



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

Edvinas Bartkevičius

**BIOKURO JĖGAINĖS SU SLAPTOSIOS ŠILUMOS
REGENERACINE SISTEMA ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. Vytautas Dagilis

KAUNAS, 2017

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

**BIOKURO JĖGAINĖS SU SLAPTOSIOS ŠILUMOS
REGENERACINE SISTEMA ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

Termoinžinerija (kodas 621E30001)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Vytautas Dagilis

(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Valdas Lukoševičius

(data)

Projektą atliko

(parašas) Edvinas Bartkevičius

(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Edvinas Bartkevičius

(Studento vardas, pavardė)

Terminžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Biokuro jėgainės su slaptosios šilumos regeneracine sistema analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Edvino Bartkevičiaus**, baigiamasis projektas tema „Biokuro jėgainės su slaptosios šilumos regeneracine sistema 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)

**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) prieštarinę 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: Biokuro jėgainės su slaptosios šilumos regeneracine sistema analizė
.....
Patvirtinta 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-8.....
2. Darbo tikslas: Atlikti biokuro kogeneracinės jėgainės, kurioje po kondensacinio ekonomizerio yra integruotas masės mainų regeneratoriumas, energetinę bei ekonominę analizę.
.....
3. Darbo struktūra: Literatūros apžvalga. Kogeneracija šiuolaikinėje energetikoje. Elektros ir šilumos energijos generavimas biokuro kogeneraciniame jėgainėje. Kogeneracinių biokuro jėgainių palyginamoji analizė. Masės mainų regeneratoriumas žemo potencialo šilumai atgauti. Išvados
.....
.....
4. Reikalavimai ir sąlygos: Darbas turi atitikti baigiamajam magistro projektui keliamus reikalavimus
.....
.....
.....
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 23 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamąjo darbo dalis.
Išduota studentui.....
Užduotį gavau2017-02-02
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)
Vadovas2017-02-02
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)

Bartkevičius, Edvinas. Biokuro jėgainės su slaptosios šilumos regeneracine sistema analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Vytautas Dagilis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *biokuro jėgainė, kogeneracija, slaptoji šiluma, regeneratoriums.*

Kaunas, 2017. 77 p.

SANTRAUKA

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas kogeneracinių biokuro jėgainių efektyvumas ir jį lemiantys veiksniai, įrenginiai gebantys sumažinti šilumos nuostolius atsirandančius dėl kuro specifikos. Biokure esanti vandens dalis dažnai sudaro 50% viso biokuro masės, todėl degimo produktuose esti didelis kiekis vandens garo. Kondensacinis ekonomizeris iš dūmų sugeba pasiimti tik dalį šilumos, likusi žemo potencialo šiluma tiesiog šalinama per kaminą. Susigrąžinta šiluma iš dūmų gali ženkliai pagerinti jėgainės energetinius ir ekonominius rodiklius. Pagrindinis darbo uždavinys išanalizuoti šilumos ir masės mainų regeneratoriaus teikiamą naudą, ją pagrįsti energetiniais ir ekonominiais skaičiavimais. Darbe išsamiai išnagrinėtas biokuro jėgainių termodinaminis efektyvumas ir jo priklausomybės nuo įvairių faktorių. Panaudota programinė įranga, kurios pagalba sukurtas šilumos ir masės mainų regeneratoriaus erdvinis modelis, atlikti stipruminiai skaičiavimai, kurie leido tiksliai įvertinti regeneratoriaus investicinius kaštus. Atlikti energetiniai ir ekonominiai skaičiavimai pagrindė regeneracinės sistemos teikiamą naudą. Analizuojamos jėgainės su regeneracine sistema išlaidos kurui sumažėjo daugiau kaip 15%, šilumos nuostoliai per kaminą sumažėjo apie 15%. Mažos galios biokuro kogeneracinių jėgainių investiciniai kaštai dideli, todėl didžiąją dalį išlaidų sudaro paskolos grąžinimas, dėl ko tokių jėgainių pelnas nėra didelis, o kai kuriais atvejais jėgainės darbas gali būti ir nuostolingas. Regeneracinė sistema gali užtikrinti efektyvų ir pelningą jėgainės darbą be didelių investicijų.

Bartkevičius, Edvinas. *Analysis of Biofuel Plant with Latent Heat Regeneration System*: Master's thesis / supervisor assoc. prof. Vytautas Dagilis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy Engineering

Key words: biofuel plant, cogeneration, latent heat, regenerator.

Kaunas, 2017. 77 p.

SUMMARY

The Master's Final Thesis examines the efficiency of biofuel cogeneration plants and its determining factors, and the equipment capable to reduce the thermal losses arising from the specific features of fuel. The share of water in biofuel often constitutes 50% of total biofuel mass; therefore, a large quantity of water vapour exists in combustion products. The condensing economizer is capable to accept only part of heat from smoke; the remaining low-potential heat is simply removed through the chimney. The heat recovered from smoke may significantly improve energetic and economic indicators of a plant. The main task of the Thesis is to analyze the benefit provided by the heat and mass exchange regenerator, and to justify it by energetic and economic calculations. The Thesis thoroughly examined the thermodynamic efficiency of biofuel cogeneration plants and their dependencies on various factors. With the help of the software, a spatial model of the heat and mass exchange regenerator was developed, and strength calculations were performed, which enabled the accurate estimate of the investment costs of the regenerator. The performed energetic and economic calculations justified the benefit provided by regenerative system. The fuel costs of the analyzed plant with regeneration system decreased to more than 15%, the thermal losses through the chimney decreased to about 15%. The investment costs of the low-capacity biofuel cogeneration plants are high; therefore, a large part of the costs consists of the loan repayment, in consequence of which the profit of such plants is not large; and, in some cases, the work of the plant may also be loss-making. The regenerative system may ensure the efficient and profitable work of the plant without large investments.

TURINYS

ĮVADAS	13
1. KOGENERACIJA ŠIUOLAIKINĖJE ENERGETIKOJE	15
1.1 Kogeneracinių jėgainių tipai ir parametrai	16
1.2 Kogeneracinė dujų turbinos kombinuoto ciklo technologija	19
1.3 Vidaus degimo variklis	21
1.4 Kogeneracinė Cheng‘o ciklo technologija.....	23
2. ELEKTROS IR ŠILUMOS GENERAVIMAS BIOKURO KOGENERACINĖJE JĖGAINĖJE	25
2.1 Medžio drožlių kuras, jo savybės ir specifika.....	25
2.2 Žemo potencialo šilumos atgavimo technologijos.....	29
3. KOGENERACINIŲ BIOKURO JĖGAINIŲ PALYGINAMOJI ANALIZĖ.....	34
3.1 Biokuro jėgainės garo ciklo termodinaminis efektyvumas ir jo priklausomybė nuo darbo režimo.	34
3.2 Biokuro jėgainių efektyvumo analizė ir jos palyginimas su dujomis kūrenamomis jėgainėmis	38
3.3 Kogeneracinių režimų palyginimas.	41
3.4 Jėgainės energetinė ir ekonominė analizė.....	45
3.5 Kiti jėgainės ekonomiką įtakojantys parametrai.....	52
4. MASĖS MAINŲ REGENERATORIUS ŽEMO POTENCIALO ŠILUMAI ATGAUTI.....	56
4.1 Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus specifika ir veikimo principas.....	56
4.2 Žemo potencialo šilumos dalis šiuolaikinėje jėgainėje.....	60
4.3 Energetinė ir ekonominė biokuro kogeneracinės jėgainės su šilumos ir masės mainų regeneracine sistema analizė.....	61
IŠVADOS.....	68
LITERATŪROS SĄRAŠAS:.....	69
A PRIEDAS.....	71

