



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Linas Pučinskas**

**KOGENERACINĖS JĖGAINĖS ENERGETINIO IR**  
**EKONOMINIO EFEKTYVUMO ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Valdas Lukoševičius

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**KOGENERACINĖS JĖGAINĖS ENERGETINIO IR**  
**EKONOMINIO EFEKTYVUMO ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

Termoinžinerija (kodas 621E30001)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Valdas Lukoševičius

(data)

**Recenzentas**

(parašas) Prof. V. Dagilis

(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Linas Pučinskas

(data)

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:**

Šilumos ir atomo energetikos \_\_\_\_\_  
(parašas, data)

katedros vedėjas doc. E. Puida

\_\_\_\_\_  
(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO  
UŽDUOTIS**

**Studijų programa TERMOINŽINERIJA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema: **Kogeneracinės jėgainės energetinio ir ekonominio efektyvumo analizė**

.....  
.....

Patvirtinta 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-8.....

2. Darbo tikslas: Įvertinti energetinį ir ekonominį esamos kogeneracinės jėgainės efektyvumą bei pasiūlyti techninių sprendinių efektyvumui didinti.....

.....

3. Darbo struktūra: Įvadas. Biokurą naudojančių kogeneracinių jėgainių technologijų ir charakteristikų apžvalga. Elektros ir centralizuoto šilumos tiekimo rinkų apžvalga Kaune. Biokuro termofikacinės elektrinės apžvalga. Termodinaminė, energetinė ir ekonominė kogeneracinės elektrinės analizė. Esamos sistemos optimizavimas. Išvados. Priedai.....

.....

4. Reikalavimai ir sąlygos: **rengiant baigiamąjį darbą prisilaikyti Lietuvos Respublikos norminių aktų reikalavimų bei magistro baigiamojo darbo apiforminimo reikalavimų**.....

.....

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 23 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui **Linui Pučinskui**.....

Užduotį gavau **Linas Pučinskas**..... 2017-02-02

(studento vardas, pavardė) (parašas)

(data)

Vadovas **Doc. dr. Valdas Lukošiavičius**..... 2017-02-02

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas)

(data)



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

---

Linas Pučinskas

(Studento vardas, pavardė)

Terminžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

---

„KOGENERACINĖS JĖGAINĖS ENERGETINIO IR EKONOMINIO EFEKTYVUMO  
ANALIZĖ“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 23 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Lino Pučinsko**, baigiamasis projektas tema „KOGENERACINĖS JĖGAINĖS ENERGETINIO IR EKONOMINIO EFEKTYVUMO ANALIZĖ“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Pučinskas, Linas. Kogeneracinės jėgainės ir energetinio ir ekonominio efektyvumo analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Valdas Lukoševičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *kogeneracija, elektrinė, efektyvumas, ekonomija, turbina, kondensatorius, biokuras*

Kaunas, 2017. 52 p.

## **SANTRAUKA**

Šiame baigiamajame magistro darbe apžvelgiama biokurą naudojančios kogeneracinės jėgainės technologijos ir charakteristikos. Analizuojamos elektros ir centralizuotai tiekiamos šilumos pardavimo rinkos. Identifikuojami biokuro kogeneracinės elektrinės termodinaminio, energetinio ir ekonominio efektyvumo rodikliai.

Taip pat nagrinėjamos efektyvumo gerinimo galimybės siekiant padidinti turbinos kondensatoriaus efektyvumą. Pirmasis būdas tai padaryti – eliminuoti tarpinį šilumokaitį. Kitas būdas sumažinti kondensatoriaus slėgį yra optimaliai paskirstyti grįžtančio termofikacinio vandens srautą į turbinos kondensatorių ir į dūmų kondensacinį ekonomizerį. Taip pat siūloma įdiegti termofikacinio vandens aušintuvą, kuris aukščiausių elektros supirkimo kainų metu suteiktų galimybę dirbti kondensaciniu režimu, nepriklausomai nuo centralizuotos šilumos poreikio, o pagamintą elektrą maksimaliai tiekti į elektros biržą.

Atliekami skaičiavimai, apibendrinami gauti rezultatai ir pateikiamos išvados.

Pučinskas, Linas. *The Analysis of Energy and Economic Efficiency for Cogeneration Plant: Master's thesis / supervisor assoc. prof. Valdas Lukoševičius. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.*

Research area and field: Energy Engineering

Key words: Cogeneration, power plant, efficiency, economy, turbine, condenser, biofuel  
Kaunas, 2017.52 p.

## **SUMMARY**

In this master's thesis technologies and characteristics of biofuel fired CHP plant are examined. Electricity and central heating supply markets are analyzed. The calculations of thermodynamic, energy and economic efficiencies of biofuel CHP plant were made.

Also, the improvement opportunities of condensers efficiency were analyzed. The first way of efficiency increasing is to eliminate the heat exchanger. The other way is to distribute the return DH water flow properly to condenser and to flue gas condenser. Installing a DH water cooler to generate a full amount of electricity, despite of DH water need, when electricity prices are on top.

At the end, economical calculations are made and the results are presented in conclusions.

## TURINYS

ĮVADAS .....	10
1. BOKURĄ NAUDOJANČIŲ KOGENERACINIŲ JĖGAINIŲ TECHNOLOGIJŲ IR CHARAKTERISTIKŲ APŽVALGA .....	11
1.1 Priešslėginė garo turbina .....	11
1.2 Kondensacinė garo turbina .....	12
1.3 Organinis Renkino ciklas .....	14
2. ELEKTROS IR CENTRALIZUOTO ŠILUMOS TIEKIMO RINKŲ APŽVALGA KAUNE .....	16
2.1 Bendros šilumos ir elektros energijos gamybos naudingumo nustatymo metodika pagal 2012/27/ES direktyvą .....	16
2.2 Elektros rinkos apžvalga .....	18
2.3 CŠT rinkos apžvalga .....	20
3. BOKURO TERMOFIKACINĖS ELEKTRINĖS APŽVALGA .....	22
3.1 Biokuro termofikacinės elektrinės technologija .....	22
3.2 Garo katilas .....	23
3.3 Garo sistema ir turbina su kondensatoriumi .....	25
3.4 Kondensacinis dūmų ekonomazeris .....	26
3.5 Šilumos nuvedimas į šilumos tiekimo sistemą .....	28
4. TERMODINAMINĖ, ENERGETINĖ IR EKONOMINĖ KOGENERACINĖS ELEKTRINĖS ANALIZĖ .....	29
4.1. Termodinaminė analizė .....	29
4.2 Energetinė jėgainės analizė .....	31
4.3 Kogeneracinės jėgainės ekonominė analizė .....	36
5. ESAMOS SISTEMOS OPTIMIZAVIMAS .....	41
5.1 Principinės schemos optimizavimas eliminuojant skiriamąjį šilumokaitį .....	41
5.2 Termofikacinio vandens srauto paskirstymas į DKE ir turbinos kondensatorių .....	43
5.3 Papildomos aušinimo sistemos įrengimas .....	45
IŠVADOS .....	48
LITERTATŪROS SĄRAŠAS .....	49
A priedas. Žemutinės ir viršutinės degimo šilumos santykis pagal kuro drėgmę .....	51
B priedas. Apskaičiuotos pajamos už parduotą šilumą ir elektrą pagamintą kogeneracinėje jėgainėje .....	52

## Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Kogeneracinės jėgainės priešslėginės garo turbinos principinė schema .....	11
1.2 pav. Kogeneracinės jėgainės su kondensacine garo turbina principinė schema .....	13
1.3 pav. Organinio Renkino ciklo kogeneracinės jėgainės principinė schema .....	15
2.1 pav. 2016 m. elektros pardavimo kaina Lietuvoje €/MWh.....	19
2.2 pav. Valandinės elektros supirkimo kainos 2017.04.11 – 2017.04.17 dienomis .....	19
2.3 pav. Šilumos iš NŠG supirkimo kainos 2014.01-2016.01 mėn., ct/kWh [12].....	21
3.1 pav. Esama termofikacinės elektrinės principinė schema.....	23
3.2 pav. Garo katilas XILO STEAM 25,5-62-485 .....	25
3.3 pav. Kondensacinis ekonomizeris ir kondensato valymo sistema.....	28
4.1 pav. Garo ciklo kogeneracinio režimo T-s diagrama .....	29
4.2 pav. Kondensaciniame ekonomizeryje galimos gauti santykinės šilumos priklausomybė nuo dūmų temperatūros.....	33
4.3. pav. Biokuro kogeneracinės jėgainės energetinis balansas dirbant nominaliais parametrais	34
4.4 pav. Biokuro kogeneracinės jėgainės generuojamos elektrinės galios priklausomybė nuo paduodamos į CŠT vandens temperatūros .....	36
4.5 pav. Metinis pajamų ir išlaidų balansas .....	39
5.1 pav. Termofikacinės elektrinės principinė schema be tarpinio šilumokaičio .....	41
5.2 pav. Termofikacinės elektrinės principinė schema įdiegus garo vandens pašildytuvą .....	44
5.3 pav. Šilumos balansas garo vandens pašildytuvui .....	44
5.4 pav. Termofikacinės elektrinės principinė schema įdiegus papildomą aušinimo sistemą .....	46
5.5 pav. Aušyklė AquaForce30XA .....	47



## Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Kogeneracinės jėgainės priešslėginės garo turbinos privalumai ir trūkumai .....	12
1.2 lentelė. Kogeneracinės jėgainės su kondensacine garo turbina privalumai ir trūkumai .....	14
1.3 lentelė. Kogeneracinės ORC jėgainės privalumai ir trūkumai .....	15
2.1 lentelė. Nustatytosios elektros ir šilumos energijų santykio vertės.....	17
3.1 lentelė. Pagrindiniai garo katilo STEAM 25,5-62-485 parametrai .....	24
3.2 lentelė. Dūmų kondensacinio ekonomaizerio šiluminis galingumas .....	27
4.1 lentelė. Nagrinėjamos kogeneracinės elektrinės parametrai .....	29
4.2 lentelė. Termodinaminio ciklo parametrai dirbant kogeneraciniu ir kondensaciniu režimais	30
4.3 lentelė. Apskaičiuoti termodinaminio ciklo parametrai dirbant kondensaciniu režimu.....	30
4.4 lentelė. Apskaičiuoti termodinaminio ciklo parametrai dirbant kogeneraciniu režimu .....	31
4.5 lentelė. Šilumos, gaunamos iš dūmų, priklausomybė nuo dūmų ataušimo temperatūros ir kuro drėgmės .....	33
4.6 Energetinės analizės metu gauti dydžiai .....	34
4.7 lentelė. Biokuro kogeneracinės jėgainės energetinės analizės dydžiai priklausomai nuo katilo apkrovimo.....	35
4.8 lentelė. Biokuro kogeneracinės jėgainės generuojama elektrinė galia padidinus vandens temperatūrą nuo 70 iki 115 °C. ....	35
4.9 lentelė. Metinės biokuro kainos ir išlaidos.....	38
4.10 lentelė. Ekonominės analizės metu gauti dydžiai.....	39
5.1 lentelė. Palyginamoji jėgainės efektyvumo analizė dirbant be skiriamąjo šilumokaičio .....	42
5.2 lentelė. Termofikacinio vandens srauto paskirstymo įtaka kogeneracinės elektrinės efektyvumui.....	43
5.3 lentelė. Garo kiekiai reikalingi pašildyti termofikacinį vandenį nuo T2 iki 70 °C .....	45
5.4 lentelė. Aušyklės AquaForce 30XA techniniai parametrai .....	47

## IVADAS

Patikimumas ir proporcingas vystymas – tai svarbiausi Europos Sąjungos energetikos sektoriaus politikos tikslai. Išsivysčiusių ir besivystančių šalių energetikos politikoje vis svarbesnė vieta skiriama atsinaujinančių energijos išteklių plėtrai. Atsinaujinanti energetika laikoma vienu svarbiausių valstybės energetikos politikos prioritetų. Ji tapo pripažinta energetikos sritimi, pateikiančia vartotojui iš atsinaujinančių šaltinių gaminamą elektrą, šilumą, degalus, dujas. Tai ne tik mažina ar net panaikina energijos gamybos žalą aplinkai, bet ir užtikrina technologinę pažangą ir mažina socialinę atskirtį. Taip pat plečiant atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimą, mažinama šalies priklausomybė nuo importuojamo iškastinio kuro, taip energetikos rinkai suteikiamas lankstumas ir panaikinama energetikos monopolija. Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas Lietuvos energetinės nepriklausomybės strategijoje išskiriama kaip svarbiausias prioritetas energetikos srityje iki 2020 metų [1]. Didelio naudingumo kogeneracija yra vienas iš veiksmingiausių būdų pasiekti šiuos tikslus.

Kogeneracija vadinama šiluminės ir elektros energijos gamyba vienu metu, kuomet abi energijos rūšys yra panaudojamos, taip pasiekiant didesnę efektyvumą. Siekiant patenkinti energijos poreikius naudojant tvarius, vietinius, atsinaujinančius ir kitus energijos išteklius, užtikrinti patikimą energetinės sistemos veikimą ir tikslingai panaudoti turimus centralizuoto šilumos ūkio privalumus, didžiuosiuose Lietuvos miestuose 2015–2021m. skatinama didelio naudingumo kogeneracija iš biomasės. Taigi svarbiausias šių dienų Lietuvos energetinis tikslas – didinti naudojamo kuro energetinio sunaudojimo potencialą, pagaminant kuo didesnę šilumos ir elektros energijos kiekį su mažiausiomis kuro ir eksploataavimo sąnaudomis. Tačiau biokuro kogeneracinėms elektrinėms tenka konkuruoti elektros ir šilumos rinkose, kur kainų šuoliai reikšmingi, o konkurencija įtempta, todėl būtina ieškoti efektyvumo didinimo galimybių ir gerinti ekonominius rodiklius.

**Darbo tikslas:** Įvertinti energetinį ir ekonominį kogeneracinės jėgainės efektyvumą konkurencingose elektros ir šilumos rinkose bei pasiūlyti techninių sprendimų efektyvumui didinti.

### **Darbo uždaviniai:**

- Apžvelgti biokurą naudojančių kogeneracinių jėgainių technologijas ir charakteristikas;
- Išanalizuoti elektros ir centralizuoto šilumos tiekimo rinkas;
- Apžvelgti kogeneracinės elektrinės technologiją ir techninius įrenginių parametrus;
- Atlikti energetinę ir ekonominę analizę, identifikuoti pagrindinius faktorius lemiančius geresnę šilumos ir elektros generavimą;
- Techninių sprendimų, siekiant didesnio efektyvumo, parinkimas ir modeliavimas.

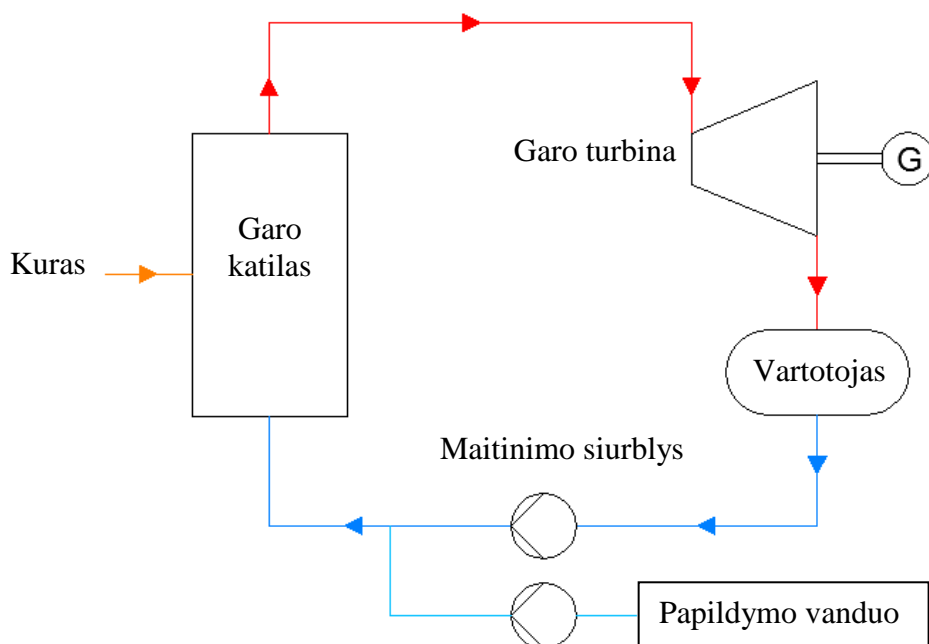
# 1. BIOKURĄ NAUDOJANČIŲ KOGENERACINIŲ JĖGAINIŲ TECHNOLOGIJŲ IR CHARAKTERISTIŲ APŽVALGA

Kogeneracinės jėgainės suteikia galimybę decentralizuoti energijos gamybos pajėgumus, kadangi jėgainės projektuojamos taip, kad atitiktų vietos vartotojų poreikius, užtikrintų didelį efektyvumą tam, kad būtų patiriami mažesni perdavimo nuostoliai ir padidintas sistemos lankstumas. Kogeneracinėse jėgainėse gali būti naudojami įvairūs įrenginiai, besiskiriantys techniniais, eksploataciniais aspektais, efektyvumu ir kitais parametrais. Todėl parenkant kogeneracinį įrenginį pirmiausiai reikėtų atsižvelgti į norimos šiluminės ir elektrinės galios santykį, šilumos parametrus bei pageidaujamą naudoti kuro rūšį.

Šiame skyriuje apžvelgsime labiausiai paplitusių kogeneracinių įrenginių, galinčių naudoti biokurą, technologijas, veikimo principus bei efektyvumą.

## 1.1 Priešslėginė garo turbina

Garų turbinų technologijos veikimo principas pagrįstas teoriniu termodinaminiu Rankino ciklu. Maitinimo siurbliais iki vidutinio (40–60 bar) arba aukšto (daugiau nei 60 bar) slėgio suslegiamas vanduo, paskui jis garo katile išgarinamas ir dažniausiai perkaitinamas perkaitintuvuose, kuriuose jo temperatūra pakeliama iki 400–600 °C. Perkaitintas garas priešslėginėje garo turbinoje plečiasi ir paprastai pasiekia aukštesnį už atmosferos slėgį. Garo išsiplėtimo turbinoje metu gauta mechaninė energija generatoriumi transformuojama į elektros energiją. Išsiplėtęs garas gali būti tiekiamas CŠT sistemoms, pramonės įmonėms ir kitiems šilumos energijos vartotojams. Paprastai priešslėginės turbinų veikimas priklauso nuo garo poreikio, t. y. gaminamos elektros energijos kiekis tiesiogiai priklauso nuo gaminamo garo kiekio [2] (1.1 pav.).



1.1 pav. Kogeneracinės jėgainės priešslėginės garo turbinos principinė schema

Priešslėginės garo turbinos gali būti taikomos pramonės ir elektros energijos gamybos įmonėse, kurių elektrinė galia 0,5–300 MW ir didesnė. Termodinaminiu požiūriu didelį elektrinį efektyvumą galima pasiekti tik gaminant aukštų parametrų perkaitintą garą (170–227 bar, 600 °C). Šitoks režimas įmanomas tik tiesiasroviuose (priverstinės cirkuliacijos) garo katiluose. Jėgainėse, kuriose kūrenamas biokuras, garo parametrai yra ribojami, nes dėl kure esančios sieros ir chloro būna didesnė rūgštinės korozijos rizika. Reikia atsižvelgti į tai, kad biokuro drėgmė veikia gaminamo garo temperatūrą ir masės debitą.

