



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Šilumos gamybos šaltinio elektros energijos apsirūpinimo  
techninė ir ekonominė galimybių studija**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Matas Metelionis**

Projekto autorius

**Doc. Algimantas Balčius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Šilumos gamybos šaltinio elektros energijos apsirūpinimo techninė ir ekonominė galimybių studija**

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

---

**Matas Metelionis**

Projekto autorius

**Doc. Algimantas Balčius**

Vadovas

**Doc. Rolandas Jonynas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Matas Metelionis

## **Šilumos gamybos šaltinio elektros energijos apsirūpinimo techninė ir ekonominė galimybių studija**

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.

Matas Metelionis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Metelionis, Matas. Šilumos gamybos šaltinio elektros energijos apsirūpinimo techninė ir ekonominė galimybių studija. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. dr. Algimantas Balčius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija, Inžinerijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: organinis Renkino ciklas, Renkino ciklas, biokuras, elektros energija, energetika.

Kaunas, 2022. 78 p.

### **Santrauka**

Pasaulyje didėjanti elektros ir šilumos energijos paklausa, aplinkosaugos problemos, naujų energijos šaltinių trūkumas – tai problemos su kuriomis šiandiena susiduria energetikos sektorius. Spręsti šiuos naujus iškilusius klausimus leidžia mažo potencialo šilumos energijos ir atsinaujinančios energijos panaudojimas. Tokios energijos tipus veiksmingai gali panaudoti organinio Renkino ciklo (toliau – ORC) technologija. Minėta technologija efektyviai sugeba išnaudoti žemos kokybės šilumą ir ją paversti naudinga elektros energija, kuri gali būti panaudojama daugybei tikslų. Todėl būtent ORC technologija yra puikus sprendimas, galintis užtikrinti šilumos gamybos objekto apsirūpinimą elektros energija. Šio baigiamo darbo tikslas – pateikti menamos biokuro vandens šildymo katilinės elektros energijos apsirūpinimo techninę ir ekonominę galimybių studiją. Pirmoje magistro darbo dalyje analizuojama biokuro ir dujinių jėgainių specifiška, naujos elektros energijos generacijos technologijos ir organinio Renkino ciklo įrenginių ypatumai. Antroje dalyje gilinamasi į ORC praktinį pritaikymą – apskaičiuojama technologijos generuojama elektros galia pagal tiekiamą šilumos energijos galią. Pasirinkus tinkamą ORC technologijos įrenginį toliau atliekama ekonominė analizė, siekiant išsiaiškinti kokią naudą duos naujos technologijos įrengimas šilumos gamybos objekte. Gauti rezultatai parodė, kad elektros generacijos įrenginio atsipirkimo laikas labiausiai priklauso nuo parduodamos elektros kainos į tinklus ir nuo biokuro pirkimo kainos.

Metelionis, Matas. Technical and Economic Feasibility Study of Electricity Self Supply in Heat Production Plant. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Algimantas Balčius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): power Engineering, Engineering Science

Keywords: organic Rankine cycle, Rankine cycle, biomass, electric power, energy.

Kaunas, 2022. 78 p.

### **Summary**

The growth of a global demand for electricity and heating energy, environmental problems and the lack of new energy sources are the biggest challenges, that the energy sector is facing nowadays. The use of low-potential thermal energy and renewable energy makes it possible to address these new issues. These types of energy can be used efficiently by organic Rankine cycle (ORC) technology. This technology which is mentioned above, is able to efficiently utilize low-quality heat and convert it into useful electricity that can be used for many purposes. That is the reason why, the ORC technology is a great solution that can ensure the supply of electricity to a heat production facility. The aim of this thesis - is to present a technical and economic feasibility study, of electricity supply boiler water heating. The first part of this thesis analyzes the specifics of biofuels and gas-fired power plants, new electricity generation technologies and the peculiarities of the organic Rankine cycle equipment. The second part of this thesis, delves into the practical application of ORC - the electric power generated by the technology is calculated according to the supplied heat energy. Once the appropriate ORC technology facility has been selected, an economic analysis is carried out to determine the benefits of installing the new technology at the heat production facility. The results that were obtained showed that the payback time of the electricity generation unit depends mostly on the price of electricity sold to the grids and on the purchase price of biofuels.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>11</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>13</b>
1.1. Biokuro vandens šildymo katilinės analizė .....	13
1.1.1. Technologijos aprašymas .....	13
1.1.2. Tiekiamas kuras .....	14
1.1.3. Generuojama galia.....	15
1.1.4. Technologijos privalumai ir trūkumai .....	15
1.1.5. Erdvės reikalavimai .....	16
1.1.6. Aplinkosauga.....	16
1.1.7. Tyrimų ir plėtros perspektyvos.....	18
1.2. Dujinė vandens šildymo katilinė .....	21
1.2.1. Technologijos aprašymas .....	21
1.2.2. Technologijos privalumai ir trūkumai .....	22
1.2.3. Aplinkosauga.....	22
1.2.4. Tyrimų ir plėtros perspektyvos.....	22
1.2.5. Rinkoje esantys standartiniai technologijos pavyzdžiai .....	22
1.3. Elektros generavimo technologinės alternatyvos .....	24
1.3.1. Fotovoltinės saulės jėgainės .....	24
1.3.2. Biokuro gazifikacinės elektrinės .....	27
1.3.3. Mikroturbinos .....	30
1.3.4. Kuro elementai .....	32
<b>2. Organinio Renkino ciklo analizė.....</b>	<b>35</b>
2.1. ORC apžvalga.....	37
2.2. ORC veikimas .....	37
2.3. Organinio darbo agento parinkimas .....	40
2.4. Palyginimas su garo Renkino ciklu .....	43
2.5. ORC technologijos integravimas su atsinaujinančiais energijos šaltiniais.....	45
2.5.1. Biokuro ORC jėgainės.....	45
2.5.2. Saulės ORC jėgainės .....	46
2.5.3. Kombinuoto ciklo ORC jėgainės.....	48
2.5.4. Geoterminės ORC jėgainės .....	49
2.5.5. Vandenyno ORC jėgainės .....	50
<b>3. ORC modeliavimas biokuro katilinėje .....</b>	<b>53</b>
3.1. Dabartinė situacija .....	53
3.2. Energijos išteklių kainos.....	53
3.2.1. Šilumos pardavimo kainos .....	53
3.2.2. Elektros energijos kaina .....	55
3.3. Šilumos energijos gamyba biokuro katilinėje .....	57
3.3.1. Šilumos gamybos šaltiniai .....	57
3.3.2. Biokuro katilinėje pagaminamas šilumos kiekis .....	58
3.4. ORC technologijos įrengimo tikslingumo vertinimas .....	58

3.4.1. Technologijos aprašymas .....	58
3.4.2. ORC įrenginio galios parinkimas .....	60
3.4.3. Preliminarios ORC įrenginio pajungimo schemos sudarymas .....	61
3.4.4. ORC įrenginio įsigijimo ir įrengimo sąnaudų nustatymas .....	61
3.4.5. Techninis – finansinis įrenginio įvertinimas .....	63
<b>4. Techninio – finansinio įvertinimo rezultatai .....</b>	<b>66</b>
4.1. Parametrų jautrumo analizė .....	67
<b>Išvados .....</b>	<b>71</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>72</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>78</b>
1 Priedas. AT500 Simuliacija.....	78

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Biokuro vandens šildymo katilinės duomenys (kuras – medienos skiedros) [3] .....	20
<b>2 lentelė.</b> Dujinės vandens šildymo katilinės duomenys [3] .....	23
<b>3 lentelė.</b> Vietinės generacijos pasiskirstymas pagal galią [31].....	36
<b>4 lentelė.</b> RC ir ORC palyginimas .....	45
<b>5 lentelė.</b> Elektros energijos kainos dedamosios biokuro katilinėje (2021 metų vasario mėnesį)....	55
<b>6 lentelė.</b> Biokuro katilų techninės charakteristikos .....	58
<b>7 lentelė.</b> Ekonominio vertinimo suvestiniai rezultatai .....	66
<b>8 lentelė.</b> Elektros ir kuro kainos optimistiniais, realistiniais ir pesimistiniais scenarijais .....	67
<b>9 lentelė.</b> Trys ORC variantai pagal skirtingą elektros kainą.....	68
<b>10 lentelė.</b> Trys ORC variantai pagal skirtingą šilumos gamybos savikainą.....	69



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> SNCR sistema NO <sub>x</sub> emisijai mažinti [2] .....	17
<b>2 pav.</b> SCR sistema NO <sub>x</sub> emisijai mažinti [2] .....	18
<b>3 pav.</b> „Filter“ firmos dūmavamzdžio vandens šildymo katilas [4] .....	21
<b>4 pav.</b> Principinė saulės modulio schema [7] .....	24
<b>5 pav.</b> Dažais įjautrinto fotovoltinio elemento krūvininkų generacijos procesas [14] .....	26
<b>6 pav.</b> Saulės elementų gamyba pagal skirtingą technologiją [19] .....	27
<b>7 pav.</b> „Volter“ atstovo gazifikatorius [23] .....	28
<b>8 pav.</b> Gazifikatoriaus principinė schema [23] .....	29
<b>9 pav.</b> „SCADA“ valdymo langas [23] .....	30
<b>10 pav.</b> Kogeneracinės jėgainės su mikroturbina principinė schema (kuras – dujos, dyzelinas): 1 – aplinkos oras, 2 – oro kompresorius, 3 – velenas, 4 – turbina, 5 – kuras, 6 – degimo kamera, 7 – degimo produktai, 8 – generatorius, 9 – elektros energija, 10 – rekuperacinis oro šildytuvas, 11 – atliekinės šilumos pasisavinimo šilumokaitis, 12 – kaminas, 13 – šilumos vartotojai [26] .....	31
<b>11 pav.</b> Capstone Turbine Corporation mikroturbina C60 [26] .....	32
<b>12 pav.</b> Kuro elemento su polimerinio elektrolito membrana veikimo schema [28] .....	33
<b>13 pav.</b> Elektros generacijos sistemos ir technologijos .....	37
<b>14 pav.</b> Supaprastinta ORC schema [40] .....	38
<b>15 pav.</b> ORC temperatūros – entropijos diagrama .....	39
<b>16 pav.</b> Principinė ORC schema su rekuperatoriumi .....	39
<b>17 pav.</b> ORC su rekuperatoriumi temperatūros – entropijos diagrama .....	40
<b>18 pav.</b> Sausų, izentropinių ir šlapių garų temperatūros – entropijos diagrama .....	42
<b>19 pav.</b> Įprastų šaltnešių ir vandens sočiųjų garų specifinis tūris, palyginant su sočiųjų medžiagų temperatūra .....	42
<b>20 pav.</b> Vandens ir organinių darbo agentų temperatūros-entropijos diagrama .....	44
<b>21 pav.</b> Biokuro ORC jėgainės schema [58] .....	46
<b>22 pav.</b> Saulės ORC jėgainės schema .....	47
<b>23 pav.</b> Dujų turbinos su ORC technologija schema .....	48
<b>24 pav.</b> Geoterminės ORC jėgainės schema .....	50
<b>25 pav.</b> Vandenyne ORC jėgainės principinė schema .....	51
<b>26 pav.</b> Optimaliausių darbo agentų sąrašas, atsižvelgiant į šilumos šaltinio temperatūrą ir darbo agento kritinę temperatūrą .....	52
<b>27 pav.</b> Biokuro katilinės Lietuvos miestuose [76] .....	53
<b>28 pav.</b> Realizuojama šilumos kaina .....	54
<b>29 pav.</b> Vidutinė šilumos kaina Lietuvoje, ct/kWh be PVM, 2012–2021 metais [77] .....	54
<b>30 pav.</b> Biokuro katilinės elektros energijos kaina ir poreikis .....	56
<b>31 pav.</b> Elektros sunaudojimas šilumos gamybos gamybai (kWh/MWhš - Lyginamosios šilumos gamybos elektros energijos sąnaudos; kgne/MWhš - Lyginamosios kuro sąnaudos) [75] .....	56
<b>32 pav.</b> Kintama elektros kaina verslui [78] .....	57
<b>33 pav.</b> Šilumos gamyba biokuro katilinėje .....	58
<b>34 pav.</b> Šiluminių elektrinių efektyvumas priklausomai nuo šilumos šaltinio temperatūros [80] .....	59
<b>35 pav.</b> ORC technologijos teorinis efektyvumas įvertinus šilumos šaltinio ir aušinančios terpės temperatūras [81] .....	60
<b>36 pav.</b> ORC įrenginio pajungimo principinė schema .....	61

<b>37 pav.</b> Santykinės ORC technologijos investicijos .....	62
<b>38 pav.</b> „Againity“ AT500 ORC įrenginys .....	63
<b>39 pav.</b> Atsipirkimo laikas pagal skirtingą elektros kainą .....	68
<b>40 pav.</b> Atsipirkimo laikas pagal skirtingą šilumos gamybos savikainą.....	69

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

ORC – organinis Renkino ciklas;

RC – Renkino ciklas;

CŠT – centralizuotas šilumos tiekimas;

VERT – valstybinė energetikos reguliavimo taryba;

IRR – vidinė gražos norma;

WACC – Vidutiniai svertiniai kapitalo kaštai.

### Terminai:

**ORC technologija (blokas)** – elektros generacijos įrenginys, naudojantis mažo potencialo šilumos energiją (*angl.* ORC technology).

## Įvadas

Klimato pokyčiai ir energetika, tai bendrai susiję iššūkiai su kuriais šiomis dienomis susiduria visuomenė. Atsinaujinančios energetikos naudojimas, iškastinio kuro vartojimo mažinimas, efektyvus energijos vartojimas ir gamyba, tai pagrindiniai veiksniai, kurie prisideda prie CO<sub>2</sub> mažinimo strategijos. ORC technologijos naudojimas gali įdarbinti mažo potencialo šilumos energiją, tokią kaip biokuro energiją, saulės energiją, geoterminę energiją ir netgi vandenynų energiją. Būtent dėlto ORC sistema galėtų dar efektyviau išnaudoti atsinaujinančią energiją, taip padidinus energijos vartojimo efektyvumą ir sumažinus CO<sub>2</sub> išmetimą.

Dėl minėtų ORC privalumų, paskutiniaisiais metais ši technologija sulaukė itin didelio susidomėjimo, buvo atlikta daugybė mokslinių tyrimų. Moksliniuose straipsniuose ir tyrimuose labiausiai gilinamasi į sistemos projektavimą, jos optimizavimą, darbo agentų parinkimą ir ciklo konfigūracijos tobulinimą. Visus šiuos mokslinius tyrimus vienija keli tikslai – generuojamos grynosios elektros galios padidėjimas ir šiluminis efektyvumas. Atlikus vis daug tyrimų buvo pradama gilintis ir į ekonominius rodiklius. Skaičiuojama bendra investicija į įrangą, atsipirkimo laikas ir grynoji dabartinė vertė. Taip pat skaičiuojami CO<sub>2</sub> išmetimai į aplinką. Visi šie aptarti rodikliai parodė gana neprastus rezultatus, dėl šios priežasties ORC sulaukia vis daugiau dėmesio.

Organinio Renkino ciklo technologijos panaudojimas yra itin patrauklus centralizuotame šilumos tinkle, kur yra dideli pertekliniai šilumos kiekiai ir elektros kaina nėra maža. ORC gali užtikrinti elektros energijos poreikio 90-100 % patenkinimą biokuro vandens šildymo katilinėms. Vasaros metu neišnaudojami pertekliniai biokuro MW, ypač mažesnėse sistemose, gali būti išnaudojami elektros gamybai savoms reikmėms, užtikrinant geresnį katilo darbo režimą. Tokia bendra dviejų sistemų sinchronizacija ne tik sumažina šildymo savikainą, tačiau neša papildomą pelną šilumos gamybos įmonėms. Priemonės įdiegimas leistų sumažinti bendras įmonės sąnaudas elektros energijai apie 33 %, įrenginiams dirbant ištisus metus.

**Tyrimo tikslas.** Parengti menamos biokuro vandens šildymo katilinės elektros energijos apsirūpinimo techninę ir ekonominę galimybių studiją.

### **Tyrimo uždaviniai:**

1. Išnagrinėti biokuro ir dujines vandens šildymo katilines, išanalizuoti jų parametrus, elektros suvartojimą ir apžvelgti trūkumus bei privalumus;
2. Išanalizuoti naujausias elektros energijos generacijos technologijas ir tendencijas;
3. Parinkti metodologiją: organinio Renkino ciklo skaičiavimas, ekonominio įvertinimo skaičiavimas nustatant atsipirkimo laiką;
4. Sumodeliuoti ORC sistemą biokuro katilinėje ir nustatyti įdiegimo techninius ir ekonominius parametrus.

## **1. Literatūros analizė**

### **1.1. Biokuro vandens šildymo katilinės analizė**

#### **1.1.1. Technologijos aprašymas**

Energijos konversija biokuro vandens šildymo (toliau – HOP) ar kogeneracinėse (toliau – CHP) katilinėse – tai medienos atliekų iš miškininkystės ūkio arba medienos pramonės deginimas. Lietuvoje plačiausiai naudojama biokuro rūšis, tai medienos „čipsai“. Pasaulio rinkoje taip pat yra deginama medienos granulės ar šiaudai. Pagrindiniai techniniai skirtumai tarp šių dviejų katilinių – elektros gamyba. Ši energijos rūšis yra gaminama tik kogeneracinėje jėgainėje, bet ne HOP.

Pasauliniu mastu biokuro kogeneracinės šilumos ir elektros energijos gamybos technologijos naudojamos vis plačiau. Tuo pačiu pritaikomos ir naujos skirtingos technologijos. Klasikinis procesas yra biomasės deginimas katile, maitinančiame garo turbiną. Energija iš katilo yra arba karštas vanduo, skirtas tiesiogiai naudoti centralizuotam šildymo tinklui (CŠT), arba tai gali būti (aukšto slėgio) garai, plintantys turbinoje. Turbinos būna priešslėgio arba kondensacinės. Priešslėgio turbinoje plėtimasis baigiasi kondensatoriuje, kuris būna pajungtas centralizuotoje šilumos tinkle, kai slėgis yra apytiksliai 0,4 bar. Kondensacinėje turbinoje plėtimasis vyksta iki žemiausio galimo slėgio – apytiksliai 0,025 bar., kurį užtikrina vandeniui aušinamas kondensatorius. Kondensacinė turbina gali veikti priešslėgio, tiek kondensacijos režimu.

Išmetamųjų dujų kondensacijos taikymas tolesniam energijos atgavimui yra įprastas reiškinys biomasės katilinėse, kuriose deginamas daug drėgmės turintis biokuras, pvz. medienos „čipsus“. Įrenginys, kuris leidžia atgauti papildomą šiluminę energiją iš išeinančių dūmų, vadinamas kondensaciniu ekonomizeriu. Tačiau šis įrenginys nėra naudojamas mažos galios katilinėse (mažiau nei 2 MW<sub>šil</sub>), dėl papildomų kapitalo, eksploatavimo ir priežiūros kaštų. Jėgainėse, kuriuose nėra dūmų kondensacijos, paprastai yra suprojektuotos naudoti kitą biomasės kurą, kurio drėgnumas mažesnis nei 30 %.

Vis dėlto dūmų kondensatas galimas ir šiaudų deginimui. Išmetamųjų dujų kondensacija gali padidinti efektyvumą maždaug 10 %, remiantis modelio skaičiavimais (esant 40 °C grįžtamojo vandens temperatūrai), o tai reiškia, kad kondensacijos efektyvumas ir gražinimo temperatūra padidės, palyginti su ankstesniais rodikliais, t. y. 5–10 %. Šiuo metu Lietuvoje tik keliuose šiaudais kūrenamuose katilinėse yra įrengta dūmų kondensavimo sistema.

Katilinėse, kuriose yra deginama šiaudai paprastai yra įrengiamas maišinis filtras išmetamųjų dujų valymui. Elektrostatiniai filtrai neveikia taip efektyviai kūrenant šią biokuro rūšį, dėl šiauduose susidarančių druskų nuosėdų.

#### **ORC jėgainė**

Alternatyvi jėgainė gali būti Organinio Renkino ciklo jėgainė (ORC jėgainė). Čia (biomasės) katilas naudojamas kaitinti (be garavimo) šiluminę alyvą iki šiek tiek aukštesnės nei 300 °C temperatūros. Ši įkaitinta alyva perduoda šilumą ORC įrenginiui, kuris yra panašus į garo ciklą, tačiau kaip darbo terpėje vietoj vandens naudojamas šaltnešis.

Susidomėjimo ORC jėgainėmis priežastis yra ta, kad tokia įranga yra pristatoma standartizuotuose komplektuose už patrauklią kainą. O derinys su katilu, kuris yra tik naudojamas alyvai šildyti. Investicijos yra gana nedidelės.

ORC technologija yra mažo potencialo atliekinės šilumos atgavimo technologija, naudojama elektros energijos gamybai. ORC blokas yra gamykloje surinktas tam tikras modulis, dėl šios priežasties jie yra mažiau lankstūs, bet sąlyginai pigūs. Dėl to gali būti finansiškai patrauklu statyti mažos galios kogeneracinius įrenginius. Žodis „Renkino“ nurodo, kad ši technologija, panaši į tradicinį vandens garų Renkino ciklą. Pagrindinis skirtumas yra terpės, t. y. šaltnešio arba silikoninės alyvos (organinio junginio, kuris gali degti, bet nesprogsta) naudojimas. Šaltnešio termodinaminės savybės yra tinkamesnės nei vandens, dėl žemos temperatūros energijos gamybai.

### **1.1.2. Tiekiamas kuras**

Kuras, kuris yra naudojamas biokuro katilinėje yra vadinamoji biomasė. Šioje katilinėje yra deginama: medienos pramonės likučiai, medienos skiedros, dar kitaip plačiai naudojama sąvoka – „medienos čipsai“. Taip pat sėkmingai praktikoje yra naudojami šiaudai ir kiti energetiniai augalai. Medienos skiedros deginamos tada, kai jų drėgmė nesiekia daugiau nei 60 %, o šiaudų – iki 25 %. Darbe nagrinėjami trys biokuro žaliavos tipai: medienos „čipsai“, medienos granulės ir šiaudai. Šios kuro rūšys keliais parametrais labai stipriai skiriasi (granuliuotumas, drėgmė, pelenų kiekis ir sudėtis, tankis ir smulkumas).

Kartais gamykloje galima pakeisti kurą iš vienos rūšies biomasės į kitą, tačiau tai turi aiškiai garantuoti gamyklos tiekėjas. Žemiau pateikiamas platus biomasės kuro aprašymas.

Mediena (ypač drožlių pavidalu) paprastai yra pati palankiausia biomasė deginti, nes joje yra mažai pelenų, azoto ir šarminių metalų, tačiau paprastai skiedros drėgnumas yra 45 %, o granulės – mažiau nei 10 %. Žolinės biomasės, tokios kaip šiaudai, mискantas ir kiti vienmečiai/greitai augantys augalai, turi didesnę kalio, azoto, chloro, sieros ir kt. medžiagų kiekį, todėl išskiriamas didesnis NO<sub>x</sub> ir kietųjų dalelių kiekis. Visa tai padidina pelenų susidarymą, korozijos greitį ir šlako nuosėdas.

Rinkoje yra ir kitų egzotiškų biomasės alternatyvų, tokių kaip tuščių vaisių kekių granulės (EFB) ir palmių branduolių lukštai (PKS), visgi tokių eksploatavimo pavyzdžių pasaulyje nėra itin daug.

Miško pramonės atliekos paprastai būna pristatomos kaip medžio drožlės („čipsai“). Miško liekanos taip pat gali būti pristatomos granuliu pavidalu. Gaminant granules kuras yra džiovinamas iki 10 % drėgnumo lygio. Šiuo metu miško biomasės naudojimas energetikos reikmėms sudaro tik nedidelę dalį palyginus su visos miško biomasės produkcija. Pavyzdžiui tokioms pramonėms šakoms kaip, mediena, popierius ir kitos pramonės šakos, biomasės yra sunaudojama žymiai didesni kiekiai. Taigi, energetikos tikslais naudojama biomasė paprastai yra kaip liekamasis produktas. Taip pat reikėtų paminėti, jog medienos kaina energetikos tikslams yra žymiai mažesnė nei medienos kaina pramoniniams tikslams. Be to, pasaulinės apžvalgos rodo, kad didėja susidomėjimas kitų rūšių biomasės pertekliumi iš pramoninės gamybos. Tai būtų atliekiniai produktai iš vyno daryklų, alyvuogių aliejaus gamybos, cukraus gamybos ir t.t.

Medienos drožlės („čipsai“) – tai 5-50 mm medienos gabaliukai, ilgesnės šakelės (drožlės), dažniausiai smulkios frakcijos. Kokybės aprašymas yra pagrįstas trijų rūšių medienos „čipsais“:

smulkūs, stambūs ir ypač stambūs. Pavadinimai nurodo tik drožlės dydį, o ne kokybę. Smulkios dalelės, taip pat ploni, ilgi pluoštai gali sukelti problemų (jei katilas yra su grotelėmis).

Lietuvoje esančiose vandens šildymo ir kogeneracinėse katilinėse, priklausomai nuo technologijos, galima deginti iki 60 % drėgnumo medienos drožles. Daug drėgmės turinčios medienos drožlės dažnai maišomos su sausomis medienos drožlėmis. Mažesniuose įrenginiuose kūrenant medžio drožles naudojama grotelių degimo technologija, o kai kuriuose didesniuose įrenginiuose naudojama cirkuliuojantis verdančio sluoksnio (CFB) arba verdančio sluoksnio (BFB) katilų technologija.

Medienos granulės gaminamos iš medžio “čipsų”, pjuvenų, medžio drožlių ir kitų medienos gamintojų likučių. Granulės yra gaminamos kelių rūšių ir atitinka tam tikras kokybes klases. Elektrinėms ir vandens šildymo katilinėms granulės yra naudojamos prastesnės kokybės, o privatiems - gyvenamiesiems namams, naudojama aukštos kokybės kuras. Granulės kaip kuras yra ypač tankus (netgi dvigubai tankesnės nei paprasta mediena) ir gali būti gaminamos su mažu drėgnumo lygiu (mažiau nei 5 % aukštos kokybės gaminiams), todėl jas lengva sandėliuoti (įskaitant ilgalaikį saugojimą) ir dega su dideliu degimo efektyvumu. Būtina paminėti, kad drėkinamos granulės yra linkusios savaime užsidegti. Mechanškai apdorojant, pvz., transportuojant konvejeriu, granulės gali suirti ir pavirsti į dulkes, šios dulkės yra labai sprogios ir todėl kelia rimtą pavojų. Lietuvos katilinėse, kuriose naudojamos medienos granulės arba skiedros, turi užtikrinti kuro tvarumą.

### **1.1.3. Generuojama galia**

Biokuro kogeneracinių elektrinių produktai yra elektra ir šiluma. Prie šilumos yra priskiriami garai (temp. didesnė nei 110 °C) ir karštas vanduo centralizuotam šilumos tinklui (temp. mažesnė nei 110 °C).

Pagrindinis generuojamas produktas biokuro vandens šildymo katilinėje yra karštas vanduo centralizuotam šilumos tinklui arba žemo slėgio garai pramoniniams tikslams. Vandens šildymo katilinių ir kogeneracinių elektrinių energijos vartojimo efektyvumas yra identiškas. Tačiau vandens šildymo katilinėje nėra šilumos nuostolių generatoriuje ir turbinos pavaru dėžėje, kadangi HOP neturi šių įrenginių, atvirkščiai nei CHP. Taigi šilumos gamyba iš HOP yra identiška (arba šiek tiek didesnė) nei pagamintos elektros ir šilumos suma iš lygiavertės kogeneracinės elektrinės.

Išmetamųjų dujų kondensacijos atveju kondensato perteklius gali būti paverčiamas aukštos kokybės vandeniu, kuris gali būti naudingas techniniams tikslams, pavyzdžiui, katilo vandeniui arba centralizuoto šilumos tiekimo tinklo vandens nuostoliams padengti.

Biokuro vandens šildymo katilinių tipiniai pajėgumai yra 1–50 MW. Daugumos centralizuoto šilumos tiekimo įrenginių galia yra mažesnė nei 15 MW, o vidutinis dydis – 5–6 MW<sub>šil</sub>, priklausomai nuo kuro [1].

### **1.1.4. Technologijos privalumai ir trūkumai**

#### **Privalumai:**

Biokuras yra atsinaujinantis energijos šaltinis, tai yra bene svarbiausias šios tipo katilinės privalumas. Kitaip nei dujų, anglies ar naftos susidarymas užtrunka milijonus metų, o biomasės susidarymas yra žymiai greitesnis. Kol augalai bus auginami, tol biokuro atsiras vis daugiau.

Mažina CO<sub>2</sub> išmetimą į aplinką. Sulaukęs daug laiko augalas, pūdamas į atmosferą išmeta anglies dioksidą. Kai tuo metu ta pati biomasė gali būti panaudota sudeginti biokuro pakuroje. Čia laimima šiluminė energija, išmetant tą patį CO<sub>2</sub> kiekį.

Biokuro katilinės yra itin efektyvios. Jų efektyvumas siekia apie 90 %, o pasitelkiant kondensacinį ekonomaizerį, efektyvumas viršija ir 100 %.

### **Trūkumai:**

Biokuro jėgainė užima nemažai vietos, jiems reikia daugiau vietos nei pvz. dujomis kurenamai jėgainei. Katilinę sudaro tokie įrenginiai kaip: didelių gabaritų pakura, vandens šildymo katilas, biokuro transporteris, slankiojančios grindys, ekonomaizeris. Visi šie įrenginiai reikalauja didelio ploto. Svarbu atkreipti dėmesį, kad biokurą privaloma sandėliuoti. Atsargų laikymas užima nemažą plotą.

Kaip yra žinoma, jog biomasė yra gaunama iš miškininkystės ar augalijos atliekų. Šiuo metu yra susiduriama su miškų kirtimo problema. Teigiama, kad iškirsti medžiai yra atsodinami naujais sodinukais, tačiau šis ciklas reikalauja laikytis itin griežtų žemėtvarkos reikalavimų. Didėjant biomasės jėgainių skaičiui, biokuro paklausa atitinkamai padidės, o tai darys didesnę spaudimą medžio ištekliams, kuriems jau kyla pavojus dėl kitų pramonės šakų.

#### **1.1.5. Erdvės reikalavimai**

Plotas, kuris skirtas pastatams ir kuriuose yra technologinė įranga, yra apskaičiuojamas įvairiai. Administracijai, valgyklai, garažams, dirbtuvėms ir pan., nepriklausomai nuo katilinės dydžio, vietos ploto yra skirta sąlyginai mažai. Labiausiai yra atsižvelgiama į papildomą plotą, kuris bus skirtas biokuro tvarkymui, sunkvežimių manevravimui ir svėrimui, transporto priemonių parkavimui, keliams ir kitai laisvai zonai. Iš viso privalo būti užtikrinamas pagrįstas ploto naudojimo procentas.

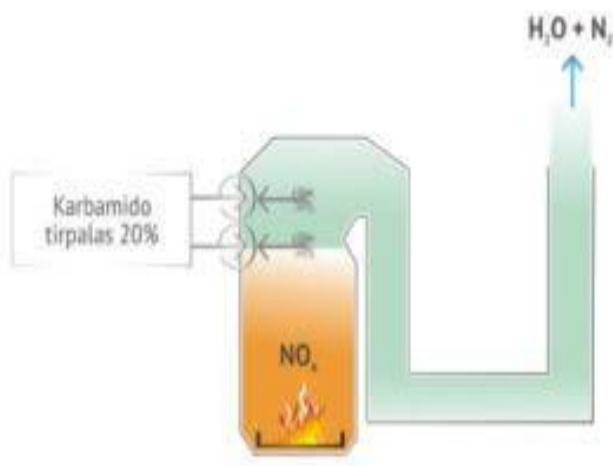
#### **1.1.6. Aplinkosauga**

Pagrindiniai biokuro deginimo ekologiniai padariniai - pastovus toksiškumas, klimato kaita (ŠESD) ir rūgštėjanti aplinka. Tačiau šie pėdsakai nėra laikomi labai dideliais [1]. Visgi ši tema visuomenėje yra diskutuotina. Daugiausia yra kalbama apie medieną - panašią į biomasę ir apie jos tvarumą elektros energijos gamybai. Tyrimai parodė, kad biokuru kūrenamos elektrinės gali itin stipriai sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą, lyginant su iškastinių kurą kūrenamomis katilinėmis. Tačiau reiktų paminėti ar biomasė išteklių požiūriu yra perspektyvus ilgalaikis sprendimas.