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 paveikslėlis. Kogeneracinės jėgainės priešslėginės turbinos schema.....	17
2 paveikslėlis. Kogeneracinės jėgainės garų išgavimo kondensacinės turbinos schema	17
3 paveikslėlis. Dujų turbinos su šilumos atgavimo sistema technologinio ciklo schema (Braytono ciklas)	19
4 paveikslėlis. Kogeneracinio DTKC jėgainės principinė schema.....	20
5 paveikslėlis. Kogeneracinės jėgainės schema su vidaus degimo varikliu	22
6 paveikslėlis. Kogeneracinė Cheng‘o ciklo jėgainė. Principinė schema	23
7 paveikslėlis. Medienos kuro klasifikacija.....	26
8 paveikslas. Kieto kuro sudedamosios dalys	27
9 paveikslėlis. Kuro degimo dalelės procesai.....	28
10 paveikslėlis. Biokuro katilinės su absorbciniu šilumos siurbliu schema.....	30
11 paveikslėlis. 10MW katilinės AŠS investicijų nediskontuotas atsipirkimas priklausomai nuo jų kaštų.....	31
12 paveikslėlis. Biokuro katilinės schema su integruotu kompresoriniu šilumos siurbliu.....	32
13 paveikslėlis. Garo ciklo kondensacinio režimo T-s diagrama.....	35
14 paveikslėlis. Garo ciklo kogeneracinio režimo T-s diagrama	37
15 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema šildymo sezonui	46
16 paveikslėlis. Papildomos šilumos dalis nuo VŠV priklausomai nuo dūmų ataušinimo temperatūros	46
17 paveikslėlis. Pajamų ir išlaidų balansas šildymo sezono metu.....	50
18 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema ne šildymo periodui.....	51
19 paveikslėlis. Pajamų ir išlaidų balansas ne šildymo sezono metu.....	51
20 paveikslėlis. Jėgainėms tiekiamo kuro kainos priklausomybė nuo atstumo	54
21 paveikslėlis. Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus principinė schema.	57
22 paveikslėlis. Regeneratoriaus kolonos schema, ji atlieka ir kamino funkcijas.....	58
23 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės su masės regeneratoriumi principinė schema.	59
24 paveikslėlis. Susigražintos šilumos kiekis iš kondens. ekonomizerio ir regeneratoriaus.....	59
25 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema su šilumos ir masės regeneratoriumi.....	62
26 paveikslėlis. Šilumis ir masės mainų regeneratoriaus eskizas.....	64
27 paveikslėlis. Pajamų ir išlaidų balansas šildymo sezono metu (jėgainė su šilumos ir masės mainų regeneratoriumi).	66

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Įvairių kogeneracinių sistemų efektyvumo palyginimas	16
2 lentelė. Medienos cheminė sudėtis	26
3 lentelė. Drėgnumo kiekis pagal medienos rūšį ir jos dalį.....	27
4 lentelė. Labiausiai paplitusių medžių rūšių apatinis šilumingumas, MJ/kg	28
5 lentelė. KŠS investicinių kaštų sudėtis 10MW katilinei	32
6 lentelė. Biokuro jėgainės parametrai kondensacinio darbo režime	35
7 lentelė. Biokuro jėgainės parametrai kogeneracinio darbo režime.....	37
8 lentelė. Biokuro jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kondensacinio darbo režime.....	38
9 lentelė. Dujų jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kondensacinio darbo režime.....	40
10 lentelė. Biokuro jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kogeneracinio darbo režime	41
11 lentelė. Biokuro kogeneracinės jėgainės naudingumo koef. esant skirtingiems kogeneraciniams slėgiams P_k	42
12 lentelė. Dujų jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kogeneracinio darbo režime	43
13 lentelė. Dujų jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kogeneracinio darbo režime.	43
14 lentelė. Energetinės analizės metu gauti dydžiai (šildymo sezonas).	48
15 lentelė. Ekonominės analizės metu gautos sumos (šildymo sezonas).	50
16 lentelė. Energetinės analizės metu gauti dydžiai (ne šildymo sezonas).	51
17 lentelė. Ekonominės analizės metu gautos sumos (ne šildymo sezonas).	52
18 lentelė. Garo turbinos parametrai ir kaina	52
19 lentelė. Biokuro (medienos drožlių arba dar vadinamų čipsų) kainos sudedamosios dalys.....	53
20 lentelė. Vakarų Italijos kogeneracinių jėgainių parametrai	54
21 lentelė. Biokuro kogeneracinių jėgainių kaina pagal galią.....	55
22 lentelė. Energetinės analizės metu gautų dydžių palyginimas.	62
23 lentelė. Ekonominės analizės metu gautų sumų palyginimas.	62
24 lentelė. Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus techniniai duomenys.	63
25 lentelė. Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus kaina.....	64
26 lentelė. Regeneratoriaus montavimo darbų kaina.....	65

GRAFIKŲ SĄRAŠAS

1 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną	39
2 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną	39
3 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną	40
4 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną	40
5 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną	41
6 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną	42
7 grafikas. Biokuro kogenracinės jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo kogeneracinio garo slėgio P_k	42
8 grafikas. Biokuro kogenracinės jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo turbinos naudingumo koef. η_{iz}	43
9 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną	44
10 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_{tv} priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną	44

SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI

- VDV – vidaus degimo variklis;
- KŠS – kompresorinis šilumos siurblys;
- AŠS – absorbcinis šilumos siurblys;
- CŠT – centralizuoti šilumos tinklai;
- IAE – Ignalinos atominė elektrinė;
- ES – Europos Sąjunga;
- LEKA – Lietuvos energetikos konsultantų asociacija;
- DTKC – dujų turbinos kombinuotas ciklas;
- DKDĮ – dideli kurą deginantys įrenginiai;
- VKDĮ – vidutiniai kurą deginantys įrenginiai;
- VŠV – kuro viršutinė šiluminė vertė, MW;
- ŽŠV – kuro apatinė šiluminė vertė, MW;
- Q – jėgainės šiluminė galia, MW;
- M – mechaninė jėgainės galia, MW;
- EL – elektrinė jėgainės galia, MW;
- Kd – kondensatoriaus šiluminė galia, MW;
- E – sausojo ekonomizaizerio galia, MW;
- KE – kondensacinio ekonomizaizerio galia, MW;
- Ek – ekonomizaizerių šiluminė galia, MW;
- W_g – elektros energijos generavimo nuostoliai, MW;
- W_E – elektros energijos nuostoliai dėl jėgainės savo reikmių, MW;
- W_p – elektros energijos pardavimui, MW;
- a_1 – vidutinė kasmetinė bankams mokama diskontuota pinigų suma, mln.€
- a_2 – diskontuota pinigų suma mokama per visą laikotarpį, mln.€
- η_T – jėgainės termodinaminis efektyvumas, %;
- η_K – šilumos nuostoliai per kaminą, %;
- η_D – šilumos nuostoliai dėl degimo, %;
- η_P – papildoma šilumos dalis kondensaciniame ekonomizaizeryje, %;
- η_{iz} – turbinos efektyvumas, %;
- p_1 – garo slėgis prieš turbiną, bar;
- t_1 – garo temperatūra prieš turbiną, °C;
- gd – garo kiekis po turbinos, %;
- η_s – vandens siurblio efektyvumas, %;

p_2 – kondensacinis garo slėgis, bar;
 t_2 – vandens temperatūra po kondensatoriaus, °C;
 h_1 – garo entalpija prieš turbiną, kJ/kg;
 h_{2f} – vandens entalpija prieš siurbli, kJ/kg;
 h_{2g} – garo entalpija prie tam tikros temperatūros, kJ/kg;
 h_2 – garo entalpija po turbinos, kJ/kg;
 h_3 – vandens entalpija po vandens siurblio suslėgimo, kJ/kg;
 h_{1-g} – entalpijų skirtumas, kJ/kg;
 h_{kf} – kogeneracinio vandens entalpija prieš vandens siurbli, kJ/kg;
 h_k – kogeneracinio garo entalpija po turbinos, kJ/kg;
 h_{ks} – garo entalpija po turbinos, kJ/kg;
 h_{3k} – kogeneracinio vandens entalpija po vandens siurblio suslėgimo, kJ/kg;
 s_1 - garo entropija prieš turbiną, J/kg·K;
 s_{2s} - garo entropija po turbiną, J/kg·K;
 s_{2g} - garo entropija prie tam tikros temperatūros, J/kg·K;
 s_{kf} - kogeneracinio vandens entropija prieš vandens siurbli, J/kg·K;
 T_k – kogeneracinio garo temperatūra, °C;
 P_k – kogeneracinio garo slėgis, bar;

