspx](https://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/Faktin%C4%97%20biokuro%20bir%C5%BEos%20(skiedr%C5%B3)%20kaina%20(2017%E2%80%932019%20m.)/Faktine-biokuro-birzos-(skiedru)-kaina-(2017%E2%80%932019-m-)-.aspx)
37. Odavic, P., Zekic, V. & Milic, D. (2017). Life cycle cost of biomass power plant: Monte Carlo simulation of investment. *Ekonomika Poljoprivrede*, 64(2):587-599 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/321989156_Life_cycle_cost_of_biomass_power_plant_Monte_Carlo_simulation_of_investment
38. Malico, I., Pereira, R., N., Gonçalves, A., C. & Sousa, A., M., O. (2019). Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 960-977 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119304150#!>
39. Latõšov, E., Volkova, A. & Siirde, A. (2011). The impact of subsidy mechanisms on biomass and oil shale based electricity cost prices. *Oil Shale*, 28(1) [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/266213640_The_impact_of_subsidy_mechanisms_on_biomass_and_oil_shale_based_electricity_cost_prices
40. IRENA (2012). Biomass for Power Generation. *Renewable energy technologies: cost analysis series*. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf
41. Strzalka, R., Schneider, D. & Eicker, U. (2017). Current status of bioenergy technologies in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 801-820 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117301089#!>
42. Branchini, L., de Pascale, A., Melino, F. & Torricelli, N. (2020). Optimum Organic Rankine Cycle Design for the Application in a CHP Unit Feeding a District Heating Network. *Energies*, 13(6) [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/339898261_Optimum_Organic_Rankine_Cycle_Design_for_the_Application_in_a_CHP_Unit_Feeding_a_District_Heating_Network
43. Lemmens, S. (2016). Cost Engineering Techniques and Their Applicability for Cost Estimation of Organic Rankine Cycle Systems. *Energies*, 9(7) [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/304301230_Cost_Engineering_Techniques_and_Their_Applicability_for_Cost_Estimation_of_Organic_Rankine_Cycle_Systems

44. Heberle, F. & Brüggemann, D. (2015). Thermo-Economic Evaluation of Organic Rankine Cycles for Geothermal Power Generation Using Zeotropic Mixtures. *Energies*, 8(3) 2097-2124 [žiūrēta 2021-05-01]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/276884722_Thermo-Economic_Evaluation_of_Organic_Rankine_Cycles_for_Geothermal_Power_Generation_Using_Zeotropic_Mixtures
45. U.S. Energy Information Administration. (2019). *EIA projects nearly 60% increase in world energy usage by 2050, led by growth in Asia*. [žiūrēta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433>
46. Ritchie, H. & Roser, M. (2020). *CO2 emissions*. [žiūrēta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
47. U.S. Energy Information Administration. (2019). *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*. [žiūrēta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>
48. U.S. Energy Information Administration. (2020). *Global Energy Review 2019*. [žiūrēta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>
49. Our World in Data. (2015). *Years in fossil fuel reserves left*. [žiūrēta 2021-05-08]. Prieiga per internetą: <https://ourworldindata.org/grapher/years-of-fossil-fuel-reserves-left>