Priešslėginės garo turbinos pagrindu veikiančios kogeneracinės jėgainės elektrinis efektyvumas siekia tik 10–25 %, o didelės galios modernios kondensacinės elektrinės elektrinis efektyvumas siekia 40–45 %, tačiau mažesnių kondensacinių turbinų efektyvumas svyruoja nuo 15 iki 35 %. Ypač mažųjų jėgainių, kurių pagaminta elektros energija yra garo tiekimo šilumos vartotojams proceso šalutinis produktas, elektrinis efektyvumas gali būti mažesnis kaip 10 %. Bendras garo turbinų kogeneracinių jėgainių efektyvumas siekia 85 % ir daugiau [3].

1.1 lentelė. Kogeneracinės jėgainės priešslėginės garo turbinos privalumai ir trūkumai

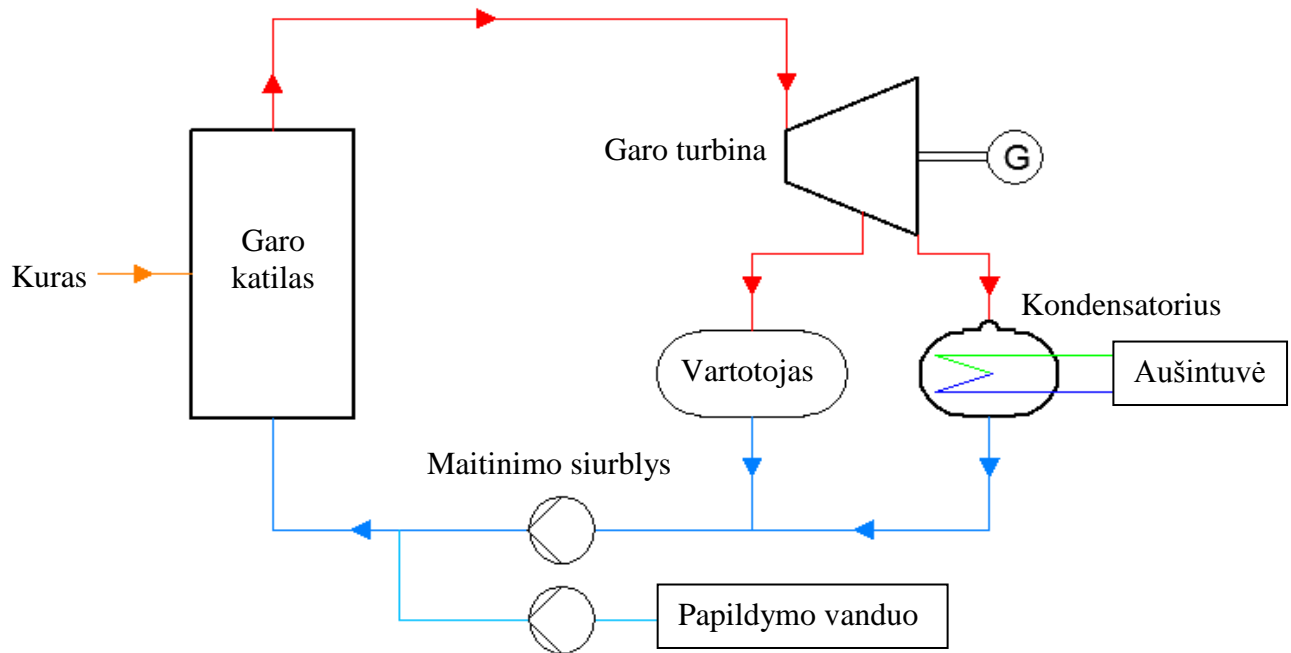
Pranašumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"> <li>• aukštas bendrojo efektyvumo rodiklis;</li> <li>• galima naudoti įvairių rūšių kurą;</li> <li>• praktiškai neribojama galia;</li> <li>• patikima ir ilgaamžė bei gerai išvystyta technologija;</li> <li>• parengtis darbui gali siekti 100 %, t. y. ištisus metus turbinos gali būti eksploatuojamos be sustojimo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• žemas elektrinio efektyvumo rodiklis;</li> <li>• brangus eksploatavimas;</li> <li>• turbina lėtai paleidžiama iš šaltos būsenos;</li> <li>• dirbant maža apkrova mažėja elektrinis efektyvumas.</li> </ul>

## 1.2 Kondensacinė garo turbina

Šios technologijos veikimo principas analogiškas priešslėginės garo turbinos veikimo principui. Pagrindinis skirtumas tas, kad šio ciklo metu garas, reikalingas šilumos energijos vartotojams, paimamas ne visai išsiplėtęs. Kondensacinėje garo turbinoje garas plečiasi į kondensatorių, kuriame palaikomas kuo didesnis vakuumas. Kondensatoriuje garas kondensuojasi ir iš jo į garo katilą grąžinamas maitinimo siurbliais, kur jis suslegiamas iki procesui reikalingo slėgio bei papildomai deaeruojamas. Taikant šią technologiją šilumos ir elektros energijos gamybą galima reguliuoti pagal skirtingus šilumos ir elektros energijos poreikius:

1. Nuimamo garo slėgis reguliuojamas vožtuvais, kurie yra pačioje garo nuėmimo linijos pradžioje, – taip palaikomi reikiami garo parametrai, priklausantys nuo proceso, kuriam bus tiekiamas garas.

2. Esant maksimaliam šilumos energijos poreikiui, visą garą galima nuimti nevisai išsiplėtusį (turbinos vidurinėje dalyje), o esant mažam šilumos energijos poreikiui ši turbina gali dirbti įprastu kondensacinės turbinos ciklu, kai visas garas išsiplečia turbinoje ir būna kondensuojamas kondensatoriuje, o atlikusi šiluma išmetama į atmosferą (1.2 pav.).



1.2 pav. Kogeneracinės jėgainės su kondensacine garo turbina principinė schema

Kondensacinės garo turbinos gali būti taikomos pramonės ir elektros energijos gamybos įmonėse, kurių elektrinė galia didesnė kaip 0,5 MW. Modernios didelės galios kondensacinės jėgainės elektrinis efektyvumas siekia 40–45 %, tačiau mažesnių kondensacinių turbinų efektyvumas svyruoja nuo 15 iki 35 %. Ypač mažų jėgainių, kurių gaminama elektros energija yra garo tiekimo šilumos vartotojams proceso šalutinis produktas, elektrinis efektyvumas gali nesiekti nė 10 %. Bendrasis kondensacinių garo turbinų kogeneracinių jėgainių efektyvumas siekia 85 % [2].

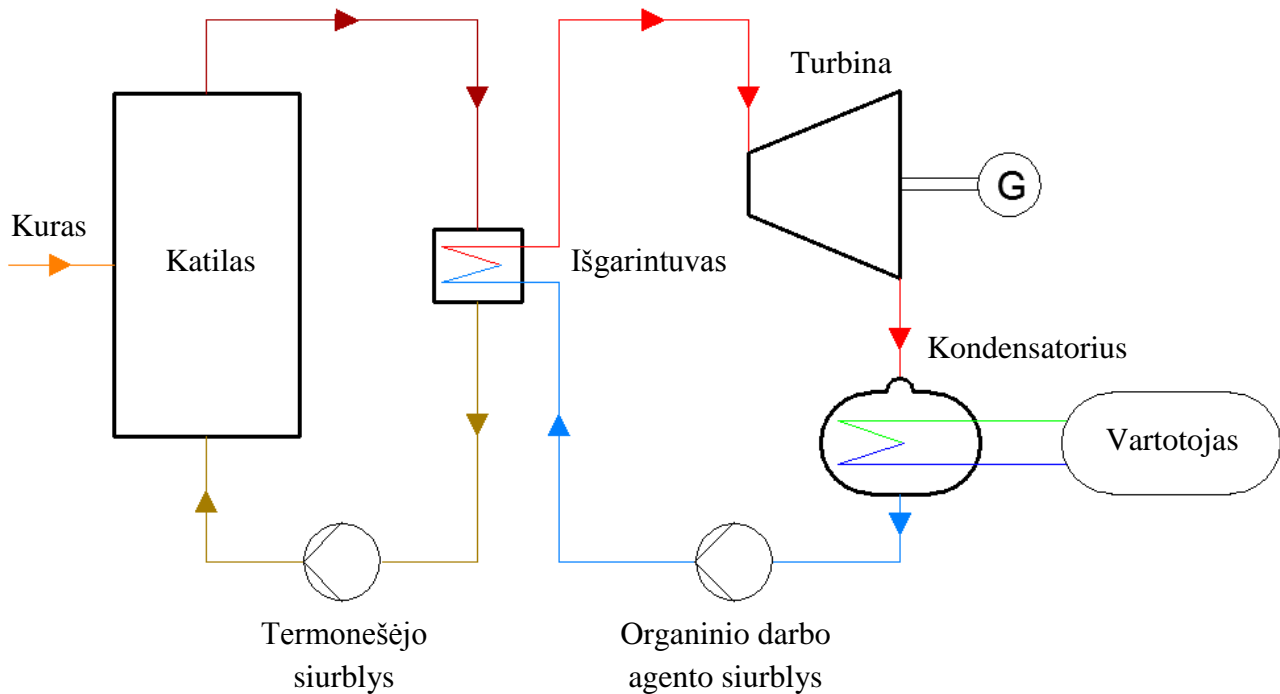
1.2 lentelė. Kogeneracinės jėgainės su kondensacine garo turbina privalumai ir trūkumai

Pranašumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"> <li>• aukštas bendrojo efektyvumo rodiklis;</li> <li>• galima naudoti įvairių rūšių kurą;</li> <li>• neribojama galia;</li> <li>• patikima ir ilgaamžė bei gerai išvystyta technologija;</li> <li>• galima reguliuoti elektros ir šilumos energijos santykį.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• žemas elektrinio efektyvumo rodiklis;</li> <li>• brangus eksploatavimas;</li> <li>• turbina lėtai paleidžiama iš šaltos būsenos;</li> <li>• dirbant maža apkrova mažėja elektrinis efektyvumas;</li> <li>• efektyvumas priklauso nuo aplinkos sąlygų, t. y. didėjant aplinkos temperatūrai mažėja naudingumo koeficientas.</li> </ul>

### 1.3 Organinis Renkino ciklas

Organinis Renkino ciklas – tai iš esmės nauja termotechnologija elektros ir šilumos energijai gaminti iš žemesnio potencialo šilumos. Tokiais šilumos šaltiniais gali pasitarnauti tiek biokuras, tiek geoterminė ar pramonės atliekinė šiluma. Toks ciklas sąlygoja pakankamai efektyvų elektros energijos gavimą, kai turime iki 500°C temperatūros šilumą. Tačiau reikia pažymėti, kad elektros šiuo atveju gaunama nedaug – iki 20%. Likusi energija panaudojama šilumai arba nuvedama į aplinką.

Nuo įprastinio Renkino ciklo ORC skiriasi tuo, kad nenaudojamas vandens garas kaip darbo agentas. Kogeneracinėse jėgainėse, kuriose taikomas organinis Renkino ciklas, deginamas kuras, ir degimo metu susidarę karšti degimo produktai perduoda šilumą tepalui. Šis tarpinis tepalo ciklas leidžia lengviau reguliuoti perduodamą temperatūrą. Iš tepalo ciklo šiluma perduodama darbo agentui, kuris virsta garais. Patekę turbinų garai plečiasi ir atlieka darbą. Gauta mechaninė energija generatoriuje verčiama į elektros energiją. Toliau garai keliauja į kondensatorių, kur šiluma gali būti paimama vandeniui įkaitinti. Vėliau susikondensavęs darbo agentas grąžinamas į išgarintuvą (1.3 pav.).



1.3 pav. Organinio Rankino ciklo kogeneracinės jėgainės principinė schema

Organinio Rankino ciklo įrenginiai dažniausiai parduodami moduliais, ir vieno modulio elektrinė galia svyruoja nuo 200 kW iki 1,5 MW. Didesnė galia pasiekama kelis modulius sujungus lygiagrečiai. Organinių junginių, kuriuos galima naudoti šioje technologijoje, molekulinė masė didesnė nei vandens: tai gali būti toluolas, pentanas, silikono tirpalas. Darbo agento slėgis siekia 10 bar. [2].

1.3 lentelė. Kogeneracinės ORC jėgainės privalumai ir trūkumai

Pranašumai	Trūkumai
<ul style="list-style-type: none"> <li>• įvairių kuro rūšių panaudojimo galimybės;</li> <li>• dirbant su organiniais junginiais nereikalinga aukšta temperatūra;</li> <li>• geri parametrai dirbant ne pilnu pajėgumu;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• būtinas tarpinis tepalo ciklas;</li> <li>• naudojami organiniai junginiai brangesni už vandenį, jie gali būti pavojingi, todėl galimos papildomos eksploatacinės išlaidos;</li> <li>• maža darbo įrenginiais, naudojančiais biomasę kaip kurą, patirtis;</li> <li>• didelės investicijos.</li> </ul>

## 2. ELEKTROS IR CENTRALIZUOTO ŠILUMOS TIEKIMO RINKŲ APŽVALGA KAUNE

Šiame skyriuje bus apžvelgiama kogeneracijos naudingumo metodika identifikuojami pagrindiniai faktoriai lemiantys elektros ir šilumos generavimo efektyvumą. Atskirai nagrinėjama elektros ir šilumos rinkos. Taip pat bus apžvelgiama esama situacija Kauno šilumos gamybos sektoriuje, šilumos poreikis miestui šildymo ir nešildymo sezonais.

### 2.1 Bendros šilumos ir elektros energijos gamybos naudingumo nustatymo metodika pagal 2012/27/ES direktyvą

Termofikacijos būdu pagamintas elektros energijos kiekis turi būti apskaičiuojamas naudojant faktinius elektros ir šilumos energijos gamybos santykius, paremtus metine elektros energijos ir naudingos šilumos energijos gamyba [4]. Elektros energijos, pagamintos termofikacijos būdu, vienerių metų laikotarpiui reikalingi faktiniai duomenys:

- faktinis naudingos šilumos, pagamintos termofikaciniuose įrenginiuose, kiekis  $q_{CHP}$  [MWh];
- faktinis elektros energijos, pagamintos termofikaciniuose įrenginiuose, kiekis (bruto)  $p$  [MWh];
- faktinis sunaudoto kuro kiekis  $f$  [MWh];

Nustatomas bendras termofikacinės elektrinės naudingumas  $\eta$ :

$$\eta = \frac{p + q_{CHP}}{f - f_{non-CHP,q}}; \quad (2.1)$$

kur  $f_{non-CHP,q}$  – kuro kiekis sunaudotas šilumos energijos gamybai ne termofikaciniuose įrenginiuose.

Jei bendras kondensacinių garo turbinų su tarpiniu garo nuėmimu naudingumas  $\eta \leq 80 \%$ , tai elektros energijos kiekis, kurį galima pripažinti kaip pagamintą termofikacijos būdu perskaičiuojamas tokia tvarka:

a) Nustatomas elektrinės galios praradimo koeficientas  $\beta_{CHP}$ . Elektrinės galios praradimo koeficientas gali būti arba matuojamas, arba, jei tokios galimybės nėra, apskaičiuojamas.

b) Apskaičiuojamas elektros energijos gamybos naudingumas  $\eta_{non-CHP,p}$ .

$$\eta_{non-CHP,p} = \frac{p + \beta_{CHP} \cdot q_{CHP}}{f - f_{non-CHP,q}}; \quad (2.2)$$

c) Apskaičiuojamas elektros ir šilumos energijų santykis –  $C$  ( $\sigma_{CHP}$ ).

$$C = \sigma_{CHP} = \frac{\eta_{non-CHP,p} - \beta_{CHP} \cdot \eta_{CHP}}{\eta_{CHP} - \eta_{non-CHP,p}}; \quad (2.3)$$

Kur bendras termofikacinio įrenginio naudingumas ( $\eta_{CHP}$ ) lygus 80% (pagal įrenginio tipą).



d) Apskaičiuojamas elektros energijos, pagamintos termofikacijos būdu, kiekis:

$$E_{CHP} = p_{CHP} = C \cdot q_{CHP} [\text{MWh}]; \quad (2.4)$$

e) Termofikacijos būdu pagamintai elektros energijai sunaudotas kuras:

$$f_{CHP} = \frac{p_{CHP} + q_{CHP}}{\eta_{CHP}} \quad (2.5)$$

Kai termofikacinio įrenginio faktinis elektros ir šilumos energijos santykis nėra žinomas, termofikacijos būdu pagamintam elektros energijos kiekiui apskaičiuoti (ypač statistiniams tikslams) siūloma naudoti nustatytąsias elektros ir šilumos energijų santykio vertes (2.1 lentelė), su sąlyga, kad apskaičiuotas termofikacijos būdu pagamintas elektros energijos kiekis yra mažesnis už to įrenginio bendrą elektros energijos gamybą arba jai lygus.

2.1 lentelė. Nustatytosios elektros ir šilumos energijų santykio vertės

Įrenginio tipas	Nustatytasis elektros energijos ir šilumos santykis, C
Kombinuotojo ciklo dujų turbina su šilumos atgavimu	0,95
Priešslėginė garo turbina	0,45
Kondensacinė garo turbina su tarpiniu garo paėmimu	0,45
Dujų turbina su šilumos atgavimu	0,55
Vidaus degimo variklis	0,75

Bendros šilumos ir elektros energijos gamybos naudingumui ir pirminės energijos sutaupymui (PES) apskaičiuoti naudojami dydžiai, nustatyti pagal planuojamą ar faktinį įrenginio darbą įprastomis eksploatacijos sąlygomis. Didelio naudingumo bendra šilumos ir elektros energijos gamyba turi atitikti šiuos reikalavimus:

- 1) Apskaičiuotas termofikacinių įrenginių bendro šilumos ir elektros energijos gamybos būdo metu sutaupyta pirminės energijos kiekis turi būti ne mažesnis kaip 10 % lyginant su atskira šilumos ir elektros energijos gamyba.
- 2) Bendra šilumos ir elektros energijos gamyba nedidelės elektrinės galios (< 1 MW) ir mikro (<50 kW) termofikaciniuose įrenginiuose pripažįstama kaip didelio naudingumo šilumos ir elektros energijos gamyba, esant bet kokiam pirminės energijos taupymui (PES >0).
- 3) Sutaupyta pirminės energijos kiekio skaičiavimo tvarka: Bendros šilumos ir elektros energijos gamybos metu sutaupyta pirminės energijos kiekis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$PES = \left( 1 - \frac{1}{\frac{CHPH\eta}{refH\eta} + \frac{CHPE\eta}{refE\eta}} \right) \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Kur: PES – sutaupyta pirminės energijos kiekis (%);

CHP  $H\eta$  – bendro šilumos ir elektros energijos gamybos būdo šiluminis naudingumas, apibrėžiamas kaip naudingosios šilumos energijos, pagamintos termofikaciniuose įrenginiuose, kiekis padalintas iš viso kuro kiekio, sunaudoto bendrai šilumos ir elektros energijos gamybai.