NO<sub>x</sub> emisijas galima sumažinti maždaug 60–70 % taikant selektyvinį nekatalitinį valymą (SNKV) biokuro katilinėse. Naudojant selektyvųjį katalizinį redukavimą (SCR), NO<sub>x</sub> emisiją galima sumažinti 80–90 %. Selektinio nekatalizinio redukavimo (SNCR), kaip ir selektinio katalizinio redukavimo (SCR) veikimas pagrįstas amoniakinio vandens ar karbamido sąveika su kenksmingomis azoto oksido dujomis (NO<sub>x</sub>). SNCR technologijoje nėra katalizatoriaus, todėl labai svarbu ir privalo nustatyti tinkamą darbo terpės temperatūros režimą, kad azotų oksidų (NO<sub>x</sub>) emisija būtų maksimaliai ir efektyviai sumažinta. Naudojant amoniakinį vandenį, kurio modelis – „AZO NO<sub>x</sub> AV1“, NO<sub>x</sub> temperatūra privalo būti apie 870–985 °C. Temperatūrai esant didesnei nei 1000 °C, amoniakas reaguoja ir pavirsta kenksmingomis azoto monoksido dujomis (NO).



SNCR technologija plačiai taikoma daugumoje pramonės šakų ir kurą deginančiuose įrenginiuose (atliekų deginimo, plieno, biokuro, naftos perdirbimo ir kt.), kaip itin efektyvi azoto oksidų susidarymą mažinanti technologija. SNCR technologija sumažina NO<sub>x</sub> emisiją iki 80 %, o geriausiu atveju gali pasiekti net ir 95 % sumažėjimą.



**1 pav.** SNCR sistema NO<sub>x</sub> emisijai mažinti [2]

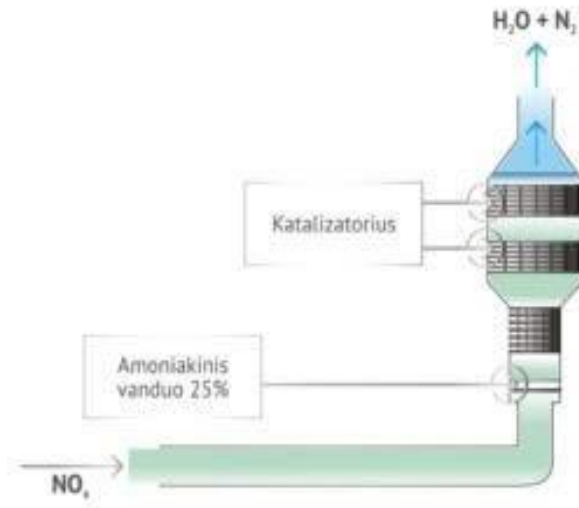
1 paveikslėlyje nurodama, kad pasirinktas karbamido tirpalas iš talpos per purkštukus yra paduodamas į pakuros vidų. Itin svarbu, kad SNCR sistema dirbtų pagal tikslų darbo režimą. Privalo būti optimizuotas tirpalo įpurškimas į išmetamąsias NO<sub>x</sub> dujas, esant tiksliai nustatytai ir apibrėžtai temperatūrai. Po išpurkšto tirpalo ir įvykusių reakcijų, galutiniai SNCR technologijos susidarę produktai – N<sub>2</sub> ir H<sub>2</sub>O. Pagrindiniai SNCR sistemos procesų efektyvumo veiksniai, kurie mažina NO<sub>x</sub> emisiją:

- Pastovi išmetamųjų dujų temp. reakcijos zonoje;
- Pirminė NO<sub>x</sub> koncentracija;
- Susidariusių išmetamųjų dujų temp. reakcijos zonoje;
- Karbamido tirpalo arba amoniako vandens įpurškimo dažnis į pakurą;
- Pakuros konfigūracija, nuo kurios dažniausiai priklauso purkštukų išdėstymo tvarka.

#### **SNCR technologijos privalumai:**

- SNCR technologijos įdiegimas kainuoja žymiai mažiau nei SCR sistema;
- Greitas technologijos įrengimas;
- SNCR technologija atitinka aukštus saugumo ir kokybės reikalavimus;
- Lietuvoje SNCR sistema diegiama ir energetikos šakoje (katilinėse).

Selektyviojo katalizinio redukavimo (SCR) veikimas yra labai panašus į SNCR sistemos, tačiau amoniako ir azoto oksido dujų (NO<sub>x</sub>) sąveika vyksta esant papildomai katalizatoriui. SCR technologijoje katalizatoriaus pagalba NO<sub>x</sub> sumažėja net 95 %.



**2 pav.** SCR sistema NOx emisijai mažinti [2]

Iš 2 paveikslėlio matoma, jog amoniakinis vanduo – SCR sistemoje yra paduodamas taip per purkštukus ir sumaišomas su kenksmingomis išmetamosiomis dujomis (NOx) prieš katalizatorių. Toks dujų mišinys toliau pereina per katalizatoriaus atskirus sluoksnius, kur NOx dujos paverčiamos nekenksmingomis ir neutraliomis azoto dujomis (N<sub>2</sub>) ir vandens (H<sub>2</sub>O) garais. Siekiant, kad SCR sistema veiktų efektyviai, reikia palaikyti 300–350 °C temperatūrą.

#### **SCR technologijos privalumai:**

- Kenksmingų dujų sumažinimas yra net iki 95 %, todėl sistema gali būti naudojama esant griežčiausioms sąlygoms ir reikalavimams;
- Degimo temperatūra mažesnė nei SNCR technologijoje [2].

Tikimasi, kad ateityje NOx emisijų ribinės vertės bus palaipsniui griežtinamos. Degimo valdymo technologija, katilo konstrukcija ir SNCR technologijos patobulinimai gali sumažinti SCR poreikį, tačiau tikimasi, kad SCR taikymas ateityje padidės.

#### **1.1.7. Tyrimų ir plėtros perspektyvos**

Tiek biokuro kogeneracinės elektrinės, tiek vandens šildymo katilinės yra šiandien gerai žinomos technologijos, kurių yra pastatyta pakankamai daug. Vis dar galima tikėtis patobulinimų, bet tik ne per greitą laiką.

Biokuro katilinių modernizacija yra labai svarbi ir neatsiejama energetikos dalis šiomis dienomis. Modernizacija yra siejama su katilinių efektyvumo didinimu ir mažesniais sąnaudomis. Žvelgiant į dabartinę elektros kainą buitiniams ir pramoniniams objektams, privalu imtis tam tikrų veiksmų energijos gamybos išlaidoms mažinti. Vienas iš perspektyvių technologinių sprendimų - elektros energijos gamyba pačioje vandens šildymo katilinėje. Elektros energija būtų naudojama savoms reikmėms. Elektra būtų panaudojama oro ventiliatoriams, transporteriams, hidrovareikiams ir kitiems įrenginiams. Toks sprendimas ne tik sumažintų šilumos gamybos kainą, bet ir padidintų bendrą vandens šildymo katilinės efektyvumą.

Ekonominis skirtumas tarp kogeneracinių elektrinių, kurios gamina garą (taip pat ir elektrą) ir vandens šildymo katilinių, kurios tiekia šiltą vandenį į CŠT yra gana didelis. Vandens šildymo katilai, kurie negamina garo yra gaminami serijiniu būdu, todėl jie yra daug pigesni nei perkaitinto garo katilai. Šiuo atveju yra kalbama apie vienodą galią abejems įrenginiams.

Šiuo metu populiariausios ir paklausios yra vandens šildymo katilinės, kurių galia iki 20 MW, o deginamas biokuras - medienos skiedros ("čipsai"). Tokio tipo katilinėse biokuro katilai yra mažiau, daugiau gaminami serijiniu būdu, o tai reiškia mažesnes kapitalo ir priežiūros, išlaikymo sąnaudas. Detalę biokuro katilinės specifikaciją galima matyti 1 lentelėje [3].

**1 lentelė.** Biokuro vandens šildymo katilinės duomenys (kuras – medienos skiedros) [3]

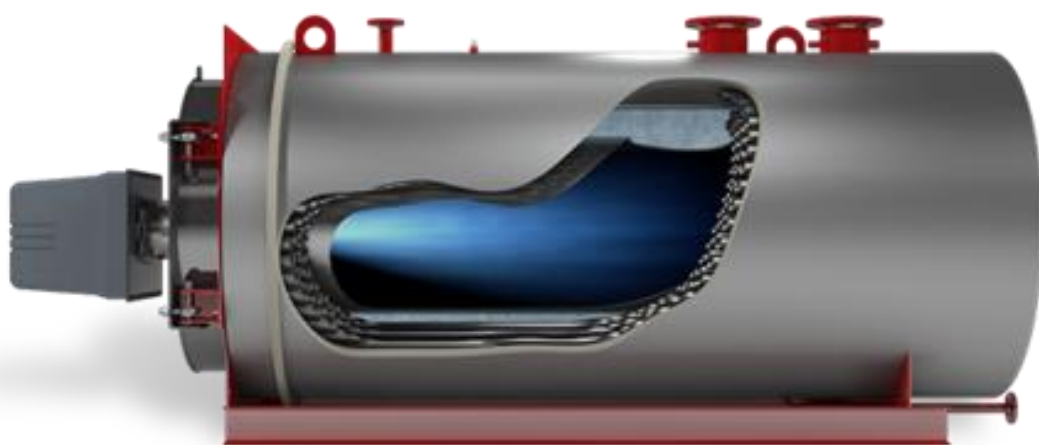
Technologija	Medienos skiedromis kūrenama 6 MW biokuro katilinė			
	2015	2020	2030	2050
<b>Metai</b>				
<b>Techniniai parametrai</b>				
Šiluminė galia (MW)	6,8	6,8	6,8	6,8
Bendras efektyvumas, grynasis (%), vardinis	114,0	114,0	114,0	114,0
Bendras efektyvumas, grynasis (%), metinis vidurkis	114,0	114,0	114,0	114,0
<b>Papildomas elektros energijos suvartojimas ( % šilumos generavimui)</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>
Priverstinis sustabdymas (%)	3,0	3,0	3,0	3,0
Planuojamas sustabdymas (savaitės per metus)	2,0	2,0	2,0	2,0
Techninis eksploatavimo trukmė (metai)	25,0	25,0	25,0	25,0
Statybos laikas (metai)	1,0	1,0	1,0	1,0
Vietos poreikis (1000 m <sup>2</sup> /MW šilumos galiai generuoti)	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Reguliavimas</b>				
Pirminis reguliavimas (% per 30 sekundžių)	Neįmanoma	Neįmanoma	Neįmanoma	Neįmanoma
Antrinis reguliavimas (% per minutę)	10,0	10,0	10,0	10,0
Minimali apkrova (% visos įkrovos)	20	20	20	20
„Karšto starto“ laikas (valandomis)	0,3	0,3	0,3	0,3
„Šalto starto“ laikas (valandomis)	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Finansiniai duomenys</b>				
Nominali investicija (M€/MW – šilumos galiai)	0,71	0,69	0,66	0,59
- iš kurių įranga	0,41	0,40	0,38	0,34
- iš kurių įrengimas	0,30	0,29	0,28	0,25
Fiksuotos išlaidos (€/MWšil/metus)	33 000	32 500	31 500	29 600
Kintančios išlaidos (€/MWh)	2,59	2,72	3,43	3,78
- iš jų elektros sąnaudos (€/MWh-šiluma)	1,40	1,53	2,24	2,59
- iš jų kitos išlaidos (€/MWh-šiluma)	1,19	1,19	1,19	1,19

## 1.2. Dujinė vandens šildymo katilinė

### 1.2.1. Technologijos aprašymas

Dujos yra deginamos degimo kameros skyriuje. Šiluma iš liepsnos yra perduodama spinduliuotės ir konvekcijos būdu. Liepsna kaitina vidines katilo sienes, kur aplink jas teka kaitinamas vanduo. Po degimo proceso dūmas yra nukreipiamas konvekcines katilo dalis ir šiluma taip pat perduodama šildomam vandeniui. Įprastai dujinių katilų galia būna nuo 0,5 iki 20 MW. Kaip ir biokuro katilinės, taip ir dujinės katilinės integruotos į centralizuotą šilumos tinklą tiekia apie 70 °C temperatūros vandenį, o grįžtama temp. – 40 °C. Tiesiai iš dujinio katilo išeinanti vandens temp. yra 120 °C, gali būti ir aukštesnė.

Dūmavamzdžiai tipo katilai yra dažniausiai naudojami katilai Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo įmonėse. 3 paveikslėlyje pateikta tokio tipo katilo vizualizaciją [4].



3 pav. „Filter“ firmos dūmavamzdis vandens šildymo katilas [4]

Dujiniai katilai gali būti su išoriniu šilumokaičiu, tai yra ekonomizeriu. Šis įrenginys naudojamas, kad būtų galima išnaudoti visą likusią šilumą, įskaitant ir latentinę kondensacijos šilumą.

Centralizuoto šildymo dujiniai katilai buvo naudojami daugelį dešimtmečių. Šiomis dienomis daugelis dujomis kūrenamų centralizuoto šildymo katilų yra naudojimo pikams padengti (rezerviniams pajėgumams). Gamtinių dujų vandens šildymo katilai puikiai pritaikomi didelių pikų padengimui, dėl galios padidinimo – sumažinimo lankstumo, tai galima padaryti vos per kelias minutes. Šalto katilo paleidimas trunka maždaug apie 30 minučių. Šių įrenginių efektyvumas paprastai yra 97–105 %, remiantis grynuoju kaloringumu verte.

Pramonės sektoriuje gamtinės dujos naudojamos tiek individualiose, tiek centralizuotose šildymo tiekimo sistemose. Taip pat yra platus pritaikymas pramoninių procesų šildymui. Skirtinguose pramonės sektoriuose naudojami pavyzdžiai:

- Geležies ir plieno: krosnių šildymas
- Chemijos pramonė: džiovinimo procesai
- Popieriaus pramonė: džiovinimo procesai
- Maistas ir gėrimai: džiovinimo procesai
- Nemetalinis mineralas: šildymo procesai

Gamtinių dujų bendrasis (viršutini) šilumingumas paprastai yra  $39 \text{ MJ/m}^3$ , tuo tarpu kai grynasis šilumingumas yra 10 % žemesnis.

### **1.2.2. Technologijos privalumai ir trūkumai**

#### **Privalumai:**

Dujiniai katilai yra sena, gerai žinoma ir patikrinta technologija. Ši technologija gali būti naudojama plačiame galios diapazone. Reagavimas į susidariusias apkrovas yra lankstus.

Į dujinės vandens šildymo katinės technologinį procesą galima integruoti kompresorinį ar absorbcinį šilumos siurblių. Išmetamoji dujų šiluma gali būti panaudojama išvardintuose įrenginiuose, ir taip padidinant jų efektyvumą.

#### **Trūkumai:**

Dujinius katilus kūrenant dyzeliniu arba biodujomis, ir tarkim maišant su gamtinėmis dujomis, galimas variantas, jog gali prireikti papildomų sieros valymo įrengimų, kurie sudaro papildomas išlaidas.

### **1.2.3. Aplinkosauga**

NO<sub>x</sub>, metano ir sieros emisijos deginant gamtines dujas yra sąlyginai mažos, lyginant su biomasę ar šiukšles deginančiomis katilinėmis.

Jei yra naudojamas kondensatas, prieš išleidžiant jį į nuotekų sistemą, jis turi būti tam tikrai išvalytas ir apdorotas, kad atitiktų nustatytus nuotekų standartus ir taisykles. Šiame valymo procese dažniausiai atsižvelgiama į pH reguliavimą.

### **1.2.4. Tyrimų ir plėtros perspektyvos**

Dujinėse katilinėse yra įmanomas kelių degalų naudojimas (dujų/alyvos). Tačiau tokiam procesui vykdyti yra reikalingi specialūs degikliai. Biodujos taip pat gali būti plačiai naudojamos to paties tipo katilinėse. Išskirtiniu atveju kai kuriuose katilinėse yra įrengti spec. degikliai medienos dulkėms (pvz. sumaltų medienos granulių) deginimui. Šiuo atveju katilinė virsta į biokuro katilinę.

### **1.2.5. Rinkoje esantys standartiniai technologijos pavyzdžiai**

Jei naudojamas žema grįžtamojo vandens temperatūra (30-35 °C), centralizuoto šildymo katilas su ekonomazeriu gali pasiekti kuro efektyvumą iki apytiksliai 106-107 %. 2 lentelėje galima matyti dujinės vandens šildymo katilinės specifikacijas [3].

**2 lentelė.** Dujinės vandens šildymo katilinės duomenys [3]

<b>Technologija</b>	<b>Gamtinėmis dujomis kūrenama katilinė</b>			
	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>Metai</b>				
<b>Techniniai parametrai</b>				
Šiluminė galia (MJ/s)	0,5-10			
Bendras efektyvumas, grynasis (%), vardinis	105	105	106	106
Bendras efektyvumas, grynasis (%), metinis vidurkis	103	103	104	104
Papildomas elektros energijos suvartojimas (% šilumos generavimui)	0,15	0,14	0,12	0,1
Priverstinis sustabdymas (%)	1	1	1	1
Planuojamas sustabdymas (savaitės per metus)	0,4	0,4	0,4	0,4
Techninio eksploatavimo trukmė (metai)	25	25	25	25
Statybos laikas (metai)	0,5	0,5	0,5	0,5
Vietos poreikis (1000m <sup>2</sup> per MJ/s)	0,005	0,005	0,005	0,005
<b>Reguliavimas</b>				
Pirminis reguliavimas (% per 30 sekundžių)	-	-	-	-
Antrinis reguliavimas (% per minutę)	-	-	-	-
Minimali apkrova (% visos įkrovos)	15	15	15	15
„Karšto starto“ laikas (valandomis)	0,1	0,1	0,1	0,1
„Šalto starto“ laikas (valandomis)	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>Finansiniai duomenys</b>				
Nominali investicija (M€ vienam MJ/s)	0,06	0,06	0,05	0,05
- iš kurių įranga	0,04	0,04	0,03	0,03
- iš kurių įrengimas	0,02	0,02	0,02	0,02
Fiksuotos išlaidos (€/MJ/s/metus)	2 000	1 950	1 900	1 700
Kintančios išlaidos (€/MWh)	1,1	1,1	1,0	1,0
- iš jų elektros sąnaudos (€/MWh)	0,1	0,1	0,1	0,1
- iš jų kitos išlaidos (€/MWh)	1,0	1,0	0,9	0,9

### 1.3. Elektros generavimo technologinės alternatyvos

Lietuvos katilinėms perėjus prie biokuro naudojimo, labai išaugo elektros energijos suvartojimas jų pačių reikmėms. Elektra darosi vis brangesnė, o tai didina šilumos gamybos kaštus. Privalu atsižvelgti į elektros energijos gamybos technologijas, kurios galėtų būti įdiegtos biokuro katilinėse. Čia gilinamasi į populiariausias kogeneracines technologijas, kurios naudojamos šiomis dienomis.

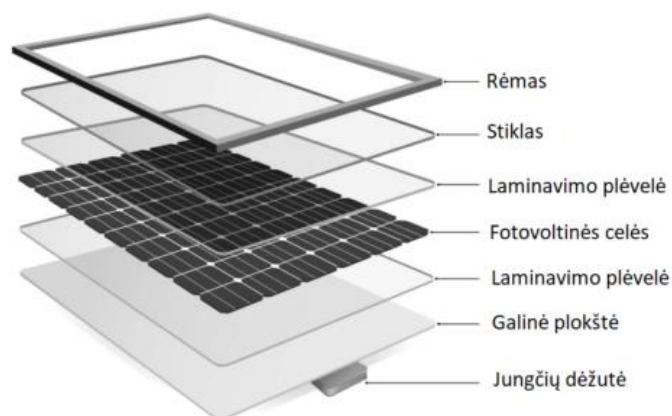
#### 1.3.1. Fotovoltinės saulės jėgainės

Saulė – tai žvaigždė, kuri generuoja didžiulius kiekius energijos. Žemę pasiekusi saulės energija daro įtaką mūsų planetai, įtakoja planetos klimatą ir užtikrina gyvybės egzistavimą. Energetiniu požiūriu Žemėje saulė yra pats galingiausias atsinaujinančiosios energijos šaltinis. Mokslininkų duomenimis, teorinis metinis pasaulio saulės energijos potencialas yra 900 000 000 TWh ir skaičiuojama, kad yra apie 60 kartų didesnis už teorinį metinį pasaulio vėjo energijos potencialą, apie 2200 kartų – už teorinį metinį geoterminės energijos potencialą, apie 4500 kartų – už biomasės ir apie 36 000 kartų – už hidroenergijos teorinius metinius pasaulio potencialus [5].

Visi pasaulio gyventojai per vienerius metus nesunaudoja tiek saulės energijos, kiek jos į Žemę patenka per vieną valandą. Pasitelkus šiuolaikines technologijas, saulės šviesa paverčiama į energiją, kuri vėliau panaudojama pastatų reikmėms. Gyvenamuosiuose namuose ir įmonėse dažniausiai naudojama fotovoltinė technologija (moduliai) elektros energijos gamybai.

Verslas ir pramonė naudoja saulės technologijas, siekdamos įvairinti savo energijos šaltinius, pagerinti efektyvumą ir taupyti pinigus. Energijos tiekėjai naudoja minėtas fotovoltines saulės jėgaines ir koncentruojamos saulės energijos technologijas, kad pagamintų didelius kiekius elektros energijos miestams ir mažiems miesteliams [6].

Svarbiausias saulės elektrinės elementas yra saulės modulis. Saulės modulis yra sudarytas iš celių. Pakilus saulei saulės spinduliai tiesiogiai krenta į saulės modulio celes. Saulės spinduliuose esantys fotonai išjudina elektronus, atsilaisvinančius nuo savo atomų esančių silikono celėje. Laidininkai yra pritvirtinti prie teigiamų ir neigiamų ląstelės pusių, todėl susidaro elektros grandinė. Elektronams tekant per tokią grandinę yra gaminama elektra. 60 celių sujungus kartu, dažniausiai gaunamas saulės modulis. Kuo daugiau saulės modulių bus sumontuota į vieną saulės elektrinę, tuo daugiau energijos ji generuos. 4 paveikslėlyje atvaizduota saulės modulio principinė schema.



4 pav. Principinė saulės modulio schema [7]

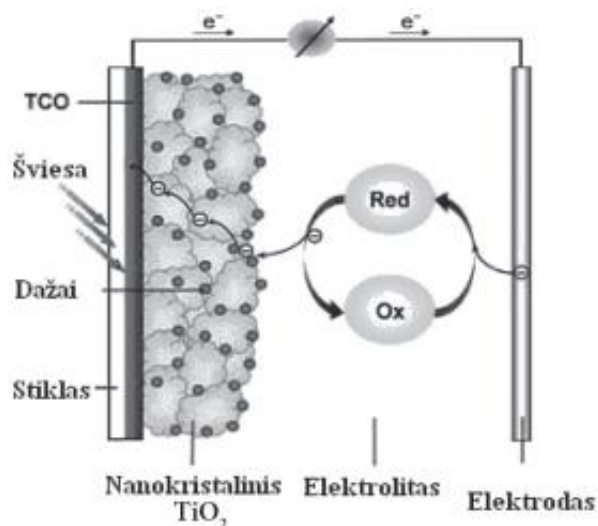


Tęsiant apie saulės jėgaines, būtina paminėti, jog egzistuoja ne vienas saulės elektrinių tipas:

**Kristalinis silicis (c-Si)**, plačiausiai naudojama substrato medžiaga, pagaminta iš išgryninto polisilicio žaliavos. Tiekama monokristalinių arba polikristalinių silicio plokštelių pavidalu. Monokristaliniai saulės elementai yra pagaminti iš plokštelių, supjaustytų iš cilindro formos monokristalinio silicio liejinio. Polikristaliniai saulės elementai yra pagaminti iš plokštelių, supjaustytų iš kvadratinių lietojo silicio blokelių, kuriuose monokristaliniai grūdėliai yra 5–50 mm dydžio. Tikimasi, kad silicio pagrindu pagaminta saulės elementų technologija monokristaliniame pavidale dominuos pasaulinėje rinkoje dešimtmečius dėl žemų sąnaudų ir našumo pranašumų [8, 9]. Šiuo metu monokristaliniai elementai turi didesnę efektyvumą, palyginti su Polikristaliniais elementais, tačiau jie taip pat turi didesnę efektyvumo didinimo potencialą. Dėl šios priežasties saulės modulių gamintojai renkasi polikristalinius elementus. Nustatyta, kad patobulintų monokristalinių plokščių efektyvumas siekia 24,4 % [10].

**Amorfinio silicio moduliai (a-Si) (plonasluoksniai)** gaminami metalinį pagrindą padengiant plonu silicio sluoksniu. Šie moduliai yra sudaryti ne iš atskirų mažos galios elementų (celių), o turi vieną didelio ploto ploną ištisinę fotoelektrinę dangą, užimančią visą modulio plotą. Šiuolaikinių fotoelektroninių modulių galia svyruoja nuo kelių iki 300 W. Norint gauti didesnes galias, kombinuojant lygiagretųjį ir nuoseklųjį jungimą, moduliai jungiami į modulynus. Šie moduliai gali būti naudojami kaip sienų ar stogų danga, pusiau skaidriam balkonų, mansardų, laiptinių įstiklinimui. Tai labai aktualu konstruojant daug mažos galios saulės baterijų masyvų. Be to, plonasluoksnių saulės baterijų galios praradimai dėl aukštos temperatūros yra beveik dvigubai mažesni nei kitų saulės elementų. Plonasluoksne technologija paremtų saulės baterijų sistema sugeneruoja apie 20 % daugiau energijos esant išsklaidytos saulės šviesos sąlygomis (t.y. debesuotomis dienomis ar lyjant). Šiuo metu pasiekta, kad polikristalinių ir monokristalinių modulių savikaina beveik susilygino. Plonasluoksniai moduliai yra daugiau nei 20 % pigesni [11]. Pastaruoju laiku hidrinto amorfinio silicio plonasluoksnių saulės elementų efektyvumas padidėjo nuo 2,4 % iki 15,2 % (nuolatinis 13,0 %). Taip pat šio tipo technologija gali pasigirti kelių jungčių pajungimu, fotoninio pralaidumo struktūra, nesudėtinga gamyba ir didžiuliu optinės sugerties koeficientu [12].

**Monolitiniai III-V saulės elementai**, pagaminti iš III ir V grupės cheminių elementų junginių (Ga, As, In ir P). Šios medžiagos gali būti naudojamos gaminant labai efektyvius, daugiasandūrius saulės elementus. Šie elementai daugiausia naudojami kosmose arba koncentruotose fotovoltinės sistemose. CSP daugiausia naudoja tiesioginį saulės spinduliuotės komponentą. Dažais įjautrinti fotovoltiniai elementai (angl. Dyesensitized solar cell) ir polimeriniai/organiniai saulės elementai yra naujos technologijos. Mokslininkai skiria daug laiko, kad būtų išsiaiškinta tokio tipo saulės modulių gyvavimo trukmė. Tokių elementų efektyvumas siekia iki 10 % [13]. Kol kas aptarti saulės moduliai nėra naudojami kaip pagrindiniai elementai, generuojantys elektros energiją į tinklo sistemą. 5 paveikslėlyje pateikta dažais įjautrinto fotovoltinio elemento krūvininkų generacijos procesą.



5 pav. Dažais įjautrinto fotovoltinio elemento krūvininkų generacijos procesas [14]

**Perovskito saulės elementai** yra pagaminti iš organinių ir neorganinių švino arba alavo halogenidų pagrindu pagamintų medžiagų. Per daugelį metų Perovskito saulės baterijos laboratorinėmis sąlygomis tapo labiau efektyvesnės. Jų fotoelektrinės energijos konversijos efektyvumas išaugo nuo 3,8 % 2009 m. iki 20,9 % 2019 m., todėl ateinančiais metais jie gali pakeisti įprastus silicio saulės elementus [15]. Neatsižvelgiant į itin didelį tokio tipo modulių efektyvumą ir našumą, šių elementų vis dar negalima plačiai naudoti dėl dviejų pagrindinių priežasčių: plačiai naudojamo toksiško elemento – švino ir blogo medžiagų stabilumo. Siekiant išspręsti perovskitinių saulės elementų toksiškumą ir medžiagų stabilumą reikia gerai įsigilinti į medžiagų ir struktūrų pokyčius, kurie lemia saulės elementų bei šviesą emituojančių diodų charakteristikų blogėjimą, o tuomet rasti galimybes ir būdus šiuos pokyčius sustabdyti ar sumažinti jų žalingą poveikį [16]. Perovskito saulės elementus galima pagaminti kaip pusiau skaidrią plėvelę ir ją padengti pastatų langus, panaudoti įgyvendinant įvairius urbanistinius sumanymus, sumontuoti ant transporto priemonių, mobiliųjų telefonų ir pan. [17]. 6 paveikslėlyje pavaizduota diagrama, kurioje pavaizduota saulės modulių metinė gamyba procentais, pagal skirtingą technologiją.

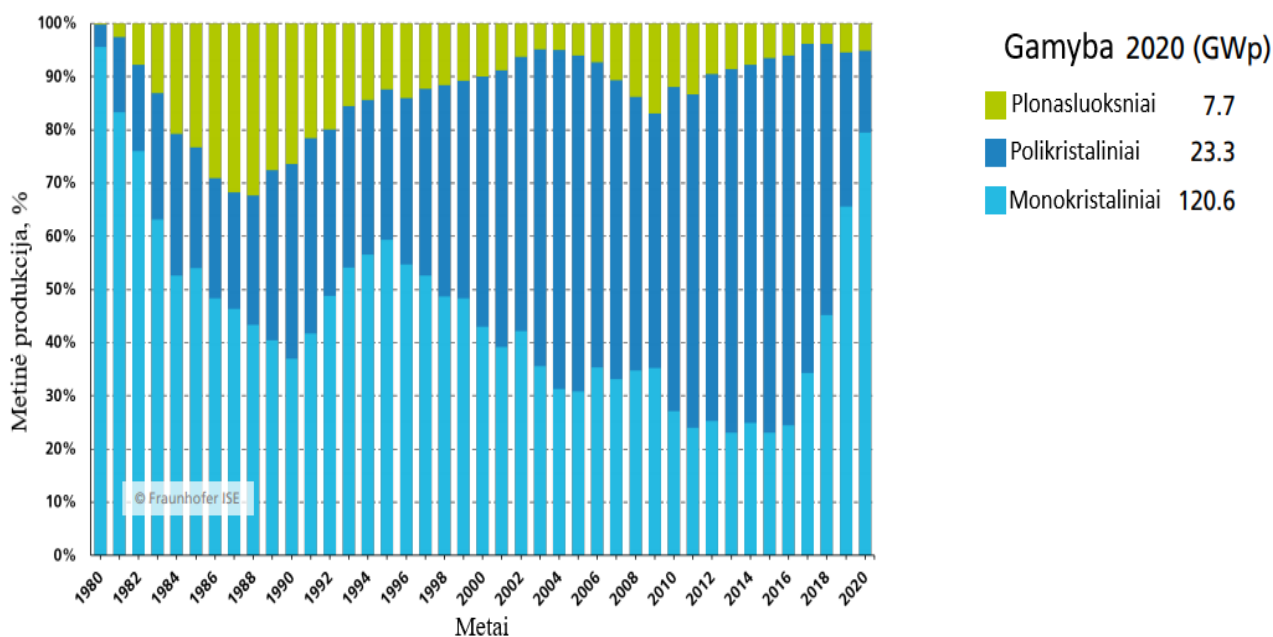
#### Saulės elementų privalumai:

- nenaudoja kuro ar kitokių sunaudojamų medžiagų;
- elektros energija yra gaminama dieną, kai jos poreikis būna pats didžiausias;
- netriukšminga technologija;
- gali stabilizuoti tinklo funkcijas;
- didelis ilgaamžiškumas – daugiau nei 30 metų, taip saulės moduliai gali būti perdirbami;
- sistema yra modulinė ir lengvai montuojama;
- paprastas eksploatavimas ir priežiūra, nėra judančių detalių, inverteriai keičiami vieną arba du kartus per visą įrenginio eksploatavimo laiką;
- patogus tose vietose, kuriose nėra elektros energijos (neprijungta prie tinklo).

#### Saulės elementų trūkumai:

- sistema turi didelius išankstinius kaštus ir sąlyginai mažą efektyvumą (iki 20 % į  $m^2$ ), reikia didelio ploto;
- estetinis įvaizdis gali netikti tam tikrose miesto vietose;

- energija nėra pastovi, kadangi tai sąlygoja paros laikas ir meteorologinės sąlygos;
- kai kuriose plonasluoksnėse technologijose yra nedideli kiekiai toksiško kadmio ir arseno [18].