ĮVADAS

Su kiekvienais metais elektros energijos poreikis vis didėja ir tai natūralus procesas vykstantis dėl pasaulyje didėjančio žmonių skaičiaus, pramonės plėtros, įrangos tobulėjimo ir t.t. Tačiau šis žmonijos progresas turi ir kitą medalio pusę: didelis energijos poreikis sąlygoja ir didelį pirminio kuro suvartojimą, juolab kad iškastinio kuro rezervai nėra begaliniai ir jie taip greitai negali atsinaujinti. Išaugęs iškastinio kuro naudojimas turi neigiamą poveikį aplinkai ir žmonėms. Energetikos sektoriuje dažniausiai sutinkami teršalai tokie kaip: SO₂, NO_x, CO, CO₂ ir kietosios dalelės, tai teršalai, kurių koncentracijoms stipriai viršijus normas, atsiranda kvėpavimo organų sutrikimai, šios medžiagos, patekusios į organizmo vidų sukelia įvairias vidaus organų patologijas ar net mirtį. Šių teršalų poveikis gamtai pasireiškia augmenijos nykimu, dirvos erozija, derlingumo mažėjimu, ežerų dumblių ir t.t.

Pasaulyje sparčiai didėja energijos gamybos dalis iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Tai Saulės, vėjo, hidroenergija, biokuras, geoterminė energija. Tačiau šių energijos šaltinių panaudojimą riboja gamtinės sąlygos, šalies geografinė padėtis ir pačių technologijų efektyvumas bei investiciniai kaštai. Tradiciniai energijos gamybos būdai užtikrina stabilų ir nepertraukiamą energijos tiekimą, o alternatyvūs energijos šaltiniai dažnu atveju jų gali tik papildyti. Negalime pamiršti šiuolaikinių energijos gamybos technologijų, tokių kaip kombinuotas ciklas, kai gaminama elektros energija ir šiluma, vandenilio energetika ar gazifikacija. Naujų technologijų diegimas ir jų tobulinimas leidžia efektyviau išnaudoti kurą, sumažinti taršą ir iškastinio kuro naudojimą.

Per pastarąjį dešimtmetį ženkliai išaugo biokuro naudojimas energetikos sektoriuje. Šio kuro populiarumą nulėmė tai, kad jis laikomas ekologišku ir naujai statomoms ar rekonstruojamos jėgainėms skiriamos didelės subsidijos. Kitas svarbus faktorius - šio kuro kaina, kuri šiai dienai daugiau ar mažiau yra perpus mažesnė už gamtinių dujų. Nepaisant didelių plusų šios jėgainės turi ir nemažai trūkumų. Vienas iš didžiausių trūkumų, tai kad biokuro drėgmė dažnai siekia 50% ir dėl šios priežasties jėgainės nesugeba pasiekti aukštų garo parametrų. Kitas trūkumas, tai jėgainės kaina, kuri kelis kartus viršija gamtiniomis dujomis kūrenamų jėgainių kainą. Taip pat jėgainės galią stipriai riboja regiono miškingumas.

Biokuro kogeneracinių jėgainių bendras efektyvumas išlieka aukštas ir gali viršyti 90%, tačiau ir čia yra nemažai potencialo. Šiose jėgainėse didelis kiekis žemo potencialo šilumos šalinama per kaminą. Šią šilumą dalinai įmanoma susigrąžinti panaudojus šilumos siurblius, tačiau čia iškyla kita problema - tai investicijų kaštai ir atsipirkimo laikas. Kiekvienas šilumos ir elektros energijos gamintojas suinteresuotas turėti pelną. Visai kita situacija yra su emisijų mažinimu, šios yra reglamentuotos ir su laiku tik griežtėja, todėl jėgainės turi skirti vis didesnę dalį investicijų naujiems įrenginiams ir technologijoms, kurios užtikrintų žemas teršalų emisijas. Dažnai jėgainėse įrenginiai naudojami kompleksiskai. Pavyzdžiui, dūmų valymas nuo kietųjų dalelių vykdomas multiciklonais bei elektrostatiniais filtrais, tačiau prie dūmų išvalymo ženkliai prisideda ir kondensacinis ekonomizeris, nors jo pagrindinė užduotis kuo daugiau sugrąžinti šilumos iš dūmų. Šiame darbe nagrinėjamas šilumos ir masės regenerorius gali ženkliai prisidėti prie atliekinės šilumos utilizavimo, kas pagerintų ir bendrą jėgainės efektyvumą. Reikia paminėti, kad regenerorius, kaip ir ekonomizeris, gali stipriai prisidėti prie kietųjų dalelių emisijų mažinimo.

Gamybos technologijų tobulinimas, teršalų susidarymo ir energijos transformavimo nuostolių mažinimas - tai taršos prevencijos principai, kurie užtikrina švarią ir saugią mūsų aplinką, tačiau pagrindinis ir svarbiausias principas išlieka perteklinio vartojimo mažinimas, už kurį atsakingas kiekvienas žmogus. Perteklinis vartojimas, tai vartojimas ne iš būtinybės, o todėl kad galima sau tai leisti. Buities apyvokos prekės, elektronikos, telemonikacijų ir t.t keičiamos naujomis ne todėl, kad sugedo ar neatlieka efektyviai savo funkciju, o tik todėl kad paseno moralškai ar tiesiog iš noro turėti naują madingą daiktą. Šių daiktų elementų gamybai sunaudojami milžiniški kiekiai elektros ir šilumos energijos ir jie tiesiogiai priklauso nuo mūsų-vartotojų.

1. KOGENERACIJA ŠIUOLAIKINĖJE ENERGETIKOJE

Kogeneracija - tai viena populiariausių energiją taupančių technologijų, kai aukšto potencialo šiluma sunaudojama elektros energijos gamybai, o žemesnio – šilumai. Gaminant elektros energiją, didelis šilumos kiekis gaunamas kaip šalutinis produktas, kuris įprastinėse jėgainėse tiesiog paleidžiamas į aplinką, tačiau kogeneracinės jėgainės leidžia ją utilizuoti. Kogeneracijos proceso metu paprastai nuo 7% iki 50% energijos sunaudojama elektros energijos gamybai, 8-20% energijos virsta nuostoliais ir likusi dalis energijos sunaudojama šilumos arba garo gamybai.

Modernios biokuro jėgainės efektyvumas užtikriną mažas elektros ir šilumos energijos kainas galutiniam vartotojui, miškingose šalyse energetinį nepriklausomumą ir švaresnę aplinką. Steigiamos nedidelės galios biokuro kogeneracinės jėgainės gali padidinti konkurencingumą šilumos ir elektros energijos tiekime-pradavime, taip mažindamos monopolio efektą. Posovietinės šalys tarp kurių ir Lietuva, turi gerai išvystytą centralizuotos šilumos tiekimo sistemą, todėl kogeneracinių jėgainių plėtra turi didelį potencialą.