CHP  $E\eta$  – bendro šilumos ir elektros energijos gamybos būdo elektrinis naudingumas, apibrėžiamas kaip elektros energijos (bruto), pagamintos termofikaciniuose įrenginiuose, kiekis padalintas iš viso kuro kiekio, sunaudoto bendrai šilumos ir elektros energijos gamybai. Jei termofikacinis įrenginys gamina mechaninę energiją, metinis elektros energijos kiekis, pagamintas bendros šilumos ir elektros energijos gamybos būdu, gali būti padidintas papildoma dalimi, atspindinčia elektros energijos kiekį, ekvivalentišką mechaninės energijos kiekiui. Ši papildoma dalis nesuteikia teisės išduoti kilmės garantijų.  $ref H\eta$  – palyginamasis šilumos energijos gamybos įrenginio naudingumo koeficientas;

$ref E\eta$  – palyginamasis elektros energijos gamybos įrenginio naudingumo koeficientas, gaminant vien tik elektros energiją (kondensacinės elektrinės);

## 2.2 Elektros rinkos apžvalga

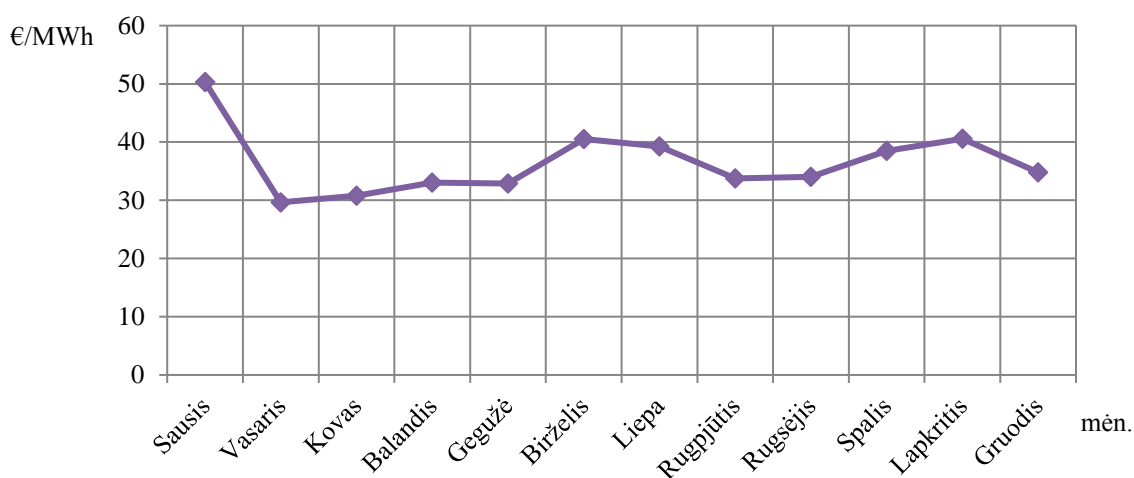
Elektros rinka – tai įvairių ūkio subjektų santykių, kurie formuojasi prekiaujant elektros energija, visuma. Ši rinka yra ypatinga tuo, kad elektros energija negali būti sandėliuojama, ji turi būti suvartojama tuo pačiu metu, kaip ir gaminama, o elektros perdavimas turi būti vykdomas kontroliuojant jos parametrus. Elektros rinką sudaro didmeninė ir mažmeninė elektros prekyba.

Didmeninėje prekyboje dalyvauja elektros gamintojai, kurie savo pagamintą elektros energiją parduoda nepriklausomiems tiekėjams. Taip pat šiai rinkai priklauso perdavimo ir skirstymo sistemų operatoriai, kurie įsigyja elektros energiją technologiniams nuostoliams perdavimo ir skirstymo tinkluose kompensuoti. Didmeninės prekybos dalyviai gali sudaryti dvišales sutartis tiesiogiai arba pirkti ir parduoti elektrą elektros biržoje. Mažmeninėje prekyboje dalyvauja nepriklausomi elektros tiekėjai ir elektros vartotojai, kurie su tiekėjais yra sudarę dvišales elektros prekybos sutartis [6].

Bendru atveju, elektros energiją gamina visos elektros sistemoje integruotos elektrinės. Iš jų elektros energija perduodama į aukštos įtampos perdavimo tinklą, vėliau ji paskirstoma žemesnės įtampos tinklais. Tokiu būdu, elektros energija pasiekia galutinį vartotoją, kur ši tuo pat metu yra suvartojama.

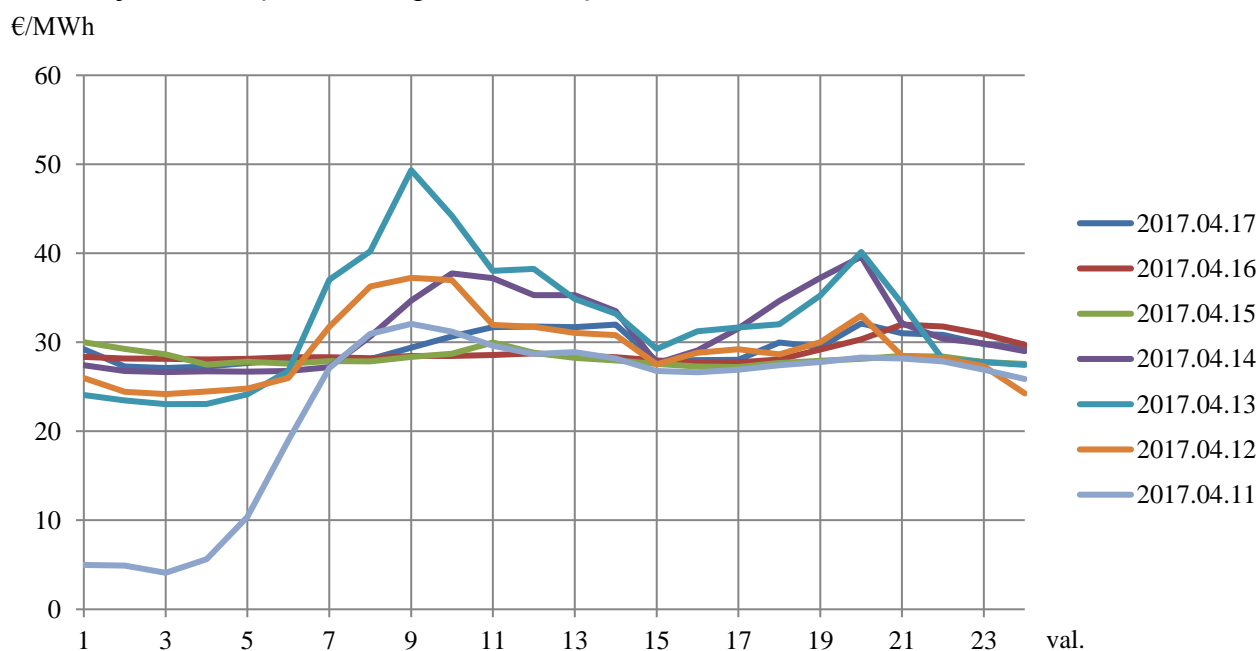
2016 m. sausio 1 d. Lietuvos elektros sistemoje elektrinių bendra įrengtoji galia sudarė 3558 megavatus (MW). Šiluminėse elektrinėse įrengtoji galia yra 1910 MW, tačiau biokuro termofikacinėse elektrinėse įrengtoji galia tik 108 MW. [8] Tai rodo didelį potencialą kogeneracinių jėgainių skaičiaus didėjimui Lietuvoje.

Nuo 2012 m. Lietuvoje pradėjus veikti „Nord Pool Spot“ elektros biržai, kurios paskirtis yra prekiauti elektros energija Šiaurės ir Baltijos šalyse bei Vokietijoje, atsirado galimybė elektros gamintojams laisvai parduoti pagamintą elektros energiją tarptautinėje rinkoje. „Nord Pool Spot“ birža apima apie 70 % Šiaurės šalyse sudaromų fizinės elektros energijos pirkimo ir pardavimo sandorių. Darbe nagrinėjama elektrinė parduoda pagamintą elektros energiją „Nord Pool Spot“ administruojamoje „dienos prieš“ - „Elsport“ rinkoje. „Dienos prieš“ modelio veikimas – elektros energijos suprekiavimas vyksta diena prieš jos tiekimą rinkos šalių vartotojams nurodant valandinius elektros energijos pardavimo kiekius. 2016 m. vidutinė Lietuvoje pagamintos elektros energijos kaina „Nord Pool Spot“ elektros biržoje vidutiniškai buvo 36,5 €/MWh (2.1 pav.).



2.1 pav. Elektros pardavimo kaina Lietuvoje €/MWh 2016 m.

Tačiau iš vidutinių elektros supirkimo kainų sunku spręsti kaip keičiasi elektros supirkimo kaina kiekvieną dieną. Paros eigoje galima išskirti net kelis didesnius kainų šuolius. 2.2 pav. vaizduoja valandinį elektros supirkimo tarifą 2017.04.11 – 2017.04.17 dienomis. [15]



2.2 pav. Valandinės elektros supirkimo kainos 2017.04.11 – 2017.04.17 dienomis

Iš šio grafiko matome, jog elektros supirkimo kaina didėja nuo 5 – 6 val. iki 9 – 10 val. ryto, kur pasiekia savo piką ir iki 14 val. nežymiai mažėja. Kitas elektros kainos padidėjimas matomas nuo 17 iki 21 val. Elektros kainos amplitudė metų eigoje gali svyruoti nuo 5 iki 80 €/MWh, o retais atvejais, šaltuoju metų laikotarpiu, gali peržengti net ir 100€/MWh ribą.

### 2.3 CŠT rinkos apžvalga

Centralizuotas šilumos tiekimas (CŠT), vystomas tiek grynai komerciniais tikslais, tiek grindžiant jo plėtrą planine ekonomika, labai plačiai taikomas šaltesnio klimato šalyse: Skandinavijoje, Rytų ir Vidurio Europoje, Rusijoje. Tokį CŠT populiarumą galima paaiškinti jo privalumais, kadangi jis turėjo ir turi daug pranašumų aprūpinant šiluma lyginant su kitais energijos nešikliais. Pagrindiniai CŠT privalumai:

1. Termofikacinėse elektrinėse, gaminant elektrą ir šilumą kartu, daug efektyviau panaudojamas kuras ir santykinai mažiau išmetama teršalų;
2. Galima efektyviai panaudoti žemarūšį kurą ir įvairias atliekas;
3. Galima panaudoti geoterminę ir pramoninių procesų atliekinę šilumą;
4. Reikalinga mažiau eksploatuojančio personalo;
5. Pastatuose nereikia skirti ploto katilinėms, todėl jis gali būti naudingai panaudotas kitiems reikalams;
6. Centralizuotai gaminamos šilumos šaltinių teršalus daug lengviau kontroliuoti nei iš individualių šilumos šaltinių. Juos galima efektyviai pašalinti iš degimo produktų;
7. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos yra pakankamai lanksčios ir todėl nesunkiai galima keisti jų režimus, atsižvelgiant į aplinkos faktorius. [9]

Nepriklausomų šilumos gamintojų pagamintą šilumą teisės aktų nustatyta tvarka superka tų miestų šilumos tiekimo įmonės. Didžiausias nepriklausomų šilumos gamintojų skaičius 2016 m. IV ketv. gamino ir pardavė šilumą AB „Kauno energija“ valdomoje Kauno miesto (9) ir AB „Klaipėdos energija“ valdomo Klaipėdos miesto (6) centralizuoto šilumos tiekimo sistemose. [10]

Visų Kauno miesto CŠT esamų ir planuojamų įrengti šilumos gamybos šaltinių įrengtoji katilų galia sistemoje siekia apie 1900 MW, kai Kauno miesto CŠT sistemos didžiausias šilumos poreikis per paskutinius tris metus buvo tik kiek daugiau nei 430 MW. Svarbu pažymėti, kad vidutinis metinis šildymo sezono galios poreikis siekė apie 200-250 MW, kai tuo tarpu biokurą naudojančių katilų šiuo metu eksploatuojama 270 MW, o per artimiausius kelis metus turėtų būti apie 340 MW. Akivaizdu, kad esamų įrenginių galia stipriai viršija Kauno miesto CŠT sistemos šilumos poreikį. [14]

Kauno mieste 2016 m. gegužės mėn. buvo fiksuojami 9 nepriklausomi šilumos gamintojai. UAB „GECO Kaunas“, UAB „SSPC-Taika“, UAB „Foksita“, UAB „Lorizon Energy“, UAB „Danpower Baltic Biruliškės“, UAB „Aldec General“, UAB „Kauno termofikacijos elektrinė“ yra nereguliuojami šilumos gamintojai. UAB „Petrašiūnų katilinė“ ir UAB „Ekoresursai“ yra taikoma

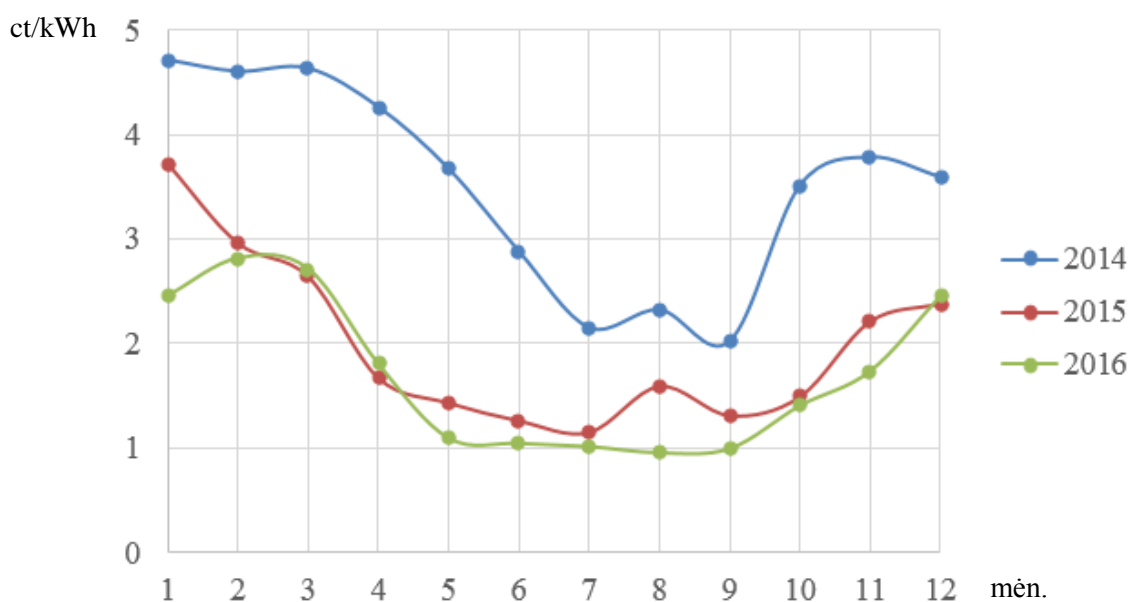
šilumos gamybos kainodara, tai reiškia, jog jie turės teikti komisijai bazinės kainos skaičiavimo projektus bei investicijų planą bazinės kainos galiojimo laikotarpiui. Reguluojamą šilumos gamybos kainodarą gamintojams privaloma taikyti, kai:

- šilumos gamybos įrenginių statybai nepriklausomas šilumos gamintojas panaudoja ES arba Lietuvos biudžeto paramos lėšas;

- remtinios elektros energijos gamybai kogeneracinėse jėgainėse taikomas fiksuotas elektros energijos tarifas;

- nepriklausomo šilumos gamintojo pagaminamas šilumos kiekis sudaro daugiau kaip 1/3 metinio šilumos kiekio vienoje centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje. Šį kriterijų atitinkantys nepriklausomi šilumos gamintojai turi teisę kreiptis į Komisiją dėl privalomos šilumos gamybos kainodaros netaikymo. [12]

2.6 pav. pateiktos CŠT šilumos supirkimo kainos iš NŠG 2014.01- 2015.12 laikotarpiu [11]. Kaip matome per 2 metus 2014.01 – 2016.01 kaina ženkliai sumažėjo. Tokį šilumos kainos mažėjimą įtakojo naujų nepriklausomų šilumos gamintojų atsiradimas Kauno CŠT rinkoje. Šilumos gamybos sektoriuje atsirado konkurencija tarp šilumos gamintojų. Vandens šildymo katilinės vasarą yra priverstos stovėti, nes ir taip nedidelę šilumos rinkos dalį užėmė biokuro kogeneracinės elektrinės, kurios gali šilumą parduoti pigiau. Žiemos laikotarpiu pastebimas dvigubai didesnis šilumos supirkimo tarifas, nes šilumos gamintojai nori uždirbti kuo didesnę pelną.



2.3 pav. Šilumos iš NŠG supirkimo kainos 2014.01-2016.01 mėn., ct/kWh [13]

Analizei pasirinktas Kauno miestas dėl to, jog jis yra tipinis konkurencijos ir technologijų pavyzdys. Vienoje CŠT sistemoje esant daug konkuruojančių skirtingų šilumos gamintojų, eilę mėnesių jie nedirba, dėl galios pertekliaus, o prastovos didina jų pastoviuosius kaštus. Šiame mieste dirba 2 kogeneracinės jėgainės, o netolimoje ateityje bus pastatyta ir trečioji – 70 MW

šiluminės galios ir 24 MW elektrinės. Neefektyvūs šilumos gamintojai bus priversti trauktis iš rinkos, todėl būtina ieškoti būdų kaip išlikti konkurencingais rinkos dalyviais.

### **3. BOKURO TERMOFIKACINĖS ELEKTRINĖS APŽVALGA**

Biokuro termofikacinės elektrinės paskirtis yra gaminti ir tiekti šilumą centralizuoto šilumos tiekimo vartotojams bei gaminti elektros energiją ir tiekti ją į Lietuvos elektros skirstomąjį tinklą.

Šiame skyriuje analizuojamas termofikacinės elektrinės technologinis veikimas, eksploatuojami pagrindiniai įrenginiai, tokie kaip garo katilas, garo turbina, kondensacinis dūmų ekonomizeris ir kt.