6 pav. Saulės elementų gamyba pagal skirtingą technologiją [19]

### 1.3.2. Biokuro gazifikacinės elektrinės

Sąvokos „gazifikatorius“ arba „gazifikacija“ yra naudojamos daugeliui technologijų. Jos yra paremtos tuo pačiu fizikiniu reiškiniu – pirolize. Tačiau šios sąvokos turi skirtingą taikymo sritį, tuo pačiu skirtingą formą ir sudėtingumą.

Gazifikatorius iš esmės yra cheminis reaktorius, kuris kaip kurą naudoja medžio drožles („čipsus“), medžio anglį, anglį ar panašias anglies medžiagas. Jas degina nepilno degimo procese dėl riboto oro tiekimo.

Gazifikacija – tai procesas, pagrįstas pirolize aukštoje temperatūroje (didesnėje nei 800 °C). Kitaip tariant, tai yra termocheminis procesas, kurio metu biomasė paverčiama degiomis dujomis.

#### Gazifikacijos procese susidariusios medžiagos:

- pelenai;
- iš dalies oksiduoti produktai, tokie kaip suodžiai (kurie turi būti periodiškai pašalinami iš gazifikatoriaus);
- generatoriaus dujos.

#### Pagrindinės degios dujos susidariusios gazifikatoriuje:

- anglies monoksidas (CO);
- vandenilis (H<sub>2</sub>);
- metanas (CH<sub>4</sub>).

Dėl didelio azoto (daugiau nei 50 %) ir kitų nedegių komponentų kiekio įrenginyje atsiradusios dujos turi mažą šiluminę vertę, lyginant su kitu kuru. Gazifikatoriaus dujų šilumingumas yra tik apie 5–6 MJ/kg, palyginti su 35–50 MJ/kg gamtinių dujų.

Gazifikacijos technologija iš esmės puikiai tinka mažoms elektrinėms, kurių galia nuo 10 kW iki daugiau nei 100 kW. Atitinkamos dujų degimo sistemos su vidaus degimo varikliais gali pagaminti 1 kWh elektros iš 1,1–1,5 kg medienos, 0,7–1,3 kg medžio anglies arba 1,8–3,6 kg ryžių lukštų. Darant prielaidą, kad mediena kilusi iš atsinaujinančios išteklių – nesvarbu, ar planuojama sodinti miškus, ar natūraliai juos atsodinti – tai yra puikus, beveik CO<sub>2</sub> neutralus atsinaujinantis energijos šaltinis [20, 21].

Dėl optimaliai apskaičiuoto dujinimo proceso laiko gautos dujos turi labai nedidelį dervų kiekį ir gali būti naudojamos gaminti šilumą, pasitelkiant dujinius degiklius ar elektrą, naudojant dujinius variklius – generatorius. Biomasės dujinimo proceso metu gautos dujos yra „žaliosios“ energijos šaltinis, keičiant šiomis dujomis fosilinių kurą mažinama CO<sub>2</sub> emisija [22].

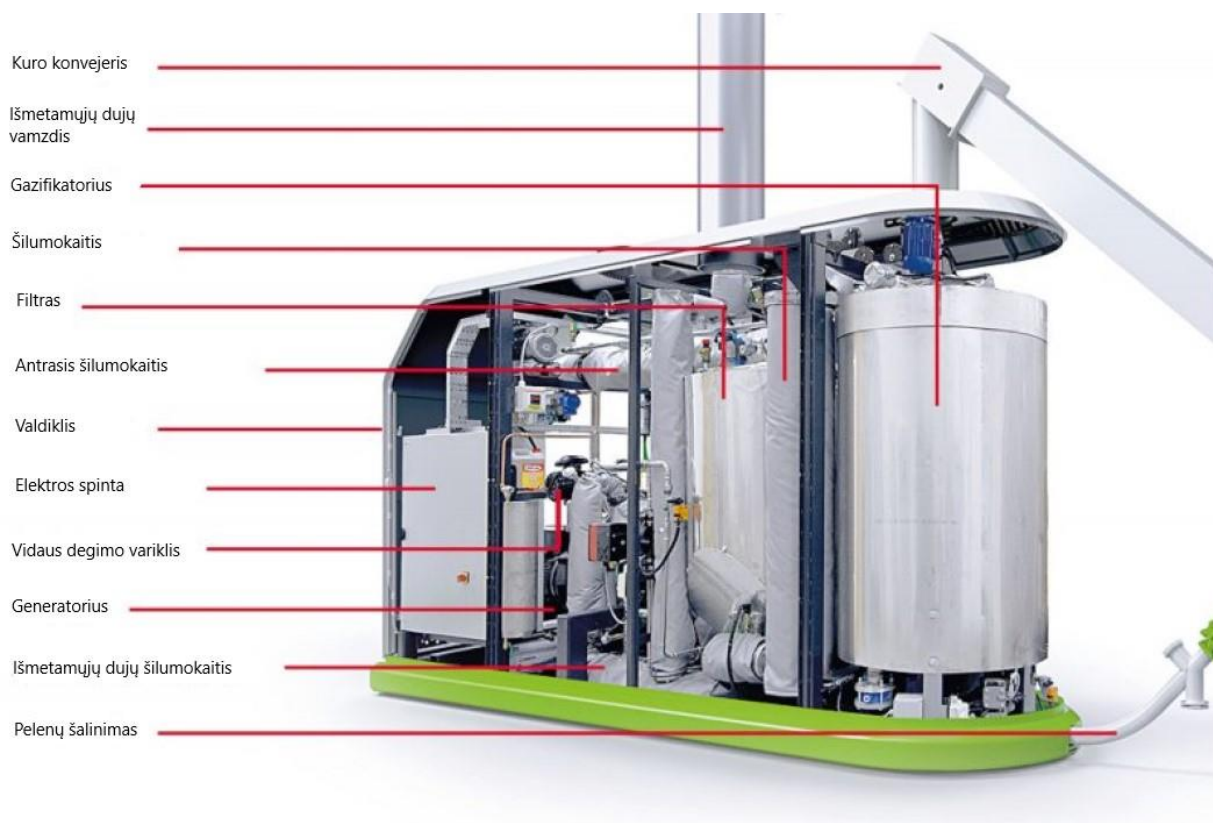
Puikus gazifikatoriaus įrenginio pavyzdys galėtų būti suomių prekės ženklas „Volter“. Tai firma gaminanti gazifikacinius generatorius, kurie šilumą ir elektrą gamina pasitelkiant biokurą. Gamintojai giriasi, jog energiją gali generuoti naudojant vietinę biomasę. Medienos drožlių pavidalo mediena yra perkaitinama, kad gazifikacijos metu susidarytų dujos, kurios varo vidaus degimo variklį, o šis – elektros generatorių. Proceso šiluma yra perduodama į vandenį. Viena „Volter“ 40 CHP jėgainė pagamina pakankamai elektros ir šilumos energijos ūkio reikmėms mažo gyvenamojo kvartalo ar smulkaus verslo metiniams poreikiams. Reikalaujant didesnės galios ar šilumos, galima kombinuoti kelis tokius įrenginius. Įrenginio pavyzdys pavaizduotas 7 paveikslėlyje.



7 pav. „Volter“ atstovo gazifikatorius [23]

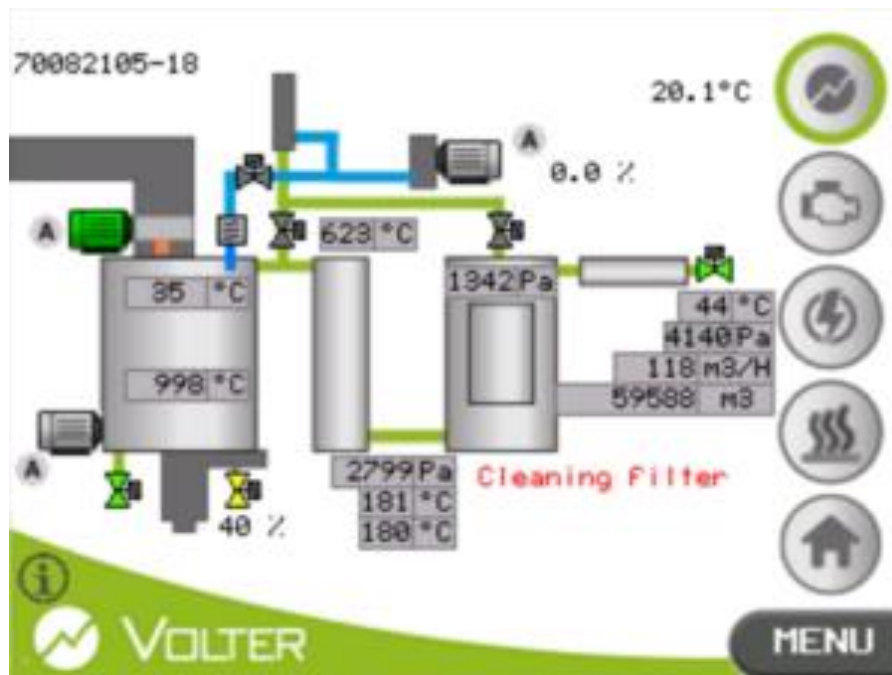
Skiedros tiekiamos į gazifikatorių, kurios dega esant žemam deguonies kiekiui ir aukštai temperatūrai, tuo metu susidaro švarios gazifikacijos dujos. Toliau šilumokaitis dujas atšaldo iki 200 °C. Filtras atskiria dujose esančias visas kietąsias daleles. Antrinis šilumokaitis atšaldo dujas iki 60 °C ir jas sumaišo su oru. Atvėsusios dujos patenka į vidaus degimo variklį, kuris varo generatorių. Vykstant šiems procesams „Volter 40 CHP“ generuoja 40 kW elektros galią. Toliau tęsiant apie

šilumos energija, t.y. sugeneruojama 100 kW karšto vandens galios ir 20 kW šildymo galios kaip šilto oro. 8 paveikslėlyje pateikta įrenginio sudedamąsias detales.



**8 pav.** Gazifikatoriaus principinė schema [23]

„Volter 40“ gazifikatorius turi jam pritaikytą automatiką, kitaip dar vadinama „SCADA“. Automatizuota sistema nuolat matuoja kogeneraciniame įrenginyje esamus parametrus ir leidžia juos automatiškai koreguoti atsižvelgiant į veiklos pokyčius. Jutikliniame ekrane galima stebėti kogeneracinės energijos gamybos procesus (9 paveikslėlis). „Volter“ gazifikatorius galima valdyti nuotoliniu būdu, pasitelkiant kompiuterį ar išmanųjį mobilų telefoną. Dėl saugios, greitos ir pažangios automatizavimo sistemos yra pasiekiamas modernus techninis aptarnavimas ir atnaujinimai [23].



9 pav. „SCADA“ valdymo langas [23]

#### Gazifikatoriaus privalumai:

- ekologiškumas – iškastinio kuro pakeitimas CO<sub>2</sub> neutralia biomase;
- ekonomiškumas – konkurencinga kaina už kWh;
- patikimumas – aukštas automatizavimo lygis ir aukšta kokybė;
- prieinamumas – kai nėra galimybės pasijungti prie elektros tinklo ar gaminti šilumą;
- vietos taupymas – vienas mažiausių kogeneracinių įrenginių rinkoje;
- plėtrumas – galimybė sujungti kelis kogeneracinius įrenginius (didesniam energijos kiekiui gaminti).

#### Gazifikatoriaus trūkumai:

- sprogstamoji situacija, deguoniui prasiskverbus;
- nedidelė biokuro įvairovė;
- kuras, kuriame yra daug pelenų;
- didelės kapitalo sąnaudos.

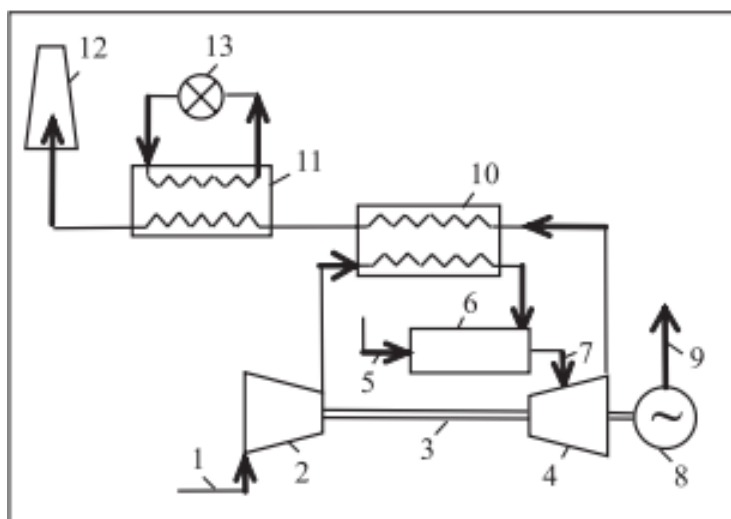
#### 1.3.3. Mikroturbinos

Mikroturbinos yra mažos apimties dujų turbinos. Šiam įrenginiui veikti naudojamos gamtinės dujos, tačiau pasitaiko ir dyzeliu, vandeniliu varomų mikroturbinų. Jos veikia labai dideliu greičiu, t. y. virš 40000 aps/min. Dauguma mikroturbinų naudoja greitaeigius nuolatinio magneto generatorius elektros energijai gaminti. Mikroturbinos elektrinis naudingumo koeficientas yra 20–30 %, o galios diapazonas – nuo 25 iki 500 kW [24]. Mikroturbinos dažnai naudojamos dideliuose komerciniuose pastatuose, tokiuose kaip viešbučiai, mokyklos ir biurai. Mikroturbinų sistemos skirstomos į tris kategorijas pagal suvartojimą ir energijos gamybą:

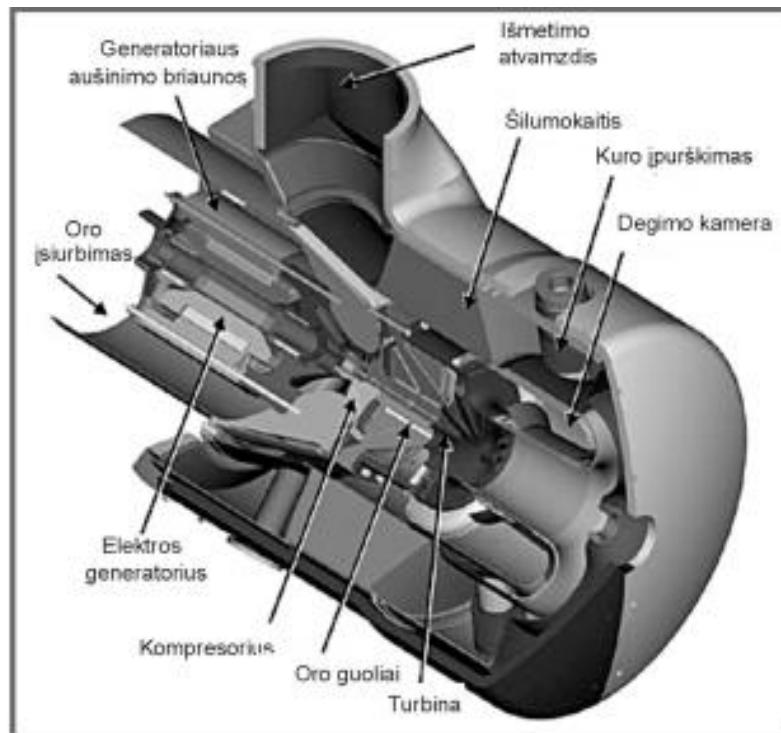
1. Mikroturbinos be rekuperatoriaus (su paprastu ciklu) yra mažiau efektyvios (naudingumas siekia iki 15 %) ir yra pigesnės.
2. Mikroturbinos su rekuperatoriumi yra efektyvesnės (naudingumas siekia 20–30 %). Šio tipo mikroturbinos parodytos 9 paveikslėlyje.
3. Mikroturbinos, veikiančios kogeneraciniu pagrindu (naudingumas siekia iki 85 %) [25]. 10 paveikslėlyje parodytas kogeneracinės mikroturbinos procesas.

Mikroturbinas taip pat galima suskirstyti į dvi grupes: vienašius (vieno veleno) ir dviašius (dviejų ašių). Vieno veleno sistemoje ir kompresorius, ir generatorius yra varomi turbinos. Dviejų ašių modelyje kompresorių varanti turbina yra ant to paties veleno, o generatoriaus rotorių varanti turbina yra ant kito veleno. Dviejų ašių modelis sukuria tinkamą dažnį vartotojams, panaudojant įprastą sinchroninį generatorių (pvz., sukimosi greitis 3600 aps/min) su atskira turbina generatoriui ir pavarų dėžei.

Viena didžiausių pasaulyje mikroturbinų gamintoja yra JAV firma vardu Capstone Turbine Corporation. Šis prekės ženklas pasižymi inovatyviais sprendimais turbinų rinkoje. Jų modelis C60 turi tik viena besisukančią detalę, tai velenas ant kurio sumontuoti prieš tai minėti agregatai (elektros generatorius, kompresorius ir pati turbina). Esant nominaliai apkrovai, velenas sukasi  $96000 \text{ min}^{-1}$  greičiu specialiuose „oriniuose“ guoliuose, kurių nereikia tepti, palyginti su vidaus degimo varikliais ar kai kurių kitų firmų gaminamomis mikroturbinomis. Šio modelio galia yra 60 kW, o elektrinis naudingumas siekia 29 %. Technologija pasižymi veikimu be vibracijos ir mažu triukšmingumu, visa tai produktą daro dar patrauklesniu. C60 darbo laikas iki pilno serviso – 60000 h. Taip pat turbina yra tolygiai valdoma visame darbo režime (0–100 %) su minimaliais nuostoliais. Įrenginys gali dirbti kaip atskiras vienetas arba kartu pajungtas į bendrą tinklą [24, 26]. 10 ir 11 paveikslėliuose atvaizduota C60 pavyzdinis modelis ir jo skersinis pjūvis.



**10 pav.** Kogeneracinės jėgainės su mikroturbina principinė schema (kuras – dujos, dyzelinas): 1 – aplinkos oras, 2 – oro kompresorius, 3 – velenas, 4 – turbina, 5 – kuras, 6 – degimo kamera, 7 – degimo produktai, 8 – generatorius, 9 – elektros energija, 10 – rekuperacinis oro šildytuvas, 11 – atliekinės šilumos pasisavinimo šilumokaitis, 12 – kaminas, 13 – šilumos vartotojai [26].



**11 pav.** Capstone Turbine Corporation mikroturbina C60 [26]

Vieno veleno modeliai paprastai yra skirti darbui esant labai dideliems sūkiams. Šių generatorių generuojamas srovės dažnis yra labai aukštas. Dėl itin didelės spartos vieno veleno generatoriaus dažnis privalo būti konvertuojamas į 50 Hz [27].

Nepaisant didelių investicinių sąnaudų, mikroturbinos yra kompaktiško dydžio, lengvo svorio, sąlyginai gero efektyvumo šilumos ir elektros kogeneracijos įrenginys. Jos pasižymi maža išmetamųjų dujų emisija, alternatyva atliekinio kuro panaudojimui. Taip pat reiktų atkreipti dėmesį į retą remontą ir gerą veikimą esant žemam dujų slėgiui.

#### **Mikroturbinų privalumai:**

- mažai judančių detalių,
- optimalus dydis;
- mažas svoris;
- aukštas efektyvumas;
- puiki alternatyva panaudoti atliekinę šilumos energiją.

#### **Mikroturbinų trūkumai:**

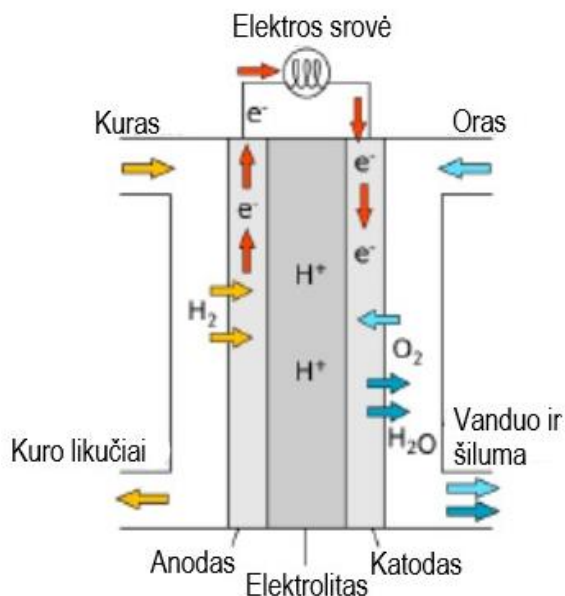
- aukštas sukimosi dažnis;
- galios ir efektyvumo praradimas esant aukštesnei aplinkos temperatūrai;
- aptarnaujančio personalo trūkumas Lietuvoje.

#### **1.3.4. Kuro elementai**

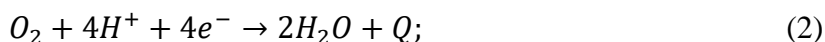
Kuro elementai veikia kaip akumuliatoriai, tačiau jie neišsenka ir jų nereikia įkrauti. Jie gamina elektrą ir šilumą tol, kol yra tiekiamas kuras. Kuro elementą sudaro du elektrodai – neigiamas elektrodas (anodas) ir teigiamas elektrodas (katodas), įterpti tarp elektrolito. Kuras, kaip vandenilis yra tiekiamas į anodą, o oras - į katodą. Kuro elemente katalizatorius prie anodo atskiria vandenilio molekules į protonus ir elektronus (1 formulė), kurie skirtingais keliais keliauja link katodo.



Elektronai praeina per išorinę grandinę, sukurdami elektros srautą, jei grandinė yra uždara. Protonai migruoja per elektrolitą į katodą, kur susijungia su deguonimi ir elektronais, kad susidarytų vanduo ir šiluma (2 formulė). Veikimo principas pateiktas 12 paveikslėlyje [28].



12 pav. Kuro elemento su polimerinio elektrolito membrana veikimo schema [28].



Žemos temperatūros PEM kuro elementai veikia žemesnėje nei 100 °C temperatūroje (paprastai apie 80 °C), kadangi membrana turi būti prisotinta vandens.

Šiandien didesni kogeneracinių kuro celių įrenginiai paprastai yra suprojektuoti taip, kad juos būtų galima integruoti pramonės procesuose. Tarkim, chloro dujų gamybos procesuose vandenilis yra atliekinės išmetamosios dujos, tuo tarpu jos gali būti panaudotos elektros energijos gamybai. Ateityje kuro celėms naudojamas vandenilis gali būti išgaunamas elektrolizės būdu, naudojant elektrą be išskastinio kuro [28].

Kuro elementų šilumos ir galios santykis svyruoja nuo 0,5 iki 1,4. Kombinuojant kuro elementus su kitomis energijos generacijos technologijomis (dujų, garo turbinomis) kuro elementai gali pasiekti net iki 60 % elektros naudingumo koeficientą. Tačiau šiuo metu tokių sistemų bendra sąveika pasaulyje mažai kur egzistuoja, dėl didelių kuro elementų gamybos sąnaudų ir investicijų. Taip pat būtina paminėti, jog kuro elementų technologija yra priskiriama prie švariausių energijos konvertavimo sistemų.

Kadangi technologija sąlyginai yra ganėtinai nauja, vyrauja dideli neapibrėžtumai, susiję su būsimomis sąnaudomis, technologiniais iššūkiais, ateities rinka ir paklausa. Remiantis prognozėmis iki 2030 metų kainą už 1 MW turėtų siekti 1,1 mln. €, o iki 2050 m. – 0,8 mln. € [3]. Numatoma, kad tipiniai gamybos pajėgumai padidės nuo maždaug 0,1 MW 2020 m. iki maždaug 2 MW 2050 m., o elektros efektyvumas padidės iki 50 %.

Toliau tęsiant apie vandenilį kaip kūrą, kuris naudojamas kuro elementuose, tai jis yra gaminamas iš daugybės išteklių, tokių kaip branduolinė energija, biomasė, gamtinės dujos ar atsinaujinančių išteklių. Dėl šių savybių vandenilis yra patrauklus kuro pasirinkimas transportuojant ir generuojant elektros energiją. Nagrinėjant vandenilio chemines savybes tai yra bekvapės, labai degios ir bespalvės dujos. Taip pat būtina paminėti, jog tai cheminis elementas, kuris yra labiausiai paplitęs visoje visatoje. Vandenilis laikomas kaip vienas perspektyviausių kuro rūšių, kuris galėtų spręsti šių dienų globalines problemas ir tuo pačiu prisidėti prie energetikos sektoriaus efektyvinimo. Pramonės šakose, tokiose kaip metalo gamyba ir apdirbimas, vandenilio dujos atlieka itin svarbią funkciją išgaunant cheminius junginius. Šiandien iš vandens gaminamas vandenilis (elektrolizės būdu) sudaro tik apie 5 % visos vandenilio produkcijos. Didžiausi kiekiai vandenilio yra gaminami pasitelkiant reformingo procesą. Šiuo proceso metu  $H_2$  yra išgaunamas iš minėtų angliavandenilių, tokių kaip gamtinės dujos, nafta ar anglis [28].

#### **Kuro elementų privalumai:**

- didelis efektyvumas lyginant su kitais įrenginiais, kurie naudoja įprastą cheminį kūrą;
- ekologiška technologija, šalutinis susidarantis produktas – vanduo;
- tylus įrenginys;
- lengvas valdymas;
- efektyvumas nepriklauso nuo įrenginio dydžio.

#### **Kuro elementų trūkumai:**

- didelės gamybos sąnaudos dėl brangių medžiagų (platinos);
- trumpas tarnavimo laikas.

## 2. Organinio Renkino ciklo analizė

Šiais laikais energija yra laikoma pagrindiniu pasaulio ekonomikos veiksniumi ir būtina pramonės bei gamybos procesų dalis. Energijos gamybos ir vartojimo procesų efektyvumas daro didelį poveikį mūsų visuomenei ir supančiai aplinkai. Remiantis Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) ataskaita [29], iki 2050 m. padidėjus dabartiniam energijos suvartojimui ir energijos vartojimo efektyvumo tendencijai, pasaulinis energijos poreikis ir emisija išaugs atitinkamai iki 70 % ir 60 %, lyginant su 2011 m. Dėl padidėjusių išmetamųjų teršalų kiekio iki 2050 m. ilgalaikė vidutinė pasaulinė temperatūra turėtų pakilti 6 °C ir tai gali sukelti rimtų pasekmių, tokių kaip klimato kaita, energetinis saugumas ir tvarios ateities nebuvimas. IEA pasiūlė veiksmingą „2DS“ pavadintą scenarijų, kuriame pateikiami sprendimai, kurie iki 2050 m. neleistų pasaulinei temperatūrai pakilti daugiau kaip 2 °C. Programoje yra siūlomos tvarios energijos sistemos, kurios mažintų CO<sub>2</sub> išmetimą. Programa siūlo drastiškų veiksmų pramonei, svarbiausiems energetikos sektoriaus dalyviams ir politikos formuotojams, kad iš esmės būtų pagerintas sistemų energijos vartojimo efektyvumas ir per ateinančius 30 metų būtų 25 % apribotas energijos poreikio padidėjimas, o išmetamų teršalų kiekis būtų sumažintas 50 %. Ši strategija sukuria sistemą, kuri vienu metu gali užtikrinti saugias, įperkamas ir palankias aplinkai energijos sistemas. Scenarijuje apibrėžiama, kad reikia imtis įvairių veiksmų, įskaitant atsinaujinančių išteklių, pvz., saulės, vėjo ir geoterminės energijos, naudojimą, pažangų elektros perdavimą ir paskirstymą, transporto sektoriaus elektrifikavimą, aktyvesnį tarptautinį ir regioninį bendradarbiavimą.

Energijos vartojimo efektyvumo gerinimas labai prisideda prie „2DS“ scenarijaus. Pavyzdžiui, galia tradiciniame elektros tinkle (toliau – nacionalinė generacija) buvo tiekama vienu būdu nuo gamybos stoties iki apkrovos. Nacionalinė generacija naudoja aukščiausią įmanomą įtampos lygį dideliems energijos kiekiams perduoti ir paskirstyti. Šio transportavimo metu patiriami nuostoliai sudaro 12 % galios ir 30 % pristatytos elektros sąnaudų, kaip rašoma [30] šaltinyje. Be to, yra numanomų sąnaudų, susijusių su anglies dvideginio išmetimu, kai galutinis vartotojas nevisiškai sunaudoja kūrą, kuris skirtas elektros energijai gaminti. Todėl, siekiant padidinti sistemos energijos efektyvumą, šiuos nuostolius būtina sumažinti iki minimumo.

Priešinga nacionalinei generacijai technologija, kur elektros energija yra gaminama pasitelkiant kogeneracines jėgaines, hidroelektrines, vėjo jėgaines ir t. t., yra elektros gamyba vietoje savoms reikmėms (toliau – vietinė generacija). Vietinė generacija dažnai minima „paskirstytos energijos gamybos“ kontekste [32]. Dažniausiai vietinės generacijos elektros energija gaminama įdarbinant mažos galios kogeneracines elektrines (ORC, gazifikatorius, mikroturbinas). Vietinės generacijos pasiskirstymą pagal galios diapazoną galima matyti 3 lentelėje [31]. Nedidelės galios kogeneracinėse elektrinėse sugeneruota energija (šiluma ir elektra) yra panaudojama šalia gamybos vietos. Šiluminių trasų tiesimas ir jų priežiūra tampa nereikalinga. Elektros energija tampa pigesnė, nei perkant iš tinklo, į kurį elektros energiją tiekia nacionalinė generacija. Taip pat pašalinami tokie trūkumai: perdavimo ir paskirstymo tinklo modernizavimo kaštai, jo reguliavimo išlaidos ir valdymo prietaisų sąnaudos. Be to, šalia vartotojo vykdoma elektros energijos gamyba yra nepriklausomas elektros šaltinis, kuris tiesiogiai prijungtas prie skirstomojo tinklo arba prie kliento apkrovos. Taip yra išvengiama šilumos ir elektros energijos tiekimo sutrikimų ir avarijų. Tai itin aktualu ligoninėms, telekomunikacijos ir duomenų saugojimo centrums, pavyzdžiui, įvykus stichinėms nelaimėms. Anot [33] šaltinio, atlikus tam tikrus matematinius skaičiavimus, tokia vietinė generacija gali būti efektyvesnė ir tam pačiam energijos kiekiui pagaminti gali išskirti mažiau CO<sub>2</sub>, priešingai negu viena

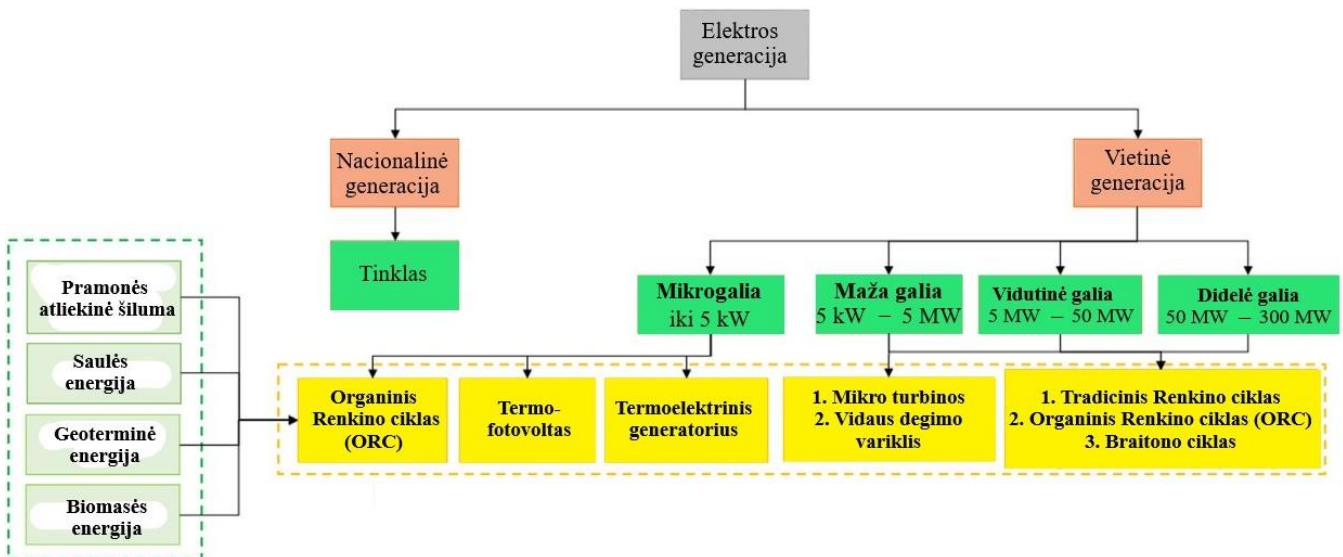
didelės galios jėgainė, kuri gamina šilumą ir elektrą. Svarbu paminėti, kad vietinė generacija gali panaudoti saulės, geoterminius energijos šaltinius ar atliekinę šilumą.