Galimybė panaudoti vietos išteklius energijos gamyboje yra viena iš strateginių valstybės užduočių. Vietinių išteklių panaudojimas mažina importuojamo kuro dalį, taip mažinamas energetinis priklausomumas, atsiranda galimybė išsiderėti palankesnes importuojamo kuro kainas ir užtikrinamas energetinis saugumas. Kogeneracinių jėgainių aukštas efektyvumas užtikriną mažesnę tiek vietinio, tiek importuojamo kuro kiekį. Po IAE uždarymo Lietuva tapo daugiausiai elektros energijos importuojanti šalis ES, todėl net ir nedidelės kogeneracinės jėgainės yra svarbios.

Šilumos ir elektros energijos gamyboje, svarbią vietą užima aplinkosauga. Teršalų ribinės vertės reglamentuotos tokiomis direktyvomis kaip 2013/0442 ir 2010/75/ES. Tai dvi pagrindinės direktyvos, kuriomis reglamentuojama ne tik išmetamų teršalų ribines vertes, bet ir jų kontrolė bei prevencija. Abu reglamentai įsigaliojo nuo 2016 01 01 ir galioja dabar.

Direktyva 2010/75/ES apima didelius kurą deginančius įrenginius, kurių šiluminė galia 50MW ir daugiau. Priede A pateikiamos lentelės, kuriose nurodytos ribinės teršalų normos galiojusios iki 2010/75/ES direktyvos priėmimo ir įsigaliojusios po jos priėmimo. Galime pastebėti, kad naujojoje direktyvoje žymiai griežtesni reikalavimai, SO₂ griežtėja 2-5 kartus, NO_x griežtėja 2-3 kartus, CO griežtėja 2-3 kartus, KD griežtėja 2-5 kartus [19].

Direktyva 2013/0442 apima vidutinius kurą deginančius įrenginius, kurių šiluminė galia 1MW arba didesnė, bet mažesnė nei 50MW. Šios direktyvos nustatytos ribinės teršalų vertės pateiktos A priedo lentelėse. Po šios direktyvos įsigaliojimo SO₂ griežtėja net 10 kartų, tuo tarpu NO_x griežtėja 1,7-2 kartų, KD griežtėja 2-5 kartų, CO normavimas dingsta [19].

1.1 Kogeneracinių jėgainių tipai ir parametrai

Kogeneracinių jėgainių tipų yra įvairių, jei nagrinėtume ir nedideles jėgaines, tačiau čia paminėti pagrindiniai, plačiausiai naudojami tipai:

- Garo turbinos.
- Kombinuoto ciklo jėgainės.
- Dujų turbinos.
- Vidaus degimo varikliai.

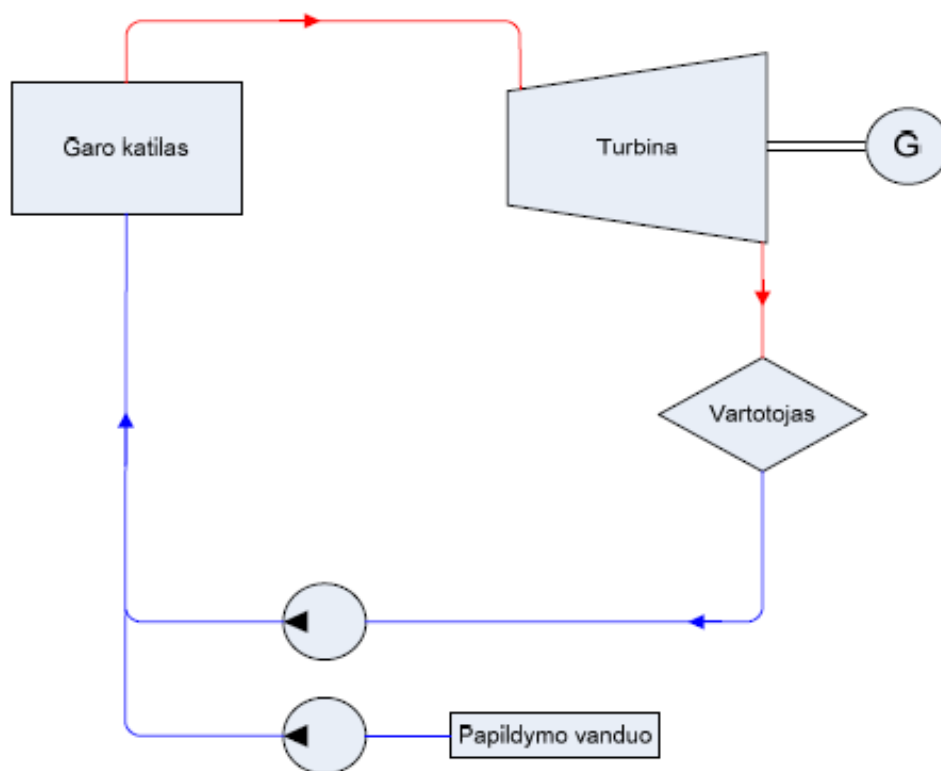
Skirtingas kogeneracijos technologijų pasirinkimas jėgainėse priklauso nuo daugelio aplinkybių, tai: šilumos ir generuojamos elektros energijos santykis, šilumos (degimo) parametrai, kuro tipo ir t.t. Kogeneracinių sistemų efektyvumo palyginimas pateiktas 1 lentelėje.

1 lentelė. Įvairių kogeneracinių sistemų efektyvumo palyginimas [16]

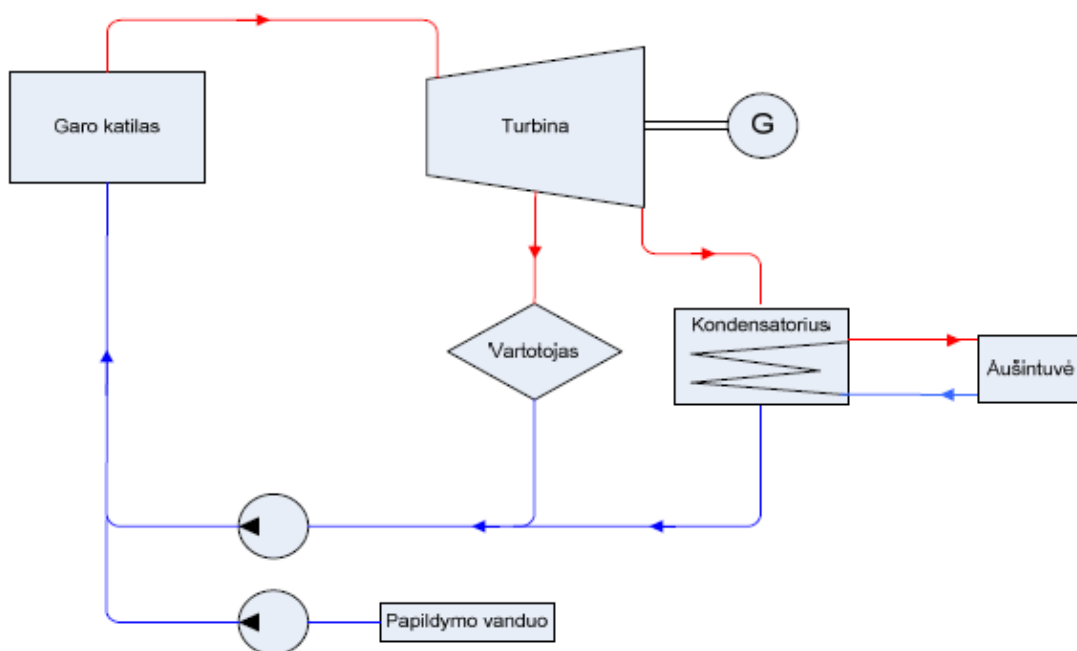
Kogeneracinė sistema	Šilumos ir elektros galių santykis kW_s / kW_e	Elektra, %	Bendras jėgainės efektyvumas, %
Galinio slėgio garo turbina	4.0 – 14.3	14 - 28	84 -92
Ekstrakcinė garo turbina	2.0 - 100	22 - 40	60 - 80
Dujų turbina	1.3 – 2.0	24 - 35	70 -85
Kombinuotas ciklas	1.0 – 1.7	34 - 40	69 -83
Vidaus degimo variklis	1.1 – 2.5	33 - 53	75-85

Garo turbinos vienos seniausių ir populiariausių įrengimų naudojamų elektros energijos gamyboje ir kitų įrengimų sukimui. Garo turbinų populiarumą nulėmė jų efektyvumas, pigumas ir patikimumas, lyginant su ankstesniais laikais naudojamų garo variklių. Kitas svarbus aspektas, kad garo turbinos gali būti įvairios galios diapazono, nuo kelių kilovatų iki tūkstančio megavatų.