#### **3.1 Biokuro termofikacinės elektrinės technologija**

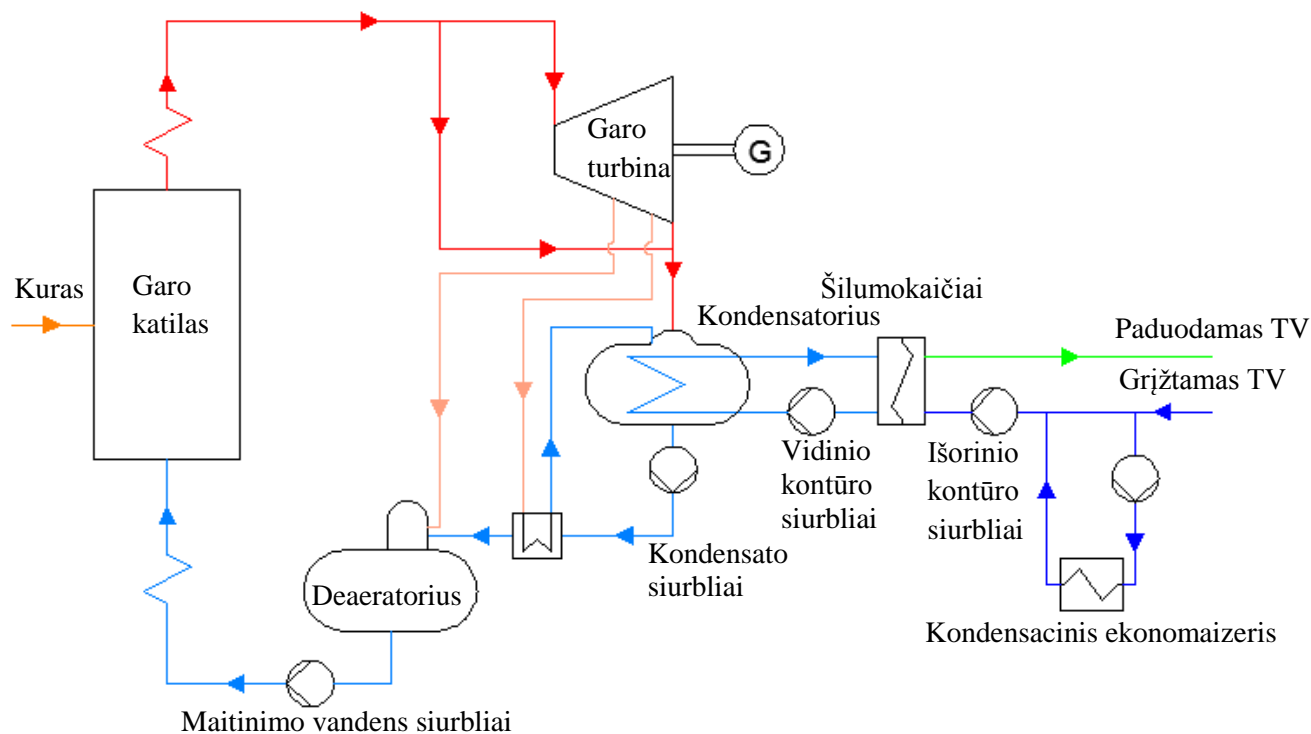
Elektrinės dirbančios termofikaciniu režimu, gamina garą ir elektros energiją. Garas naudojamas garo turbinose, technologiniams pramonės poreikiams, mazuto rezervuarų šildymui ir karštam termofikaciniam vandeniui ruošti. Šilumos vartotojų ir technologiniams poreikiams sąlyginai reikalingas žemos temperatūros termofikacinis vanduo, o jo pašildymui naudoti aukšto temperatūrinio potencialo degimo produktus nėra termodinamiškai naudinga. Bendras termodinaminis ciklo efektyvumas išauga gaminant šilumos ir elektros energiją.

Kuras tiekiamas iš kuro sandėlio su judančiomis hidraulinėmis grindimis į grandiklinį kuro transporterį, kuriuo kuras keliauja į pakuros bunkerį. Hidrauliniais stūmikliais, įrengtais po kuro iškrovimo bunkeriu, kuras tiekiamas į degimo kamerą, ant kilnojamojo ardyno. Kurui patekus į degimo kamerą, ant viršutinių kilnojamojo ardyno pakopų, vyksta drėgmės išgarinimo iš kuro procesas. Tada kuro dalelės užsiliiepsnoja. Kurui judant nuo viršutinių ardyno pakopų link apatinių pakopų, skiedrų dalelės visiškai sudega. Sudegdamos ant ardyno, dalelės išspinduliuoja šilumą (40–45 %), kuri išdžiovina ant ardyno naujai patenkantį kurą.

Garų gamyba vyksta natūralios cirkuliacijos garo katile, kuriame garas perkaitinamas iki 485°C ir 62 bar slėgio. Katilo būgne vyksta vandens ir garo atskyrimas, švarus garas paduodamas į garo perkaitintuvus, esančius konvektyvinėje katilo dalyje. Perkaitintuvuose garas perkaitinamas iki 485°C temperatūros. Toje pačioje konvektyvinėje dalyje esantis išgarintuvas sujungtas su katilo būgnu ir sudaro atskirą cirkuliacinį kontūrą. Praėję konvektyvinėje dalyje sumontuotus paviršius, degimo produktai nukreipiami į už katilo esantį ekonomizerį.

Ekonomizeryje vyksta pirminis katilo maitinimo vandens pašildymas. Praėję ekonomizerį degimo produktai patenka į baterinį multicikloną, kuriame nusodinami lakūs pelenai, taip sumažinant kietųjų dalelių koncentraciją juose. Pakuroje susidarantys pelenai ir šlakas šalinami šlapio tipo transporteriu – į uždarus pelenų šalinimo konteinerius, kartu su sausais pelenais iš baterinio multiciklono. Po multiciklono, dalis degimo produktų (~40%) recirkuliacinio

dūmsiurbio pagalba bus grąžinama atgal į pakurą degimui palaikyti. Likusi degimo produktų dalis nukreipiančiųjų dūmų užsklandų pagalba bus tiekama į dūmsiurbį arba į kondensacinį ekonomaizerį. Jame kondensuojamas, iš katilo išeinančiuose dūmuose esantis vandens garas, susidarantis deginant biokurą. Toks dūmų šilumos išnaudojimas, leidžia 15-30 % padidinti biokuro termofikacinėje elektrinėje pagamintą šilumos kiekį nenaudojant papildomo kuro. Po kondensacinio dūmų ekonomaizerio, žemos temperatūros dūmai šalinami per plieninį kaminą su nerūdijančio plieno įdėklu.



3.1 pav. Esama termofikacinės elektrinės principinė schema

Garo katilo pagamintas aukštų parametrų garas tiekiamas į garo turbiną, kuri per reduktorių sujungta su elektros energijos generatoriumi. Besiplėsdamas garas įsuka turbinos darbo ratą, o sukimo momentas per veleną ir reduktorių perduodamas generatoriui, generuojančiam elektros energiją. Pagaminta elektros energija tiekama į aukštos įtampos skirstomuosius tinklus, o dalis sunaudojama technologinėms reikmėms. Žemų parametrų garas iš po garo turbinos patenka į kondensatorių, kur yra sukondensuojamas. Kondensatoriuje pagaminama šilumos energija tiekama į miesto šilumos tinklus. Sukondensuotas garas cirkuliaciniais siurbliais tiekiamas į du nuosekliai sujungtus deaeratorius. Vandens papildymui naudojamas chemiškai valytas vanduo iš vandens paruošimo sistemos. Iš deaeratorių maitinimo siurbliais vanduo paduodamas į garo katilo būgną, kuriame yra išgarinamas ir vėl ciklas kartojasi iš naujo.

### 3.2 Garo katilas

Katilas XILO STEAM 25,5-62-485 (gamintojas „Boilerworks“, Danija) skirtas perkaitintam garui gaminti. Katilas– vieno būgno, su vertikaliais vandens vamzdžiais ir natūralia

cirkuliacija, su atskirai įrengta ir kietam kurui deginti skirta degimo kamera XILO SAX WOOD, kurioje įrengtas kilnojamas ardynas. Katilo agregatas XILO STEAM gali veikti tokiais režimais:

- garo slėgio už katilo reguliavimas;
- šiluminės galios reguliavimas.

Pagrindiniai projektiniai katilo duomenys pateikti 3.1 lentelėje.

Katilo agregatą sudaro atskirai įrengta degimo kamera ir pats katilas. Degimo kamera yra kylantis dūmtakis. Šoninės ir viršutinė pakuros dalys padengtos ugniai atspariu apdangalu. Apatinėje degimo kameros dalyje išdėstytas kilnojamas ardynas ir šlako šalinimo kanalas. Erdvėje po ardynu, pro keturias sklendes vyksta pirminio oro tiekimas, kuris kilnojamąjį ardyną sąlyginai dalija į keturias degimo zonas. Ant šoninių degimo kameros sienelių išdėstyti antrinio oro tiekimo purkštukai. Virš jų, ant priekinės ir galinės sienelių išdėstyti tretinio oro tiekimo purkštukai. Kuro degimo temperatūrai reguliuoti (mažinti), erdvėje po ardynu ir lakiųjų dujų degimo zonoje įrengti purkštukai, kuriais tiekiami recirkuliuojami dūmai.

3.1 lentelė. Pagrindiniai garo katilo STEAM 25,5-62-485 parametrai

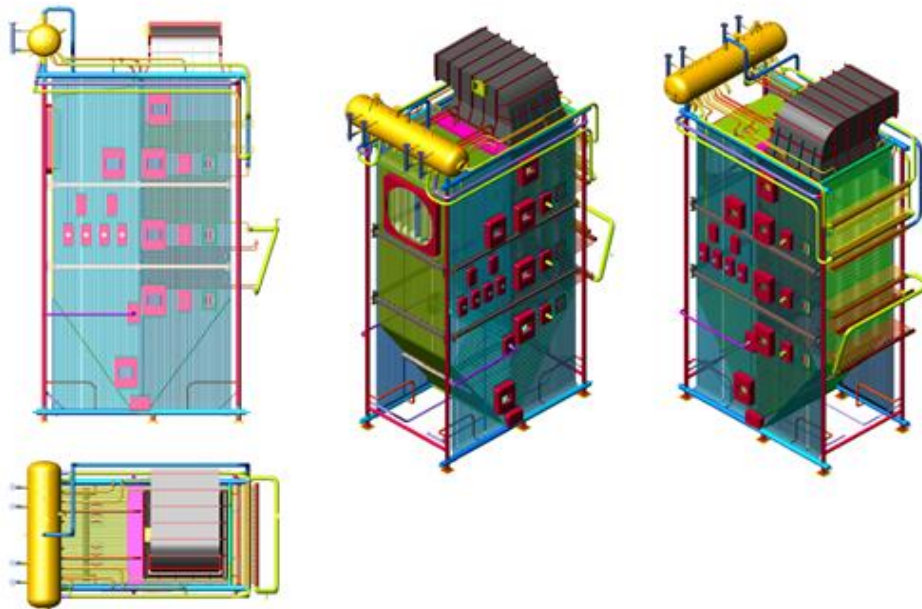
Parametro pavadinimas	Vertė
Galia, MW	14,6
Gaminamo garo kiekis, t/val.	25,5
Perkaitinto garo slėgis, bar a.	62
Perkaitinto garo temperatūra, °C	485
Maitinimo vandens temperatūra, °C	130
Išmetamų dūmų temperatūra, °C	180
Bendras katilo NVK, %	87
Reguliavimo diapazonas, %	30–100

Katilas – pilnai suvirintos konstrukcijos, su vandens vamzdžiais ir savaimine cirkuliacija, stacionariai sumontuotas naudojant nuosavą laikančiąją konstrukciją, katilo nuleidžiamieji vamzdžiai yra jo laikančiosios konstrukcijos dalis.

Katile įrengti trys kontūrai:

- pirmąjį kontūrą sudaro ekranuota šachta ir radiaciniai konvekciniai kaitinamieji paviršiai;
- antrąjį kontūrą sudaro konvekciniai kaitinamieji paviršiai ir garo perkaitintuvas bei II pakopos išgarintuvas;
- trečiąjį kontūrą sudaro I pakopos išgarintuvas ir vandens ekonomizeris, įrengtas atskirai įrengtoje šachtoje (3.2 pav.).





3.2 pav. Garo katilas XILO STEAM 25,5-62-485

Katilas įrengtas kartu su pakura, skirta kietajam kurui (žievei, pjuvenoms, skiedroms, medžio dulkėms), medžio skiedrų ir smulkintų durpių mišiniui, kurio maksimalus santykis yra atitinkamai 70/30, arba medžio skiedrų ir 10 % žemės ūkio atliekų mišiniui deginti.

Garų perkaitinimui naudojami du nuosekliai sujungti perkaitintuvai. Vanduo temperatūros reguliavimui išpurškiamas po pirmojo perkaitintuvo laipsnio. Vanduo imamas iš garo katilų maitinimo slėgiminės linijos. Susidaręs perteklinis garas nuvedamas į maitinimo vandens deaeratorių, o vanduo į naujai projektuojamą aušinimo šulinį. Siurbliai du po 100% našumo kiekvienas su dažnio keitikliais. Parinkti maitinimo vandens siurbliai įvertinant vandens nuostolius dėl katilo prapūtimų, taip pat vandens kiekis reikalingas garo aušinimui tiek katilo perkaitintuve, tiek slėgio redukavimo įrenginyje. Prieš patenkant į katilą maitinimo vanduo papildomai pašildomas ekonomizaizeryje.

### 3.3 Garo sistema ir turbina su kondensatoriumi

Garas po garo katilo perkaitintuvo tiekiamas tiesiai į garo turbiną. Vamzdynas parenkamas taip, kad slėgio nuostoliai nuo katilo iki turbinos įėjimo neviršytų 1 bar. Katile pagaminto garo apskaitai projektuojamas garo kiekio ir šilumos skaitiklis.

Į turbiną tiekiamo garo parametrai:

Garų kiekis – 24,5 t/h;

Garų slėgis – 60 bar(a);

Garų temperatūra – 480 °C.

Maksimalus garo turbinos generatoriuje pagaminamos elektros energijos kiekis esant 24,5 t/h garo srautui – 5100 kW. Kondensatoriuje gauta šiluminė galia  $K_d = 14,6$  MW. Generatoriuje gaminama 10,6 kV įtampos elektros srovė. Aukščiau turbinos (prieš srovę) įrengtas garotiekis turi

avarinį uždarymo (atkirtimo) vožtuvą, slėgio reguliavimo vožtuvą ir garo filtrą. Turbinos avarinis uždarymo vožtuvas pritaikytas biomase kūrenamo katilo garo išleidimo slėgiui. Slėgio reguliavimo vožtuvas palaiko pastovų garo slėgį į turbiną. Turbina su kondensatoriumi palaiko užduotą termofikacinio vandens temperatūrą. Prieš garo turbiną įrengta garo vamzdžio prašildymo linija neleidžianti kondensato lašeliams pateikti į turbiną. Ant pagrindinio garo vamzdžio suprojektuota atjungiamoji armatūra leidžianti atlikti turbinos aptarnavimą TE dirbant per turbinos apvedimo liniją.

Garo turbinos alyvos sistemą sudaro tepimo alyvos sistema ir hidraulinė alyvos sistema. Tiek tepimo, tiek valdymo sistemos su savo atskirais darbiniais ir rezerviniais cirkuliaciniais siurbliais. Turbinos generatorius bus aušinamas vandeniu. Generatoriaus aušinimo sistema bendra kartu su tepalo aušinimo sistema.

Išleidžiamas kondensatas nuvedamas į kondensato baką. Kartu su turbina komplektuojami vakuumo siurbliai nesikondensuojančiom dujoms iš turbinos kondensatoriaus ir garo/vandens šilumokaičio išsiurbti. Prapūtimo garas nuvedamas į lauką. Iš turbinos išeinančio atidirbusio garo sukondensavimui įrengtas vakuuminis žemo slėgio kondensatorius. Kondensavimui naudojamas termofikacinis vanduo. Kondensatoriaus garo pusė parinkta maksimaliam susidarančiam vakuumui ir pertekliniam slėgiui. Termofikacinės pusės maksimalus darbinis slėgis - nemažiau 16 bar, maksimali darbinė temperatūra - nemažiau kaip 115°C.

Turbinos kondensatorius suprojektuotas su 10 procentų atsarga. Numatomas maksimalus temperatūrų skirtumas tarp turbinos garo kondensacijos temperatūros ir išeinančio termofikato temperatūros - 3 °C. Turbinos kondensatoriai parinkti taip, kad jame būtų galima sukondensuoti visą garo katilė pagaminamo garo kiekį dirbant per garo turbinos apėjimo liniją.

Numatoma, kad šaltuoju metu laikotarpiu kai termofikacinio vandens temperatūros bus nepakankamos reikiamam vakuumui po kondensatoriaus sudaryti dalis garo per tarpinio nuėmimo liniją nuvedama į garo vandens šilumokaitį. Šilumokaitis jungiamas nuosekliai turbinos kondensatoriui pagal termofikacinio vandens srautą. Dirbant tokiu režimu turbinos kondensatoriuje termofikacinis vanduo pašildomas iki 87-90 °C temperatūros. Jei reikia, papildomai vanduo šildomas garo/vandens šilumokaityje. Garo/vandens šilumokaičio termofikacinės pusės maksimalus darbinis slėgis - nemažiau 16 bar, maksimali darbinė temperatūra - nemažiau kaip 115 °C. Garo aušinimui naudojamas garo katilo maitinimo vanduo po maitinimo vandens siurblių. Kondensatas iš kondensatoriaus ir galo šilumokaičio nuvedamas į tarpinį kondensato baką iš kurio siurbliais tiekiamas į deaeratorių.

### **3.4 Kondensacinis dūmų ekonomizeris**

Dūmų kondensacinis ekonomizeris – įrenginys, skirtas iš pakuros per garo katilą išeinančių dūmų šilumos utilizavimui ir dūmų valymui. Dūmuose kondensuojasi drėgmė dūmų temperatūrai sumažėjus žemiau rasos taško ir panaudojus slaptąjį garavimo šilumą.

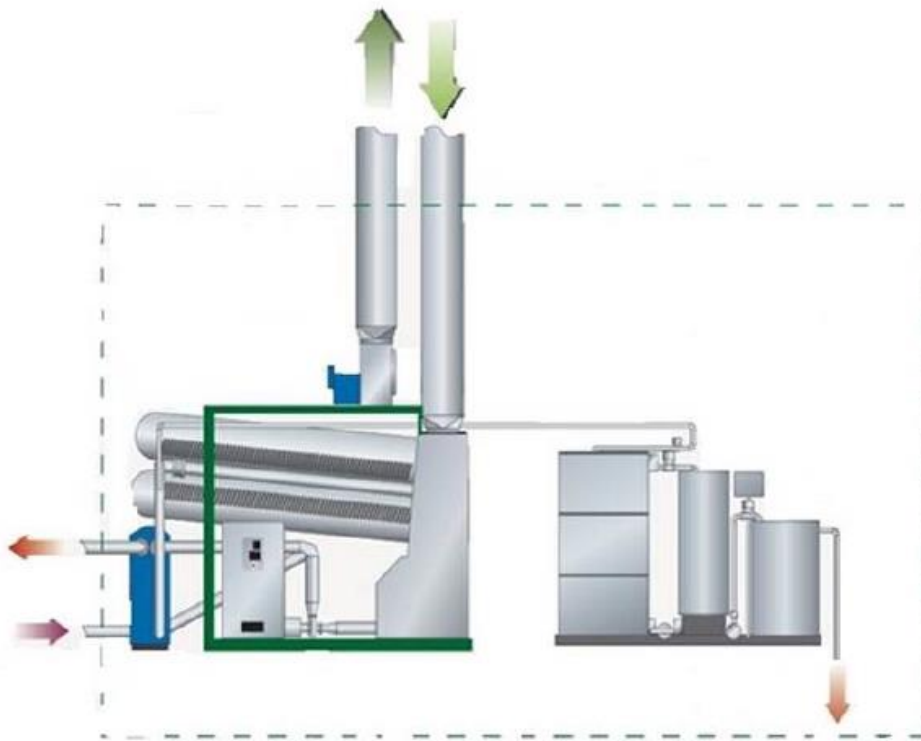
Kondensacinio ekonomaizerio šiluminis galingumas priklauso nuo parametų pateiktų žemiau 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Dūmų kondensacinio ekonomaizerio šiluminis galingumas

Žymėjimas	Pavadinimas	Parametras
$Q_{DKE}$	DKE šilumos gamybos galia	6,3 MW*
* - DKE šilumos gamybos galia 6,3MW yra pateikta esant žemiau nurodytoms sąlygoms		
W	Kuro drėgnumas	55%
$t_{gr}$	Grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra	43°C
$Q_K$	Katilo šilumos gamybos galia	14,6 MW
$t_d$	Dūmų temperatūra prieš DKE	180°C

Kondensacinio ekonomaizerio pagalba, priklausomai nuo sąlygų derinio, galima nesudeginant papildomo kuro kiekio, gauti 15-30% katilų (visos sistemos) galios padidėjimą. Kondensacinis ekonomaizeris su pagalbiniais įrengimais statomas išnaudoti biokuro katilo, dirbančio su medienos kuro deginimo pakura, dūmų šilumą.