**3 lentelė.** Vietinės generacijos pasiskirstymas pagal galią [31].

Kategorija	Galios diapazonas
Mikrogalios vietinė generacija	Nuo 1 W iki 5 kW
Mažos galios vietinė generacija	Nuo 5 kW iki 5 MW
Vidutinės galios vietinė generacija	Nuo 5 MW iki 50 MW
Didelės galios vietinė generacija	Nuo 50 MW iki 300 MW

Apie 50 % pasaulyje suvartojamos energijos (šiluminės energijos) yra iššvaistoma dėl energijos konversijos procesų [34]. Ši atliekinė šiluma atsiranda iš įvairių šaltinių: pramoninių procesų, vykstančių dujų ir garo turbinų veikimo jėgainėse, vidaus degimo variklių, saulės spinduliuotės, geoterminės šilumos ir biomasės šilumos. Panaudotos šilumos atgavimo taikymas su vietine generacija turi didelį potencialą padidinti sistemos efektyvumą ir sumažinti kuro sąnaudas, taip pat sumažinti CO<sub>2</sub> emisiją, pirminio kuro poreikį. Šilumos atgavimas leidžia sugeneruoti daugiau energijos su tuo pačiu kuro kiekiu, o tai padidina galios ciklo konversijos efektyvumą ir tvarumą [34]. Efektyvumo padidėjimas gali būti pasiektas įdiegiant naujausias ir šiuo metu pasiekiamas technologijas. Norint pasiekti geresnius parametrus prie tradicinio garo Renkino ciklo, turi būti įdiegtas perkaitinimo įrenginys. Superkritiniam CO<sub>2</sub> ciklui būtinas aukštas slėgis. Pavyzdžiui, iš brangių medžiagų pagaminti termoelektriniai generatoriai pasižymi mažu efektyvumu. Visgi, organinio Renkino ciklo (ORC) technologijai būdingos patrauklios savybės: sąlyginai paprasta konstrukcija, aukštas patikimumo lygis ir nesudėtinga priežiūra. ORC technologija pasirodė esanti viena iš patikimiausių ir efektyviausių alternatyvų panaudoti minėtų šilumos šaltinių mažo potencialo atliekinę energiją, norint generuoti elektrą su vietinės generacijos sistemomis. Galima sakyti, kad ORC yra įrenginys, kuris išnaudoja švaistomą šiluminę energiją ir ją paverčia naudinga elektros energija, kurios galia svyruoja nuo kelių kW iki dešimčių MW. ORC yra panašus į tradicinį Renkino ciklą, tačiau vietoje vandens, kaip darbo agento, yra naudojamas organinis junginys, kuris verda esant žemesnei temperatūrai ir slėgiui. Šios savybės ir pagrindžia ORC universalumą, kad generuojant elektrą būtų galima naudoti žemos ir vidutinės temperatūros darbo agentus (nuo 60 °C iki 350 °C). Lyginant su tradiciniu Renkino ciklu, ORC būdingos unikalios pranašesnės savybės: maži gabaritai, paprastumas, patikimumas ir mažas poveikis aplinkai, kai jis kombinuojamas su atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Dėl šių priežasčių per pastaruosius kelerius metus ORC technologija buvo sparčiai diegiama visame pasaulyje ir dėl naujausių mokslinių tyrimų patyrė nepaprastą pažangą.

Šioje dalyje yra apžvelgiama ORC technologijos specifika. Apžvelgiamas termodinaminis ORC modeliavimas, ciklo šiluminis ir ekserginis efektyvumas. Taip pat gilinamasi į tinkamo darbo agento parinkimą atsižvelgiant į mažo potencialo šilumos energiją, tokią kaip: geoterminė šiluma, saulės spinduliuotė ir biomasės šiluma. 13 paveikslėlyje vaizduojama galimos elektros generavimo sistemos ir pačių technologijų klasifikavimas.



13 pav. Elektros generacijos sistemos ir technologijos

## 2.1. ORC apžvalga

Organinis Renkino ciklas (ORC) yra tas pats Renkino ciklas (RC), kadangi jame yra naudojami visi pagrindiniai RC įrenginiai: garintuvas, ekspanderis, kondensatorius ir siurblys. Vienintelis skirtumas – darbo agentas: vietoje vandens yra naudojamas organinis junginys (angliavandeniliai, šaltnešiai, eteriai ir siloksonai). Galima teigti, kad ORC technologija yra tokia pati sena kaip ir RC. Pirmas variklis, kuris naudojo eterį kaip darbo agentą, buvo išrastas 1826 m. [35]. XX a. pirmoje pusėje buvo investuota daug išteklių ir atlikta daug mokslinių tyrimų, kad būtų sukurta ORC technologija. Energijai gaminti iš pradžių buvo naudojama saulės ir geoterminė energija [36]. Aštuntame ir devintame dešimtmetyje ištikus naftos krizei ORC technologija pradėta tobulinti dar sparčiau. Atrandami organiniai skysčiai – zeotropiniai mišiniai. Bandoma pritaikyti ORC transporto priemonėse [37, 38]. Toliau intensyviai vykdomi moksliniai šios technologijos tyrimai.

## 2.2. ORC veikimas

Kaip buvo minėta, ORC yra labai panašus į RC technologiją technine prasme. Tačiau organinė ciklo sistema yra daug paprastesnė, nes nereikia garo katilo, o vienas šilumokaitis atstoja visas tris fazes: vandens pašildymą, garinimą ir perkaitinimą [39]. 14 paveikslėlyje galima matyti paprastą organinio Renkino ciklo schemą. ORC proceso sudedamosios dalys:

*1–2 procesas (išsiplėtimas).* Aukšto slėgio ir temperatūros garų organinis skystis nukreipiamas į turbiną, kurioje jo šiluminė energija paverčiama į mechaninę energiją, kai jis plečiasi iki mažesnio slėgio ir toliau teka į kondensatorių. Turbinos galia apskaičiuojama pagal 3 formulę:

$$P_t = P_{t\text{ideali}} \eta_t = m(h_3 - h_4)\eta_t; \quad (3)$$

čia:  $P_{t\text{ideali}}$  – ideali turbinos galia, W;

$\eta_t$  – turbinos naudingumo koeficientas;

$m$  – darbo agento masinis debitas, kg/s;

$h_3$  ir  $h_4$  – darbo agento entalpija įtekant ir ištekant iš turbinos, kJ/kg;

2–3 procesas (kondensacija). Garai kondensuojami kondensatoriuje, naudojant aušinimo terpę (orą arba vandenį). Kondensatoriuje išsiskyrusi šilumos energija apskaičiuojama pagal 4 formulę:

$$Q_k = m(h_1 - h_4); \quad (4)$$

čia:  $m$  – darbo agento masinis debitas, kg/s;

$h_1$  ir  $h_4$  – darbo agento entalpija įtekant ir ištekant iš kondensatoriaus, kJ/kg;

3–4 procesas (suslėgimas). Žemo slėgio organinis skystis išteka iš kondensatoriaus ir siurbliu suslėgtas yra paduodamas į garintuvą. Siurblio galia skaičiuojama pagal 5 formulę:

$$P_s = \frac{P_{s,ideali}}{\eta_s} = \frac{m(h_1 - h_2)}{\eta_s}; \quad (5)$$

čia:  $P_{s,ideali}$  – ideali siurblio galia, W;

$\eta_t$  – siurblio naudingumo koeficientas;

$m$  – darbo agento masinis debitas, kg/s;

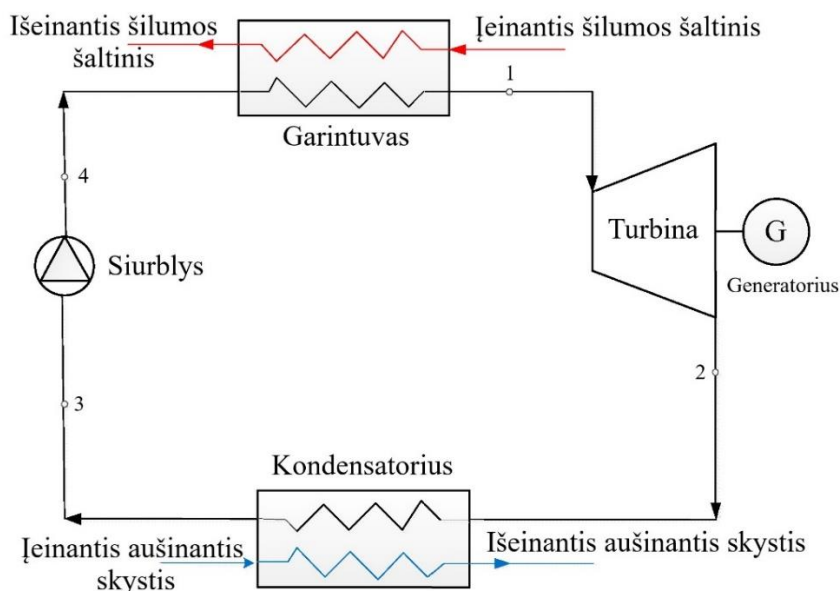
$h_1$  ir  $h_2$  – darbo agento entalpija įtekant ir ištekant iš siurblio (idealiu atveju), kJ/kg;

4–1 procesas (garinimas). Organinis skystis išgarinamas garintuve naudojant žemo potencialo šilumą ir prasideda naujas ciklas. Skystis teka iš siurblio į turbiną. Energijos šaltinio darbo agentui perduotas šilumos kiekis yra apskaičiuojamas pagal 6 formulę:

$$Q_g = m(h_3 - h_2) \quad (6)$$

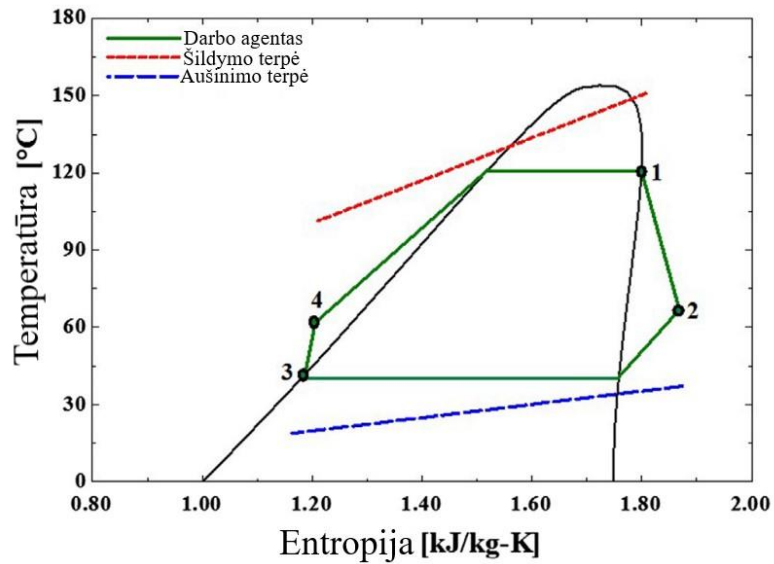
čia:  $m$  – darbo agento masinis debitas, kg/s;

$h_3$  ir  $h_2$  – darbo agento entalpija ištekant ir įtekant į garintuvą, kJ/kg.



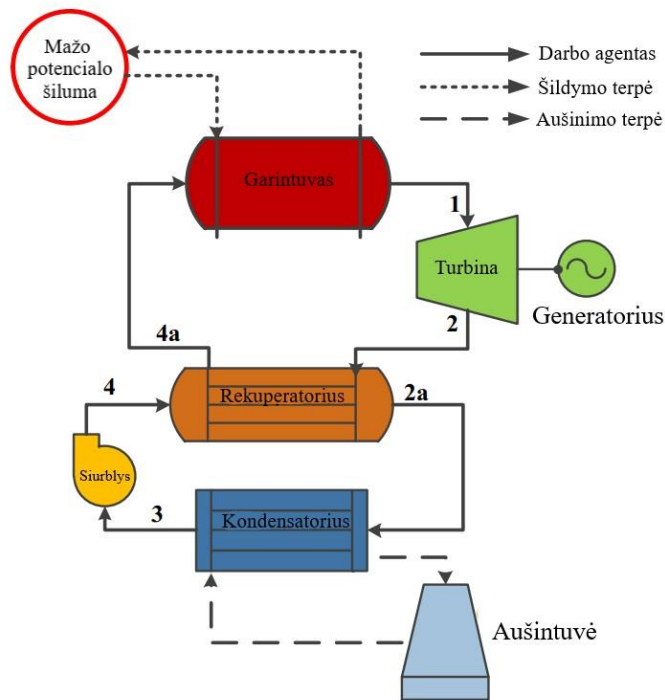
14 pav. Supaprastinta ORC schema [40]

Organinio Renkino ciklo temperatūros ir entropijos diagrama pateikta 15 paveikslėlyje.



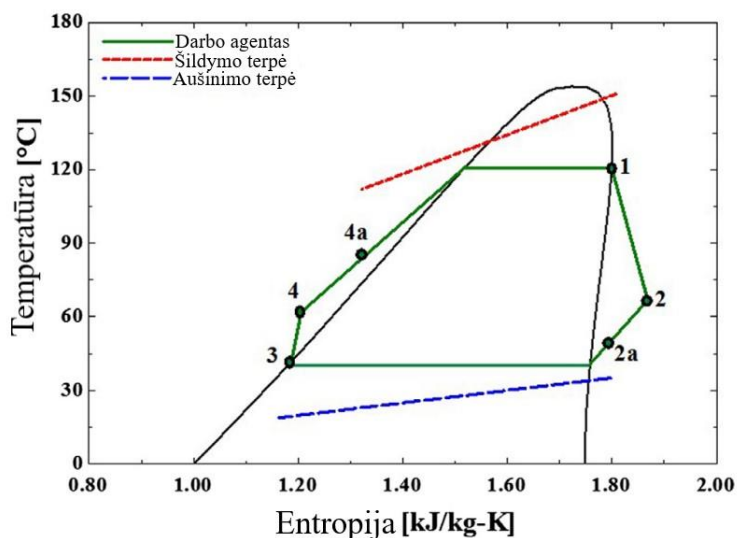
15 pav. ORC temperatūros – entropijos diagrama

Jei turbinos išėjimo temperatūra yra itin aukšta, ORC šiluminį efektyvumą galima padidinti į veikimo schemą pridėdant papildomą įrenginį rekuperatorių. Jis įrengiamas tarp turbinos išėjimo ir kondensatoriaus įėjimo [41]. Rekuperatorius gali panaudoti likutinę šilumą po turbinos, kad būtų galima pašildyti darbinį skystį prieš jam patenkant į garintuvą. Organinio Renkino ciklo schema su rekuperatoriumi parodyta 16 paveikslėlyje. Čia vidutinė šilumos perdavimo temperatūra yra aukštesnė už paprastą ORC (be rekuperatoriaus), o vidutinė šilumos perdavimo aplinkai temperatūra yra žemesnė. Tokia technologija leidžia padidinti bendrą šilumos ciklo efektyvumą [42].



16 pav. Principinė ORC schema su rekuperatoriumi

Atitinkama ciklo temperatūros – entropijos diagrama su rekuperatoriumi yra atvaizduota 17 paveikslėlyje. Lyginant 14 pav. ir 16 pav. yra pavaizduojami ORC su rekuperatoriumi pranašumai, tačiau tai sąlygoja sudėtingesnę konstrukciją ir didesnes pradines kapitalo sąnaudas.



17 pav. ORC su rekuperatoriumi temperatūros – entropijos diagrama

### 2.3. Organinio darbo agento parinkimas

Darbo agento – fluído parinkimas yra vienas pagrindinių veiksnių, jog ORC sistema veiktų tinkamai. Darbinių agentų termofizinės savybės turi didelę įtaką sistemos efektyvumui, ekonominiam naudingumui ir komponentų dydžiui. Tinkamas fluídos taip pat įtakoja sistemos stabilumą, ekspenderio veikimą, saugos ir aplinkosaugos problemas [43]. Darbinio skysčio pasirinkimas yra labai svarbus norint pasiekti aukštą ciklo šiluminį efektyvumą ir maksimaliai padidinti šilumos pasisavinimą iš šilumos šaltinio, kuris garina fluідą. Organiniai skysčiai dažnai yra tokie junginiai, turintys didelę molekulinę masę ir žemą virimo temperatūrą bei slėgį. Fluїdai yra apibūdinami pagal garų prisotinimą, o tai atsispindi diagramose 18 paveikslėlyje. Garai būna: sausi sotūs garai, izotropiniai ir drėgnai. Esant žemesnei ORC darbinei temperatūrai, sausi ir izotropiniai skysčiai yra palankesni, lyginant su drėgnais skysčiais, tokie kaip vanduo, dėl jų perkaitimo po išsiplėtimo. Taip atsikratoma perkaitinimo įrangos ir galimos žalos. Šios charakteristikos gali žymiai sumažinti garintuvo dydį, o ekspenderio priežiūra taip pat tampa pigesnė, todėl sumažėja sistemos kapitalo ir eksploatacinės išlaidos.

Be viso to, yra ir kitų svarbių termofizinių savybių, kurios daro didelę įtaką atsižvelgiant į organinio darbo agento parinkimą:

*Specifinė garavimo šiluma:* naudojant mažo potencialo atliekinę šilumos energiją ORC technologijoje, svarbu atsižvelgti į darbo agentą, kurio specifinė garavimo šiluma yra mažesnė, nes tai leistų šilumos perdavimo procesui garintuve vykti esant kintamajai temperatūrai [44].

*Specifinis tūris:* mažas specifinis tūris (didelis garų tankis) yra bene vienas iš svarbiausių organinių skysčių privalumų. Mažo specifinio tūrio darbo agentai užtikrina mažesnę tūrio srautą, todėl šilumokaičiai ir ekspenderiai yra mažesni, o tai reiškia žymiai mažesnius gabaritus ir kainą. 19



paveikslėlyje pateikta kai kurių įprastų organinių skysčių, taip pat vandens, specifinį garų tūrį ir akivaizdžiai matomą organinių skysčių pranašumą.

*Kritinė temperatūra:* geras ciklo efektyvumas gaunamas tik iš darbo agentų, kurių kritinė temperatūra yra maksimaliai artima šilumos šaltinio temperatūrai [45].

*Šiluminis stabilumas:* esant aukštai darbinei temperatūrai ir slėgiui, organiniai skysčiai gali suirti ir sukelti koroziją, ar net užsidegti. Todėl jie privalo išlaikyti terminį stabilumą esant aukštai temperatūrai.

*Poveikis aplinkai:* Darbo agentas turi būti parinktas, jog būtų laikomasi visų esamų aplinkos apsaugos standartų ir taisyklių. Parametrai, į kuriuos labiausiai reiktų atsižvelgti, tai ozono sluoksnio ardymo ir šiltnamio efekto potencialai.

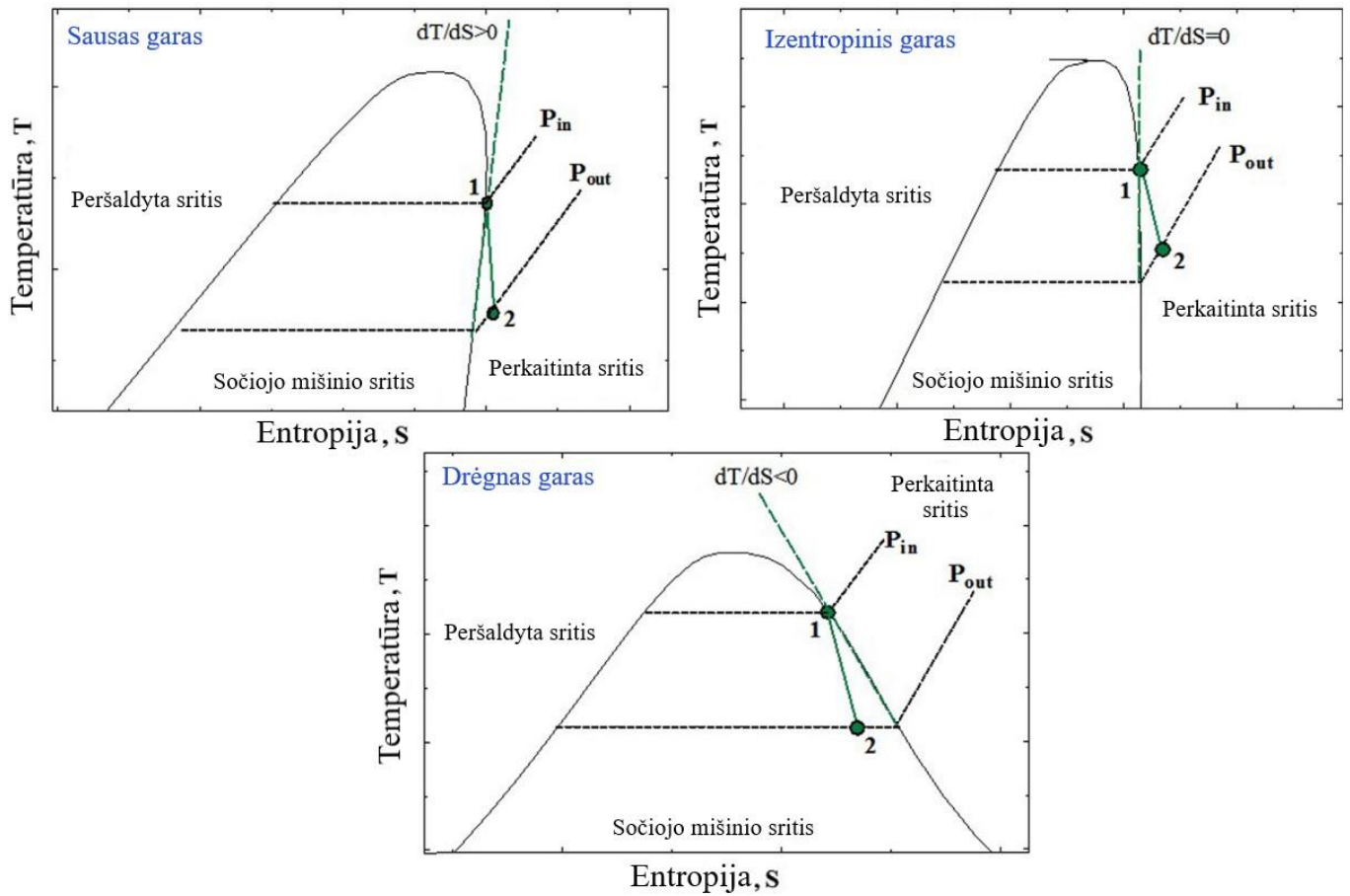
*Sauga:* operatoriaus sveikatos ir saugos klausimais pageidautina naudoti netoksiškus ir nedegius organinius skysčius, kad apsaugotumėte darbuotojus skysčiui nutekėjus iš sistemos. Netinkamai parinktas fluidas gali būti ir korozijos priežastis.

*Medžiagų suderinamumas:* organiniai skysčiai turi turėti nerūdijančias ir neeroduojančias savybes, kad galėtų būti suderinti su šių dienų inžinerinėmis medžiagomis. Jos yra naudojamos ORC komponentams gaminti, tokiems kaip: šilumokaičiai, ekspenderiai, sandarikliai ir tarpinės bei jungiamieji vamzdžiai.

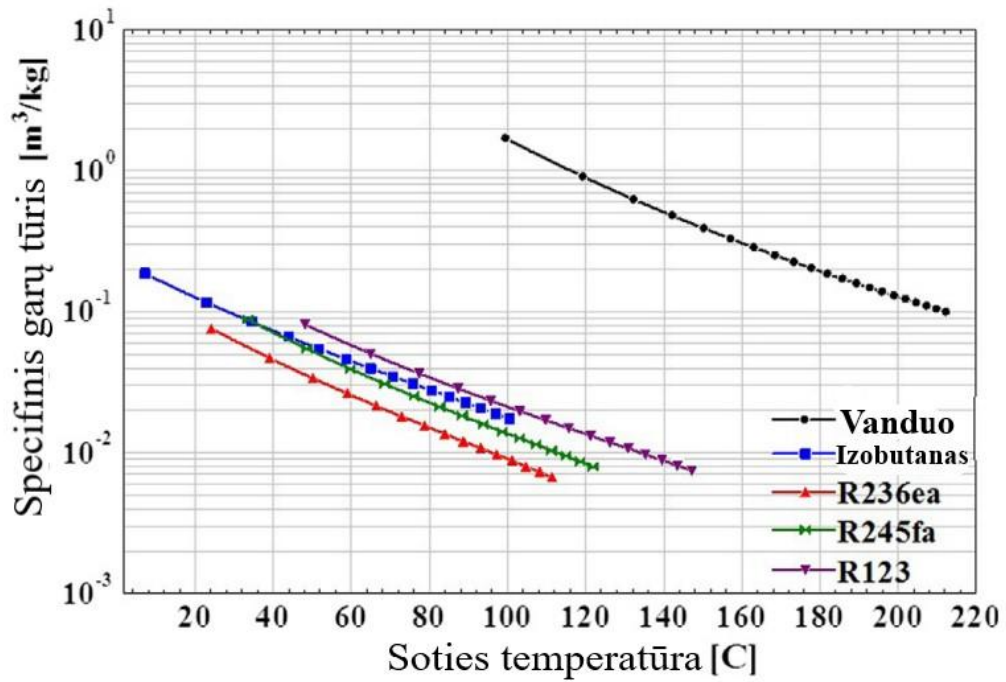
*Klumpumas:* Mažas klumpumas tiek skystoje, tiek garų fazėje yra naudingas siekiant sumažinti šilumokaičių ir vamzdžių trinties nuostolius.

*Kaina ir prieinamumas:* Darbo agentai, kurie yra naudojami ORC technologijoje yra brangūs. Fluidų kainų sumažėjimą lemtų gamybos apimties padidėjimas. Dėl vis atsirandančių naujų tarptautinių protokolų, tam tikrų organinių skysčių yra atsisakoma. Taigi, prieš išsirenkant darbo agentą, būtina išsianalizuoti jo prieinamumą ir ekonomiškumą.

Tačiau nėra vieno universalaus organinio fluideo, kuris vienu metu atitiktų visus aukščiau išvardintus reikalavimus. Skystis yra parenkamas pagal skirtingus kriterijus ir šilumos šaltinį. Šių dienų literatūroje aprašyta ir atlikta daugybė tyrimų, kuriuose tiriamos įvairios tinkamo organinio agento parinkimo procedūros ir metodai.



18 pav. Sausų, izentropinių ir šlapių garų temperatūros – entropijos diagrama



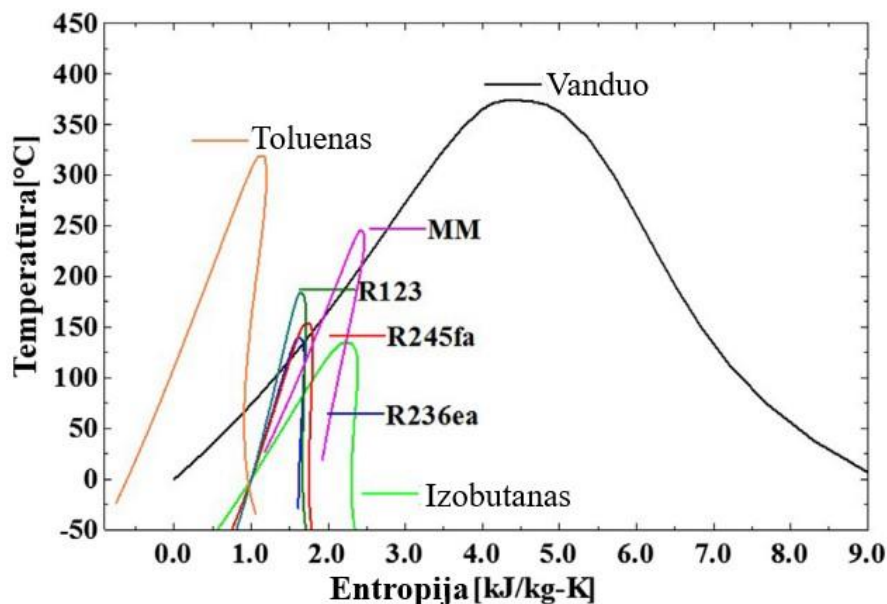
19 pav. Įprastų šaltnešių ir vandens sočiųjų garų specifinis tūris, palyginant su sočiųjų medžiagų temperatūra

Mokslininkas Hung'as [46] ištyrė penkis skirtingus darbinus agentus ir palygino juos pagal negrižtamumo pasiskirstymą skirtinguose ORC komponentuose. Tyrimas parodė, kad efektyvus ORC veikimas priklauso nuo dviejų pagrindinių veiksnių, tai darbo sąlygų ir skysčių termodinaminių savybių. Iš tirtų skysčių p-Ksilenas pasižymėjo mažiausiu negrižtamumu ir pasirodė labiausiai tinkamas aukštos temperatūros mažo potencialo atliekinei šilumai atgauti. Saleh'as ir kt. [42] atliko 31 gryno organinio junginio atrankos procesą. Jame alkanai, fluorinti alkanai, eteriai ir fluorinti eteriai. Autoriai įvertino visų šių skysčių ciklo šiluminį efektyvumą tiek paprastam ORC, tiek ORC su rekuperatoriumi. Buvo atsižvelgiama ir iki kritinėms, tiek superkritinėms ciklų konfigūracijoms, nustatant šiluminį efektyvumą. Jie padarė išvadą, kad didžiausią šiluminį efektyvumą pasiekia sausi skysčiai su aukšta virimo temperatūra ORC sistemoje su rekuperatoriumi. N-pentanas parodė didžiausią šiluminį efektyvumą – 13 %. Drescher'is [47] sukūrė programinę įrangą, kuri skirta rasti termodinamiškai tinkamą ORC darbinį agentą. Kurdamas programą jis ištyrė daugiau nei 700 junginių ir pritaikė naują įrenginio dizainą, norint išvengti suspaudimo laipsnio taško garavimo pradžioje. Didžiausią ciklo šiluminį efektyvumą pasiekė alkilbenzenų šeima. Tchanche'as ir kt. [48] tyrė tinkamų darbo agentų pasirinkimą ORC sistemoms su saulės kolektoriais, kuriose teka žemos temperatūros agentas. Buvo ištirta 20 organinių skysčių savybės ir palygintos pagal šiluminį efektyvumą, tūrio srautą, plėtimosi santykį, toksiškumą ir degumą. Tyrimas parodė, kad nė vienas iš tirtų skysčių neturi visų pageidaujamų savybių, o sprendimas kurį agentą reikia pasirinkti turi būti priimtas atsižvelgus į kiekvieno skysčio pranašumus ir trūkumus. Autoriai padarė išvadą, kad minėtam pritaikymui palankiausiomis savybėmis pasižymi R134a darbo agentas, po to R152a, R290, butanas ir izobutanas. Branchini's ir kiti [49] atliko sisteminį ORC tyrimą, apskaičiuodamas jo veikimą pagal šešis skirtingus termodinaminius parametrus, įskaitant ciklo efektyvumą, specifinį darbą, regeneravimo efektyvumą ir šilumokaičių dydžio parametą. Visam tam naudodami tris aromatinės medžiagas, tris siloksanus, du šaltnešius ir tris angliavandenilius kaip darbo agentus. Atliktas tyrimas suteikė naudingos informacijos, kaip rasti tinkamiausią balansą tarp darbo agento ir ORC sistemos pagal apibrėžtus veikimo parametrus ir pritaikymą. Larsen'as [50] naudojo kelis regresijos modelius, kad nustatytų optimalų ciklo šiluminį efektyvumą, o tada klasifikavo geriausius fluidus plačiam šilumos šaltinio temperatūrų diapazonui. Remiantis rezultatais, tarp optimalių skysčių dominuoja šaltnešiai ir alkanai (sausieji skysčiai).