Galime išskirti porą pagrindinių garo turbinų technologijų: tai kogeneracinės (priešslėginė) garo turbina ir kondensacinė garų išgavimo turbina. Kondensacinės garų išgavimo turbinos technologinis veikimo principas toks pats kaip ir (kogeneracinės) priešslėginės garo turbinos, skirtumas tik tas, kad šilumos vartotojams garas paimamas ne visai išsiplėtęs, o pilnai išsiplėtęs garas toliau kondensuojamas kondensatoriuje, kuriame palaikomas gilus vakuumas. 1 paveikslėlyje pateikta kogeneracinės jėgainės galinio slėgio turbinos schema, 2 paveikslėlyje pateikta kogeneracinės jėgainės ekstrakcinės turbinos schema.



1 paveikslėlis. Kogeneracinės jėgainės priešslėginės turbinos schema [3]



2 paveikslėlis. Kogeneracinės jėgainės garų išgavimo kondensacinės turbinos schema [3]

Garų turbinos veikimo principas pagrįstas Renkino ciklu. Maitinimo siurbliais vandens slėgis pakeliamas iki 40-60 barų (didesniųjų net iki 150bar) ir tiekiamas į garo katilą, kur išgarinamas ir perkaitinamas perkaitintuvuose, kuriuose garo temperatūra pakyla iki 600°C. Garo plėtimosi metu

gaunama mechaninė energija, kuri naudojama elektros generatoriui sukurti, o išsiplėtęs garas tiekiamas centralizuoto šildymo sistemoms arba kitiems šilumos vartotojams.

Didelį elektrinį efektyvumą galima pasiekti tik gaminant aukštų parametrų garą t.y. 170-227 bar. ir 600°C, tačiau tokius parametrus galima pasiekti tik labai dideliuose garo katiluose. Kogeneracinėse jėgainėse, kuriose naudojamas biokuras, garo parametrai ribojami dėl korozijos rizikos, taip pat biokuro drėgmė mažina garo temperatūrą ir jo debitą. Tokių kogeneracinių jėgainių elektrinis efektyvumas nėra didelis ir siekia 10-25%, o didelių, modernių jėgainių gali siekti ir 45%, tačiau bendras visų jėgainių energetinis efektyvumas siekia 90%, kas biokuro jėgainėms šiandien nėra labai aukštas rodiklis. Reikia vertinti tai, kad penktadalį šilumos sudaro slaptoji šiluma, nepatenkanti į šį vertinimą.

Didžiausias garo ciklo kogeneracinių jėgainių privalumas tas, kad jose galima naudoti įvairų kurą nuo anglių, biokuro iki buitinių atliekų. Išmetamų teršalų kiekiai ir rūšys tiesiogiai priklauso nuo kuro rūšies, degimo kameros konstrukcijos, dūmų valymo įrengimų ir kitų taikomų pažangių technologijų. Taigi garo ciklo kogeneracinių jėgainių privalumai ir trūkumai yra tokie.

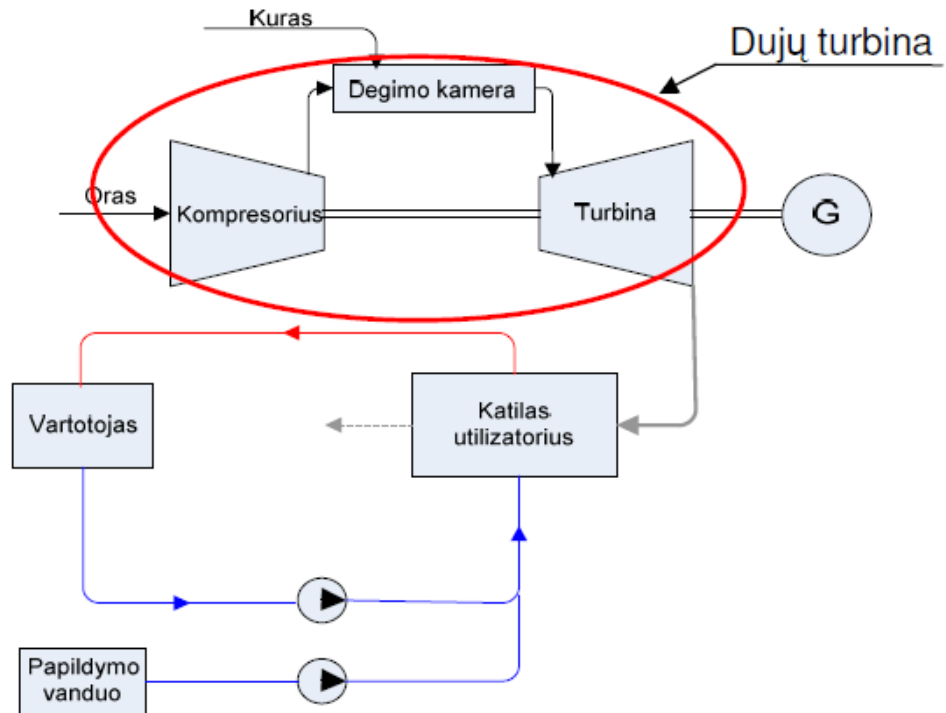
Privalumai:

- Galima naudoti labai įvairų kurą.
- Aukštas bendras jėgainės efektyvumas.
- Patikima ir ilgaamžė technologija.
- Platus galios diapazonas.

Trūkumai:

- Žemas elektrinis efektyvumas.
- Brangūs eksploataciniai kaštai.
- Dirbant maža apkrova, mažėja elektrinis efektyvumas.

Dujų turbinos kombinuoto ciklo (DTKC) technologija pagrįsta Braytono ciklu. Suslėgtas oras tiekiamas į degimo kamerą kur maišosi su kuru ir įvyksta degimas. Besiplečiantys degimo produktai suka turbiną, kuri savo ruožtu suka generatorių. Po turbinos degimo produktų temperatūra siekia 480-590°C, norint išnaudoti šią šilumą reikalingas katilas-šilumokaitis, kuris kaip dažniausiai perduoda šilumą kitam šilumnešiui. Utilizuota šiluma katile dažniausiai suvartojama šildymo reikmėms, džiovinimo ar kitiems procesams reikalaujantiems šilumos energijos. Tokių jėgainių elektrinis efektyvumas priklausomai nuo jų dydžio gali būti 20-50%, vien elektros gamybos kombinuoto ciklo elektrinis efektyvumas šiandien viršija 60%. Bendras DTKC kogeneracinių jėgainių energetinis efektyvumas yra 80-90%. Dujų turbinos kogeneracinio ciklo schema pateikta 3 paveikslėlyje.