Biokuro katilo nominalus galingumas, kuriam projektuojamas ekonomaizeris, yra 14,6 MW. Už katilo dūmsiurbio išmetami dūmai paduodami į kondensacinį ekonomaizerį, kuriame yra ataušinami termofikaciniu vandeniu. Už ekonomaizerio, ataušę dūmai išmetami į atmosferą per dūmtraukį (3.3 pav.). Dūmų srautų valdymui numatytos dvi užsklandos su pneumatinėmis pavaromis. Termofikacinis vanduo yra aušinamas paduodant priešinį srautą termofikacinio vandens iš grąžinamo termofikacinio vandens magistralės. Dūmų ataušimo sąskaita 4-10°C pašilęs termofikacinis vanduo už ekonomaizerio grąžinamas į tą pačią grįžtančio vandens magistralę prieš turbinos kondensatorių.



3.3 pav. Kondensacinis ekonomizaizeris ir kondensato valymo sistema

### 3.5 Šilumos nuvedimas į šilumos tiekimo sistemą

Į šilumos tiekimo tinklus atiduodamo šilumnešio parametrai turi būti reguliuojami pagal AB „Kauno energija“ išduotas prisijungimo sąlygas.

- Projektinis slėgis šilumos tiekimo sistemoje 16 bar
- Projektinė temperatūra šilumos tiekimo sistemoje 120 °C.

Maitinimo vanduo iš deaeratoriaus bakų į katilo ekonomizaizerį tiekiamas maitinimo siurbliu, kuriam įrengtos reguliuojamos pavaros. Katile susidarantis 62 barų slėgio ir 485 °C temperatūros garas aukšto slėgio garo vamzdynu nukreipiamas į garo turbiną. Atidirbęs garas iš turbinos išmetimo nukreipiamas į kondensatorių, kuriame pagal dviejų kontūrų schemą pašildomas termofikacinis vanduo. Garo turbinos kondensatoriaus projektinė šiluminė apkrova yra 14,6-15-85 MW.

Turbinos avarinio stabdymo atveju ir paleidimo režimais schemoje numatyta naudoti 62/0,4 bar(a) greitojo paleidimo redukcinio aušinimo įrenginį, skirtus garui iš katilo nuleisti į turbinos kondensatorių.

TE pagamintos šilumos tiekimas miesto tinklams vyksta pašildant termofikacinį vandenį termofikacinio vandens šildytuvuose, kurie šilumą gauna uždaru kontūru iš turbinos kondensatoriaus. Pirminis grįžtančiojo termofikacinio vandens pašildymas sistemoje atliekamas kondensaciniu ekonomizaizeriu. Šildymo sezono metu visas grįžtantis termofikacinis vanduo tiekiamas į TE tinklo siurblius, pašildomas kondensaciniame ekonomizaizeryje ir termofikacinio vandens šildytuvų sistemoje, šilumą tiekiant iš garo turbinos kondensatoriaus.

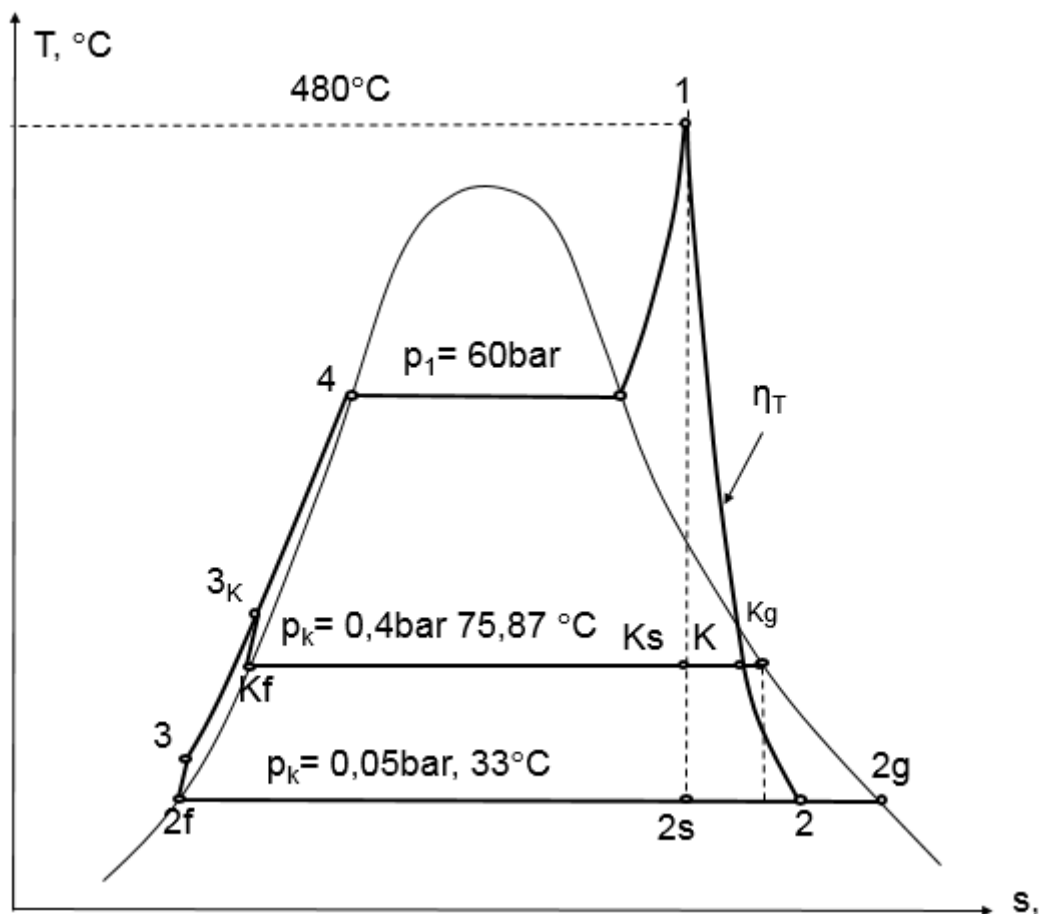
## 4. TERMODINAMINĖ, ENERGETINĖ IR EKONOMINĖ KOGENERACINĖS ELEKTRINĖS ANALIZĖ

### 4.1. Termodinaminė analizė

Termodinaminės analizės metu apskaičiuojami kondensacinio ir kogeneracinio ciklo elektros generavimo efektyvumo parametrai. 4.1 lentelėje pateikti esami kogeneracinės jėgainės termodinaminiai parametrai.

4.1 lentelė. Nagrinėjamos kogeneracinės elektrinės parametrai

Pagrindiniai elektrinės duomenys		
Perkaitinto garo temperatūra	°C	480
Garų srautas į turbiną, $G_g$	t/h	24,5
Perkaitinto garo slėgis, $p_1$	bar	60
Jėgainės elektrinė galia, $W_e$	MW	5,1
Kogeneracinio garo slėgis, $p_k$	bar	0,4
Kondensacijos slėgis, $p_2$	bar	0,05
Turbinos vandens siurblio n.v.k. $\eta_s$		0,7



4.1 pav. Garo ciklo kogeneracinio režimo T-s diagrama

Naudodami *CoolPack* programą randame kogeneracinės biokuro jėgainės termodinaminis ciklo parametrus dirbant kogeneraciniu režimu ir juos suvedame į 4.2 lentelę.

4.2 lentelė. Termodinaminio ciklo parametrai dirbant kogeneraciniu ir kondensaciniu režimais

Terpė	Temperatūra, °C	Slėgis, bar	Entalpija, kJ/kg	Entropija, J/kg·K
Perkaitintas garas	480	60	$h_1 = 3374$	$s_1, s_{ks} = 6817$
Kondensatas	75,87	0,4	$h_{kf} = 317$	$s_{kf} = 1029$
Atidirbęs garas	75,87	0,4	$h_{kg} = 2636$	$s_{kg} = 7670$
Aušinantis vanduo	33 °C	0,05	$h_{2f} = 138$	$s_{2f} = 476$
Aplinka	33 °C	0,05	$h_{2g} = 2561$	$s_{2g} = 8392$

Kiti termodinaminio ciklo parametrai apskaičiuojami pagal 4.1 – 4.5 formules, o rezultatai pateikiami 4.3 lentelėje.

Apskaičiuojama garo entalpija  $h_{2s}$  :

$$h_{2s} = h_{2f} + (h_{2g} - h_{2f}) \frac{s_{2s} - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} ; \quad (4.1)$$

Iš balanso lygties randamos garo entalpijos  $h_2$  ir  $h_3$  po turbinos:

$$h_2 = h_1 - (h_1 - h_{2s})\eta_{iz} ; \quad (4.2)$$

$$h_3 = h_{2f} + v_{2f} \cdot \Delta p ; \quad (4.3)$$

$h_3$  entalpija įvertinus siurblių efektyvumą:

$$h_3 = h_{2f} + v_{2f} \cdot \frac{\Delta p}{\eta_s} ; \quad (4.4)$$

Kondensacinio ciklo termodinaminis efektyvumo koeficientas:

$$\eta_{kd} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2f})}{h_1 - h_3} ; \quad (4.5)$$

4.3 lentelė. Apskaičiuoti termodinaminio ciklo parametrai dirbant kondensaciniu režimu

Skaičiuotas parametras	Mato vnt.	Rezultatas
Entalpija $h_{2s}$	kJ/kg	2142
Entalpija $h_2$	kJ/kg	2388
Entalpija $h_3$	kJ/kg	186
Entalpija $h_3$ įvertinus $\eta_s$	kJ/kg	189
Kondensacinio ciklo efektyvumas $\eta_{kd}$ neįvertinus $\eta_s$	–	0,3074
Kondensacinio ciklo efektyvumas $\eta_{kd}$ įvertinus $\eta_s$	–	0,3068

Kogeneracinio ciklo parametrai apskaičiuojami analogiškai prieš tai skaičiuotam režimui pagal 4.6 – 4.9 formulės, o rezultatai pateikiami 4.5 lentelėje.

Apskaičiuojama garo entalpija  $h_{ks}$ :

$$h_{ks} = h_{kf} + (h_{kg} - h_{kf}) \frac{s_{kg} - s_{kf}}{s_{kg} - s_{kf}} ; \quad (4.6)$$

Iš balanso lygties randamos garo entalpijos  $h_k$  ir  $h_{3k}$  po turbinos:

$$h_k = h_1 - (h_1 - h_{ks})\eta_{iz} ; \quad (4.7)$$

$$h_{3k} = h_{kf} + v_{kf} \cdot \frac{\Delta p}{\eta_s} ; \quad (4.8)$$

Kogeneracinio ciklo termodinaminis efektyvumo koeficientas:

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_k) - (h_{3k} - h_{kf})}{h_1 - h_{3k}} ; \quad (4.9)$$

4.4 lentelė. Apskaičiuoti termodinaminio ciklo parametrai dirbant kogeneraciniu režimu

Skaičiuotas parametras	Mato vnt.	Rezultatas
Entalpija $h_{ks}$	kJ/kg	2338
Entalpija $h_k$	kJ/kg	2546
Entalpija $h_{3k}$	kJ/kg	328
Kogeneracinio ciklo efektyvumo koeficientas, $\eta_{tk}$	–	0,2692

Atlikę termodinaminę analizę kogeneracinei elektrinei, matome, jog termodinaminis ciklo efektyvumas dirbant kondensaciniu režimu yra didesnis, tačiau bendras efektyvumas būtų mažesnis, nes kondensaciniu režimu šiluma yra tiesiog išmetama į aplinką. Kogeneraciniu režimu dirbant šiluma yra tiekama į ČŠT sistemą.

## 4.2 Energetinė jėgainės analizė

Energetinė analizė atliekama siekiant paskaičiuoti elektros ir šilumos apimtis bei suvartojamą energiją. Priimama, kad jėgainės šiluminis galingumas susideda iš šilumos gautos kondensatoriuje ir šilumos gautos kondensaciniame ekonomaizeryje sumos. Analizei reikia žinoti jėgainės šilumos taip pat ir elektros nuostolius bei jos poreikį pačiai jėgainei. Analizuojamos jėgainės nuostoliai susidaro:

1. Deginant biokurą (šiluminiai nuostoliai). Nuostoliai atsiranda dėl nevisiško sudegimo, šalinamų pelenų, šiluminių nuostolių (degimo kameros). Visi šie nuostoliai sudaro 1-3%. Priimama, kad 2% sudaro degimo nuostolius.
2. Mechaniniai nuostoliai (konversijos nuostoliai). Šie nuostoliai atsiranda turbinos, rekuperatoriaus ir generatoriaus guoliuose. Nuostoliai sudaro ne daugiau nei 5 %.

3. Elektriniai nuostoliai (konversijos nuostoliai). Nuostoliai apvijose, magnetiniai nuostoliai statoriuje, sinchronizavimo nuostoliai. Nuostoliai sudaro apie 5 %.
4. Kiti nuostoliai susiję su ciklo šiluminiais nuostoliais, kai dirbama kogeneraciniu ciklu. Savoms reikmėms sunaudojama 10 % pagamintos elektros energijos.

Apskaičiuojame sugeneruotą elektros energiją generatoriaus apvijose:

$$Q_e = \frac{G_g \cdot (h_1 - h_{kg}) \cdot 1000}{3600} \cdot 1000, MW; \quad (4.10)$$

Apskaičiuojame ciklo mechaninio darbo galią nepaisant mechaninių ir elektrinių nuostolių:

$$M = Q_e \cdot 1,05 \cdot 1,05, MW; \quad (4.11)$$

Elektros sąnaudos savoms reikmėms:

$$Q_{SR} = Q_e \cdot 0,1, MW; \quad (4.12)$$

Elektros kiekis pardavimui:

$$Q_P = Q_e - Q_{SR}, MW; \quad (4.13)$$

Viršutinės šilumos vertės galia randama taip:

$$VŠV = \frac{M + Q_{\dot{s}}}{\eta_K \cdot \eta_D}, MW; \quad (4.14)$$

Čia:  $\eta_D$  – nuostolių dėl degimo koeficientas, kurį priimame 2%, tai  $\eta_D = 0,98$ ;

$\eta_K$  – šilumos nuostolių per kaminą koeficientas. Jį randame iš 4.3 pav. Esant 50 % drėgnumo medienai, išeinančių iš ekonomizerio 43 °C dūmų temperatūrai papildomai atgauname 26 % arba 0,26 šilumos nuo viršutinės šiluminės vertės, kai tuo tarpu iš viso galėtume atgauti 33 %. Tai reiškia, kad nuostoliai per kaminą sudaro 0,07 taigi,  $\eta_K = 0,93$ .

Šilumos galia  $Q_{\dot{s}}$  (20,9 MW) susideda:

$$Q_{\dot{s}} = Kd + KE; \quad (4.15)$$

čia:  $Kd$  – turbinos kondensatoriuje gauta šiluma, MW. Žinome, jog  $Kd = 14,6$  MW;

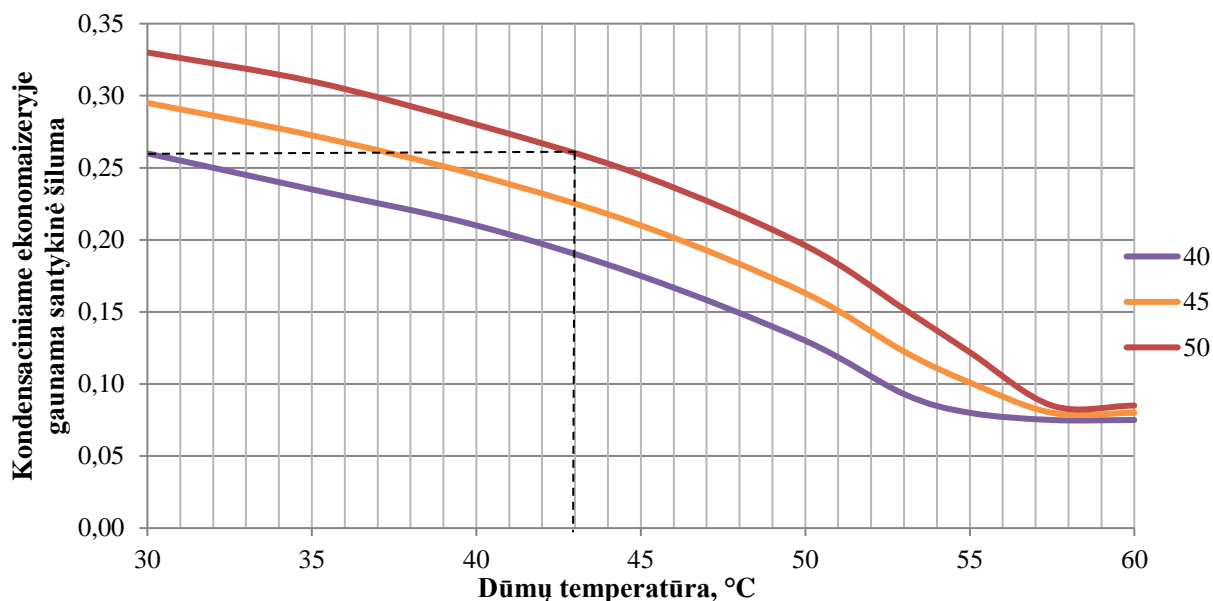
$KE$  – kondensaciniame ekonomizeryje gaunama šiluma, MW.  $KE$  šilumos gamybos galia 6,3MW, esant 50% kuro drėgmei ir 43°C grįžtamo termofikacinio vandens temperatūrai.

Pagal literatūrą [18], šilumos gaunamos iš išeinančių katilo dūmų priklausomybė nuo dūmų ataušimo temperatūros ir kuro drėgmės pateikiama 4.5 lentelėje ir 4.2 pav.