#### **2.4. Palyginimas su garo Renkino ciklu**

Garas (tradicinis) Renkino ciklas yra viena iš brandžiausių ir patikimiausių technologijų, skirtų didelio masto šiluminei energijai paversti naudingą elektros energiją, naudojant vandenį kaip darbo agentą. Pats vanduo vertinamas kaip palankus skystis, pasižymintis geru terminiu stabilumu, mažu klampumu. Jis taip pat yra pigus, jo išteklių gausūs, efektyviai perneša energiją (didelė latentinė ir specifinė šiluma), netoksiškas ir nedegus, neturintis poveikio aplinkai. Tačiau vanduo laikomas drėgnu skysčiu su neigiamu soties kreivės nuolydžiu, kaip yra parodyta 17 paveikslėlyje. Tai yra pagrindinis skirtumas tarp vandens ir daugumos dažniausiai naudojamų organinių skysčių, kurie yra arba sausi, arba izotropiniai, kaip parodyta 19 paveikslėlyje. Dėl šios priežasties vanduo turi būti perkaitinamas (iki 500°C arba 600 °C) Renkino cikle (RC), kad būtų išvengta kondensacijos išsiplėtimo metu. Be to, esant tokioms aukštoms RC temperatūroms, netinkamai izoliuotoje turbinoje gali ištikti netolygūs ar greiti temperatūros pokyčiai turbino korpuse, o dėl to gali būti pažeistos tarpinės [51]. Priešingai, naudojant sausus ir izotropinius skysčius bei žemos ir vidutinės temperatūros fluidus (iki 300°C) organinio Renkino ciklo technologijoje sumažėja perkaitinimo įrangos ir sudėtingos izoliacijos poreikis. Vandeniui entropijos pokytis tarp sočiųjų skysčių ir garų

kreivių yra daug didesnis nei organinių junginių, kaip parodyta 20 paveikslėlyje. Dėl to RC garintuve yra didelis negrižtamumas ir dėl to mažesnis eksergijos efektyvumas, lyginant su ORC. Tačiau didelė latentinė šiluma vandeniui teikia pranašumą, palyginti su organiniais skysčiais, nes esant tokiam pačiam šilumos kiekiui, reikalingas daug mažesnis vandens masės srautas, o tai reiškia mažesnes siurblio energijos sąnaudas nei ORC sistemoje.



20 pav. Vandens ir organinių darbo agentų temperatūros-entropijos diagrama

Taip pat, RC technologija dažnai veikia žemiau atmosferos slėgio, kad padidintų šiluminį efektyvumą. Neišvengiamas subatmosferinės kondensacijos rezultatas yra nekondensuojančių dujų įsiskverbimas į sistemą, todėl visame procese reikalinga pridėti oro šalinimo įrangą - deaeratorių [52]. Priešingai, turint platų organinių darbo agentų asortimentą, galima pasirinkti tuos, kurių kondensacijos slėgis yra didelis, ir sumažinti kondensacijos, viršijant atmosferos slėgį. Tai reiškia mažesnę sistemos priežiūrą. Be to, atsižvelgiant į vandens charakteristikas (mažas tankis ir didelis entalpijos kritimas), RC technologijos turbinos konstrukcija dažnai yra sudėtinga ir brangi dėl kelių pakopų (daugiau nei dviejų) dizaino ir išėjimo taškų tarp kiekvieno etapo. Taip yra siekiama padidinti ciklo efektyvumą ir pašalinti nesikondensuojančias dujas. Priešingai tradiciniam Renkino ciklui, organinių skysčių charakteristikos yra palankesnės (didelis tankis ir mažas entalpijos kritimas). Tai reiškia, kad ORC technologijos turbinos konstrukcija yra paprastesnė - su viena ar dviem pakopomis ir mažesniu periferiniu greičiu, kuris sumažina konstrukcinius įtempimus. 4 lentelėje apibendrinami RC ir ORC privalumai ir trūkumai, kai jie naudojami mažos ir vidutinės kokybės atliekinės šilumos atgavimui.

Galima daryti išvadą, kad technologijoms, kurioms reikalinga aukšta temperatūra ir elektros energija gaminama nacionalinės generacijos būdu į bendrą tinklą, tradicinio Renkino ciklo technologija yra tinkamesnė, atsižvelgiant į jos kainą ir sudėtingumą. O vietinės generacijos technologijoms labiausiai tinka žemos ir vidutinės temperatūros šilumos šaltiniai (saulės energijos šiluma, geoterminė šiluma, pramoninės mažo potencialo atliekinė šiluma). Vietinės generacijos elektros gamybos sistemoms reikia minimalios priežiūros ir išlaidų, o tai ORC technologiją padaro perspektyviu pasirinkimu. Verta paminėti, jog išnagrinėjus daugelį tyrimų apie mažos galios elektros gamybos technologijas, ORC yra laikoma pagrindine jėgaine elektros gamybai.

#### 4 lentelė. RC ir ORC palyginimas

Tradicinis garo Renkino ciklas (RC)	Organinis Renkino ciklas (ORC)
<b>Privalumai</b>	
Darbo agentas yra pigus ir jo ištekliai gausūs	Mažo potencialo šilumos energijos pritaikymas (saulės, geoterminės ir pramonės atliekinės šilumos energijos)
Mažesnis masės srautas, o tai reiškia mažesnes siurblio sąnaudas	Mažas įrenginio dydis dėl didelio skysčio tankio
	Žemas organinio darbo agento slėgis ir temperatūra
	Nedidelės kapitalo ir priežiūros sąnaudos
	Paprasta turbinos konstrukcija (vienos arba dviejų pakopų)
<b>Trūkumai</b>	
Neekonomiškai mažas šiluminis efektyvumas, kai išmetamųjų garų temperatūra nukrenta žemiau nei 370 °C	Didesnis masės srautas, o tai reiškia didesnes siurblio sąnaudas
Didelės kapitalo sąnaudos, išskylančios saugumo problemos. Tai pat sudėtinga sistema dėl aukštos temperatūros ir slėgio reikalavimų (500 °C ir 60 Bar)	Mažesnis efektyvumas esant aukštesnei temperatūrai (virš 450 °C)
Didelės išlaidos norint išvengti turbinos menčių korozijos ir erozijos. Šiuos procesus sukelia garų lašeliai	
Sudėtinga turbinos konstrukcija (kelios pakopos ir dideli gabaritai)	
Privalomas oras pašalinimas iš darbo agento – vandens, deaeratoriaus pagalba.	

## 2.5. ORC technologijos integravimas su atsinaujinančiais energijos šaltiniais

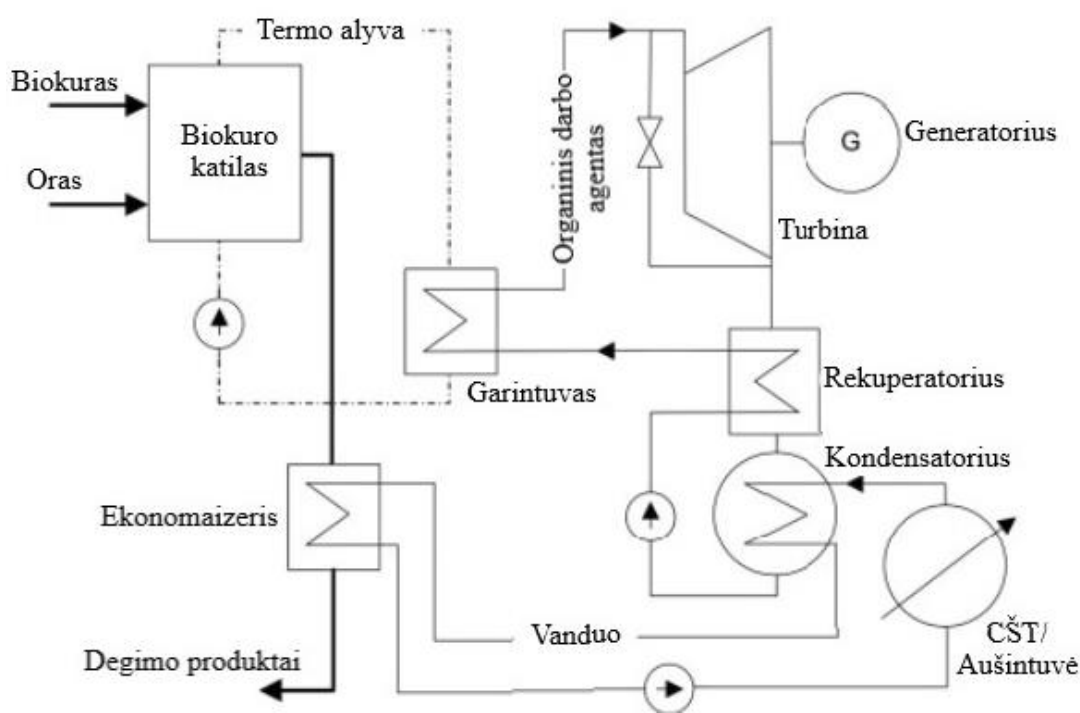
### 2.5.1. Biokuro ORC jėgainės

Biomasė yra ketvirtas pagal dydį energijos šaltinis pasaulyje, kuris sudaro apie 10 % pasaulio energijos poreikio [53]. Biomasė yra plačiai prieinama pramonės ir žemės ūkio procesų, tokių kaip baldų pramonė arba žemės ūkio ir miško atliekos. Biokuras turi didelį potencialą vienu metu tiekti šilumą ir elektrą (vykdyti kogeneraciją). Biokuras paverčiamas šilumos energija jį deginant, o tuo tarpu šiluma gali būti paverčiama elektra naudojant plačiai aptartą ORC technologiją. Šiomis dienomis tokia sistemų sąsaja susilaukia vis daugiau dėmesio, ypač nedidelės galios vietinei generacijai. Dviejų technologijų bendras veikimas pateiktas 21 paveikslėlyje.

Sugeneruota šiluma biokuro pakuroje (dujų pavidalu) perduoda šilumos energiją darbiniam agentui (terminai alyvai). Tuomet įkaitinta terminė alyva nukreipiama į ORC garintuvą, kad organinis darbinis skystis virstų garais. Tarpinis darbo agentas, šiuo atveju terminė alyva, turi tam tikrus privalumus. Vieni iš jų: žemas slėgis garintuve, mažas jautrumas apkrovų pokyčiams, paprastas, saugus ir patikimas valdymas [54].

Liu'as ir kt. [55] ištyrė 2 kW galios biomase kūrenamos kogeneracinės sistemos termodinaminį modeliavimą naudojant paprastą ORC. Buvo testuojami trys skysčiai, tokie kaip HFE7000, HFE7100 ir n-pentanas. Darbo agentai parodė, kad tiek perkaitinimas, tiek peraušinimas kenkia ORC šiluminiam efektyvumui. Pranešama, kad bendras kogeneracijos efektyvumas lygus apie 80 %, o elektros generavimo efektyvumas nuo 7,5 % iki 13,5 %. Autoriai padarė išvadą, kad ORC

efektyvumas priklauso nuo kelių veiksnių, įskaitant modeliavimo sąlygas, darbinius fluidus, karšto vandens temperatūrą biomasės katile. Efektyvumas taip pat priklausė nuo kogeneracinės technologijos tiekiamos šilumos kiekio ir kokybės. Qiu'as [56] atliko eksperimentinį biokuro kūrenamos mikro kogeneracinės sistemos tyrimą. Sistema buvo pagrįsta ORC technologija su rekuperatoriumi ir naudojant 50 kW šiluminės galios biokuro pakurą. Eksperimentui buvo panaudota mentinis rotacinis variklis (kaip turbina) ir HFE7000 darbo agentas. Rezultatas buvo toks: elektros energijos galia 0,861 kW, kogeneracijos efektyvumas 78,69 %, elektros generacijos efektyvumas 1,41 %. Prando ir kt. [57] įvertino biokuro katilo veikimą su ORC, kai darbo agentas buvo MDM (oktametiltrisiloksanas). Buvo tiriama energetinis naudingumas realiomis eksploataavimo sąlygomis. Autoriai nustatė, kad centralizuoto šilumos tiekimo tinklo temperatūrai sumažėjus 10°C, ORC sistemos generatoriaus elektros efektyvumas pagerėjo 1 %. Jie taip pat padarė išvadą, kad šis temperatūros sumažėjimas sumažino susijusius nuostolius katile, įskaitant išmetimo latentinius šilumos nuostolius, kurie sudarė 9 % katilo generuojamos galios.

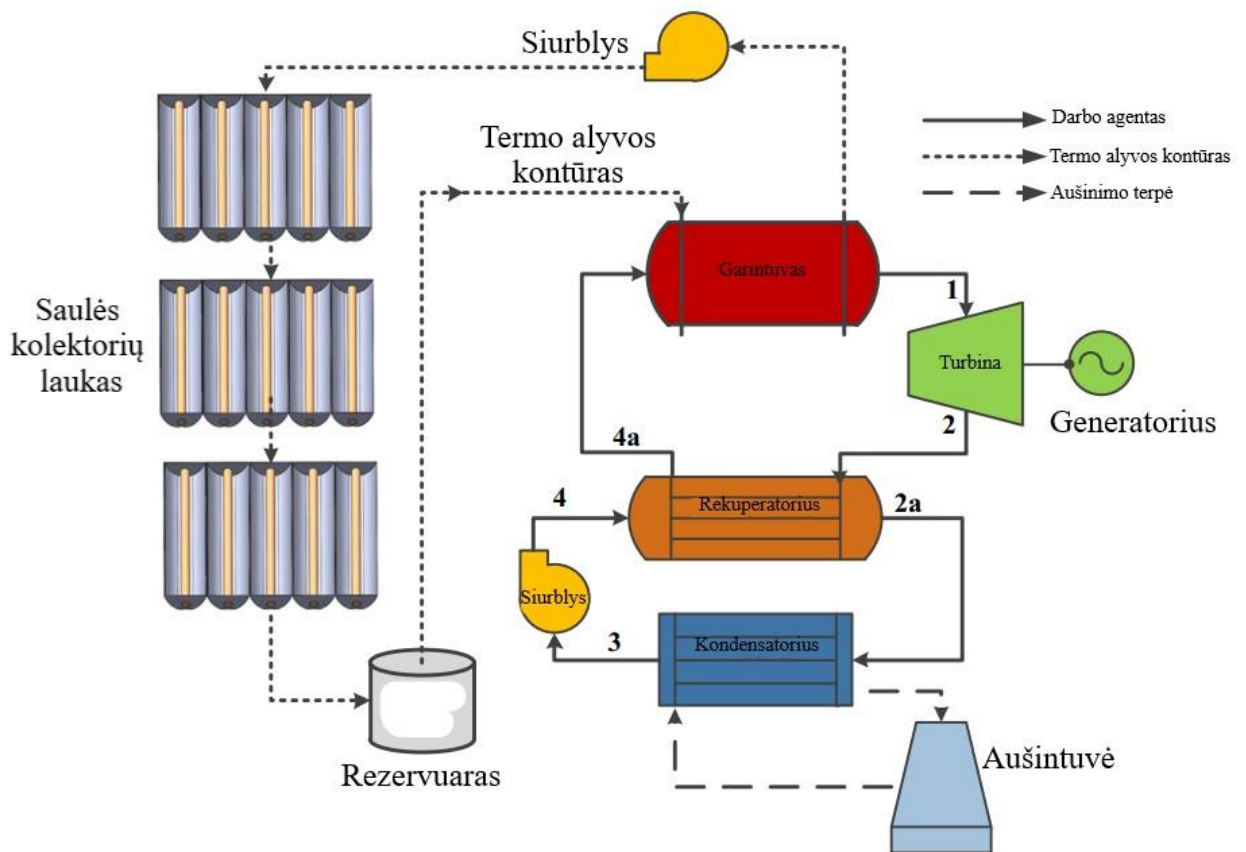


21 pav. Biokuro ORC jėgainės schema [58]

### 2.5.2. Saulės ORC jėgainės

Saulės energija yra vienas iš perspektyviausių atsinaujinančių išteklių, nes ji yra neišsenkanti, neteršianti aplinkos ir naudojama daugelyje pasaulio šalių. Saulė išleidžia  $4 \cdot 10^{26}$  W energijos, bet spinduliuotės iki žemės paviršiaus pasiekia maždaug  $8 \cdot 10^{16}$  W [59]. Nustatyta, kad saulės išskiriamas energijos kiekis per valandą yra  $430 \cdot 10^{20}$  J ir toks kiekis viršija 2001 m. visos žemės energijos suvartojimą ( $410 \cdot 10^{20}$  J) [60]. Saulės energija gali būti naudojama elektros gamybai dvejais būdais. Pirmasis, tai tiesiogiai, pasitelkus fotovoltinius modulius. Antrasis, netiesiogiai, pasitelkus saulės šiluminę energiją. Saulės šiluminės energijos gamyba yra generuojama naudojant koncentruotus kolektorius. Kolektoriai koncentruoja saulės spinduliuotę į vadinamą židinio liniją arba židinio tašką, priklausomai nuo kolektoriaus tipo. Spinduliuojama šiluma naudojama darbo agentui pašildyti. Šis keliauja per minėtus kolektorius. ORC yra patikima ir alternatyvi technologija, kuri gali panaudoti

tokią mažo potencialo šilumą, ypač mažose elektros energijos gamybos sistemose. 22 paveikslėlyje parodyta saulės ORC jėgainės schema.



22 pav. Saulės ORC jėgainės schema

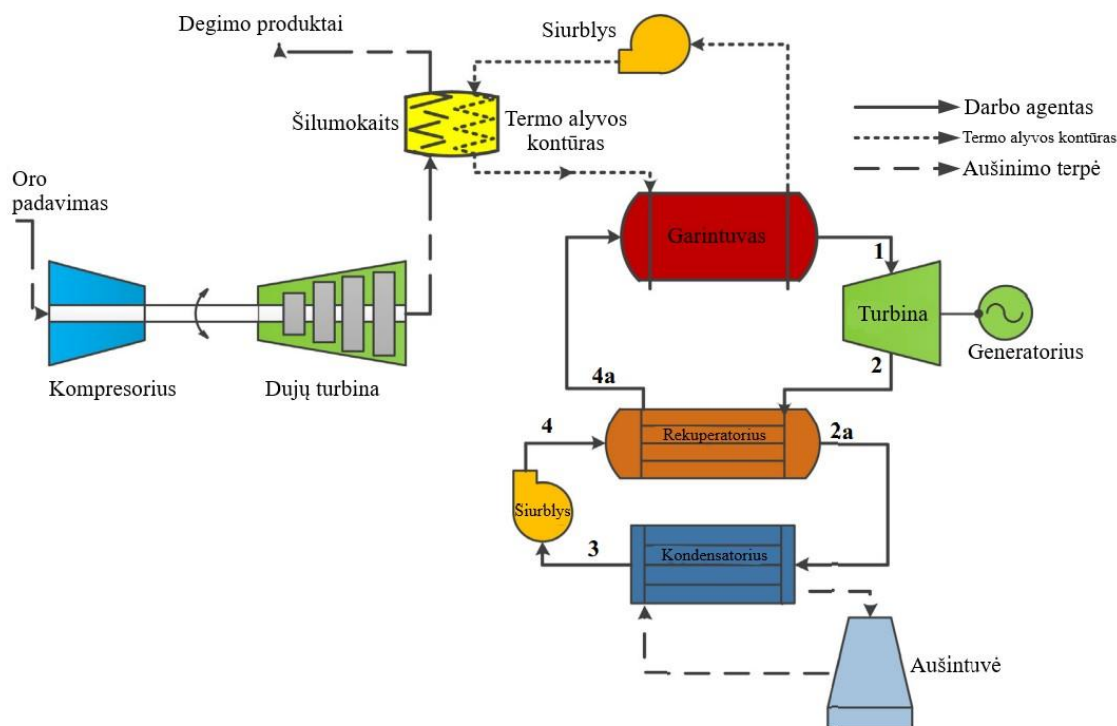
Delgado-Torres'as ir kt. [61] išanalizavo energiją saulės ORC jėgainėje, kuri naudojama atvirkštinio osmoso gėlinimo procesui. Jie įvertino 12 organinių darbo agentų ir skirtingų rinkoje parduodamų stacionarių saulės kolektorių modelių veikimą kartu. Buvo nagrinėjami šie organiniai junginiai: R134a, R227ea, propanas ir R245ca. Tuo pačiu analizuojami tokie kolektorių tipai: plokštieji, sudėtiniai paraboliniai ir vakuuminiai vamzdiniai. Autoriai svarstė dvejus garų susidarymo būdus, tai netiesioginį garų susidarymą, naudojant vandenį kaip šilumos perdavimo skystį, ir tiesioginį garų susidarymą kolektorių viduje. Gauti rezultatai parodė, kad sausiems fluidams reikalingas mažesnis angos plotas nei drėgniems fluidams, išskyrus amoniaką. Minimalus saulės kolektoriaus angos plotas buvo gautas 10–11 m<sup>2</sup>/kW, naudojant vakuuminį vamzdinį kolektorių tiesioginio garų generavimo metodu ir apšviečiant 1000 W/m<sup>2</sup> saulės apšvita.

Pei'as ir kt. [62] atliko naujoviškos saulės ORC jėgainės tyrimą su regeneracija, mažos koncentracijos paraboliniu kolektoriumi ir R123 darbinio agentu modeliavimą. Autoriai nustatė tokios sistemos privalumus, susijusius su sumažintu šilumos perdavimo negrįžtamumu. Rezultatai parodė, kad ORC technologijos elektrinis efektyvumas su regeneracija yra 8,6 %, kai apšvita yra 750 W/m<sup>2</sup>, o be regeneracijos efektyvumas siekia 4,9 %. Antonelli's [63] tyrinėjo šiluminę elektrinę, kurioje buvo įrengtas tūrinis ekspenderis ir koncentruoti paraboliniai saulės kolektoriai. Šiame tyrime buvo išsamiai ištirta ekspenderio ir kolektoriaus sąveika kartu, atsižvelgiant į galią, izentropinį efektyvumą, specifinį skysčio suvartojimą, saulės kritimo kampą ir darbo agento temperatūrą. Analizė atskleidė darbinio agento prisotinimo temperatūros poveikį šiluminiam efektyvumui, ekspenderio veikimui ir

papildomų įrengimų naudojančiai galiai. Tyrėjai taip pat padarė išvadą, kad esant 110–120 °C temperatūrai, apšvitos koncentracijos santykis turėtų būti ribojamas iki 1,75–2,25 koeficiento. Wang'as ir kt. [64] atliko saulės ORC jėgainės projektinę analizę, naudodant tuos pačius koncentruotus parabolinius kolektorius ir R245fa darbo agentą. Autoriai ištyrė sistemos veikimą keičiantis aplinkos temperatūrai, terminės alyvos masės srautui ir garų srautui paraboliniuose kolektoriuose. Eksperimentas buvo atliekamas kelių mėnesių eigoje. Rezultatai parodė, kad sumažėjus aplinkos temperatūrai ir terminės alyvos masės srautui, galima pagerinti ciklo našumą dvejais būdais: esant maksimaliam eksergijos efektyvumui gruodžio mėn. ir maksimaliai galiai – birželį arba rugsėjį.

### 2.5.3. Kombinuoto ciklo ORC jėgainės

Didelės galios jėgainėse įprasta panaudoti išmetamą šilumą su degimo produktais šilumos ar garo generavimui. Šiluma iš dujų turbinos, kuri veikia pagal Braitono ciklą, yra nuvedama į garo gamybos technologiją, kuri veikia pagal organinį Renkino ciklą. Po dujų turbinos išsiplėtę 450 °C–550 °C temperatūros degimo produktai paprastai yra panaudojami kaip mažo potencialo šiluma organinio Renkino cikle. Tačiau devintajame dešimtmetyje atsiradus mikro dujų turbinoms, ši technologija buvo puikiai pritaikyta vietiniai generacijai. O tokias nedidelių gabaritų turbinas, kurių galia mažesnė nei 500 kW, o išmetamųjų dujų temperatūra mažesnė nei 400°C, galima puikiai integruoti su ORC technologija. Organinio Renkino ciklo sistema leidžia padidinti bendrą dvejų technologijų sąsajų efektyvumą. 23 paveikslėlyje pavaizduota mikroturbinos ir ORC principinė schema.



23 pav. Dujų turbinos su ORC technologija schema

Invernizzi's [65] ištyrė galimybę pagerinti 100 kW elektrinės galios mikro dujų turbinos ir ORC bendros sistemos, našumą, nagrinėdamas šešiolikos skirtingų organinių fluidų veikimą. Termodinaminė analizė parodė, kad naudojant heksametildisiloksaną (MM) kaip darbo agentą, kombinuota technologijų konfigūracija grynąja elektros galia padidėjo 33,3 %, o tai prilygo 40 %



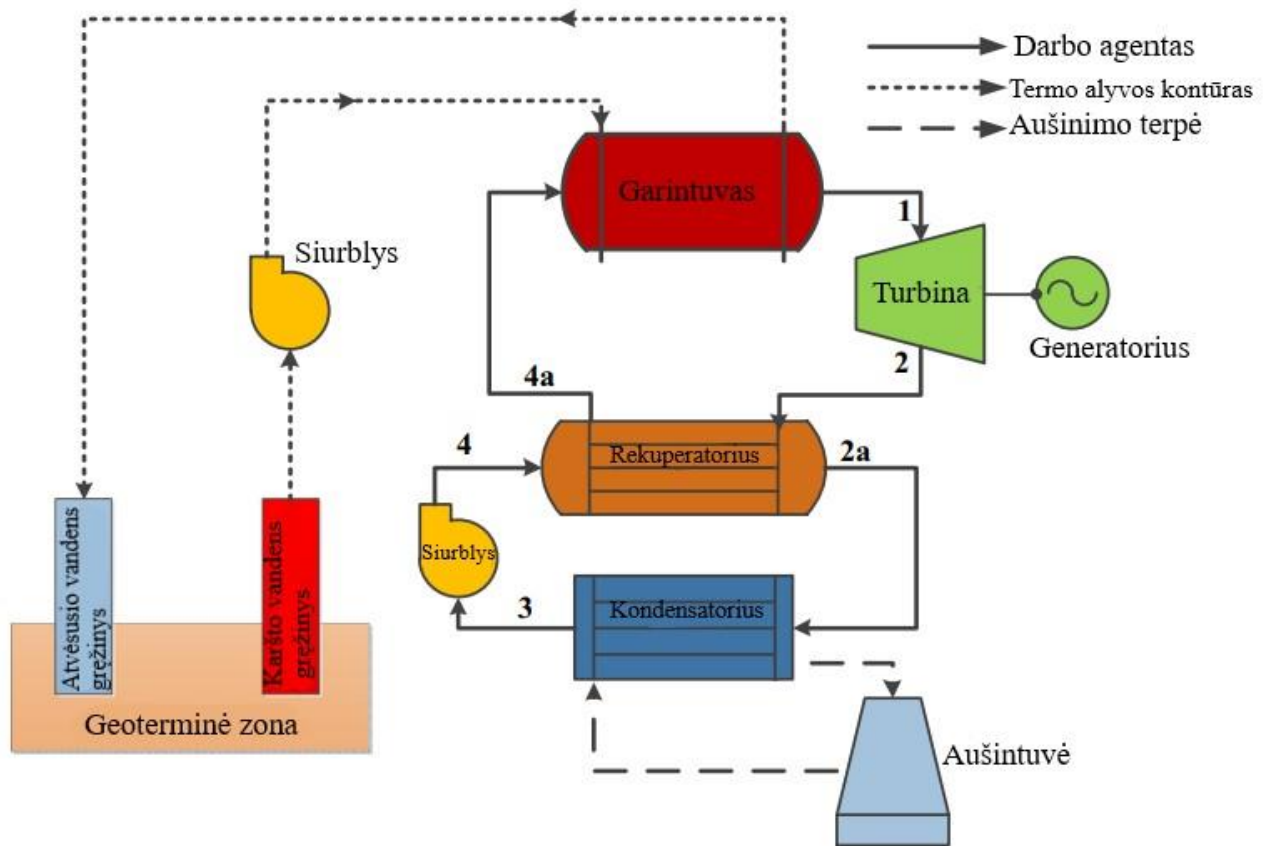
elektrinio efektyvumo padidėjimui. Muñoz de Escalona's ir kt. [66] išanalizavo penkių komercinių dujų turbinų, kurios buvo kombinuotos su ORC technologija vardinę ir dalinę apkrovą. Tyrimas buvo atliekamas naudojant aštuonis organinius darbo agentus, įskaitant MM, R245fa, izopentaną ir tolueną. Autoriai ištyrė įvairias apkrovos valdymo strategijas, kaip surinkti kuo daugiau šilumos iš dujų turbinos išmetamųjų dujų, siekiant maksimaliai padidinti bendrą sistemos efektyvumą. Pastebėta, kad išlaikant pastovų garų srauto greitį ORC sistemoje, gaunama didžiausia galia bet kokiomis darbo sąlygomis, įskaitant dalinę apkrovą. Khaljani's ir kt. [67] atliko dujų turbinos ir ORC bendros sistemos termodinaminį, eksergoekonomišką ir aplinkosaugos vertinimą, kai kartu buvo naudojamas likutinės šilumos atgavimo garo generatorius ir R123 darbo agentas. Rezultatai parodė, kad eksergija greičiausiai yra prarandama dujų turbinos degimo kameroje. Taip pat buvo įrodyta, kad padidinus slėgio santykį kompresoriuje ir pagerinus dujų turbinos efektyvumą, pagerėja sistemos veikimas, bet tai lemia didesnes investicijas.

Rashidi's ir kt. [68] atliko parametrinį garų Renkino ciklo optimizavimą su ORC technologija (darbo agentas - amoniakas) ir dviem tiekimo vandens šildytuvais, naudodami dirbtinį grandininį tinklą kaip optimizavimo schemą. Tikslinėmis funkcijomis buvo laikomi šiluminiai ir ekserginiai naudingumo koeficientai bei specifinė generuojama (išeinanti) galia. Rezultatai parodė, kad amoniako specifinės galios ir šiluminio bei ekserginio efektyvumo vertės yra žymiai didesnės nei vandens. Liu'is ir kt. [69] ištyrė atliekinės šilumos atgavimą iš įprasto garo Renkino ciklo (RC) ir ORC technologijos bendros sistemos. Taip pat jie ištyrė devynis galimus organinius darbo agentus, tokius kaip R134a, R245fa, R365mfc ir R1234yf. Jie įvertino visų fluidų veikimą pagal bendrą ciklo efektyvumą esant įvairiam garo turbinos išėjimo slėgiui ir aušinimo oro temperatūrai, tiek paprastai ORC sistemai, tiek su rekuperatoriumi. Gauti rezultatai rodo, sistemos efektyvumas gali būti pagerintas naudojant ORC su rekuperatoriumi o tarp tirtų darbo agentų geriausiai pasirodė benzenas, su kuriuo kombinuoto ciklo efektyvumas yra 33,35 %.

#### **2.5.4. Geoterminės ORC jėgainės**

Geoterminė energija, kuri natūraliai yra giliose žemės sluoksniuose, yra atsinaujinanti energijos forma ir laikoma atsinaujinančiu energijos šaltiniu. Apskaičiuota, kad 3 km gylyje nuo žemės paviršiaus yra sukaupta energija ir dydis siekia net  $43000000 \cdot 10^{18}$  J [70]. Šią energiją galima išnaudoti gręžiant gilius gręžinius ir iš jų traukiant karštą vandenį, kuris naudojamas kaip šilumos nešėjas. Geografinė padėtis daro įtaką karšto vandens temperatūrai. Visgi, vidutinis geoterminis gradientas šalia žemės paviršiaus yra apie 300 K/km [54]. Karštas vanduo perduoda savo šilumos energiją į organinį skystį ORC garintuve. Atvėsęs karštas vanduo po garintuvo grįžta į kitą gręžinį, t.y. į kitą kanalą. Geoterminės ORC jėgainės schema yra pavaizduota 24 paveikslėlyje.

Liu'is ir kt. [71], atliko ORC termodinaminį tyrimą su šlapio aušinimo sistema, kai buvo naudojami penki angliavandeniliai, varomi geoterminės šilumos 100-150 °C temperatūros diapazone. Rezultatai parodė, kad optimali kondensacijos temperatūra maksimaliai galiai pasiekti yra apie 29,6 °C, kai aušinimo vandens temperatūra yra apie 20 °C. Geriausius rezultatus parodė izobutanas, siekiant pasiekti didžiausią galią, esant 120°C geoterminio vandens temperatūrai. Zhai'as ir kt. [72] atliko geoterminės ORC jėgainės organinių junginių patikrą, įskaitant angliavandenilius ir hidrofluoro anglies darbo agentus. Autoriai sukūrė termodinaminį modelį, skirtą optimizuoti generuojamą galią pagal garavimo temperatūrą. Rezultatai parodė, kad karšto vandens temperatūra turi svyruoti nuo 110 iki 130 °C, siekiant gauti didžiausią galią.