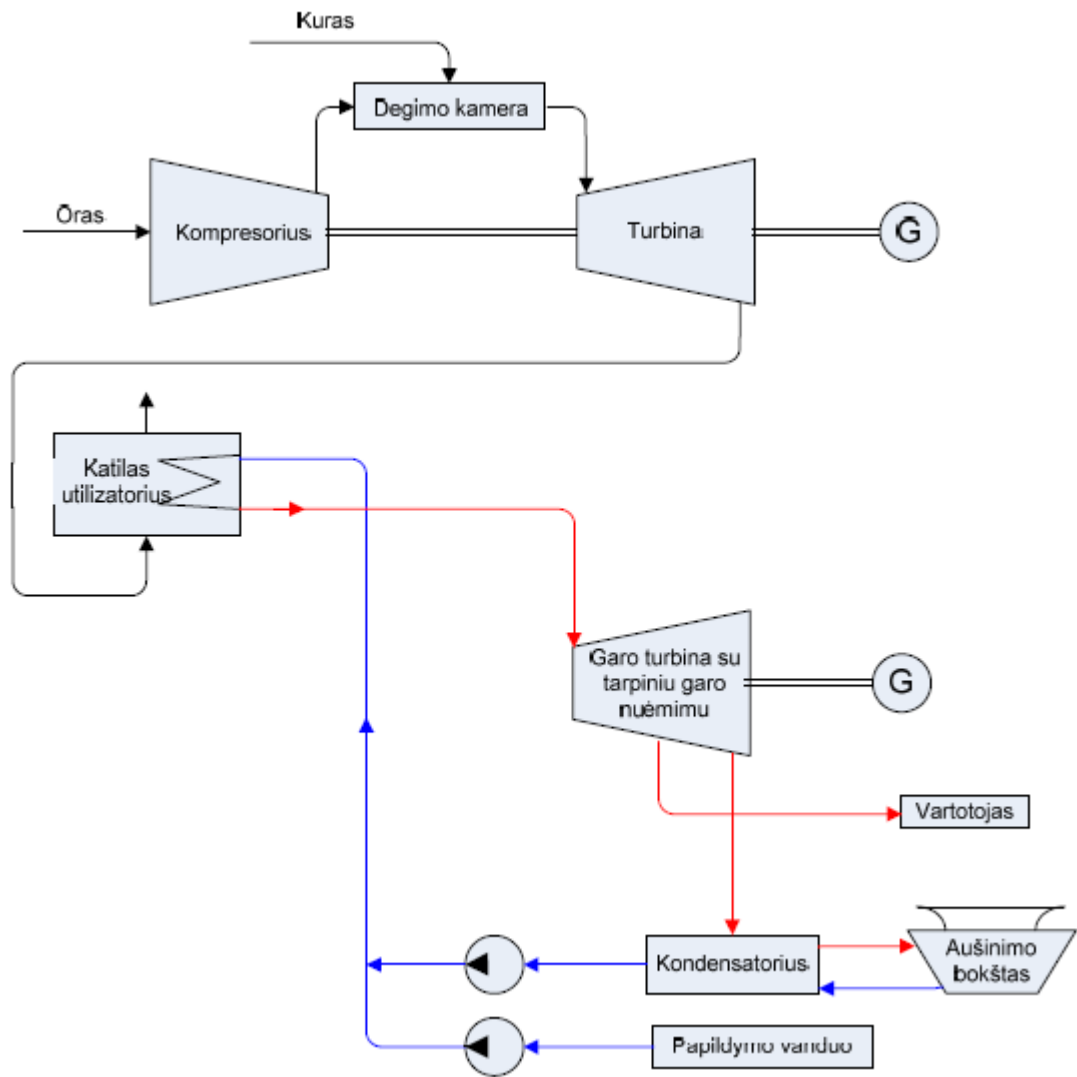
3 paveikslėlis. Dujų turbinos su šilumos atgavimo sistema technologinio ciklo schema (Braytono ciklas) [3]

1.2 Kogeneracinė dujų turbinos kombinuoto ciklo technologija.

DTKC jėgainės gali būti kondensacinio ir kogeneracinio (termofikacinio) tipo. Savo ruožtu kogeneracinio tipo gali turėti tarpinę garo nuėmimo sistemą (kuomet naudojama ekstraktinio tipo turbina) ir vien galinio slėgio sistemą, kai turbinoje garas išplečiamas iki termofikacinio slėgio be galimybės jį išplėsti efektyviau (iki slėgio, atitinkančio aplinkos temperatūrą : 0,05-0,08bar).

Pagrindinis skirtumas tarp kondensacinio ir termofikacinio darbo režimo kogeneracinių sistemų yra tas, kad antru atveju tiekiamas garas turbinoje išplečiamas nepilnai ir per tarpinę šilumos nuėmimo sistemą tiekiamas šilumos vartotojams.

Kombinuoto ciklo dujų turbinos principinė schema pateikta 4 paveikslėlyje.



4 paveikslėlis. Kogeneracinio DTKC jėgainės principinė schema [3]

Degimo kameroje gaunami degimo produktai, kurių temperatūra siekia 1200°C ir daugiau. Kuo didesnė temperatūra prieš turbiną, tuo didesnis turbinos efektyvumas, tačiau esant aukštomis temperatūroms atsiranda spartesnis azoto oksidų susidarymas ir suprastėja dujų turbinos elementų mechaninės savybės. Gauta mechaninė energija naudojama elektros generatoriaus ir dujų turbinos oro kompresoriaus sukimui. Apie 50-60% mechaninės energijos sunaudojama dujų turbinos kompresoriui sukėti, nepaisant to, tokio tipo kogeneracinėse jėgainėse pasiekiamas aukštas elektros energijos generavimo koeficientas, kuris gali siekti 60%.

Po turbinos degimo produktų temperatūra paprastai būna $500\text{-}600^{\circ}\text{C}$, toliau degimo produktai pašildomi garo katilo pradžioje iki 1000°C . Garo katile degimo produktai turi būti ataušinti iki $70\text{-}80^{\circ}\text{C}$, kad technologinis procesas būtų kuo efektyvesnis ir būtų išvengta kondensaciniu metu susidarančių korozinių terpių. Deginant gamtines dujas išmetamų degimo produktų temperatūra gali būti dar žemesnė ir technologinis procesas dar efektyvesnis, kadangi korozinės terpės nesusidaro arba susidaro tik iš dalies.

Kaip minėta anksčiau dujų turbinos elektrinis efektyvumas gali viršyti 60%, o bendras jėgainės energetinis efektyvumas yra aukštesnis nei 90%. Tačiau tokių jėgainių eksploatacinės išlaidos aukštos ir ekonomiškai apsimoka tik didelės elektrinės galios jėgainės. Kuo didesnė jėgainė tuo didesnis jėgainės efektyvumas. Natūralu, kad tokio tipo jėgainės diegiamos ten kur reikalingas didelis elektrinis efektyvumas ir kintamas vartotojų šilumos poreikis.

Trūkumai:

- Brangūs eksploataciniai kaštai.
- Netinka esant mažai elektriniai galiai.
- Naudojamas brangus kuras (gamtinės dujos, skystas kuras).