4.5 lentelė. Šilumos, gaunamos iš dūmų, priklausomybė nuo dūmų ataušimo temperatūros ir kuro drėgmės

Kuro drėgmė	Dūmų temperatūra						
	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
40%	0,26	0,235	0,21	0,175	0,13	0,08	0,075
45%	0,30	0,273	0,25	0,21	0,16	0,10	0,08
50%	0,33	0,31	0,28	0,245	0,196	0,122	0,085



4.2 pav. Kondensaciniame ekonomizaizeryje galimos gauti santykinės šilumos priklausomybė nuo dūmų temperatūros

Šilumos gamybos kogeneracinėje elektrinėje efektyvumo koeficientas:

$$\eta_s = \frac{Q_s}{Q_k + Q_{sr}}; \quad (4.14)$$

Elektros gamybos kogeneracinėje elektrinėje efektyvumo koeficientas:

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_k + W_{sr}}; \quad (4.15)$$

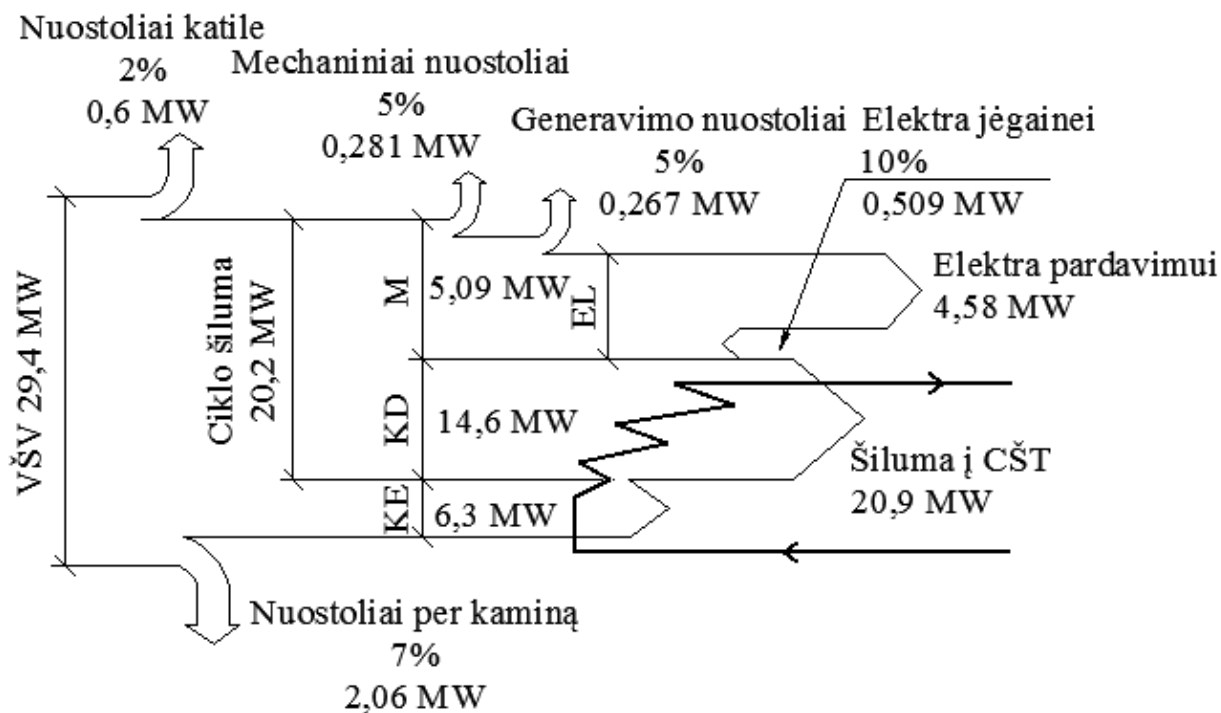
Tuomet bendras kogeneracinės elektrinės efektyvumo koeficientas:

$$\eta_\Sigma = \eta_s + \eta_e ; \quad (4.16)$$

Skaiciavimo rezultatai pateikti 4. 6 lentelėje. 4.3 pav. pagal gautus duomenis sudaromas kogeneracinės elektrinės energetinis balansas.

#### 4.6 Energetinės analizės metu gauti dydžiai

Parametras	Rezultatas
Jėgainės šiluminė galia pagal VŠV, $Q_k$	29,4 MW
Ekonomaizeryje gaunama šilumos galia, KE	6,3 MW
Kogeneracinio ciklo šilumos galia kondensatoriuje, Kd	14,6 MW
Ciklo mechaninio darbo galia, M	5,61 MW
Mechaninio darbo nuostoliai (5%), $W_M$	0,281 MW
Konversijos į elektrą nuostoliai (5%), $W_G$	0,267 MW
Sugeneruota elektrinė galia, $Q_e$	5,09 MW
Elektros galia jėgainės reikmėms (10%), $W_{SR}$	0,509 MW
Elektros galia į tinklus (pardavimui), $W_P$	4,58 MW
Šilumos nuostoliai į aplinką per kaminą (7%)	2,06 MW
Šilumos nuostoliai degimo kameroje (2%)	0,6 MW
Šiluminis efektyvumo koeficientas, $\eta_s$	0,669
Elektrinis efektyvumo koeficientas, $\eta_e$	0,170
Bendras efektyvumo koeficientas, $\eta_\Sigma$	0,839



4.3 pav. Biokuro kogeneracinės jėgainės energetinis balansas dirbant nominaliu apkrovimu

4.7 lentelėje sudaroma biokuro kogeneracinės jėgainės energetinė analizė priklausomai nuo katilo apkrovimo (30 – 100%).

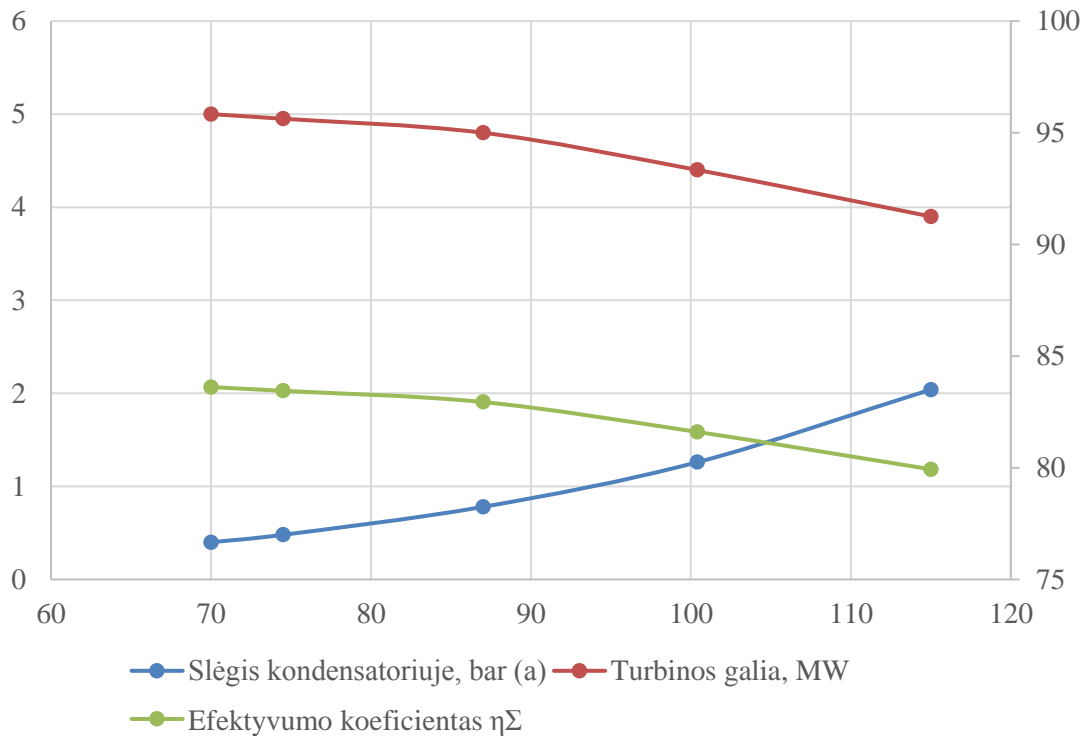
4.7 lentelė. Biokuro kogeneracinės jėgainės energetinės analizės dydžiai priklausomai nuo katilo apkrovimo

Katilo apkrovimas, %	Garų srautas, t/h	Šiluminė galia kondensatoriuje, MW	Šiluminė galia DKE, MW	Bendra šiluminė galia, MW	Elektrinė galia, MWe
30	7,7	4,4	1,9	6,3	1,4
40	10,2	5,9	2,5	8,4	1,9
50	12,8	7,3	3,2	10,5	2,5
60	15,3	8,8	3,8	12,6	3,0
70	17,9	10,2	4,4	14,6	3,5
80	20,4	11,7	5	16,7	4,0
90	23,0	13,1	5,7	18,8	4,6
100	25,5	14,6	6,3	20,9	5,1

Kaip elektros generavimą įtakoja paduodamo į CŠT vandens temperatūra atvaizduojama 4.6 pav. ir pateikiama 4.8 lentelėje. Iš katilo režiminių kortelių matome, jog vienas pagrindinių faktorių, lemiančių didesnę elektrinę galią yra garo slėgis kondensatoriuje. Šiam slėgiui įtakos turi aušinamo vandens temperatūra, todėl norint sugeneruoti kuo didesnę kiekį elektros energijos, aušinamo vandens temperatūra turi būti kuo žemesnė.

4.8 lentelė. Biokuro kogeneracinės jėgainės generuojama elektrinė galia padidinus vandens temperatūrą nuo 70 iki 115 °C

Katilo našumas, MW	Grįžtamo termofikacinio vandens temperatūra, °C	Paduodamo termofikacinio vandens temperatūra, °C	Slėgis kondensatoriuje, bar (a)	Turbinos galia, MW
20	43	70	0,4	5
20	43,3	74,5	0,48	4,95
20	44,8	87	0,78	4,8
20	46,4	100,4	1,26	4,4
20	49,4	115	2,04	3,9



4.4 pav. Biokuro kogeneracinės jėgainės generuojamos elektrinės galios priklausomybė nuo paduodamos termofikacinio vandens temperatūros

### 4.3 Kogeneracinės jėgainės ekonominė analizė

Jėgainės pajamas sudaro šilumos ir elektros pardavimas, o išlaidas: kapitalo grąžos kaštai, išlaidos kurui ir gamybos išlaidos savoms reikmėms. Pagal literatūrą [13] jėgainės 1 kW elektrinės galios kapitalo kaštai ~4000 €. Visos jėgainės kaina yra:

$$A = 5000 \cdot 4000 = 20 \text{ mln. } \text{€};$$

Ekonominės analizės metu kapitalo grąžos suma skaičiuojama dviem būdais: statant kogeneracinę elektrinę iš savų lėšų arba skolinantis statyboms reikalingą sumą iš kreditorių.

Pagrindinė išlaidų dalis – kapitalo grąža, kuri priklauso nuo paskolos dydžio, paskolos grąžinimo trukmės ir palūkanų normos. Šiuo atveju jėgainės pelningumas (rentabilumo koeficientas) bus neaukštas, nes rinka nustato šilumos ir elektros kainas. Tačiau kogeneracinė jėgainė yra naujai pastatyta, todėl efektyvesnė. Tokiu atveju, atsipirkimo laikotarpį projektuojame visam jėgainės resursui, kurie būtų apie 20 – 40 metų. Priimkime, kad šis laikotarpis (N) – 25 metai. Tokiu atveju paskolos ir palūkanų sumą daliname į 25 lygias dalis. Tai suma, kurią kasmet metų pabaigoje sumokame kreditoriams.

Vadinasi kasmet  $A_m$  bankui turime gražinti:

$$A_m = \frac{A}{N}, \text{ mln. } \text{€}/\text{metus}; \quad (4.17)$$

$$A_m = \frac{20}{25} = 0,8 \text{ mln. } \text{€}/\text{metus};$$

Priėmus, kad palūkanų norma  $p = 6\%$ , pusę sumos (10 mln. €) skolinamės pirmais metais, kurių pabaigoje sumokame  $6\%$  palūkanų nuo pasiskolintos sumos yra:

$$p_N = 0,5A \cdot p, \text{ mln. €}; \quad (4.19)$$

$$p_{N1} = 10 \cdot 0,06 = 0,6 \text{ mln. €};$$

Antrais metais, skolinantis likusią kapitalo dalį, už palūkanas sumokama nuo visos pasiskolintos sumos:

$$p_{N2} = 20 \cdot 0,06 = 1,2 \text{ mln. €};$$

Viso per statybos laikotarpį (2 metai) sumokama 1,8 mln. € palūkanų, o bendra paskola išauga iki 21,8 mln. €.

Pirmų metų palūkanų ( $p_1$ ) sumokama nuo visos pasiskolintos sumos  $A$  ir paskolos dalį  $A/N$  ( $N - 25$  metai) šis dydis apskaičiuojamas:

$$p_1 = \left[ A - (i - 1) \frac{A}{N} \right] p, \text{ mln. €}; \quad (4.20)$$

Taigi, pirmų metų pabaigoje  $i$  lygu 1, palūkanų reikia sumokėti:

$$p_1 = \left[ 21,8 - (1 - 1) \frac{21,8}{1} \right] \cdot 0,06 = 1,31 \text{ mln. €};$$

Palūkanų suma kinta tiesiškai, todėl vidutinę jų reikšmę padauginus iš viso paskolos laikotarpio gauname visą palūkanų sumą, kuri bus sumokėta:

$$p_{25} = \left[ A - \left( \frac{N + 1}{2} - 1 \right) \frac{A}{N} \right] p \cdot N, \text{ mln. €}; \quad (4.21)$$

$$p_{25} = \left[ 21,8 - \left( \frac{25 + 1}{2} - 1 \right) \frac{21,8}{25} \right] 0,06 \cdot 25 = 17 \text{ mln. €};$$

Tuomet bendra kapitalo grąžos suma:

$$KAP_{\Sigma} = 17 + 21,8 = 38,8 \text{ mln. €}.$$

Kreditoriams per 25 metus reikia sumokėti apie 42,2 mln. €. Suminę kapitalo grąžos vertę padalinus iš viso paskolos laikotarpio gauname metinę kapitalo grąžos sumą:

$$KAP_m = \frac{KAP_{\Sigma}}{N}, \text{ mln. €/metus}; \quad (4.22)$$

$$KAP_m = \frac{38,8}{25} = 1,55 \text{ mln. €/metus}.$$

Pagal literatūrą [13], metiniai gamybos kaštai skaičiuojami 4 % nuo biokuro kogeneracinės elektrinės kainos, šiuo atveju jie sudarys 0,8 mln. €.

### Išlaidos kurui

Dėl didesnio šilumos poreikio (Kauno vidutinis šiluminės energijos poreikis siekia apie 200 – 250 MW [14]) žiemos periodu būdinga aukšta biokuro kaina 12 – 14 €/MWh (4.10 lentelė) [16]. Pereinamuoju laikotarpiu biokuro kainos sumažėja. Pačios žemiausios biokuro kainos yra šiltuoju metų laikotarpiu – 8 €/MWh, tačiau Kauno šilumos poreikis yra tik apie 60 MW, todėl priimama, kad biokuro jėgainė dirbs 50 % savo nominalaus galingumo.

Su kuro tiekėjais atsiskaitoma pagal žemutinę šiluminę vertę. Iš VŠV/ŽŠV santykio (A priedas) pagal medienos drėgnumo priklausomybę randame, kad 55 % drėgnumo kurui ŽŠV sudaro 0,79 nuo VŠV.

$$\text{ŽŠV} = \text{VŠV} \cdot 0,79, MW; \quad (4.23)$$

$$\text{ŽŠV} = 29,4 \cdot 0,79 = 23,23 MW.$$

Galios išnaudojamo koeficientas (GIK) dirbant nominaliu apkrovimu (visą mėnesį). Šildymo sezono metu GIK = 1, nešildymo GIK = 0,5, o šildymo sezono pradžioje ir pabaigoje, priimkime GIK = 0,8.

Išlaidos kurui ( $I_k$ ) per mėn. randamos taip:

$$I_k = \text{Kuro kaina} \times \text{ŽŠV} \times \text{val. sk/mėn} \times \text{GIK}, €; \quad (4.24)$$

Apskaičiuojamos mėnesinės ir bendros metinės išlaidos kurui pagal pateiktas kuro kainas. Gauti rezultatai pateikiami 4.9 lentelėje.

4.9 lentelė. Metinės biokuro kainos ir išlaidos

	Sausis	Vasaris	Kovas	Balandis	Gegužė	Birželis	Liepa	Rugpjūtis	Rugsėjis	Spalis	Lapkritis	Gruodis
Kuro kaina, €/MWh	14,1	13	10,8	9,5	8,6	7,8	8,6	9,5	10,8	12	12,8	13,5
GIK	1	1	1	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	1	1
Išlaidos kurui, tūkst. €	243	217	186	131	74	65	74	82	90	165	214	233
Metinės išlaidos kurui:										$\Sigma I_k = 1,77$ mln. €		

## Pajamos pardavus elektrą ir šilumą

Vidutinė metinė 2016 m. elektros rinkos kaina yra 36,5 €/MWh, o šilumos – 17,12 €/MWh. Tačiau norint atlikti tikslesnius skaičiavimus, imame šilumos ir elektros rinkų kiekvieno mėnesio vidutinę kainą. Pajamos per mėnesį už parduotą šilumos ir elektros energiją apskaičiuojamos pagal 4.25 – 4.26 formules. Gauti rezultatai pateikiami B priede.

$$Pajamos_{el} = \text{Elektros kaina} \times W_p \times val.sk/m\acute{e}n \times GIK, \text{ €}; \quad (4.25)$$

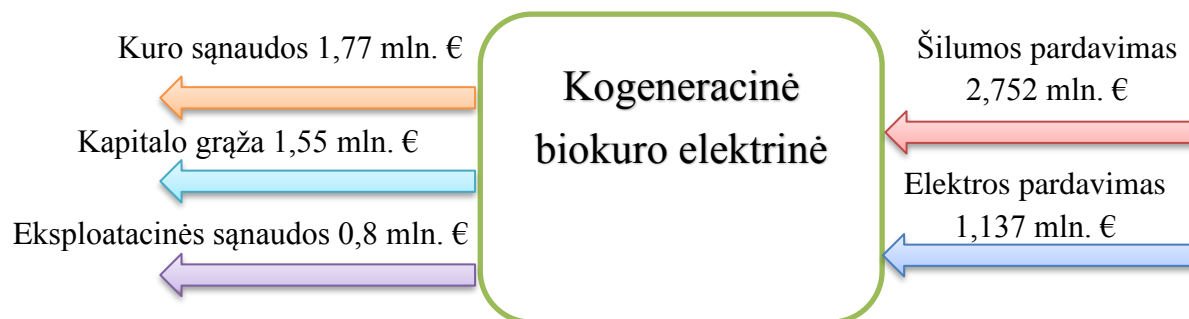
\* Pastaba: analizuojamoje kogeneracinėje elektrinėje visa sugeneruota elektros energija yra proporcinga katilo šiluminiams apkrovimui.

$$Pajamos_{\acute{s}il} = \text{Šilumos kaina} \times Q_s \times val.sk/m\acute{e}n \times GIK, \text{ €}; \quad (4.26)$$

4.10 lentelėje pateikiami apskaičiuoti ekonominės analizės dydžiai. Toliau sudarome metinį ekonominį biokuro kogeneracinės elektrinės pajamų ir išlaidų balansą (4.5 pav.).