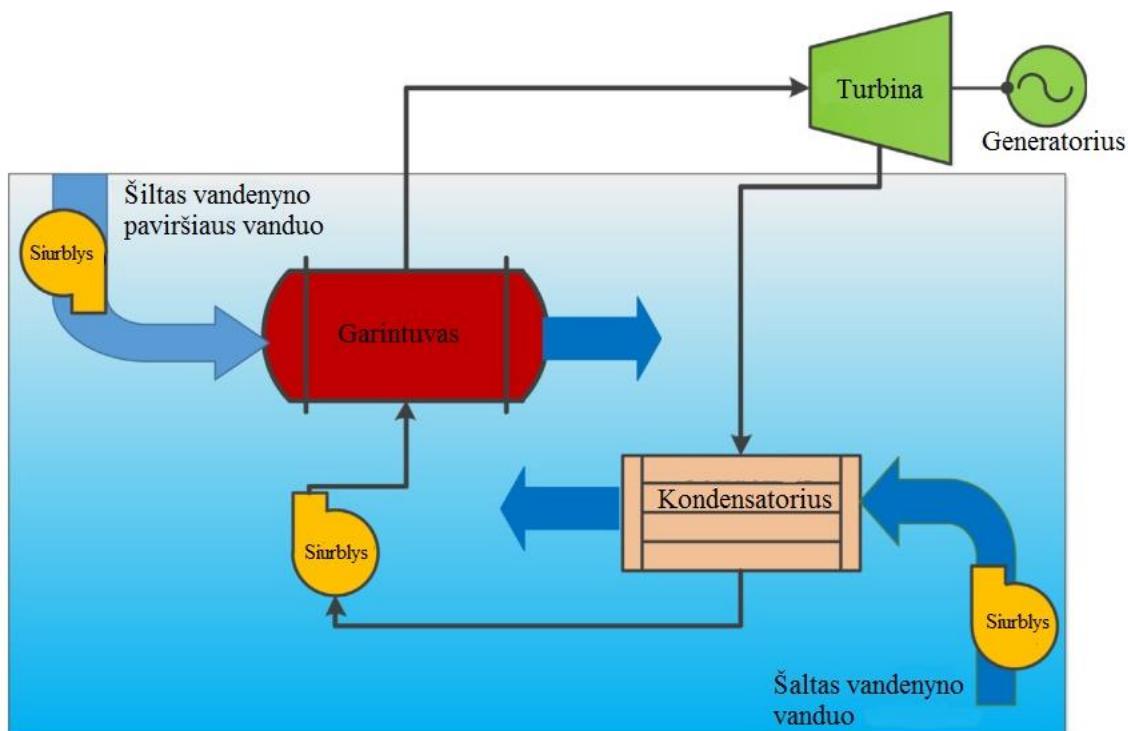
24 pav. Geoterminės ORC jėgainės schema

### 2.5.5. Vandenyno ORC jėgainės

Vandenynai užima daugiau nei 70 % žemės paviršiaus ir yra didžiausia pasaulyje saulės energijos surinkimo ir saugojimo saugykla. Vandenynų energija galėtų būti naudojama kaip gausi ir neišsenkanti atsinaujinanti energija. Vandenyno šiluminės energijos konversija yra technologija, kuri išgauna energiją iš vandenynų natūralaus terminio gradiento. Kitaip tariant, nepanaudota saulės energija, kuri yra įstrigusi viršutiniuose vandenyno vandens sluoksniuose, gali būti paversta elektra per termodinaminį ciklą. Kadangi vandens temperatūra maždaug 50 m gylyje nuo jūros lygio yra nuo 20 iki 29 °C, ORC technologija yra efektyvus sprendimas šią mažo potencialo šilumą paversti elektros energija. Tokioje sistemoje vandenyno paviršiuje esantis šiltas vanduo naudojamas kaip kaitinimo terpė organiniam darbo agentui garintuve išgarinti. O šaltas vandenyno vanduo esantis gilesniame gylyje yra naudojamas kaip aušinimo terpė organiniam fluidui kondensuoti. 25 paveikslėlyje atvaizduota sistemos schema, kurioje ORC technologija gamina elektrą pasitelkiant vandenyno vandenį.

Wang'as ir kt. [73] patikrino vandenyno šilumos energijos konversijos panaudojimą kartu su saulės energija galimybę gaminti elektros energiją. Autoriai ištyrė turbinos ir kondensatoriaus temperatūrų ir slėgio poveikį sistemos kokybei ir efektyvumui, naudojant tiek sausus (t. y. R113, R114, R123), tiek šlapius fluidus (pvz., R11, R152a, R500). Pateikti rezultatai parodė, kad šlapi skysčiai su stačiai kylančia sočiųjų garų kreive T-s diagramoje, parodė geresnes bendras charakteristikas, palyginti su sausais skysčiais. Sun'as ir kt. [74] optimizavo ORC eksergijos efektyvumą, naudojamą vandenyno šiluminės energijos konversijos sistemoje su tokiais darbo agentais kaip amoniaku ir R134a. Bendra

sistemos grynoji galia buvo pasiekta remiantis ORC technologijos kintančiais parametrais. Didžiausią įtaką galiai darė šilto ir šalto vandens temperatūra, šilto vandens masės srautas ir temperatūros esančios garintuve bei kondensatoriuje. Tyrimas parodė, kad norint padidinti maksimalią galią, visų pirma reiktų naudoti amoniaką kaip darbo agentą. Reikia paminėti, jog šilumokaičio dydis taip pat lemia generuojamą galią.



**25 pav.** Vandenyno ORC jėgainės principinė schema

Dėl per didelio slėgio ir saugumo ORC sistemose, daugumoje literatūroje aprašytų tyrimų buvo nagrinėjama subkritinė ORC konfigūracija esant įprastai ORC technologijai ir esant ORC technologijai su rekuperatoriumi (2 ir 4 pav.). Todėl subkritinei ORC sistemai didžiausią garavimo temperatūrą lemia kritinė organinio darbinio skysčio temperatūra. ORC garavimo temperatūra yra suskirstyta į tris kategorijas ir kiekvienai kategorijai perspektyviausi skysčiai yra išvardyti remiantis aukščiau pateikta literatūros apžvalga (5.4. poskyris). Organinių skysčių sąrašas pagal temperatūrą pateiktas 26 paveikslėlyje.



Darbo agentas	T <sub>kritinė</sub> (°C)
R134a	101.1
R245fa	154.1
R152a	113.3
R236fa	124.9
R227ea	102.8
R143a	72.7
R236ea	139.3
Izobutanas	144.9
Amoniakas	132.3

Darbo agentas	T <sub>kritinė</sub> (°C)
R123	183.7
R245ca	174.6
Butanas	152
HFE7000	164.5
HFE7100	195.3
Pentanas	196.5
Izopentanas	187.2
Heksametildisiloksanas	245.5
Etanolis	241.6

Darbo agentas	T <sub>kritinė</sub> (°C)
Benzenas	288.9
Toluenas	318.6
MDM	290.9
MD4M	380.1
D4	313.3
Cikloheksanas	280.5

**26 pav.** Optimaliausių darbo agentų sąrašas, atsižvelgiant į šilumos šaltinio temperatūrą ir darbo agento kritinę temperatūrą

### 3. ORC modeliavimas biokuro katilinėje

#### 3.1. Dabartinė situacija

Šiuo metu didžiąją dalį šiluminės energijos Lietuvos šilumos ūkyje pagamina biokuro deginamos katilinės, t. y. apie 80 %. Tokio kuro pasirinkimas praityje centralizuotam šilumos ūkiui atnešė didelę sėkmę, tai leido smarkiai atpiginti šilumos kainą (nuo 2012 m. centralizuota šiluma atpigo iki 40 %). Biokuro katilinės ne tik atpigino šilumos kainas, tačiau smarkiai sumažino ir anglies dvideginio išmetimus. Prieš biokuro įgaines 2004 m., šilumos energiją į centralizuotą šilumos tinklą tiekė dujinės katilinės ir jos dominavo kaip pagrindinis gamintojas. Centralizuotos šilumos sektoriuje gamtinių dujų pakeitimas biokuro leido maždaug 1,3 milijonais tonų per metus sumažinti CO<sub>2</sub> išmetimus į atmosferą. Šie pokyčiai mažina CO<sub>2</sub> išmetimus ir Lietuvoje. Biokuras yra laikomas CO<sub>2</sub> atžvilgiu neutraliu kuru. Jo nepanaudojus, o palikus pūti miške ar sąvartyne, CO<sub>2</sub> išmetimai nesumažėtų, tiesiog CO<sub>2</sub> bei kitos šiltnamio efektą sukeliančios dujos puvimo metu išsiskirtų kitoje vietoje. Taip pat ir dėl to, kad augdamas medis, sugeria tokį patį CO<sub>2</sub> kiekį, kurį išskiria deginamos medienos atliekos [75]. Visgi, Lietuvos strategija pereiti nuo dujinių katilinių į biokuro katilines, atnešė kitų sąnaudų padidėjimą. 1 ir 2 skyriuje išanalizavus biokuro ir dujinės katilinės ypatumus galima matyti, jog biomasės vandens šildymo katilinė suvartoja žymiai didesnę kiekį elektros energijos nei dujinė katilinė. Biokuro vandens šildymo katilinės sąnaudos elektros energijos gamybai yra 2,2 %, o dujinės katilinės – 0,15 % (1 ir 2 lentelės). Dėl šios priežasties privalu galvoti apie katilinės efektyvinimą, t. y. elektros energijos gamybą.



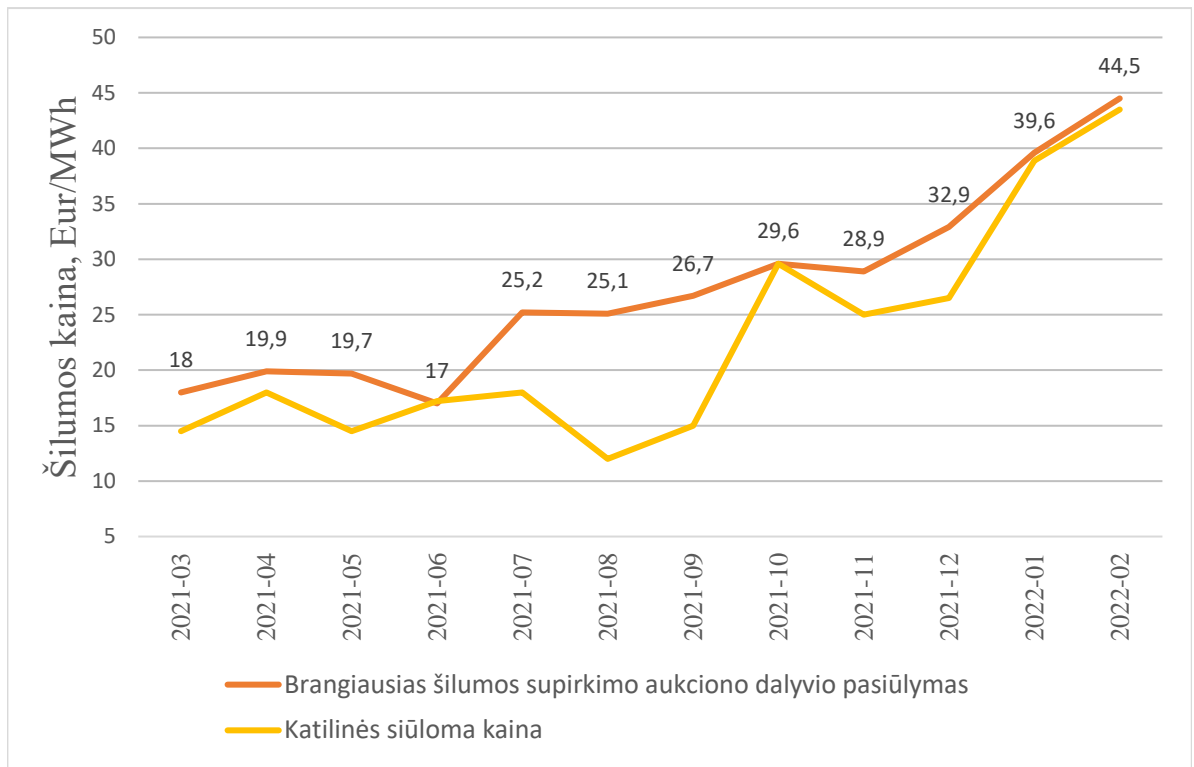
27 pav. Biokuro katilinės Lietuvos miestuose [76]

Viena iš Lietuvos šilumos gamybos bendrovių nori padidinti savo šiluminės katilinės efektyvumą ir sumažinti generuojamos šilumos energijos savikainą. Taigi, šios galimybių studijos tikslas yra įvertinti Organinio Renkimo ciklo veikimą menamoje biokuro katilinėje, norint apsirūpinti elektros energijos gamyba savoms reikmėms.

#### 3.2. Energijos išteklių kainos

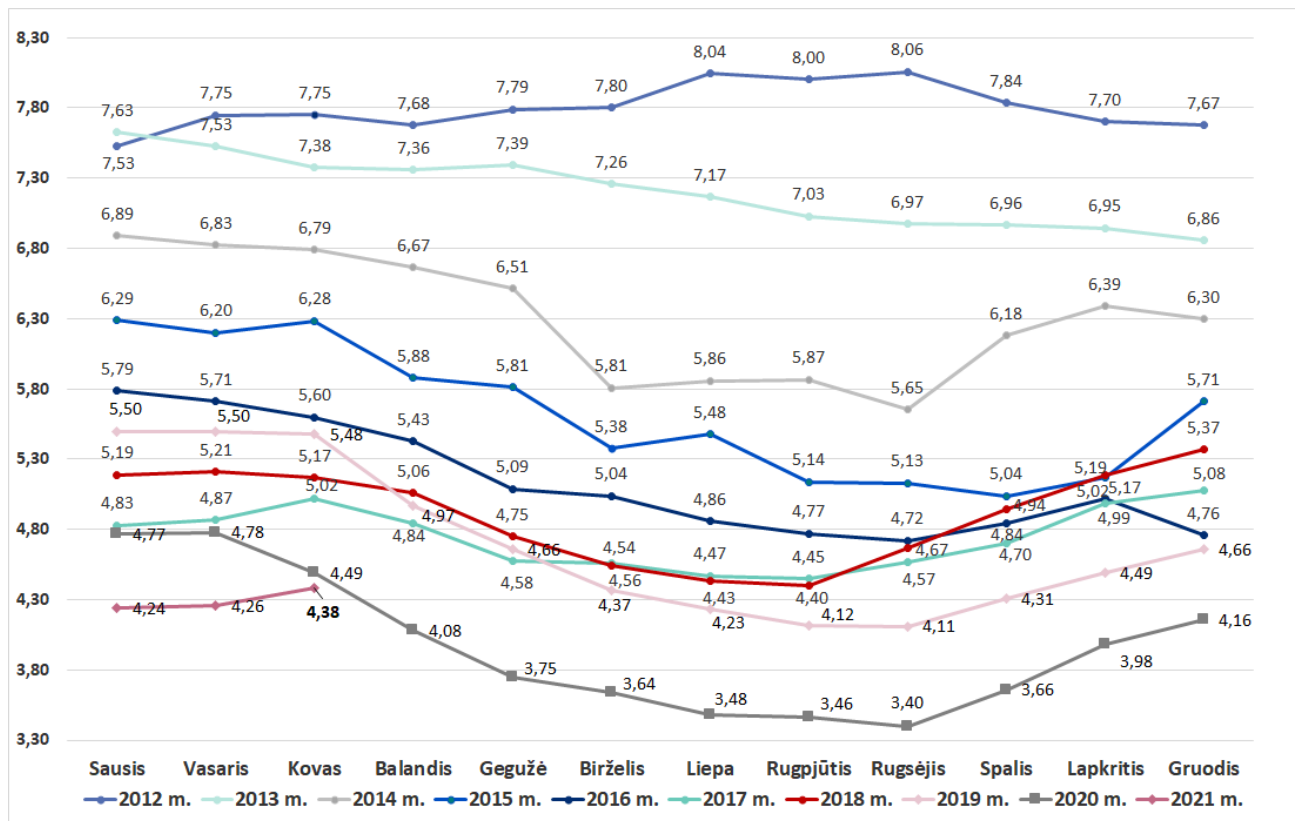
##### 3.2.1. Šilumos pardavimo kainos

Katilinė savo pagamintą šilumos energiją realizuoja dalyvaudama šilumos supirkimo aukcione, o realizuojamos šilumos kaina priklauso nuo daugelio faktorių, tokių kaip pilnas centralizuoto šilumos tiekimo tinklo poreikis, konkurencija su kitais prie tinklo prijungtais šilumos šaltiniais ir sėkmingo kuro įsigijimo. Dėl šių priežasčių nuspėti busimą realizuojamos šilumos kainą yra gana sudėtinga. Remiantis „BaltPool“ šilumos aukciono duomenimis, buvo sudarytas realizuojamos šilumos kainos grafikas, kuris atvaizduotas 28 paveikslėlyje.



28 pav. Realizuojama šilumos kaina

29 paveikslėlyje yra pateikta vidutinė šilumos kaina visoje Lietuvoje. Grafikas prasideda nuo 2012 m., kai Lietuvoje prasidėjo biokuro katilinių bumai.



29 pav. Vidutinė šilumos kaina Lietuvoje, ct/kWh be PVM, 2012–2021 metais [77]

Vertinant ORC įrenginius, dalis šilumos energijos bus sunaudojama elektros energijos gamybai. Dėl šios priežasties nepagamintą šilumos energiją reikės įsigyti iš šilumos aukciono. Vertinant nepagamintą šilumos kainą daroma prielaida, kad šiluma turės bus įsigyjama už didžiausią pasiūlytą šilumos kainą (28 paveikslėlyje pažymėta oranžinė linija).

Daroma prielaida, kad šilumos įsigijimo kaina artimiausiu metu neišaug lyginant su esama situacija. Nors Lietuvoje ir pasaulyje šiuo metu vyksta ekonomikos augimas ir infliacija, kas visgi turėtų skatinti šilumos kainų augimą. Taigi, šiai dienai neįmanoma tiksliai nuspėti kainos kitimo, todėl skaičiavimai atliekami taikant šios dienos kainas ir nenumatant jų pasikeitimo per vertinimo laikotarpį.

### 3.2.2. Elektros energijos kaina

Biokuro katilinė mokėdama už elektrą moka ne tik už įsigyjamą elektros energiją tačiau ir už papildomus mokesčius, tokius kaip:

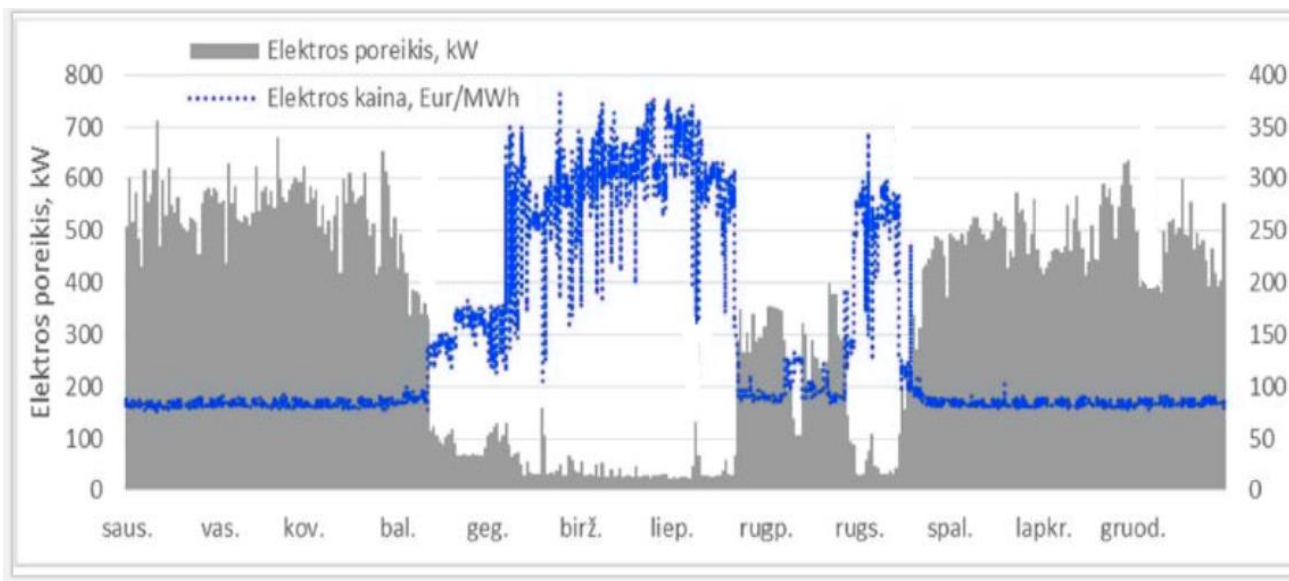
- skirstymo mokestis;
- akcizai;
- viešuosius interesus atitinkanti paslauga (VIAP);
- galios užsakymas;
- ir kiti susiję mokesčiai.

5 lentelėje pateikiami pagrindinės elektros energijos dedamosios menamoje katilinėje.

**5 lentelė.** Elektros energijos kainos dedamosios biokuro katilinėje (2021 metų vasario mėnesį)

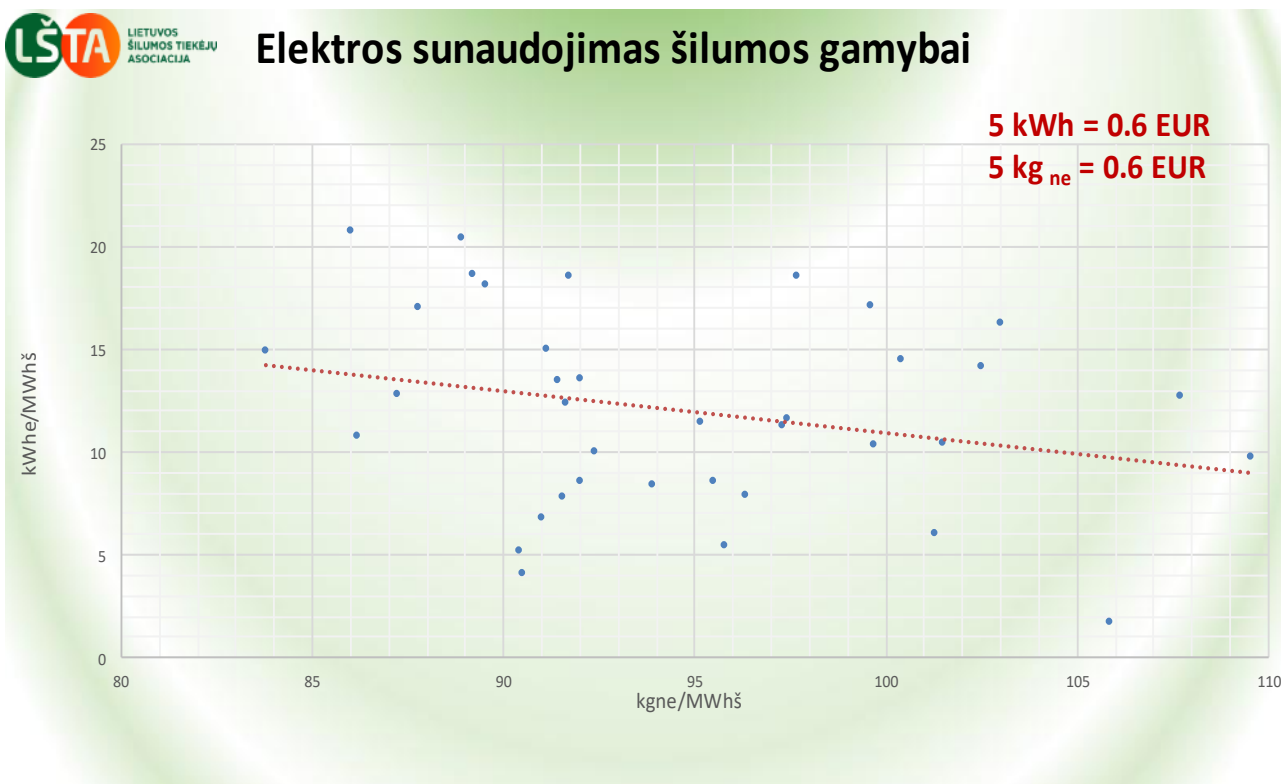
Eil. Nr.	Dedamoji	Reikšmė
1	Įsigyjamos elektros energijos kaina	48,71 Eur/MWh
2	Persiuntimo paslaugos kaina (galios dedamoji)	4,05 Eur/kW/mėn.
3	Persiuntimo paslaugos kaina (maksimalių apkrovų dedamoji)	19 Eur/MWh
4	Persiuntimo paslaugos kaina (vidutinių apkrovų dedamoji)	13 Eur/MWh
5	Persiuntimo paslaugos kaina (minimalių apkrovų, švenčių ir nedarbo dienų dedamoji)	12 Eur/MWh
6	Mokestis už II patikimumo kategoriją	0,36 Eur/kW/mėn.
7	Viešuosius interesus atitinkanti paslauga	6,83 Eur/MWh
8	Akcizo mokestis	0,52 Eur/MWh.

Iš pateiktų duomenų lentelėje galima matyti, kad dalis dedamųjų nepriklauso nuo suvartotos elektros energijos kiekio, o tik nuo užsakomų galios pajėgumo arba paros laiko kurio sunaudojama elektros energija. Todėl pilna elektros kaina svyruoja ir kiekvieną mėnesį gali būti kitokia. 30 paveikslėlyje atvaizduojama kokia būtų elektros kaina prie 2018 metų elektros energijos suvartojimo jeigu tuo metu galiotų šios dienos tarifai.



30 pav. Biokuro katilinės elektros energijos kaina ir poreikis

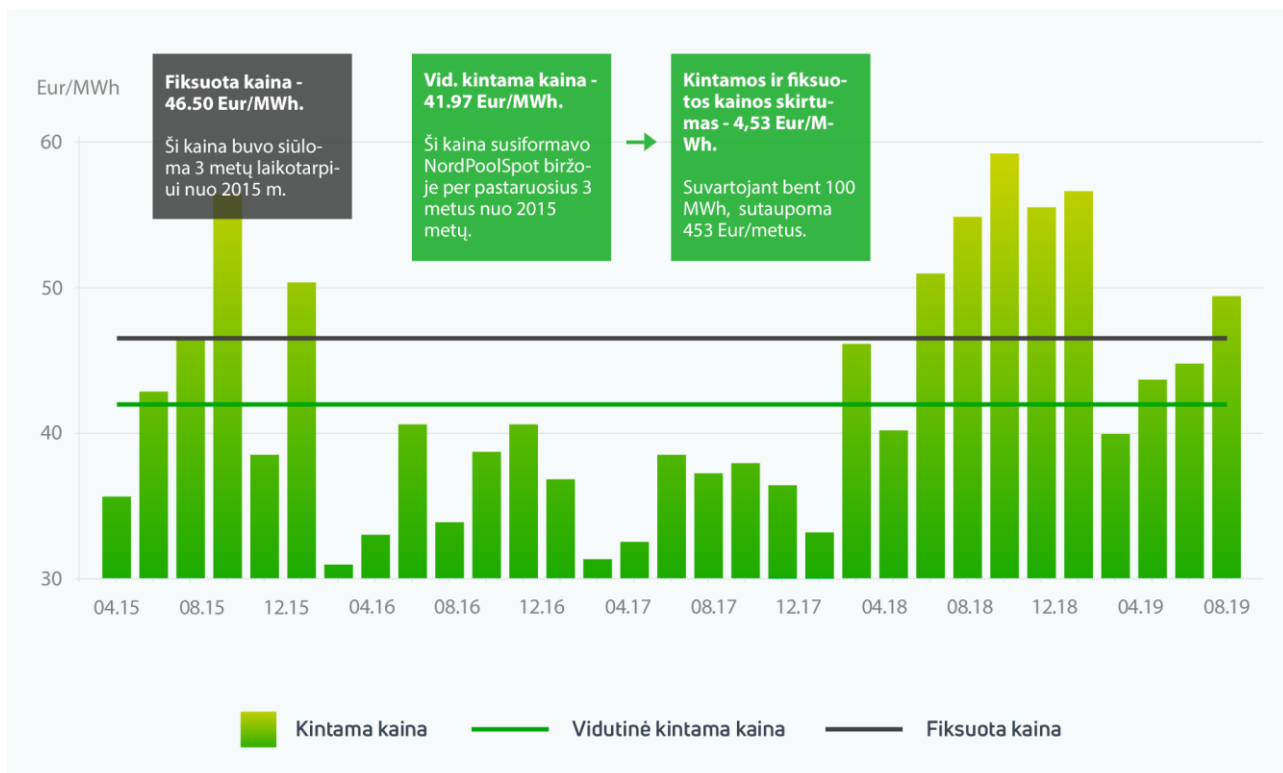
31 paveikslėlyje atvaizduota vidutinis elektros sunaudojimas Lietuvos biokuro katilinėse.



31 pav. Elektros sunaudojimas šilumos gamybos gamybai (kWhe/MWhš - Lyginamosios šilumos gamybos elektros energijos sąnaudos; kgne/MWhš - Lyginamosios kuro sąnaudos) [75]

Informacijos apie elektros kainą verslui literatūroje ir interneto platybėse praktiškai nėra. Tačiau 32 paveikslėlyje pateikta kelių metų senumo informacija, kuri leidžia susidaryti bendrą vaizdą apie elektros kainą verslo sektoriuje.





32 pav. Kintama elektros kaina verslui [78]

30 paveikslėlyje matyti, kad tais laikotarpiais kai katilinė nominaliu režimu gamina šilumos energiją, elektros energijos poreikis išauga ir jos kaina nusistovi ties 80-90 Eur/MWh.

Pastaruoju metu Lietuvoje stebima elektros kainų augimo tendencija. Analitikai numato, kad elektros energijos kaina ir toliau augs, o per artimiausius 5 metus elektros kaina išaugs nuo esamo vidurkio apie 47 Eur/MWh iki 59 Eur/MWh [79], arba apie 5 %/metus.

### 3.3. Šilumos energijos gamyba biokuro katilinėje

#### 3.3.1. Šilumos gamybos šaltiniai

Biokuro katilinėje veikia du biokurą deginantys katilai. Šių katilų aprašymas pateikiamas žemiau.

Pirmasis vandens šildymo tipo katilas su ardynine biokuro pakura (PKS-10,5), kurio gaminamo šilumos srauto galia siekia 9 MW. Katilo kuras – biokuras. Katilo kuro sunaudojimas gali siekti 3725 kg/val. Maksimalus vandens debitas – 199 m<sup>3</sup>/val. Lyginamasis kuro sunaudojimas lygus 95,5 kgne/MWh.

Antrasis tai vandens šildymo katilas su medienos pakura, kurio gaminamo šilumos srauto galia siekia 8 MW. Šis biokuro katilas dirba kartu su kondensaciniu ekonomazeriu CEG4000, kurio našumas siekia 4,04 MW. Katilo kuras – biokuras (smulkinta mediena). Katilo galios reguliavimo diapazonas svyruoja nuo 25 % iki 100 %. Kuro sunaudojimas dirbant nominaliu apkrovimu siekia siekti 3725 kg/val. Katilo efektyvumas dirbant nominaliu apkrovimu siekia 88,5 %. Lyginamasis kuro suvartojimas siekia 464,2 kg/MWh.

6 lentelėje galima matyti katilų charakteristikas.

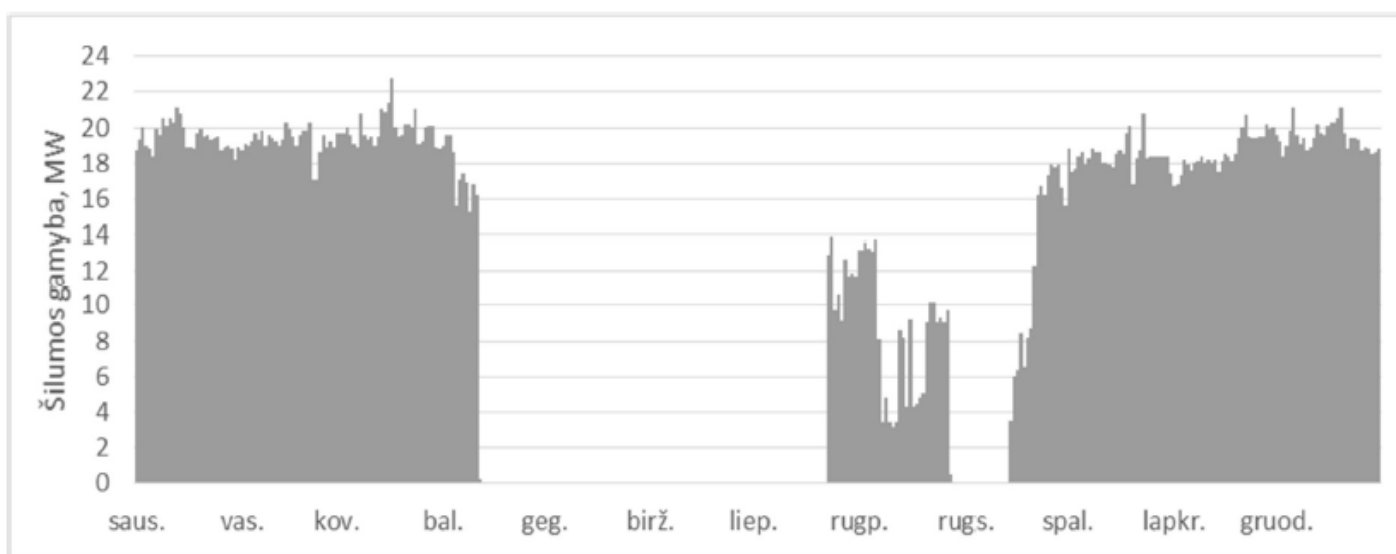
#### 6 lentelė. Biokuro katilų techninės charakteristikos

Katilas eil. nr.	Galia	Maksimali vandens temperatūra iš katilo	Vandens temperatūra į kitą katilą	Vandens srautas katilo recirkuliacijos linijoje
1	9 MW	130 °C	90 °C	300 m <sup>3</sup> /val.
2	8 MW	130 °C	84–90 °C	300 m <sup>3</sup> /val.