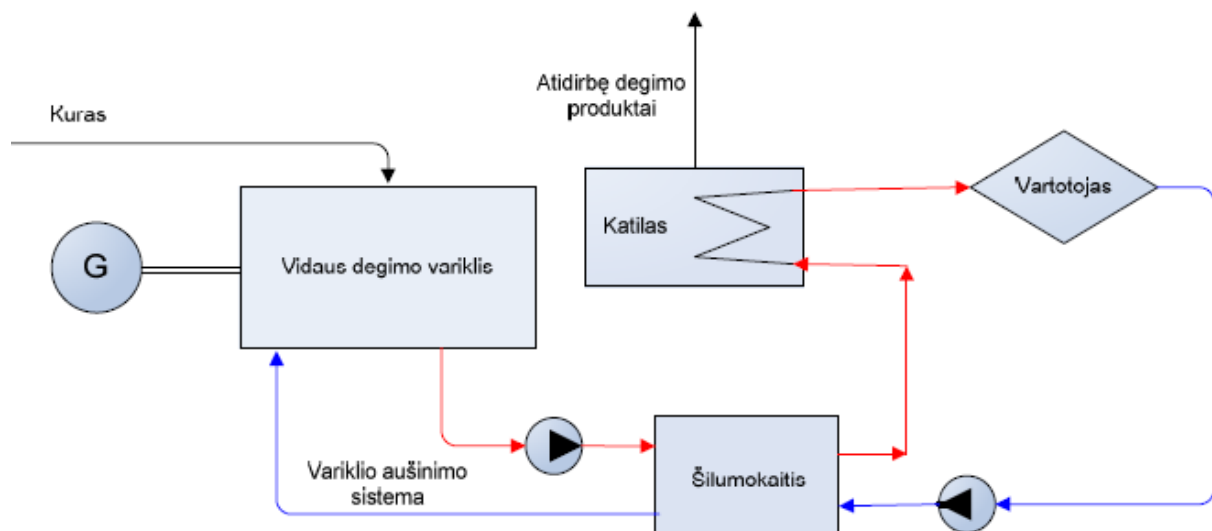
Privalumai:

- Labai aukštas jėgainės elektros bei bendras energijos efektyvumas.
- Tokios jėgainės yra labai technologiškos, dėl ko jų santykinė kaina yra žema.
- Žemos emisijos į aplinką.

1.3 Vidaus degimo variklis.

Vidaus degimo varikliai seniai taikoma kogeneracinė technologija, kurios galia svyruoja nuo kelių kilovatų iki kelių dešimčių megavatų. Naudojant vidaus degimo variklius elektra gaminama efektyviau nei dujų turbinose, bet atliekinės šilumos utilizavimas sudėtingesnis, nes šiluma pasiskirsčiusi tarp variklio aušinimo ir išmetamųjų dujų sistemų. Vidaus degimo variklius galime suskirstyti pagal jų veikimo ciklus, taktų skaičių, sūkių skaičių. Kogeneracijoje plačiausiai naudojami Otto keturių taktų vidaus degimo varikliai, kuriuose kaip kuras naudojamos gamtinės dujos. Taip pat naudojami skysto kuro vidaus degimo varikliai, dar vadinami dyzeliniais varikliais.

Vidaus degimo variklyje sudegusio kuro energija transformuojama į mechaninę ir šiluminę energijas. Mechaninė energija perduodama per veleną į elektros generatorių, tuo tarpu šiluminė energija gaunama karšto vandens ar žemų parametrų garo pavidalu utilizuojant šilumą iš vidaus degimo variklio aušinimo sistemos ar išmetamųjų dujų. Kogeneracinės jėgainės schema su vidaus degimo varikliu pavaizduota 5 paveikslėlyje.



5 paveikslėlis. Kogeneracinės jėgainės schema su vidaus degimo varikliu [3]

Vidaus degimo variklių efektyvumas priklauso nuo daugybės veiksnių tokių kaip variklio sūkių skaičiaus per minutę, kuro suspaudimo laipsnio ir t.t. Otto variklio elektros energijos efektyvumas mažesnis už dyzelinių ir svyruoja nuo 25-45%, tuo tarpu dyzelinių variklių 30-50%. Bendras jėgainės efektyvumas svyruoja tarp 70 ir 80%.

Susidarantys pagrindiniai teršalai kaip ir dujų turbinose, tai azoto oksidai, anglies monoksidas ir lakieji organiniai junginiai. Sieros oksidų junginių išmetimas priklauso tik nuo kuro rūšies, o kietųjų dalelių emisiją lemia kuro peleningumas ir jame esančių metalų kiekis.

Privalumai:

- Greitas variklio paleidimas.
- Aukštas elektros gamybos efektyvumas esant dalinėms apkrovoms.
- Patogus tuo atveju, kai įmonė negamina elektros ir ją reikia brangiai pirkti.

Trūkumai:

- Aukštos teršalų emisijos
- Aukštas triukšmo lygis.
- Didelės priežiūros išlaidos.

Svarbu paminėti, kad dujų turbinos suprojektuotos dirbti dideliu apkrovos režimu ir darbo režimo sumažinimas neigiamai atsiliepia ne tik išmetamų teršalų padidėjimu, bet ir elektrinės galios sumažėjimu. Tuo tarpu Cheng'o ciklo technologija neturi šio trūkumo, nes dirba optimaliu režimu, o reikiamą lankstumą užtikrina ciklavimo bei akumuliacinių karšto vandens talpyklų pagalba.

Privalumai:

- Žemas išmetamų teršalų kiekis.
- Galima reguliuoti šiluminę galią (cikliškai).
- Patikima technologija.
- Iš degimo produktų gaunamas gana didelis kiekis šilumos slaptosios šilumos pavidalu

Trūkumai:

- Įpurškimui reikalingas labai švarus vanduo, kurio paruošimas brangina eksploatacinius kaštus.
- Darbinei apkrovai nukritus žemiau 60-80%, mažėja elektrinis efektyvumas ir didėja teršalų emisijos.
- Esant ciklavimo režimui, atsiranda nuostoliai, nežiūrint to, kad režimą turbina pasiekia per valandą.
- Kylant aplinkos temperatūrai mažėja elektrinis efektyvumas.

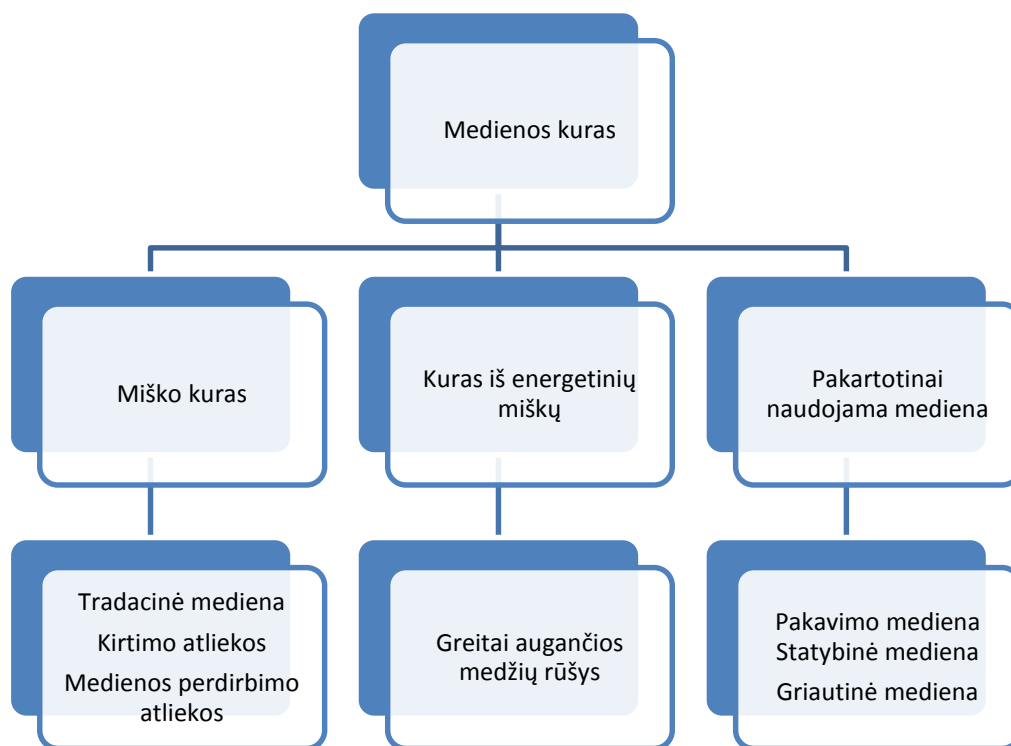
2. ELEKTROS IR ŠILUMOS GENERAVIMAS BIOKURO KOGENERACINĖJE JĖGAINĖJE

Elektros ir šilumos energijos generavimas kogeneracinėse jėgainėse yra finansiškai skatinamas ne tik dėl ekologinių klausimų, bet ir dėl pigesnės elektros energijos ir šilumos. Tačiau biokuras nėra geriausias kuras termodinaminiu požiūriu, kadangi jis dega prie žemesnės temperatūros nei iškastinis kuras. Viena vertus, tai užtikrina mažą teršalų procentą, ypač azoto oksidų, tačiau šiuo atveju trūkumas didesnis. Biokuru deginamos jėgainės, nepasiekia aukštų elektros gamybos efektyvumo parametru. Tiek temperatūra, tiek ir slėgis, šiose jėgainėse yra žemesnio lygmens ir tai mažina ciklo efektyvumą beveik perpus, lyginant pavyzdžiui su virškritiniu garo turbinos ciklu.