4.10 lentelė. Ekonominės analizės metu gauti dydžiai

Ekonominis parametras	Rezultatas
Jėgainės kaina, mln. €	20
Skola prieš darbo pradžią, mln. €	21,8
Palūkanos per 25 metus, mln. €	17
Bendra kapitalo grąžos suma, mln. €	38,8
Kasmetinė suma kapitalo grąžai, mln. €	1,55
Eksploatacinės sąnaudos, mln. €/metus	0,8
Išlaidos kurui, mln. €/metus	1,77
Pajamos pardavus elektrą, mln. €/metus	1,137
Pajamos pardavus šilumą, mln. €/metus	2,752
Pajamų ir išlaidų balansas, mln. €	-0,230



4.5 pav. Metinis pajamų ir išlaidų balansas

Metinis pajamų išlaidų balansas yra neigiamas. Ekonominio efektyvumo rodikliai pagerėtų jeigu elektrai būtų taikomas lengvatinis 57€/MWh elektros supirkimo tarifas. Tačiau jeigu elektra parduodama rinkos sąlygomis, tuomet šiltuoju metų laikotarpiu reikia siekti didesnio galios išnaudojimo koeficiento, kad būtų sugeneruotas kuo didesnis elektros energijos kiekis. Tą pasiekti galima parduodant šiluminę energiją už labai žemą kainą, artimą savikainai arba jeigu nėra didelio šilumos suvartojimo, kogeneracinę jėgainę modernizuoti taip, jog atsirastų galimybė dirbti kondensaciniu arba pusiau kondensaciniu režimu.



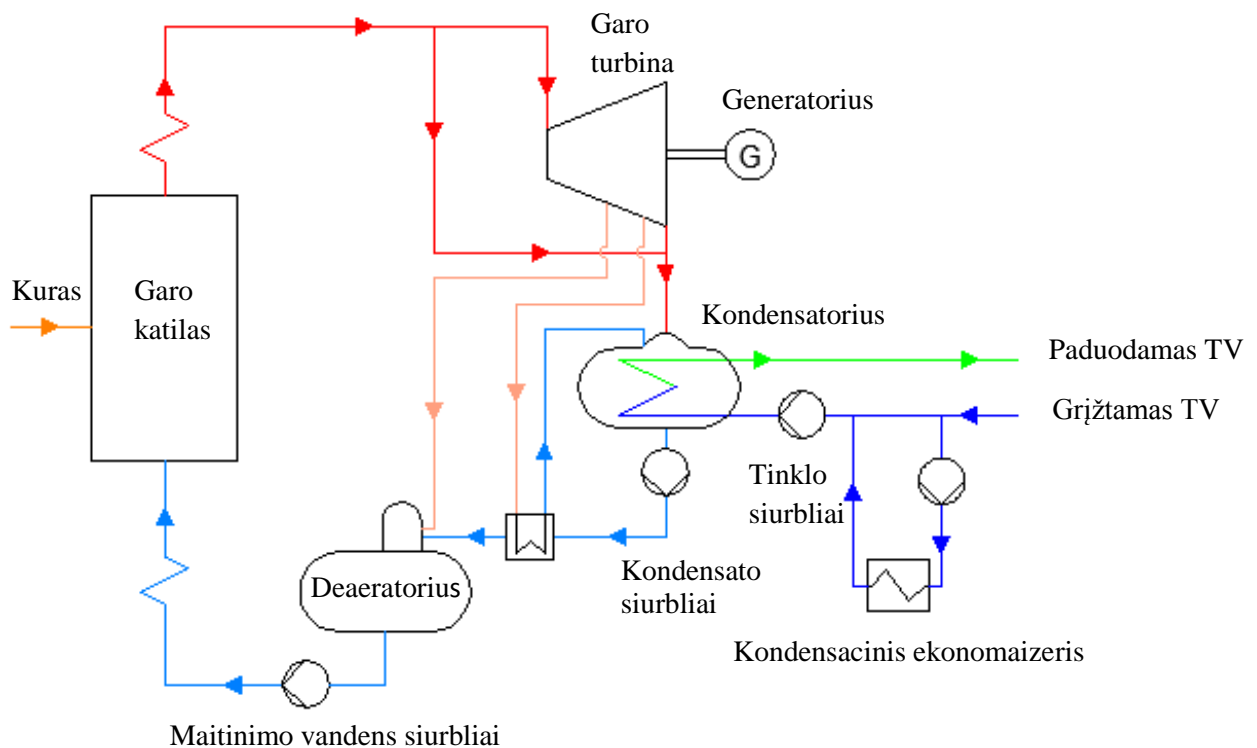
## 5. ESAMOS SISTEMOS OPTIMIZAVIMAS

### 5.1 Principinės schemos optimizavimas eliminuojant skiriamąjį šilumokaitį

5.1 pav. pavaizduota termofikacinės elektrinės principinė schema be skiriamojo šilumokaičio. Maitinimo vanduo iš deaeratoriaus bakų į katilo ekonomaizerį tiekiamas maitinimo siurbliu. Katile susidarantis 62 barų slėgio ir 485 °C temperatūros garas aukšto slėgio garo vamzdynu nukreipiamas į garo turbiną. Atidirbęs garas iš turbinos išmetimo nukreipiamas į kondensatorių, kuriame pašildomas termofikacinis vanduo.

Garų turbina turi 2 tarpinio garo nuėmimo linijas. Viena tarpinio garo nuėmimo linija skirta deaeratoriuose slėgiui palaikyti. Šioje linijoje garo slėgis į šilumokaitį 3,6 bar, o temperatūra 190°C. Kita tarpinio garo nuėmimo linija skirta kondensato į deaeratorių pašildymui. Šioje linijoje garo slėgis į šilumokaitį 1,8 bar, o temperatūra 135°C. Turbinos avarinio stabdymo atveju ir paleidimo režimais schemoje numatyta naudoti 62/0,4 bar(a) greitojo paleidimo redukcinio aušinimo įrenginį, skirtus garui iš katilo nuleisti į turbinos kondensatorių.

TE pagamintos šilumos tiekimas miesto tinklams vyksta pašildant termofikacinį vandenį turbinos kondensatoriuje. Pirminis grįžtančiojo termofikacinio vandens pašildymas sistemoje atliekamas kondensaciniu ekonomaizeriu.



5.1 pav. Termofikacinės elektrinės principinė schema be tarpinio šilumokaičio

Dirbti pagal principinę schemą, kurioje yra vidinio kontūro siurbliai ir tarpinis šilumokaitis nėra tikslinga. Šilumą susidariusią turbinos kondensatoriuje atiduodant per tarpinį šilumokaitį susidaro šilumos nuostoliai. Dirbant per šilumokaitį temperatūrų skirtumas yra 5 °C. Išeliminavus šilumokaitį ir termofikacinį vandenį tiekiant tiesiai į kondensatorių, padidėtų kondensatoriaus

efektyvumas, sumažėtų ir elektros sąnaudos, nes nereikėtų naudoti vidinio kontūro siurblių. Pagal 4 skyriuje naudojamą metodiką skaičiuojamas energetinis efektyvumas kogeneraciniam ciklui dirbant be tarpinio šilumokaičio, o rezultatai palyginami su 4 skyriuje gautais rezultatais ir pateikiami 5.1 lentelėje.

Elektros sąnaudos savoms reikmėms nenaudojant vidinio kontūro siurblių sumažėja, jas randame taip pagal 5.1 – 5.2 formules.

Vandens entalpijų padidėjimas siurbliuose apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta h_s = \frac{\Delta p_s \cdot v_k \cdot 10^{-3} \frac{kJ}{kg}}{\eta_s}; \quad (5.1)$$

čia:  $\Delta p_s$  – siurblio išsvystomas vandens slėgio perkrytis,  $\Delta p_s = 200000$  Pa;

$v_k$  – siurbiamo vandens specifinis tūris,  $m^3/kg$ . Jis randamas iš literatūros [17] laikant, kad priklausomybė nuo slėgio nėra didelė;

$\eta_s$  – siurblio n.v.k. (priimame, kad  $\eta_s = 0,7$ );

$$\Delta h_s = \frac{200000 \cdot 0,0010248 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 0,293 \frac{kJ}{kg};$$

Siurblių elektrinis galingumas randamas taip:

$$W_s = \frac{\Delta h_s \cdot D_s}{\eta_s^{el}}, kW; \quad (5.2)$$

čia:  $D_s$  – vandens srautas pratekantis per siurbli,  $kg/s$ . Priimame, kad  $D_s = 180$   $kg/s$ ;

$\eta_s^{el}$  – siurblio elektrinis n.v.k. (priimame, kad  $\eta_s^{el} = 0,86$ );

$$W_s = \frac{0,298 \cdot 180}{0,86} = 62,4 kW.$$

Priimkime, kad skiriamą šilumokaičio efektyvumas 0,997. Tuomet šiluminė galia padidėja nuo 14,6 MW iki 14,64 MW.

5.1 lentelė. Palyginamoji jėgainės efektyvumo analizė dirbant be skiriamą šilumokaičio

Temperatūra kondensatoriuje	75,87	72,87	°C
Slėgis kondensatoriuje	0,4	0,35	bar a
Šiluminė galia kondensatoriuje, $K_D$	14,6	14,64	MW
DKE galia, KE	6,3	6,3	MW
Elektrinė galia, $W_s$	5,09	5,12	MW
Elektros sąnaudos	0,509	0,446	MW
Šiluminis efektyvumo koeficientas, $\eta_s$	0,669	0,672	
Elektrinis efektyvumo koeficientas, $\eta_e$	0,170	0,173	
Bendras efektyvumo koeficientas, $\eta_\Sigma$	0,839	0,845	

Iš 5.1 lentelės matome skiriamą šilumokaičio įtaką biokuro jėgines efektyvumui. Padidėja ir šiluminio ir elektrinio efektyvumo rodikliai. Bendras efektyvumas padidėja nuo 83,9 iki 84,35 %.

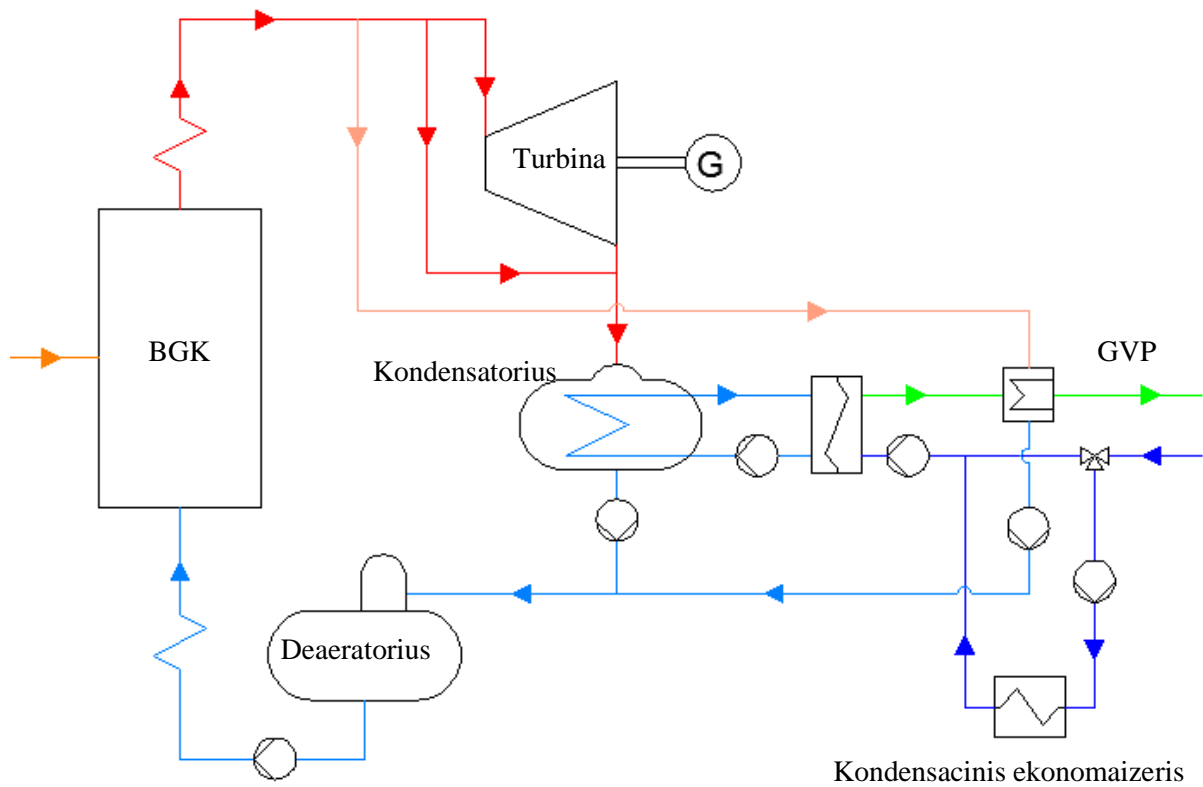
## 5.2 Termofikacinio vandens srauto paskirstymas į DKE ir turbinos kondensatorių

Pirminis grįžtančio termofikacinio vandens pašildymas vyksta dūmų kondensaciniame ekonomizažeryje, ten jis įprastai sušyla nuo 43 iki 51 °C. Jeigu grįžtančio termofikacinio vandens srautą paskirstysime taip, jog dalis termofikacinio vandens teka į DKE, ten pašilęs aštuoniais laipsniais vanduo susimaišo su 43 °C termofikatu, tuomet visas atitinkamos temperatūros termofikacinio vandens srautas per tarpinį šilumokaitį aušina kondensatorių. Toks DKE galios ribojimas duotų didesnę kondensatoriaus efektyvumą. 5.2 lentelėje pateikiami atlikti skaičiavimai, kaip termofikacinio vandens srautas atsilieptų kogeneracinės elektrinės efektyvumui, jeigu elektrinė dirbtų nominaliu galingumu. Esant 70 °C paduodamo termofikacinio vandens temperatūrai ir 20 MW šiluminiam apkrovimui, termofikacinio vandens srautas yra 650 m<sup>3</sup>/val. arba ~180 kg/s.

5.2 lentelė. Termofikacinio vandens srauto paskirstymo įtaka kogeneracinės elektrinės efektyvumui

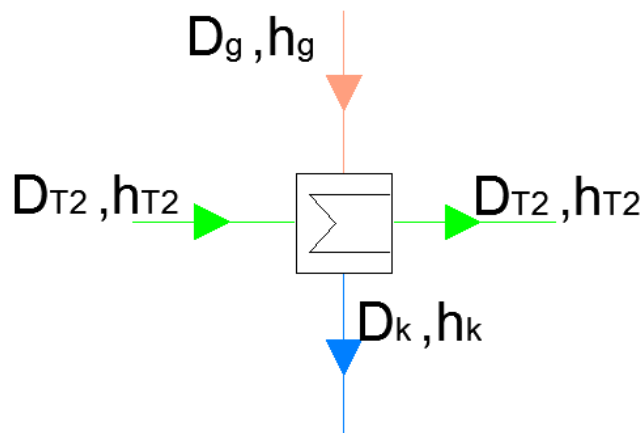
Srautas į DKE, kg/s	Srautas į TŠ, kg/s	TV temperatūra po srautų sumaišymo, °C	t <sub>Kd</sub> , °C	p <sub>Kd</sub> , bar a	Elektrinis efektyvumas, η <sub>e</sub>	Paduodamo vandens temperatūra T <sub>2</sub> , °C
180	0	51	75,9	0,4	0,170	70
150	30	49,67	74,5	0,378	0,171	68,6
120	60	48,3	73,2	0,358	0,171	67,3
90	90	47	71,9	0,338	0,172	66
60	120	45,67	70,5	0,319	0,172	64,6
30	150	44,3	69,2	0,301	0,173	63,3

Kaip matome iš 5.2 lentelės sumažinus termofikacinio vandens srautą į DKE, kondensatoriuje sumažėja temperatūra, o elektrinis efektyvumas nežymiai padidėja. Tačiau išlaikant nekintantį termofikacinio vandens srautą (180 kg/s) sumažėtų paduodamo vandens temperatūra. Norint išlaikyti nekintantį 180 kg/s srautą, o paduodamo TV temperatūrą pakelti iki reikalingos 70°C temperatūros, paduodamo vandens linijoje svarstoma garo vandens pašildytuvo įrengimo galimybė, kurio paskirtis – užtikrinti reikiamą termofikacinio vandens temperatūrą į CŠT.



5.2 pav. Termofikacinės elektrinės principinė schema įdiegus garo vandens pašildytuvą

Garas pašildytuvui paimamas iš garotiekio po katilo perkaitintuvų ir tiekiamas į garo vandens šilumokaitį. Susikondensavęs garas siurblio pagalba grąžinamas į kondensatoriaus – deaeratoriaus kondensato liniją. Norint rasti garo srautą, reikalingą visam termofikatui pašildyti iki 70 °C, garo vandens pašildytuvui sudarome šilumos balanso lygtį:



5.3 pav. Šilumos balansas garo vandens pašildytuvui

$$D_g \cdot (h_g - h_k) = D_{T2} \cdot (h_{T2}^{i\check{s}} - h_{T2}^i) \cdot \eta_p; \quad (5.3)$$

čia:  $D_g$  – garo srautas, kg/s;

$h_g$  – garo entalpija pašildytuvo įėjime, kJ/kg;

$h_k$  – kondensato entalpija pašildytuvo išėjime, kJ/kg;

$D_{T2}$  – termofikacinio vandens srautas, kg/s;

$h_{T2}^{i\check{s}}$  – termofikacinio vandens entalpija pašildytuvo išėjime, kJ/kg;

$h_{T_2}^i$  – termofikacinio vandens entalpija pašildytuvo įėjime, kJ/kg;

$\eta_p$  – šilumokaičio efektyvumo koeficientas,  $\eta_p = 0$ ;

$$D_g = \frac{D_T \cdot (h_{T_2}^{i\check{s}} - h_{T_2}^i) \cdot \eta_p}{(h_g - h_k)} ; \quad (5.4)$$

Priklausomai nuo termofikacinio vandens temperatūros pašildytuvo įėjime, ieškomas garo srauto dydis, kuris užtikrintų termofikato pašildymą, gauti rezultatai suvedami į 5.3 lentelę.