Tam, kad reikėtų minimaliai keisti katilinės aprišimo schemą, ORC įrenginys skaičiuojamas tik vienam katilui, tuo tarpu kitas katilas bus naudojamas sklandesniam į CŠT tiekiamo vandens temperatūros reguliavimui.

#### 3.3.2. Biokuro katilinėje pagaminamas šilumos kiekis

Vertinant biokuro katilinės gamybos parametrus buvo nagrinėta faktinė 2018 metų šilumos gamyba. Gamybos apimtys pateikiami 33 paveikslėlyje.



33 pav. Šilumos gamyba biokuro katilinėje

33 paveikslėlyje matyti, kad biokuro katilinėje šiluma gaminama tik šildymo sezono metu. Per metus katilinė išdirba apie 5 770 val. arba apie 2/3 viso laiko kai CŠT tinklas naudoja šilumą. Taip pat atkreiptinas dėmesys, kad veikimo metu katilinė beveik visą laiką veikia nominaliu apkrovimu ir pagal poreikį nusikrauna tik vasaros sezono metu. Per metus katilinė pagamina apie 92,6 GWh šilumos. Atliekant ORC įrenginio ekonominius skaičiavimus daroma prielaida, kad biokuro katilinė ir ateityje veiks panašiu režimu.

#### 3.4. ORC technologijos įrengimo tikslingumo vertinimas

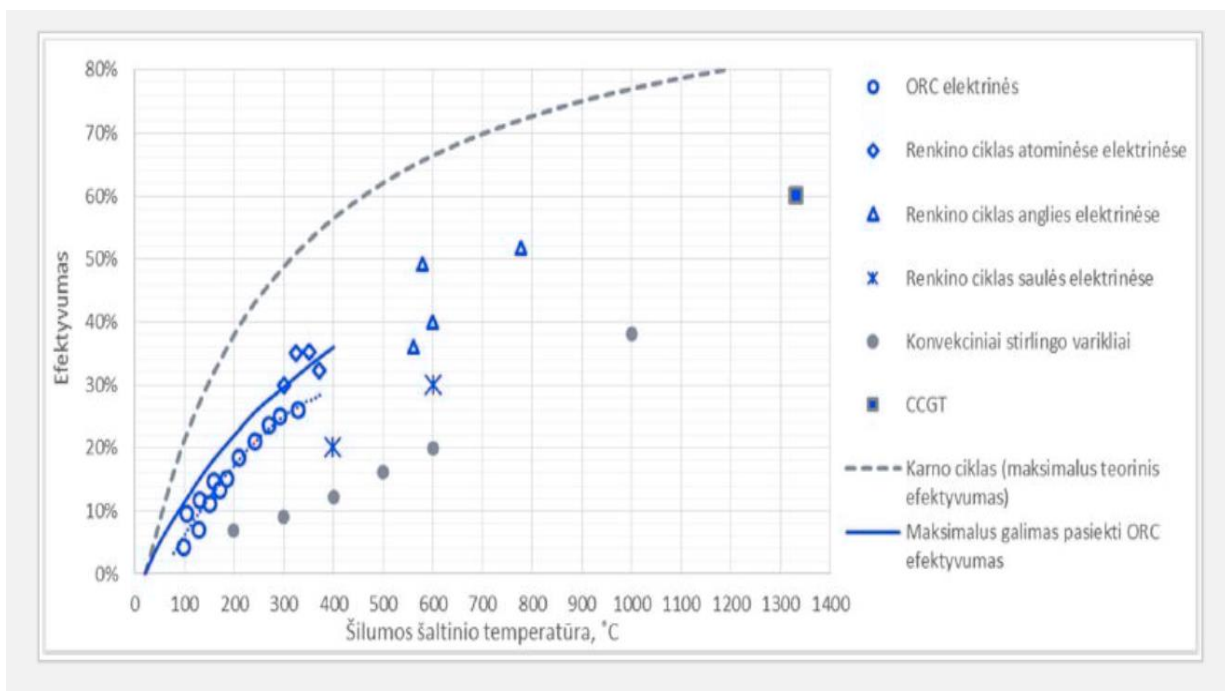
##### 3.4.1. Technologijos aprašymas

Apie ORC technologiją plačiai buvo aptarta 5 skyriuje. Tačiau svarbu susidėlioti pagrindinius aspektus apie šią nagrinėjamą sprendimą:

- tai sistema, kuri sąlyginai nedaug skiriasi nuo plačiai žinomo įprastinio Renkino ciklo, kuris plačiai naudojamas energetikoje (vandens garo turbina);
- ORC sistemoje naudojamas organinis darbo agentas (dažniausiai freonai);

- Organinis darbo agentas užverda prie žemesnės temperatūros nei vanduo, o tai leidžia generuoti elektros energiją panaudojant mažo potencialo šilumos energiją.

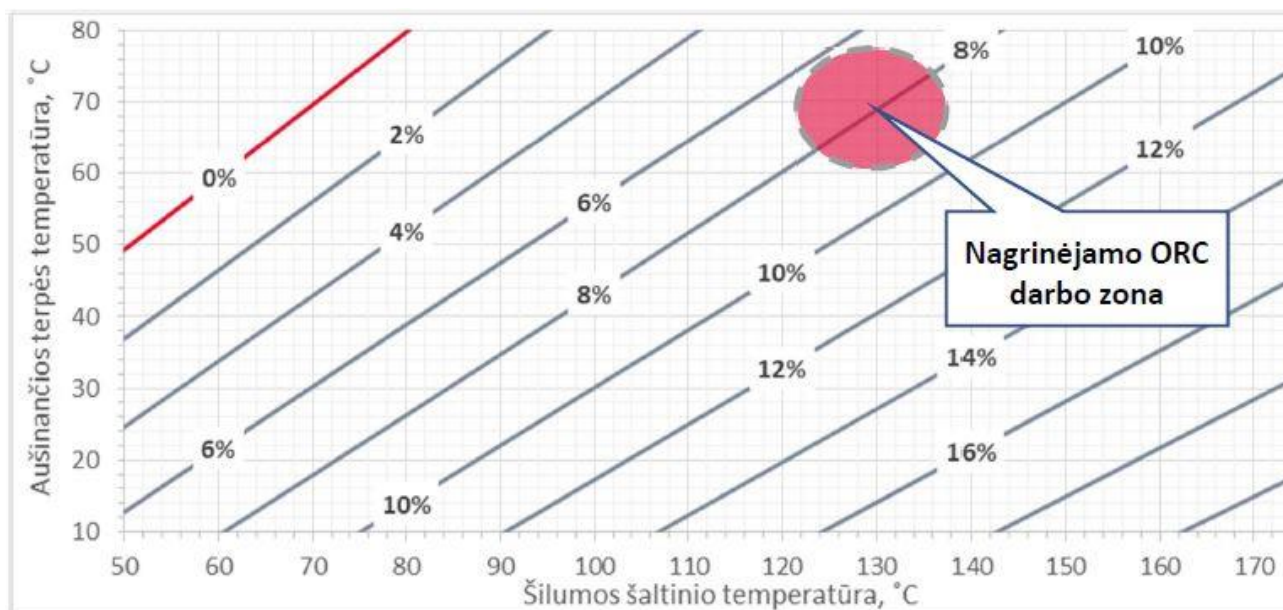
Termodinamikos dėsniai teigia, jog visų šilumos variklių efektyvumas didžiąją dalimi tiesiogiai priklauso nuo šilumos šaltinio temperatūros ir aušinimo temperatūros santykio. Idealaus šilumos variklio maksimalų galimą efektyvumą aprašo Karno ciklas. Maksimalus teorinis efektyvumas atvaizduotas 33 paveikslėlyje ir pažymėtas pilka punktyrine linija.



**34 pav.** Šiluminių elektrinių efektyvumas priklausomai nuo šilumos šaltinio temperatūros [80]

Išanalizavus 34 paveikslėlį galima daryti išvadą, kad ORC technologija, tai beveik vienintelė elektros generacijos technologija, kuri yra naudojama, kai šilumos energijos šaltinio temperatūra yra žemesnė nei 300 °C. Raudona išsitiesusi linija pažymėtas teorinis maksimaliai galimas išgauti ORC įrenginio efektyvumas (įvertinant šilumnešio perkaitinimą, peraušinimą, entropijos augimą ir panašius veiksnius), šis teorinis efektyvumas yra apie 5 % aukštesnis už praktikoje pasiekiamą efektyvumą.

Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad grafike pateikiamas šilumos variklių efektyvumas, kai kondensacijos temperatūra lygi aplinkos temperatūrai (15 °C). Tuo tarpu nagrinėjamu atveju kondensacijos temperatūra apsprendžiama CŠT tinklo grįžtamam termofikaciniui vandeniui.



**35 pav.** ORC technologijos teorinis efektyvumas įvertinus šilumos šaltinio ir aušinančios terpės temperatūras [81]

35 paveikslėlyje yra matoma, jog esant aušinimo terpės temperatūrai artimai 70 °C, o šilumos šaltinio temp. apie 130 °C, maksimalus teorinis ORC įrenginio efektyvumas gali apytiksliai 8 %. Tačiau būtina įvertinus tai, kad realus įrenginys visuomet turi vidinius nuostolius, tuomet realus ORC efektyvumas neviršys 6 % reikšmės.

### 3.4.2. ORC įrenginio galios parinkimas

Kaip įvertinta ankstesniuose skyriuose, katilinė beveik visą savo darbo laiką veikia nominaliu apkrovimu, todėl ir elektros energijos poreikis joje svyruoja nežymiai ir siekia apie 500-600 kW. Pagal 35 paveikslėlyje esantį grafiką įvertinus, kad ORC įrenginio numatomas efektyvumas sudarys 6 %, ir žinant, kad šis įrenginys bus jungiamas prie 9 MW biokuro katilo, skaičiuojama ORC elektros galia naudojant 7 ir 8 formulę [82].

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_{\text{šil}}} \quad (7)$$

Čia:  $\eta_{el}$  – ORC įrenginio efektyvumas, %;

$P_{el}$  – ORC elektros galia, kW;

$Q_{\text{šil}}$  – biokuro katilo galia, MW;

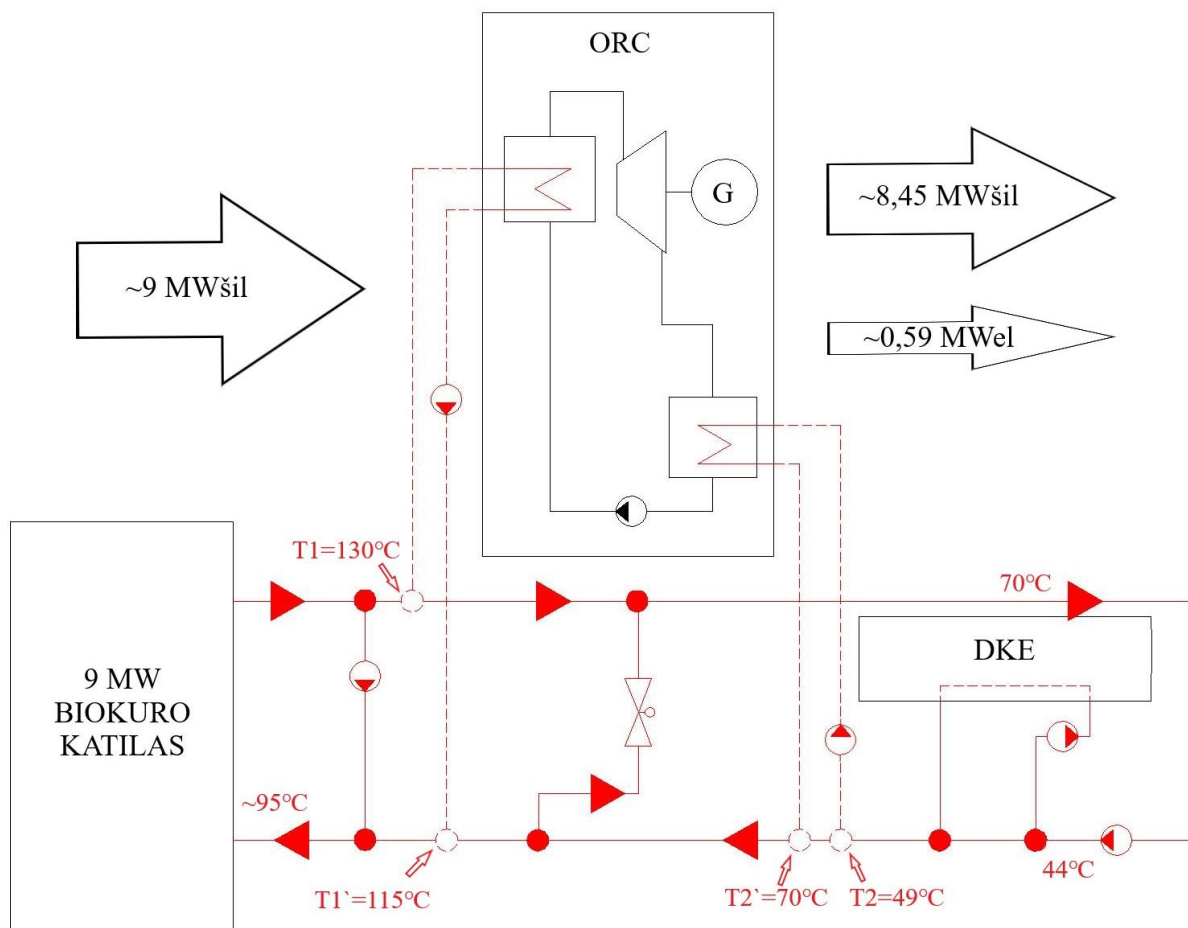
Iš 7 formulės išvedama kiek ORC įrenginys galėtų pagaminti elektros energijos. Tai apskaičiuojama 8 formulėje.

$$P_{el} = \eta_{el} Q_{\text{šil}} \quad (8)$$

Esant tokiems katilinės parametrams ORC ir įvertinus katilinės didesniojo biokuro katilo galią, numatoma, kad ORC įrenginio galia galėtų siekti **apie 540 kW**.

### 3.4.3. Preliminarios ORC įrenginio pajungimo schemos sudarymas

Numatoma, kad ORC įrenginys, kaip aukšto potencialo šilumos šaltinį (darbo agento išgarinimui) naudos katilo recirkuliacijos linijoje cirkuliuojantį vandens srautą. Tuo tarpu aušinimui (darbo agento kondensacijai) bus naudojama iš CŠT tinklų grįžtančio vandens linija už DKE. ORC įrenginio aprišimo principinė schema biokuro katilinėje pateikta 36 paveikslėlyje.

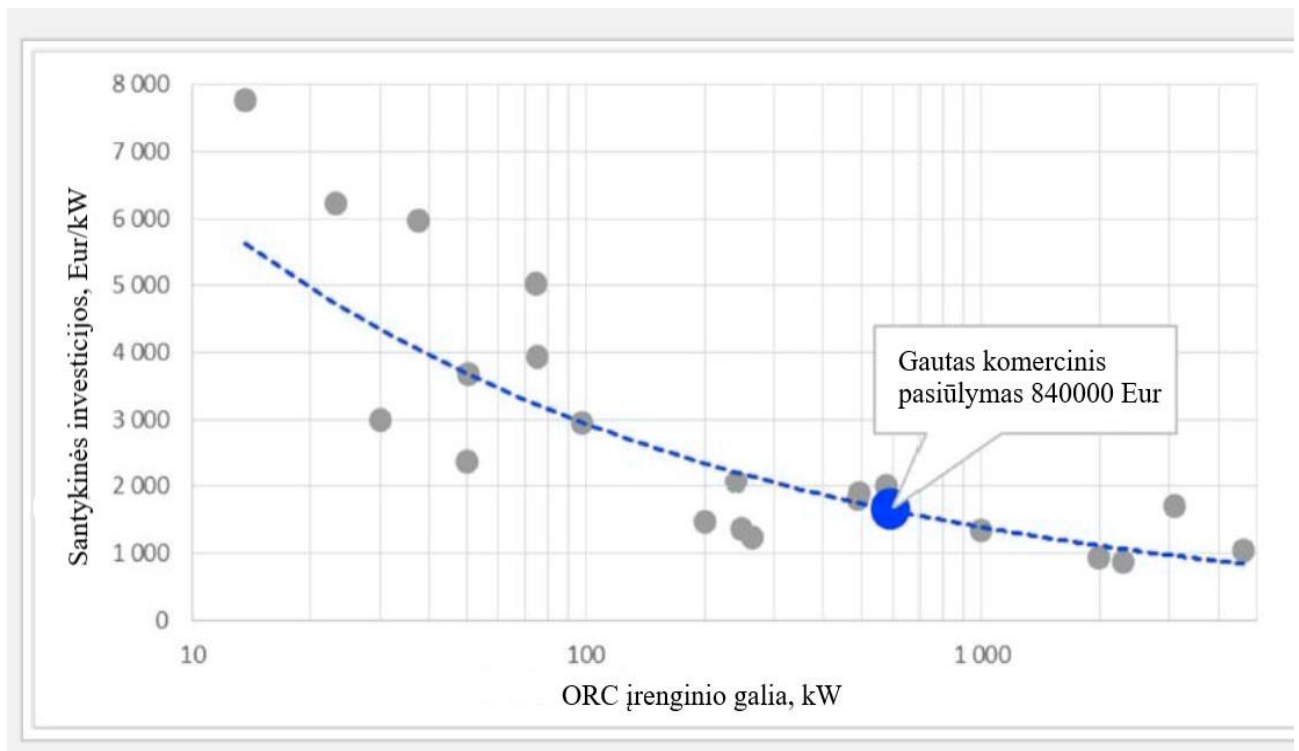


36 pav. ORC įrenginio pajungimo principinė schema

Preliminariai vertinama, kad ORC įrenginio garintuvo pajungimui turės būti naujai nutiestas DN250 skersmens vamzdis nuo recirkuliacijos linijos, iš čia būtų gaunama šilumos energija, kuri leistų technologijai funkcionuoti. Tuo tarpu nuo grįžtamos vandens linijos, prie kurios turės būti jungiamas ORC kondensatorius turės būti prvesti apie DN200 skersmens vamzdžiai. Šis grįžtamas vanduo iš centralizuoto šilumos tinklo, po ekonomizerio aušintų kondensatorių.

### 3.4.4. ORC įrenginio įsigijimo ir įrengimo sąnaudų nustatymas

Lietuvos energetikos rinkoje ORC technologija nėra paplitusi, todėl sudėtinga nustatyti apytikslią ORC sistemos įrengimo kainą. Nėra galimybės palyginti su panašiais projektais Lietuvoje. Norint išsiaiškinti tikėtiną ORC įrenginio kainą, buvo išanalizuoti realūs, įgyvendinti projektai užsienio šalyse. Taip pat buvo nagrinėjami ir techniniai-ekonominiai tyrimų parametrai [83]. Apibendrinti vertinimo rezultatai atvaizduojami 37 paveikslėlyje.



**37 pav.** Santykinės ORC technologijos investicijos

37 paveikslėlyje yra matoma tam tikra tendencija, kad didėjant ORC įrenginio galiai, atvirkščiai mažėja investicija į pačią technologiją. Taip pat grafike matoma, kad reikšmės, kurios apibrėžia ORC įrenginių kainas yra plačiai pasiskirsčiusios ir dažniausiai būna itin ženkliai nutolusios nuo vidutinės reikšmės.

Atliekant vertinimą buvo kreiptasi į ORC įrangos gamintojus su prašymu pateikti konkrečius įrangos atitinkančios biokuro katilinės technines sąlygas pasiūlymus, o gautas pasiūlymas palyginami su kituose objektuose įrengtų ORC modulių kainomis.

Gautas komercinis pasiūlymas ir jo kaina atvaizduojama 37 paveiksle. Biokuro katilinėje numatomos galios ORC įrenginio kaina siektų apie 840 tūkst. Eur. Gauto komercinio pasiūlymo kaina atitinka apžvelgtas rinkos vidutinės kainas, todėl gali būti naudojamas atliekant tolimesnius ekonominius vertinimus.

Pasiūlymą pateikė plačiai žinoma pasaulyje ORC technologijos gamybos kompanija „Againity“. Tai Švedijos kompanijos produktas. Šio įrenginio modelis yra AT500. Įmonės gaminami modelių eksploatavimo laikas yra 20 metų ir jie gali naudoti įvairių mažo potencialo šiluminę energiją. Šiuo atveju naudojama biokuro vandens šildymo katilo šilumos energija. „Againity“ sistema pasižymi mažu judančių detalių skaičiumi, visa tai supaprastina įrenginio aptarnavimą ir priežiūros poreikį, tuo pačiu sumažina įrenginio atsipirkimo laiką. Organinis darbinis skystis, naudojamas „Againity“ ORC sistemoje, yra R1233zd. Tai naujos kartos organinis skystis, skirtas ORC sistemoms. Organinis skystis yra hidrochlorofluorolefino tipo skystis, kurio molekulinė struktūra yra C3ClH2F3, su mažu ozono ardymo potencialu (ODP) ir mažu visuotinio atšilimo potencialu (GWP). Darbo agento žemas ODP ir GWP suteikia „Againity“ AT500 tvarumo pranašumą ir šį modelį daro dar patrauklesniu [89].

Gamintojo pateikta simuliacija yra pateikta 1 priede, o 38 paveikslėlyje pateiktas AT500 modelio įrenginys.



38 pav. „Againity“ AT500 ORC įrenginys

Kol nėra paruoštas techninis projektas, įvertinti ORC įrangos įdiegimo kaštus yra gana sudėtinga. Tačiau atsižvelgiant į tai, kad nagrinėjamas „Againity“ AT500 ORC įrenginys turi visą jam priklausančią automatiką ir apsaugas, taip pat, kad jo įrengimo vieta būtų šalia biokuro vandens šildymo katilo, t. y. prie reikiamų vamzdžių, įrenginio aprišimo kaina turėtų būti apie 100 tūkst. Eur. Taigi, galima teigti, kad ORC įrenginio įdiegimas į biokuro katilinę galėtų kainuoti apie 940 tūkst. Eur.

#### 3.4.5. Techninis – finansinis įrenginio įvertinimas

Atliekant ORC elektrinės finansinį vertinimą, galima teigti, kad įrenginys veiks tik šildymo sezono metu, tiek kiek numatoma 3.3.2 skyrelyje. Taip pat daroma prielaida, kad biokuro katilinė nusipirkusi įrenginį, taip pat pirks ir jo serviso (aptarnavimo) paslaugą, kuri kainuoja apie 5 Eur/MW<sub>el</sub>.

„Againity“ AT500 ORC įrenginys generuos elektros energiją biokuro katilinės savoms reikmėms, o perteklinę energiją parduos į bendrą tinklą už esančią rinkos kainą. Didžioji dalis sutaupymų bus pasiekama dėl to, kad biokuro katilinė elektros energiją pasigamins pati, o nepirks ją iš išorės. Taip pat vertinama tai, kad elektros energijos generacijai bus naudojama šilumos energija, todėl skaičiuojama, kad ORC technologijoje sunaudota šilumos energija privalės būti pagaminama pačio katilinėje arba įsigyjama iš kitų šilumos gamintojų. Kadangi pigiausių šilumos šaltinių galia įprastai yra pilnai išnaudojama, atliekant ekonominius vertinimus daroma prielaida, kad papildomai šilumai pagaminti bus naudojamas brangiausių aukciono kainą nurodęs šilumos šaltinis.

##### 3.4.5.1. Diskonto faktorius

Tęsiant toliau apie finansinį įvertinimą, svarbu žinoti patį projekto finansinį gyvybingumą. Šiuo atveju vertinama projekto generuojamos pajamos ir patirtos išlaidos per gyvavimo laikotarpį. Projekto finansinei analizei atlikti nagrinėjami alternatyvūs pinigų srautai. Analizei atlikti pasitelkiamas pinigų srauto metodas: projekto išlaidos (veiklos sąnaudos, mokesčiai, investicijos, ir pan.) prilyginami kaip neigiami pinigų srautai, o projekto įplaukos (veiklos pajamos, finansavimas, likutinė vertė ir pan.) – kaip teigiami pinigų srautai. Kad būtų rasti finansiniai rodikliai pinigų srautai

turi būti diskontuoti. Diskontavimas – tai ateities pinigų perskaičiavimas į dabartinę vertę. Kaip laikas paveikia pinigų srautą galima nustatyti apskaičiavus diskonto faktorių, pagal 9 formulę [84].

$$\text{Diskonto faktorius} = \frac{1}{(1+i)^t} \quad (9)$$

Čia:  $t$  – metai;

$i$  – diskonto norma;

### 3.4.5.2. Grynoji dabartinė vertė (NPV)

Grynoji dabartinė vertė yra vienas iš pagrindinių rodiklių, kuris nusako investicijų efektyvumą. Apie šį vertinimo rodiklį [85] šaltinyje yra teigiama taip: „Šis vertinimo metodas parodo absoliutų efektą, lyginant projekto pagrindinės veiklos pinigų srautų esamąją vertę su visomis investicijomis, reikalingomis projektui įgyvendinti. Jis parodo, ar projekto pinigų srautai leis projekto įgyvendintojui susigrąžinti investicijas ir jas viršyti, t.y. iš projekto uždirbti“. NPV apskaičiuojamas pagal 10 formulę.

$$\text{NPV} = -CF_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (10)$$

Čia:  $CF_0$  – pradinis investicinis dydis;

$CF_{1,2,\dots,t}$  – pinigų srauto reikšmė  $t$ -aisiais metais;

$i$  – kapitalo kaina.

Pinigų srautui esant laiko tarpe, jie yra diskontuojami atsižvelgiant į procentinę normą. ORC skaičiavimui diskonto norma yra 4 %. Projekto pasirinkimą lemia gauta NPV vertė. Projektas priimamas pagal tokias taisykles:

- $\text{NPV} > 0$  – Priimtas variantas
- $\text{NPV} < 0$  – Atmestinas variantas
- $\text{NPV} = 0$  – Ribinis variantas

Siekiant, kad būtų gaunamas pelnas ar bent kad investicijos atsipirktų, privaloma tokia sąlyga –  $\text{NPV} > 0$ .

### 3.4.5.3. Vidinė grąžos norma (IRR)

Vidinė grąžos norma (IRR). Tai vienas reikšmingiausių rodiklių analizuojant projekto efektyvumą. IRR apibrėžiama kaip diskonto norma, kuri sulygina projekto grynujų įplaukų dabartinę vertę su pradinėmis investicijomis. Šis rodiklis nusako investicijų rentabilumą ir parodo maksimalų leistiną santykinį (procentinį) investicijų kainos lygį, kurį viršijus projektas pasidaro nerentabilus [86].

Kuo IRR rodiklis yra didesnis, tuo projektas yra labiau patrauklesnis ir atsipirkimas greitesnis. Projektas yra pasirenkamas tuo atveju, jei vidinė grąžos norma yra didesnė negu kapitalo kaštai ( $\text{IRR} > \text{CC}$ ), tokiu atveju projektas pakelia įmonės vertę. Atvirkščiai, projektas yra atmetamas, kai vidinė grąžos norma yra mažesnė už kapitalo kaštus ( $\text{IRR} < \text{CC}$ ). Šioje situacijoje įmonės vertė krenta žemyn. O kai  $\text{IRR} = \text{CC}$ , projektas nedomina. IRR apskaičiuojamas pagal 11 formulę.

$$\text{IRR} = k_1 + \frac{\text{NPV}_1(k_2 - k_1)}{\text{NPV}_1 - \text{NPV}_2} \quad (11)$$



Čia:  $k_1$  – diskontavimo norma, kai  $NPV > 0$ ;  
 $k_2$  – diskontavimo norma, kai  $NPV < 0$ ;  
 $NPV_1$  – grynoji dabartinė vertė, apskaičiuota kai yra  $k_1$ ;  
 $NPV_2$  – grynoji dabartinė vertė, apskaičiuota kai yra  $k_2$ .

#### 3.4.5.4. Paprastasis atsipirkimo laikas

Dažniausiai paprastąjį atsipirkimo laikotarpį naudoja vadybininkai. Tačiau tai paprastas ir efektyvus rodiklis ir energetikos srityje. Šis rodiklis apibūdinamas kaip laiko tarpas, per kurį yra susigražinamas pradinis projekto kapitalas. Energetikoje toks vertinimo rodiklis (PAL) apibūdina per kiek laiko atsipirks taupymo priemonė. Investicijų paprastasis atsipirkimo laikotarpis yra numatomas kaip tam tikras metų skaičius. Šie metai nusako per kiek laiko atsipirks taupymo priemonei investuoti pinigai. Kai metinių sutaupymų suma per projekto laikotarpį išlieka tokia pati, paprastas atsipirkimo laikas gali būti apskaičiuojamas pagal 12 formulę [87].

$$PAL = \frac{I}{S} \quad (12)$$

Čia:  $I$  – investicijos;  
 $S$  – metiniai sutaupymai, Eur.

#### 4. Techninio – finansinio įvertinimo rezultatai

Pritaikius tam tikrą pasirinktą metodiką ir įvertinus prieš tai aptartus 3 skyriuje techninius – ekonominius duomenis, buvo gauti ekonominio ir techninio vertinimo suvestiniai rezultatai. Juos galima matyti 7 lentelėje.

7 lentelė. Ekonominio vertinimo suvestiniai rezultatai

Eil. Nr.	Rodiklis	Reikšmė
1.1	ORC įrenginio galia (gross), kW	595
1.2	ORC įrenginio galia (net), kW	537
2	ORC įrenginio efektyvumas (net), %	5,96
3.1	ORC įrenginio pagaminamos elektros kiekis (nuosavoms reikmėms), MWh/metus	2313
3.2	ORC įrenginio pagaminamos elektros kiekis (parduodamas į tinklą), MWh/metus	535
4	Dėl ORC papildomai sunaudojamos energijos kiekis, MWh/metus	2848
5	Pradinė investicija į ORC elektrinę, Eur	940000
5.1	ORC įrenginio kaina, Eur	840000
5.2	ORC įrenginio įdiegimo kaštai, Eur	100000
6	Sutaupymai gaminant elektrą, Eur/metus	193930
7	Pajamos iš į tinklą parduotos elektros energijos Eur/metus	26210
8	Išlaidos eksploatacijai, Eur	14269
9	Papildomos išlaidos kurui (šilumai) įsigyti, Eur	63798
10	Grynoji dabartinė vertė (prie 4 % diskonto normos), Eur	1438019
11	Vidinė gražos norma, %	17,8
12	Ekonominis gyvavimas	20
13	Paprastas atsipirkimo laikas, metai	5,97

Išanalizavus 7 lentelėje pateiktus duomenis galima teigti, kad ORC elektrinės atsipirkimo laikas yra žymiai trumpesnis už įrangos nusidėvėjimo laikotarpį, o vidinė gražos norma (IRR) yra daug aukštesnė už šilumos gamybos įmonėms nustatytą vidutinių svertinių kapitalo kaštų (WACC) rodiklį. Taigi galima teigti, kad įdiegtas ORC įrenginys mažins šilumos gamybos savikainą ir tuo pačiu jos realizavimo kainą, o generuojant elektros energiją savoms reikmėms bus gerinami įmonės lyginamieji rodikliai, kas tuo pačiu leis netiesiogiai padidinti įmonės uždirbtą pelną.

Taip pat būtina įvertinti, kad įmonei, kuriai priklauso biokuro katilinė, pelnas yra reguliuojamas valstybinės energetikos reguliavimo tarybos (toliau – VERT), todėl įmonė neturės galimybės pasilikti visą įvertintą projekto naudą. Šiuo metu įmonei nustatytas 5,64 % WACC [88], tuo tarpu kaip matyti iš atliktų skaičiavimų, projekto VGN siekia net 17,8 %. Dalis projekto sutaupytų lėšų turės būti nukreipta į šilumos kainos mažinimą. Yra įvertinta, kad tam kad nagrinėjamo projekto VGN atitiktų nustatytą WACC, projekto pinigų srautai kiekvienais metais turi būti sumažinti apie 116132 Eur. Tai yra pinigų suma kuri kiekvienais metais turės būti nukreipiama į vartotojų mokamos šilumos kainos mažinimą.

Taip pat elektros energijos nuosavų reikmių padengimas įtakos tai, kad įmonė galės efektyviau konkuruoti šilumos supirkimo aukcionuose, o tai dar labiau padidins konkurenciją kitiems rinkos dalyviams ir kaip pasekmė projektas netiesiogiai mažins šilumos gamybos kainą CŠT tinkle.

#### 4.1. Parametrų jautrumo analizė

Jautrumo analizė parodo, kaip skirtingos nepriklausomo kintamojo reikšmės veikia tam tikrą priklausomą kintamąjį pagal tam tikrą prielaidų rinkinį. Buvo nuspręsta priimti tris skirtingus scenarijus: optimistini, realistini ir pesimistini. Analizuojami kintamieji yra elektros supirkimo kaina ir biokuro kaina. Pirmame scenarijuje (realistiniame) buvo pritaikyta šių dienų elektros supirkimo kaina. Pesimistiniu variantu buvo paimta mažesnė elektros kaina, o optimistiniu scenarijuje aukštesnė pardavimo kaina. „Baltpool“ biržos duomenimis 2021 metų vidutinė biokuro kaina buvo 13,99 Eur/MWh, o elektros kaina „Nordpool“ biržoje 2021 m nurodoma kaip 90,45 Eur/MWh, tačiau katilinė pagamintą elektros energiją parduoda 2 Eur/MWh mažesne nei rinkos kaina. Elektros ir kuro kainos optimistiniais, realistiniais ir pesimistiniais scenarijais galima matyti 8 lentelėje.

**8 lentelė.** Elektros ir kuro kainos optimistiniais, realistiniais ir pesimistiniais scenarijais

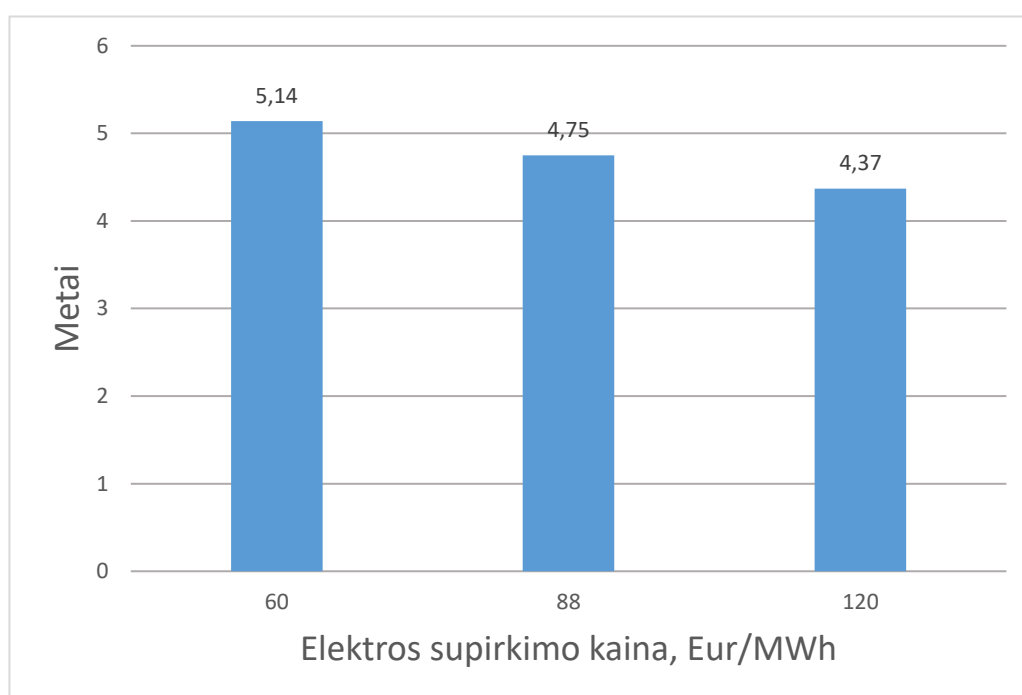
Scenarijus	Elektros kaina parduodant į tinklus, Eur/MWh	Biokuro kaina, Eur/MWh
Optimistinis	120	11
Realistinis	88	14
Pesimistinis	60	19

Pirmuoju atveju yra keičiama elektros kaina ir atsižvelgiama kaip pasikeis kiti ekonominiai rodikliai. Tris galimus variantus galima matyti 9 lentelėje.

**9 lentelė.** Trys ORC variantai pagal skirtingą elektros kainą

Rodikliai	Scenarijai		
	Pesimistinis	Realistinis	Optimistinis
Katilinės pagaminamas šilumos kiekis, MWh/metus	92 600	92 600	92 600
Katilinės suvartojamas elektros energijos kiekis (gamyba ir perdavimas), MWh/metus	2 854	2 854	2 854
Katilinės darbo valandos per metus, val./metus	5 770	5 770	5 770
Elektros realizavimo kaina į rinką, Eur/MWh	<b>60</b>	<b>88</b>	<b>120</b>
Šilumos gamybos savikaina (kintamoji dalis), Eur/MWh	13,99	13,99	13,99
ORC įrenginio instaliuojama galia (net), kW	537	537	537
ORC įrenginio efektyvumas (gross), %	5,96	5,96	5,96
ORC elektros dalis pagaminta nuosavoms reikmėms, MWh/metus	2316	2316	2316
ORC elektros dalis atiduota į tinklą, MWh/metus	538	538	538
Investicija į ORC technologiją, Eur	940 000	940 000	940 000
Vidinė grąžos norma, %	<b>18,8</b>	<b>20,6</b>	<b>22,5</b>
Grynoji dabartinė vertė (su 5 % diskonto norma), Eur	<b>1 276 362</b>	<b>1 455 153</b>	<b>1 659 486</b>
Atsipirkimo laikas, metai	<b>5,14</b>	<b>4,75</b>	<b>4,37</b>

39 paveikslėlyje pateiktas grafiškai atvaizduotas atsipirkimo laikas pagal skirtingą elektros supirkimo kainą.



**39 pav.** Atsipirkimo laikas pagal skirtingą elektros kainą

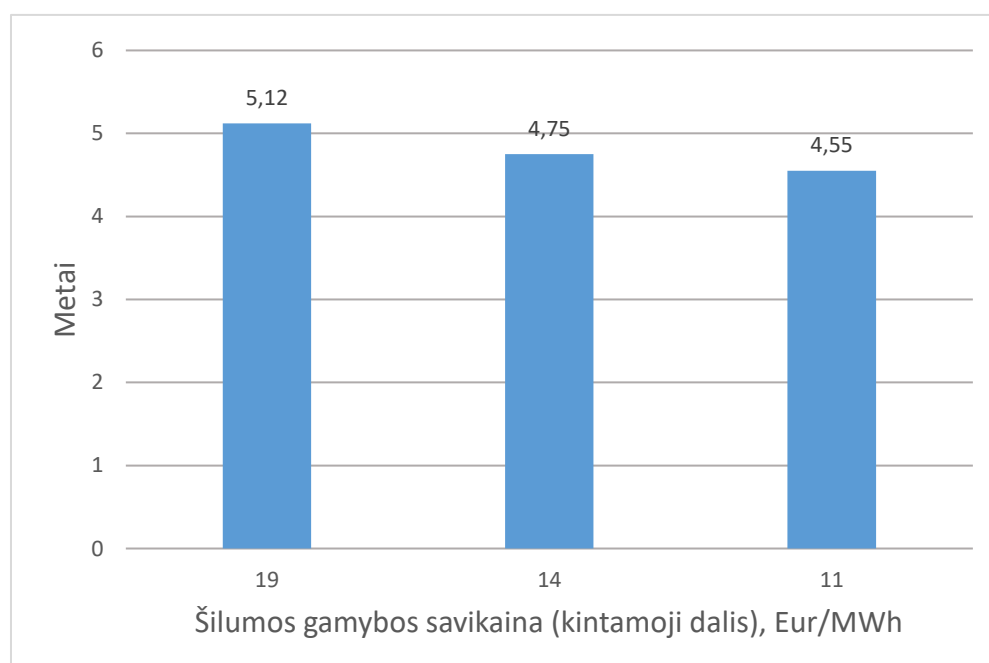
Išanalizavus skirtingus variantus pagal elektros kainas galima matyti, jog kainai esant 60 Eur/MWh atsipirkimo laikas yra maždaug 5,14 metų, o tarkim esant 120 Eur/MWh supirkimo kainai, atsipirkimo laikas sumažėja iki 4,37 metų. Taip pat buvo atlikta tokia pati analizė tik su skirtingomis

biokuro kainomis. 10 lentelėje galima matyti pakitusius ekonominius rodiklius esant skirtingai biokuro kainai.

**10 lentelė.** Trys ORC variantai pagal skirtingą šilumos gamybos savikainą

Rodikliai	Scenarijai		
	Pesimistinis	Realistinis	Optimistinis
Katilinės pagaminamas šilumos kiekis, MWh/metus	92 600	92 600	92 600
Katilinės suvartojamas elektros energijos kiekis (gamyba ir perdavimas), MWh/metus	2 854	2 854	2 854
Katilinės darbo valandos per metus, val./metus	5 770	5 770	5 770
Elektros realizavimo kaina į rinką, Eur/MWh	88	88	88
Šilumos gamybos savikaina (kintamoji dalis), Eur/MWh	<b>19</b>	<b>13,99</b>	<b>11</b>
ORC įrenginio instaliuojama galia (net), kW	537	537	537
ORC įrenginio efektyvumas (gross), %	5,96	5,96	5,96
ORC elektros dalis pagaminta nuosavoms reikmėms, MWh/metus	2316	2316	2316
ORC elektros dalis atiduota į tinklą, MWh/metus	538	538	538
Investicija į ORC technologiją, Eur	940 000	940 000	940 000
Vidinė gražos norma, %	<b>18,9</b>	<b>20,6</b>	<b>21,5</b>
Grynoji dabartinė vertė (su 5 % diskonto norma), Eur	<b>1 285 447</b>	<b>1 455 153</b>	<b>1 556 435</b>
Atsipirkimo laikas, metai	<b>5,12</b>	<b>4,75</b>	<b>4,55</b>

40 paveikslėlyje taip pat atvaizduotas grafiškas atsipirkimo laikas pagal skirtingą biokuro pirkimo kainą.



**40 pav.** Atsipirkimo laikas pagal skirtingą šilumos gamybos savikainą

Kaip ir yra matoma skirtinga biokuro pirkimo kainą taip pat daro įtaką ORC įrenginio atsipirkimo laikui. Esant kainai 19 Eur/MWh atsipirkimo laikas būna 5,12 metų, o žvelgiant geriausiu – optimistiniu variantu 11 Eur/MWh atsipirkimo laikas sumažėja iki 4,55 metų.

## Išvados

1. Atlikus literatūros apžvalgą, buvo nustatyta, jog organinio Renkino ciklo technologija yra viena perspektyviausių kogeneracinių technologijų, kuri gali naudingai ir efektyviai panaudoti mažo potencialo atliekinę šilumos energiją. ORC ne tik geba pagaminti elektros energiją iš karšto vandens, bet tuo pačiu prisideda prie CO<sub>2</sub> mažinimo strategijos.
2. Atlikus techninę analizę, buvo nustatyta, kad įdiegus ORC įrenginį į biokuro katilinę, iš 9 MW vandens šildymo katilo su minėtu įrenginiu galima generuoti 540 kW elektros galią. Tokio galingumo užtenka patenkinti 90-100 % katilinės elektros poreikio. Tokia technologija puikiai išnaudoja esamus vandens šildymo katilus, nereikalaujant naujų pajėgumų. ORC gamina elektros energija tada, kai yra elektros poreikis. Vasaros metu neišnaudojami pertekliniai biokuro MW, ypač mažesnėse sistemose, gali būti išnaudojami elektros gamybai savoms reikmėms, užtikrinant geresnį katilo darbo režimą. Taip pat būtina paminėti, kad tokia generuojama elektra yra „žalia“, nenaudojanti iškastinio kuro.
3. Įvertinus ekonominę situaciją, buvo priimta, kad ORC įrangos atsipirkimui įtaką daro keli rodikliai. Parduodama elektros kaina į tinklus, pabrangęs biokuras, mažesnė elektros energijos kaina rinkoje ir eksploatacinės išlaidos, tai parametrai, kurie daro didelę įtaką sistemos atsipirkimo laikui. Esant 60 Eur/MWh elektros pardavimo kainai į tinklus atsipirkimo laikas yra apie 5,14 metų, o pesimistiniu variantu, kai kaina yra 120 Eur/MWh, atsipirkimo laikas sumažėja iki 4,37 metų.
4. ORC technologija generuoja teigiamą investicijų grąžą ir atsiperka per santykinai trumpą laikotarpį. Todėl ši technologija neabejotinai pagerins tiek įmonės finansinius srautus, tiek įtakos šilumos kainos sumažėjimą galutiniam šilumos vartotojui.

## Literatūros sąrašas

1. Danish Energy Agency: Energiproducenttællingen [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2021-10-11 d.]. Prieiga per: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and>
2. GasSchema: Taršą mažinantys produktai [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-10-11 d.]. Prieiga per: <https://gaschema.lt/lt/tarsa-mazinantys-produktai/produkcija-2/azo-nox/>
3. Danish Energy Agency and Energinet: Technology Data - Energy Plants for Electricity and District heating generation [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2021-10-11 d.]. Prieiga per: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and>
4. Filter: Katilinės ir Energetiniai sprendimai [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-10-11 d.]. Prieiga per: <https://filter.lt/lt/sprendimai/katilines-ir-energetiniai-sprendimai/vandens-sildymo-katilines-ir-katilai>
5. SAULĖ ENERGIJA: Apie fotoelektrą produktai [interaktyvus]. 2006 [žiūrėta 2021-10-12 d.]. Prieiga per: <https://web.archive.org/web/20100505124230/http://www.aet.eaf.ktu.lt/se/fotoelektra.php>
6. NREL: Solar Energy Basics [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-10-12 d.]. Prieiga per: <https://www.nrel.gov/research/re-solar.html>
7. VilpraEnergy: Technologija produktai [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-10-11 d.]. Prieiga per: <https://vilpraenergy.lt/saules-elektrines/technologija/>
8. BOLINGER, M., SEEL, J. Utility-Scale Solar: Empirical Trends in Project Technology, Cost, Performance, and PPA Pricing in the United States – 2018 Edition [interaktyvus]. United States: N. p., 2018 [žiūrėta 2021-10-11 d.]. Prieiga per: doi:10.2172/1477381.
9. IEA: “Energy Technology Perspectives. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy, 2014 edition”. 2014 [žiūrėta 2021-10-11 d.]. Prieiga per: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy-2014>
10. Circuit Globe: Photovoltaic or Solar Cell [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-10-14 d.]. Prieiga per: <https://circuitglobe.com/photovoltaic-or-solar-cell.html>
11. Saulės Baterija: Integruotos saulės elektrinės [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2021-10-14 d.]. Prieiga per: <http://www.saulesbaterija.lt/saules-baterijos/integruotos-saules-elektrines>
12. KABIR, M.I., IBARAHIM, Z., BIN SOPIAN, K., AMIN N. A Review on Progress of Amorphous and Microcrystalline Silicon Thin-Film Solar Cells. Recent Patents on Electrical Engineering [interaktyvus]. 2011, 4, 50-62 [žiūrėta 2021-10-14 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.2174/1874476111104010050>
13. GONG, J., LIANG, J., SUMATHY, K. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews [interaktyvus]. 2012, 16(8), 5848–5860 [žiūrėta 2021-10-14 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.044>
14. KIELA, K. FOTOVOLTINIAI ELEMENTAI. Science Future of Lithuania 4, no. 1 [interaktyvus]. 2012, 56-62 [žiūrėta 2021-10-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3846/mla.2011.13>
15. ZHOU, H., CHEN, Q., LI, G. Interface Engineering of Highly Efficient Perovskite Solar Cells [interaktyvus]. 2014, 345(6196), 542–546 [žiūrėta 2021-10-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1126/science.1254050>



16. Fizinių ir Technologijos Mokslų Centras: Perovskitiniai Saulės Elementai ir Šviestukai [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2021-10-16 d.]. Prieiga per: <https://www.ftmc.lt/perovskitiniai-saules-elementai-ir-sviestukai>
17. GETAUTIS, V. „2021-ieji – naujos kartos saulės elementų eros pradžia?“ [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-10-17 d.]. Prieiga per: [http://www.lma.lt/uploads/Pranesimai%20naujienoms/akad.%20V.%20Getau%C4%8Dioio%20straipsnis\\_derinti.pdf](http://www.lma.lt/uploads/Pranesimai%20naujienoms/akad.%20V.%20Getau%C4%8Dioio%20straipsnis_derinti.pdf)
18. JUKNEVIČIUS, D. Atsinaujinančių Energijos Šaltinių Apžvalga [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2021-10-18 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija\\_ir\\_energetika/S-17805/](http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S-17805/)
19. PHILIPPS, S. Photovoltaics report [interaktyvus]. Fraunhofer. 2020 [žiūrėta 2021-10-19 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html>
20. DIMPL, E. (2010). Small-scale Electricity Generation from Biomass Part II: Biogas. GTZ-HERA – Povertyoriented Basic Energy Service. Eschborn
21. STASSEN, H. E. Small-Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power. A Global Review. World Bank Technical Paper 296 [interaktyvus]. Washington, D.C: 1995 [žiūrėta 2021-10-19 d.]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1596/0-8213-3371-2>
22. BIOPOWERIN: Mūsų Technologija [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-10-21 d.]. Prieiga per: <https://www.biopowerin.com/lt/technologija/>
23. Volter: Technolgy [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-10-29 d.]. Prieiga per: <https://volter.fi/technology/>
24. Capstone Turbine Corporation: Microturbine [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-10-29 d.]. Prieiga per: <http://www.microturbine.com/>
25. The Energy Solutions Center: Distributed Generation Consortium [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-10-29 d.]. Prieiga per: [http://www.understandingchp.com/appguide/Chapters/Chap0/0-7\\_Microturbines.htm](http://www.understandingchp.com/appguide/Chapters/Chap0/0-7_Microturbines.htm).
26. MARCINAUSKAS, K. Kogeneracija, „termofikacija“ Ir Mikroturbinos [interaktyvus]. Energetika, no. 2, 2008, 70-79 [žiūrėta 2021-10-29 d.]. Prieiga per: <https://search-ebsohost-com.ezproxy.ktu.edu/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=33767787&site=ehost-live>
27. STAUNTON, R.H., OZPINECI, B. Microturbine Power Conversion Technology Review [interaktyvus]. 2003 [žiūrėta 2021-11-03 d.]. Prieiga per: DOI:10.2172/885881
28. HAGEN, A. Test and Approval Center for Fuel Cell and Hydrogen Technologies: Phase I. Initiation: Final report [interaktyvus]. 2012, Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark [žiūrėta 2021-10-29 d.]. Prieiga per: [http://www.energiforskning.dk/sites/eudp.omega.oitudv.dk/files/slutrappporter/final\\_report\\_incl\\_app.pdf](http://www.energiforskning.dk/sites/eudp.omega.oitudv.dk/files/slutrappporter/final_report_incl_app.pdf)
29. International Energy Agency, I. Energy Technology Perspectives-ETP2014, Harnessing electricity's potential; 2014
30. World Energy Council. World Energy Perspective- Energy Efficiency Technologies; 2013.
31. ACKERMANN T, ANDERSSON G, SÖDER L. Distributed generation: a definition. Electr Power Syst Res 2001;57(3):195–204.
32. NOSRAT, A. H., SWAN, L. G., & PEARCE, J. M. Improved performance of hybrid photovoltaic-trigeneration systems over photovoltaic-cogen systems including effects of battery storage [interaktyvus]. Energy (Oxford), 2013, 49(1), 366–374 [žiūrėta 2021-11-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.005>

33. NOSRAT, A. H., SWAN, L. G., PEARCE, J. M. Simulations of greenhouse gas emission reductions from low-cost hybrid solar photovoltaic and cogeneration systems for new communities [interaktyvus]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, 8, 34–41 [žiūrėta 2021-11-19 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.06.008>
34. Siemens power generation division: Waste heat recovery with organic Rankine cycle technology [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2021-11-19 d.]. Prieiga per: [http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/brochure-orcorganic-rankine-cycle-technology\\_EN.pdf](http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/brochure-orcorganic-rankine-cycle-technology_EN.pdf)
35. GALLOWAY E, HEBERT L. History and progress of the steam engine; with a practical investigation of its structure and application. London: Printed for T. Kelly; 1836.
36. CURRAN HM. Organic working fluids in rankine engines. *J Energy* 1981;5 (4):218–23
37. WANG, XD., ZHAO, L. Analysis of zeotropic mixtures used in low-temperature solar Rankine cycles for power generation [interaktyvus]. *Sol Energy*, 2009, 83(5), 605–13 [žiūrėta 2022-11-21 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
38. DOLZ, V., NOVELLA, R., GARCÍA, A., SÁNCHEZ, J. HD Diesel engine equipped with a bottoming Rankine cycle as a waste heat recovery system [interaktyvus]. Part 1: study and analysis of the waste heat energy. *Appl Therm Eng*, 2012, 36, 269–78, 13 [žiūrėta 2022-11-22 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
39. QUOILIN, S. Sustainable energy conversion through the use of Organic Rankine Cycles for waste heat recovery and solar applications Doctor of Applied Sciences [interaktyvus]. Liège, Belgium: University of Liège; 2011 [žiūrėta 2022-11-22 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
40. LI, P. An Improved Analysis Method for Organic Rankine Cycles Based on Radial-Inflow Turbine Efficiency Prediction [interaktyvus]. *Applied Sciences*, vol. 9, no. 1, 2018, p. 49 [žiūrėta 2022-04-01 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
41. WANG EH, ZHANG HG, FAN BY, OUYANG MG, ZHAO Y, MU QH. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery [interaktyvus]. *Energy* 2011;36(5):3406–18 [žiūrėta 2022-04-01 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
42. SALEH B, KOGLBAUER G, WENDLAND M, FISCHER J. Working fluids for lowtemperature organic Rankine cycles. *Energy* 2007;32(7):1210–21.
43. BAO J, ZHAO L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle [interaktyvus]. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;24:325–42 [žiūrėta 2022-04-02 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
44. INVERNIZZI C, IORA P, SILVA P. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2007;27(1):100–10 [žiūrėta 2022-04-02 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
45. HUNG T-C. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids [interaktyvus]. *Energy Convers Manage* 2001;42(5):539–53 [žiūrėta 2022-04-05 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
46. DRESCHER U, BRÜGGEMANN D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2007;27(1):223–8 [žiūrėta 2022-04-06 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
47. TCHANCHE BF, PAPADAKIS G, LAMBRINOS G, FRANGOUDAKIS A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2009;29(11–12):2468–76 [žiūrėta 2022-04-07 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
48. BRANCHINI, L., DE PASCALE, A., PERETTO, A. Systematic comparison of ORC configurations by means of comprehensive performance indexes [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2013, 61(2), 129–40 [žiūrėta 2022-04-07 d.]. Prieiga per: ScienceDirect..

49. LARSEN, U., PIEROBON, L., WRONSKI, J., HAGLIND, F. Multiple regression models for the prediction of the maximum obtainable thermal efficiency of organic Rankine cycles [interaktyvus]. *Energy*: 2014, 65, 503–10 [žiūrėta 2022-04-07 d.]. Prieiga per: ScienceDirect..
50. LI J, PEI G, LI Y, JI J. Evaluation of external heat loss from a small-scale expander used in organic Rankine cycle [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2011;31(14– 15):2694–701 [žiūrėta 2022-04-07 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
51. TCHANCHE BF, PAPADAKIS G, LAMBRINOS G, FRANGOUDAKIS A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2009;29(11– 12):2468–76 [žiūrėta 2022-04-07 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
52. MCMAHAN A. Design and optimization of organic Rankine cycle solar thermal power plants [interaktyvus]. University of Wisconsin-Madison; 2006 [žiūrėta 2022-04-09 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
53. IEA, I.E.A. Key world energy statistics;
54. TCHANCHE BF, LAMBRINOS G, FRANGOUDAKIS A, PAPADAKIS G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – a review of various applications [interaktyvus]. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(8):3963–79 [žiūrėta 2022-04-10 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
55. LIU, H., SHAO, Y., LI, J. A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) – Thermodynamic modelling studies [interaktyvus]. *Biomass Bioenergy*, 2011, 35(9), 3985–94 [žiūrėta 2022-04-10 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
56. QIU G, SHAO Y, LI J, LIU H, RIFFAT SB. Experimental investigation of a biomassfired ORC-based micro-CHP for domestic applications [interaktyvus]. *Fuel* 2012, 96, 374–82 [žiūrėta 2022-04-10 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
57. PRANDO D, RENZI M, GASPARELLA A, BARATIERI M. Monitoring of the energy performance of a district heating CHP plant based on biomass boiler and ORC generator [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2015;79:98–107 [žiūrėta 2022-04-11 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
58. TAŃCZUK, M., ROMAN U. Implementation of a Biomass-Fired Co-Generation Plant Supplied with an ORC (Organic Rankine Cycle) as a Heat Source for Small Scale Heat Distribution System – A Comparative Analysis under Polish and German Conditions [interaktyvus]. *Energy (Oxford)*, vol. 62, 2013, pp. 132–141 [žiūrėta 2022-04-12 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
59. RABL., A. Active solar collectors and their applications [interaktyvus]. New York: Oxford University Press, 1985 [žiūrėta 2022-04-13 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
60. LEWIS NS, Nocera DG. Powering the planet: chemical challenges in solar energy utilization [interaktyvus]. *Proc Natl Acad Sci* 2006;103(43):15729–35 [žiūrėta 2022-04-15 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
61. DELGADO-TORRES, AM., GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC) [interaktyvus]. *Energy Convers Manage* 2010, 51(12), 2846–56 [žiūrėta 2022-04-15 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
62. PEI G, LI J, JI J. Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2010;30(8– 9):998–1004 [žiūrėta 2022-04-16 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
63. ANTONELLI M, BACCIOLI A, FRANCESCONI M, LENSİ R, MARTORANO L. Analysis of a Low Concentration Solar Plant with Compound Parabolic Collectors and a Rotary Expander for Electricity Generation [interaktyvus]. *Energy Proc* 2014;45:170–9 [žiūrėta 2022-04-17 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.

64. WANG J, YAN Z, ZHAO P, DAI Y. Off-design performance analysis of a solarpowered organic Rankine cycle [interaktyvus]. *Energy Convers Manage* 2014;80:150–7 [žiūrėta 2022-04-18 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
65. INVERNIZZI C, IORA P, SILVA P. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines [interaktyvus]. *Appl Therm Eng* 2007;27(1):100–10 [žiūrėta 2022-04-18 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
66. MUÑOZ DE ESCALONA, JM., SÁNCHEZ, D., CHACARTEGUI, R., SÁNCHEZ, T. Part-load analysis of gas turbine & ORC combined cycles. *Appl Therm Eng* 2012;36:63–72.
67. KHALJANI, M., KHOSHBAKHTI SARAY, R., BAHLOULI, K. Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle [interaktyvus]. *Energy Convers Manage* 2015;97:154–65 [žiūrėta 2022-04-20 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
68. RASHIDI, MM., GALANIS, N., NAZARI, F., BASIRI PARSA A., SHAMEKHI, L. Parametric analysis and optimization of regenerative Clausius and organic Rankine cycles with two feedwater heaters using artificial bees colony and artificial neural network [interaktyvus]. *Energy*, 2011, 36(9), 5728–40 [žiūrėta 2022-04-21 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
69. LIU B, RIVIÈRE P, COQUELET C, GICQUEL R, DAVID F. Investigation of a two stage Rankine cycle for electric power plants [interaktyvus]. *Appl Energy*, 2012, 100, 285–94 [žiūrėta 2022-04-20 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
70. DIPIPO R. Geothermal power plants: principles, applications and case studies. In: DiPippo R, editor. *Geothermal power plants* [interaktyvus]. Oxford: Elsevier Science, 2005 [žiūrėta 2022-04-21 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
71. LIU Q, DUAN Y, YANG Z. Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids [interaktyvus]. *Energy* 2013;63:123–32 [žiūrėta 2022-04-21 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
72. ZHAI H, SHI L, AN Q. Influence of working fluid properties on system performance and screen evaluation indicators for geothermal ORC (organic Rankine cycle) system [interaktyvus]. *Energy* 2014;74:2-11 [žiūrėta 2022-04-21 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
73. WANG SK, HUNG TC. Renewable energy from the sea - organic Rankine Cycle using ocean thermal energy conversion [interaktyvus]. In: *Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD), 2010 Proceedings of the International Conference on* [žiūrėta 2022-04-22 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
74. SUN F, IKEGAMI Y, JIA B, ARIMA H. Optimization design and exergy analysis of organic rankine cycle in ocean thermal energy conversion [interaktyvus]. *Appl Ocean Res* 2012;35:38–46 [žiūrėta 2022-04-27 d.]. Prieiga per: ScienceDirect.
75. LŠTA: Biokuras Energetikoje – Lietuvos pasididžiavimas prieš Pasaulį [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-04-05 d.]. Prieiga per: <https://lsta.lt/aktualijos/biokuras-energetikoje-lietuvos-pasididziavimas-pries-pasauli/>
76. GURKLIENĖ, R. Biokuro panaudojimas Lietuvos šilumos ūkyje – nauda ir ateitis [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2023-04-05 d.]. Prieiga per: <http://www.darnistatyba.lt/biokuro-panaudojimas-lietuvos-silumos-ukyje-nauda-ir-ateitis/>
77. VERT: Vidutinė Kovo Mėn. Šilumos Kaina Yra 2,5 % Mažesnė Nei Pernai [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2022-04-13 d.]. Prieiga per: <https://www.regula.lt/Puslapiai/naujienos/2021-metai/2021-kovas/vidutine-silumos-kaina-yra-mazesne-nei-pernai.aspx>
78. Enefit: Kintama kaina [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-14 d.]. Prieiga per: <https://www.enefit.lt/verslui/elektros-kaina/kintama-kaina>

79. Lietuvos Respublikos finansų ministerija: Finansų ministerijos makroekonomikos prognozė 2019-2022 metams [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-04-15 d.]. Prieiga per: <https://finmin.lrv.lt/lt/naujienos/finansu-ministerijos-makroekonomikos-prognoze-2019-2022-metams>
80. MARKIDES, C. N. Low-Concentration Solar-Power Systems Based on Organic Rankine Cycles for Distributed-Scale Applications: Overview and Further Developments [interaktyvus]. 2015, *Frontiers in Energy Research*, 3 [žiūrėta 2022-04-15 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00047>
81. ASTAFJEV, J. ORC plėtra šilumos tiekimo įmonėse - “žalia” elektros energija savo reikmėms [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-04-18 d.]. Prieiga per: <https://www.linkedin.com/pulse/orc-pl%C4%97tra-%C5%A1ilumos-tiekimo-%C4%AFmon%C4%97se-%C5%BEalia-elektros-savo-astafjev/>
82. ALGIERI A, MORRONE P. Comparative energetic analysis of high-temperature subcritical and transcritical Organic Rankine Cycle (ORC). A biomass application in the Sibari district [interaktyvus]. *Applied Thermal Engineering*, 2012; 36:236-244 [žiūrėta 2022-04-20 d.]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.021>
83. SYLVAIN, Q., VAN DEN BROEK, M., DECLAYE, S., DEWALLEF, P., LEMORT, V., QUOILIN, S. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems [interaktyvus]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, 2013, 168–186 [žiūrėta 2022-04-25 d.]. Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000592>
84. Finansistas: Diskontuoto pinigų srautai [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <http://www.finansistas.net/diskontuotu-pinigu-srautai.html>
85. Finansistas: Grynosios dabartinės vertės metodas [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-04-27] Prieiga per: <http://www.finansistas.net/grynoji-dabartine-verte.html>
86. BIVAINIS, J., GRIŠKEVIČIUS, A., JAKŠTAS, V. Investicinių projektų vertinimas. Vilnius: Lietuvos informacijos institutas, 1998, 39 p.
87. MARTINAITIS, V., ROGOŽA, A., BIKMANIENĖ, I. Criterion to evaluate the “twofold benefit” of the renovation of buildings and their elements [interaktyvus]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(1), 3–8 [žiūrėta 2022-03-02]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00054-9)
88. VERT: WACC-2019-2023 [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-04-29]. Prieiga per: <https://www.regula.lt/elektra/Puslapiai/wacc-2019-2023-.aspx>
89. AGAINITY: ORC Technology [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-07]. Prieiga per: <https://againity.com/>

Priedai

1 Priedas. AT500 Simuliacija