5.3 lentelė. Garo kiekiai reikalingi pašildyti termofikacinį vandenį nuo T2 iki 70 °C

Srautas į DKE, kg/s	T <sub>2</sub> , °C	Elektrinis efektyvumas $\eta_e$	Garų srautas D <sub>g</sub> , kg/s	Garų srautas D <sub>g</sub> , t/h
180	70	0,170	0	0
150	68,6	0,171	0,35	1,25
120	67,3	0,171	0,65	2,33
90	66	0,172	1	3,57
60	64,6	0,172	1,34	4,80
30	63,3	0,173	1,64	5,84

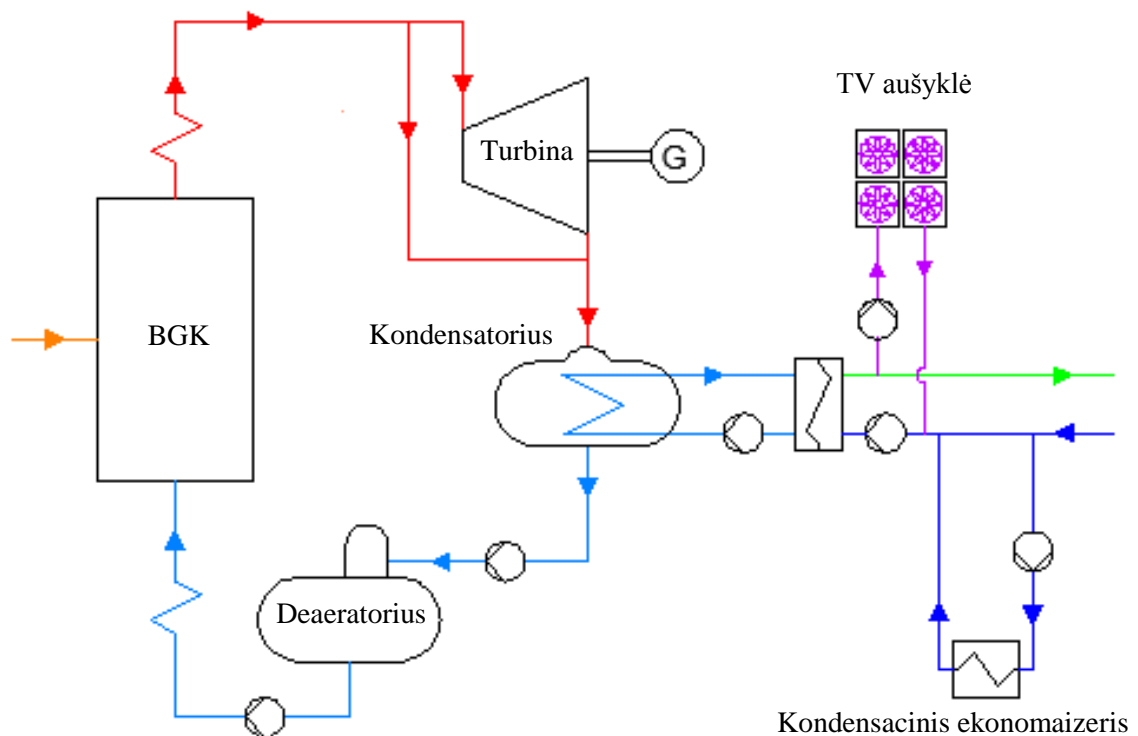
Iš 5.3 lentelės matome, jog norint pakelti elektrinį efektyvumą nuo 0,170 iki 0,173 reikia gana didelio garo srauto termofikatui pašildyti iki reikiamos temperatūros. Pagal gautis duomenis matome, jog įrengti GVŠ ir padidinti katilo galią 20 % įrengiant papildomų kaitinamųjų paviršių neverta dėl didelės garo katilo rekonstrukcijos kainos arba vietoj GVŠ pastatyti paprastesnės konstrukcijos, pigesnį vandens šildymo katilą, kurio paskirtis būtų pakelti termofikacinio vandens temperatūrą iki reikiamos, pagal Kauno energijos temperatūrinį grafiką, vertės. Tačiau bet kokių atveju, bendras kogeneracinės jėgainės efektyvumas dirbant kogeneraciniu režimu sumažėtų dėl padidėjusių šilumos nuostolių per kamina.

### 5.3 Papildomos aušinimo sistemos įrengimas

Kai centralizuoto šilumos poreikis yra sumažėjęs nuo 20 iki 15 MW, o elektros supirkimo kaina Nord Pool biržoje yra išaugusi, siekiant didesnio elektros generavimo, galima nukrauti ne katilą, o termofikacinio vandens srautą į kondensacinį ekonomaizerį. Tačiau kai šiluminis apkrovimas yra mažesnis nei 15 MW, arba jo išvis nėra, galima įdiegti termofikacinio vandens aušinimo sistemą. Taip atsiranda galimybė dirbti kondensaciniu režimu, kurio iki šiol kogeneracinė jėgainė neturėjo.

Pagalbinė aušinimo sistema perkelia šiluminę apkrovą iš jėgainės kondensatoriaus į pagalbinę aušinimo vandens sistemą ir šiltas aušinimo vanduo ataušinamas oru aušinamuose šilumokaičiuose nuo 75 iki 55 °C. Pagalbinio aušinimo sistemos pajėgumas parenkamas nuolatinei stabiliai 100% katilo apkrovai, kai dirbant su garo turbina, susidariusios šilumos kiekis

kondensatoriuje 14,6 MW. Termofikacinio vandens (TV) pagalbinio aušinimo pajėgumas projektuojamas nuolatinei stabiliai 70% katilo apkrovai, 10 MW šiluminės galios prie aplinkos temperatūros +30°C. Oro temperatūrai esant žemesnei, pajėgumas didėja. Elektros rinkos kaina šiuo metu yra žema, todėl dirbti vien tik kondensaciniu režimu būtų nuostolinga. Todėl efektyviau būtų minimaliai šilumą tiekti į miestą, o likusį šilumos kiekį nukreipti į aušinimo sistemą.



5.4 pav. Termofikacinės elektrinės principinė schema įdiegus papildomą aušinimo sistemą

#### **Aušinimo įrenginio aprašymas**

TV pagalbinio aušinimo glikolio/vandens mišinį cirkuliuoja TV pagalbinio aušinimo siurbliai (2 x 100 %) iš antrinės TV pagalbinio aušintuvo pusės (pirminėje pusėje teka termofikacinis vanduo) į TV pagalbinės aušinimo sistemos orinius aušintuvus, kurie pastatyti lauke. Pagalbinio aušinimo vandens sistema yra uždaras ciklas. Pastoviam hidrostatiniam slėgiui palaikyti TV pagalbinio aušinimo vandens siurblių įsiurbimo pusėje sumontuotas plėtimosi bakas. Glikolio vandeniui sistemą galima papildyti papildymo siurbliu ir atidarius uždaromąjį vožtuvą. Jėgainė gali dirbti su garo turbina ir 100% katilo apkrova, kai yra sumažėjęs termofikacinės šilumos vartojimo poreikis iki 15 MW ir mažiau. Tokiu atveju aušintuvas dirba ne pilnu apkrovimu. Esant žemam šilumos poreikiui apeinamas dūmų kondensacinis ekonomizaizeris. Aušinimo įrenginio pagrindiniai techniniai parametrai pateikti 5.4 lentelėje.

5.4 lentelė. Aušyklės AquaForce 30XA techniniai parametrai [19]

Pavadinimas	Duomenys
Aušyklės galia, kW	900
Aušinimo terpė	Vandens ir glikolio mišinys (60/40%)
Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	351500
Kaina €, vnt.	3500
Įrengimo kaina, €	11500
Kaina (viso), €	50000



5.5 pav. Aušinimo įrenginys AquaForce30XA

Norint, kad aušinimo sistema atsipirktų, turi būti aukšta elektros supirkimo kaina, o kuro kaina turėtų būti sąlyginai žema. Didesnį ekonominį efektą duotų lengvatinis elektros supirkimo iš atsinaujinančių energijos išteklių tarifas, kuris yra 57 €/MWh. Parduodant elektrą Nord Pool biržoje, elektros tarifai trumpalaikio piko metu (6 – 8 valandas per parą) beveik nenusileidžia Valstybinės kainų energetikos komisijos nustatytoms kainoms, todėl būtina nuolat sekti rinką, siekiant didesnio pelno iš elektros energijos pardavimo.

Aušinimo sistemos atsipirkimo laikotarpį skaičiuojame, kai katilas apkrautas nominaliu našumu, o į miestą atiduodama 10 MW šiluminės energijos. Priimkime šilumos pardavimo kainą 9 €/MWh, o elektros pardavimo – 36,5 €/MWh. Mėnesio pajamos už šilumą ir elektrą randamos taip:

$$Pajamos_{\Sigma} = (10 \cdot 9 + 36,5 \cdot 4,5) \cdot 24 \cdot 30 = 183000 \text{ €/mėn.}$$

Eksploatacines išlaidas priimkime vienam mėnesiui 50000 €. Vidutinė biokuro kaina vasarą 9 €/MWh, tuomet išlaidos kurui per mėnesį:

$$Išlaidos_{\Sigma} = (9 \cdot 23,23 \cdot 24 \cdot 30) + 40000 = 165500 \text{ €/mėn.}$$

$$Investicijų \text{ graža: } \frac{50000}{(183000 - 165500)} = 7 \text{ mėn.}$$

## IŠVADOS

1. Atlikus teorinę biokurą naudojančių kogeneracinių jėgainių analizę buvo išsiaiškinta, kad kogeneracinėse jėgainėse naudojančiose biokurą, elektrinis efektyvumas gali siekti nuo 10% iki 45% priklausomai nuo elektrinės galios. Bendras energetinis efektyvumas siekia daugiau nei 85 %.
2. Ištyrus elektros rinką nustatyta, kad vidutinė metinė elektros kaina 2016 m. buvo 36,5 €/MWh, tačiau kainos elektros biržoje Balt Pool yra labai nepastovios ir nuolat kinta. Apžvelgus Kauno miesto CŠT rinką nustatyta, jog kogeneracinių jėgainių atėjimas į rinką sumažino šilumos kainą žemiau 10 €/MWh ribos šiltuoju metų laikotarpiu, tačiau šildymo sezono metu, kainos iš esmės nepasikeitė.
3. Atlikus biokuro kogeneracinės elektrinės technologijų apžvalgą, identifikuoti pagrindiniai įrenginių parametrai, technologiniai ypatumai, susipažinta su principine schema ir jos darbo algoritmu.
4. Apskaičiuotas kogeneracinės elektrinės energetinio efektyvumo koeficientas, jis yra 83,9% deginant drėgną 55 % medieną. Elektrinis efektyvumas siekia 17 %. Pagrindiniai faktoriai lemiantys bendrą šilumos ir elektros generavimo efektyvumą yra aukšti garo parametrai (srautas, slėgis, temperatūra) ir žemi temperatūros bei slėgio parametrai turbinos kondensatoriuje. Taip pat kogeneracinės elektrinės efektyvumas priklauso ir nuo dūmų kondensacinio ekonomizerio išnaudojimo faktoriaus. Ekonominės analizės metu nustatyta, jog išlaidų pajamų balansas yra neigiamas, todėl reikia siekti kuo didesnio galios išnaudojimo faktoriaus.
5. Apskaičiuota, jog dirbant be skiriamą šilumokaičio elektrinis efektyvumas pagerėtų nuo 17 % iki 17,3 % bendras kogeneracinės elektrinės efektyvumas pagerėtų nuo 83,9 % iki 84,5%.

Į kondensacinį ekonomizerį tiekiant minimalų termofikacinio vandens srautą, galima pasiekti 0,173 elektrinį efektyvumo koeficientą, tačiau to daryti neapsimoka dėl didelės garo katilo rekonstrukcijos kainos.

Įdiegus termofikacinio vandens aušinimo sistemą atsiranda galimybė kogeneracinei elektrinei dirbti kondensaciniu režimu. Apskaičiuotas investicijų gražos laikotarpis – 7 mėn.

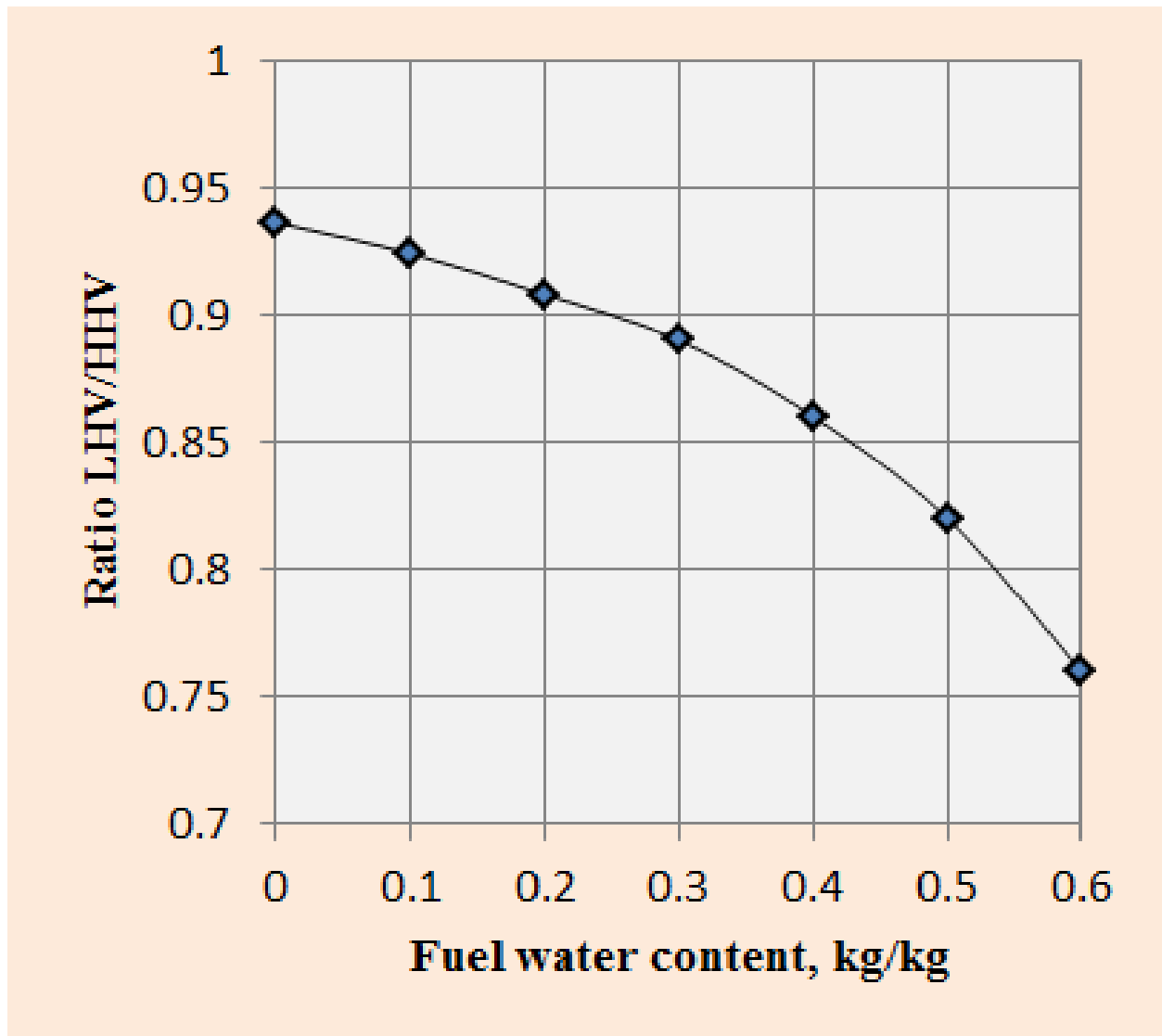


## LITERTATŪROS SĄRAŠAS

1. LR Seimas. Dėl nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos patvirtinimo 2012 m. Birželio 26 d. Nr. XI-2133Vilnius. Prieiga per internetą:  
[http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc\\_l?p\\_id=429490&p\\_query=&p\\_tr2=2](http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=429490&p_query=&p_tr2=2)  
[žiūrėta 2016 m. gegužės 20 d.].
2. FRANGOPOULOS, C. A. EDUCOGEN, The European educational tools on cogeneration. European Commission. Dec, 2001, 17.
3. Danish Energy Authority. Technology data for electricity and heat generation plants. 2005.
4. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA 2012/27/ES 2012 m. spalio 25 d. dėl energijos vartojimo efektyvumo, kuria iš dalies keičiamos direktyvos 2009/125/EB ir 2010/30/ES bei kuria panaikinamos direktyvos 2004/8/EB ir 2006/32/EB. Prieiga per internetą:  
[http://www3.lrs.lt/pls/inter1/dokpaieska.showdoc\\_l?p\\_id=62979](http://www3.lrs.lt/pls/inter1/dokpaieska.showdoc_l?p_id=62979) [žiūrėta 2017 m. balandžio 22 d.].
5. Prieiga per internetą: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/#/nordic/chart> [žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.].
6. Prieiga per internetą: <http://www.litgrid.eu/index.php/elektros-rinka/rinkos-struktura/78>  
[žiūrėta 2016 m. gegužės 22 d.].
7. Prieiga per internetą: <http://www.regula.lt/Puslapiai/naujienos/2015-metai/2015-12/2015-12-30/nuo-2016-metu-mazeja-elektros-energijos-tarifai-buitiniams-vartotojams.aspx> [žiūrėta 2016 m. gegužės 23 d.].
8. Prieiga per internetą: <http://www.litgrid.eu/index.php/energetikos-sistema/elektros-energetikos-sistemas-informacija/irengtoji-galia/502> [žiūrėta 2016 m. gegužės 23 d.].
9. Prieiga per internetą: <http://www.leka.lt/> [žiūrėta 2016 m. gegužės 23 d.].
10. Prieiga per internetą:  
<http://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/nepriklausomi%20silumos%20gamintojai/nepriklausomi-silumos-gamintojai.aspx> [žiūrėta 2016 m. lapkričio 23 d.].
11. Prieiga per internetą: <http://www.regula.lt/atsinaujinantys-istekliai/Puslapiai/tarifai.aspx>  
[žiūrėta 2017 m. sausio 9 d.].
12. Prieiga per internetą: <http://www.kaunoenergija.lt/verslui/nepriklausomiems-silumos-gamintojams/silumos-supirkimas/> [žiūrėta 2017 m. sausio 9 d.].
13. Konstantinos VATOPOULOS, David ANDREWS, Johan CARLSSON, Ioulia PAPAIOANNOU, Ghassan ZUBI. Study on the state of play of energy efficiency of heat and electricity production technologies, 2012.

14. Valdas LUKOŠEVIČIUS. Šilumos supirkimas iš nepriklausomų šilumos gamintojų, studija, 2016.
15. Prieiga per internetą: [www.nordpoolspot.com](http://www.nordpoolspot.com) [žiūrėta 2017 balandžio 18d.]
16. Prieiga per internetą: <http://www.baltpool.lt/lt/> [žiūrėta 2017 kovo 25 d.]
17. G. GIMBUTIS, K. KAJUTIS, V. KRUKONIS, A. PRANCKŪNAS, P. ŠVENČIANAS. Šiluminė technika 1995, Vilnius.
18. Brazdeikis L. Biomasės deginių slaptosios šilumos įvertinimas, 2011. Prieiga per internetą: [http://asu.lt/wp-content/uploads/2015/03/brazdeikis\\_1.pdf](http://asu.lt/wp-content/uploads/2015/03/brazdeikis_1.pdf) [žiūrėta 2017 kovo 25 d.]
19. Prieiga per internetą: <http://www.carrier.com/marine-offshore/en/worldwide/products/chillers/30xa/> [žiūrėta 2017 gegužės 18d.]

**A priedas. Žemutinės ir viršutinės degimo šilumos santykis pagal kuro drėgmę**



**B priedas. Apskaičiuotos pajamos už parduotą šilumą ir elektrą pagamintą kogeneracinėje jėgainėje**

	Sausis	Vasaris	Kovas	Balandis	Gegužė	Birželis	Liepa	Rugpjūtis	Rugsėjis	Spalis	Lapkritis	Gruodis
Šilumos supirkimo kaina, €/MWh	24,6	28,2	27,2	18,1	11	10,5	10,2	9,6	10	14,1	17,4	24,6
Elektros supirkimo kaina, €/MWh	50,32	29,65	30,81	33,03	32,87	40,53	39,23	33,78	34,03	38,47	40,57	34,79
GIK	1	1	1	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	1	1
Pajamos už šilumą, tūkst. €	382,5	396,1	422,9	217,9	85,5	79,0	79,3	74,6	150,5	219,2	261,8	382,5
Pajamos už elektrą, tūkst. €	171,5	101,0	105,0	90,0	56,0	69,1	66,8	57,6	58,0	104,9	138,2	118,5
Metinės pajamos už parduotą šilumą:									$\Sigma P_s = 2,752$ mln. €			
Metinės pajamos už parduotą elektrą:									$\Sigma P_e = 1,137$ mln. €			