Jėgainės galia vienas iš pagrindinių parametru, kuri stipriai įtakoja šalies miškingumas arba kitaip sakant biokuro tiekimo spindulys. Kuo jėgainės galia didenė tuo jos efektyvumas aukštesnis, tačiau didenis kuro poreikis ir padidėjas jo tiekimo spindulys brangina biokuro savikainą, apie tai plačiau skyriuje 3.5 Kiti jėgainės ekonomiką įtakojantys parametrai.

2.1 Medžio drožlių kuras, jo savybės ir specifika.

Lietuvoje kaip ir kitose šalyse deginamas įvairus biokuras, dažniausiai tai būna medžio drožlių kuras, rečiau durpės ir šiaudai. Durpių ir šiaudų naudojimas energetikoje yra komplikotas dėl kelių priežasčių, visų pirma „durpių degimo metu susidaręs CO₂ yra laikomas šiltnamio efektą sukeliančiomis dujomis“ [9], kai tuo tarpu šiaudų ir medžio drožlių kuro degimo metu išsiskyręs CO₂ nelaikomas šiltnamio efektą sukeliančiomis dujomis. Nepaisant to, šiaudai energetikoje naudojami labai retai, tai susiję su šio kuro chemine sudėtimi, dėl kurios degimo procesas tampa komplikotas. Baltijos šalių biokuro jėgainėse plačiausiai naudojamas medžio drožlių kuras, šio kuro populiarumą lemia keli aspektai, tai šalies miškingumas, gera kelių infrastruktūra ir žinoma „CO₂ emisijų nebuvimas“ [9]. Medienos kurą galima suskirstyti į kelias grupes (žr. 7 pav. Medienos kuro klasifikacija).



7 paveikslėlis. Medienos kuro klasifikacija [9]

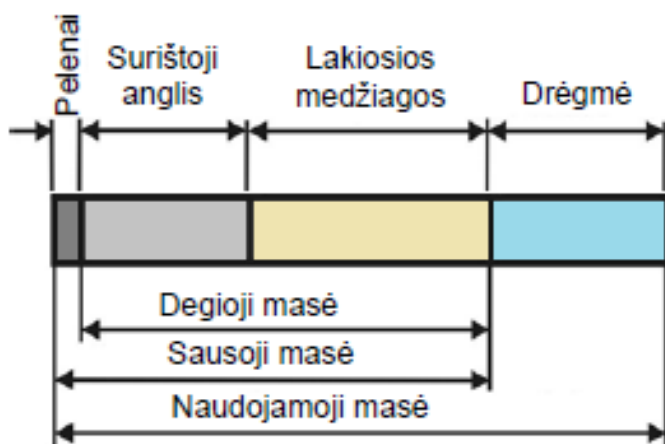
Biokurą gautą iš miškų ir energetinių miškų priimta laikyti ekologišku kuru, ko negalima pasakyti apie pakartotinai naudojamą medieną. Dažnu atveju pakartotinai naudojamose medienoje būna įvairių priemaišų, tai stiklo, metalo ar plastiko, dar dažniau ji būna dažyta ar impregnuota. Tokios medienos panaudojimas energetiniais tikslais yra komplikuoatas, kadangi degimo procesams keliami aukšti reikalavimai dėl emisijų.

Galima teigti, kad visas kietas kuras sudarytas iš degiosios ir nedegiosios dalies. Nedegiąją dalį sudaro drėgmė ir pelenai. „Elementinėje sudėtyje vyrauja trys komponentai: anglis (C), vandenilis (H) ir deguonis (O), kurie kartu sudaro 99% sausosios masės – degiosios dalies“ [9].

2 lentelė. Medienos cheminė sudėtis [9]

Elementas	Mediena, %	Žievė, %
Anglis, C	48 - 50	51 – 66
Vandenilis, H	6,0 - 6,5	5,9 – 8,4
Deguonis, O	38 - 42	24,3 – 40,2
Azotas, N	0,5 – 2,3	0,3 – 0,8
Siera, S	0,05	0,05
Chloras, Cl	<0,01	0,01 – 0,03

Kieto kuro deginime, sieros kiekis yra vienas svarbiausių rodiklių emisijų požiūriu. Esant didesnei sieros koncentracijai galima žemos temperatūros korozija dūmų kanaluose ir kai kuriuose įrengimuose. Chloras taip pat nėra pageidaujamas elementas kietame kure, kadangi degimo metu jis jungiasi su vandeniliu, taip sudarydamas druskos rūgštis, kurios sukelia šilumokaičių paviršių koroziją.



8 paveikslas. Kieto kuro sudedamosios dalys [9]

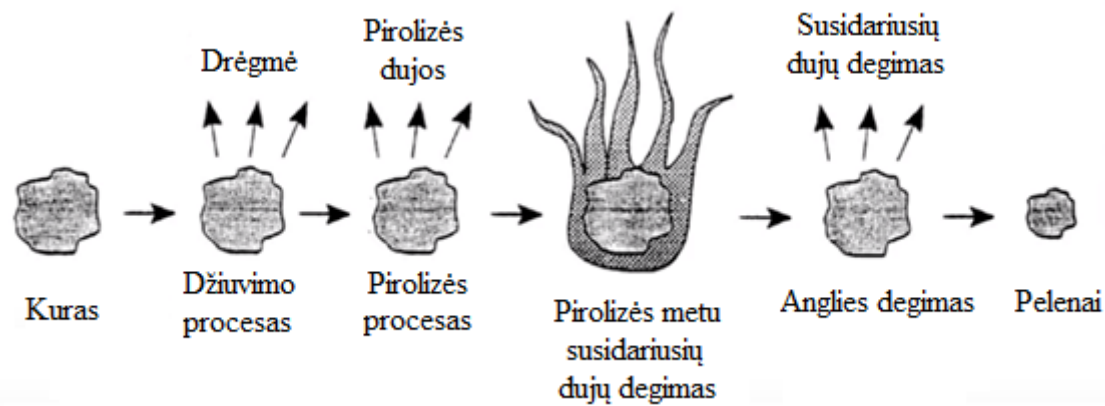
Medienos drožlių biokure neišvengiami didžiuliai kiekiai vandens drėgmės, kuri dažnu atveju priklauso nuo kelių veiksnių: medžio rūšies ir metų laiko. Paprastai augančio medžio drėgmė būna 40-60%, taip pat drėgnumo koncentracija svyruoja skirtingose medžio dalyse.

3 lentelė. Drėgnumo kiekis pagal medienos rūšį ir jos dalį [9]

	Drėgnumo koncentracija, %	
	Pušis	Eglė
Kamienas	40 - 50	40 - 60
Šakos	50 - 56	42 - 46
Viršūnė	60	60
Žievė	36 - 67	38 - 63

„Kai mediena džiūsta, pirmiausia išsiskiria vadinamasis laisvasis vanduo, vėliau – surištas vanduo arba ląstelių vanduo. Išgaravus ląstelių vandeniui fizinės medienos savybės pradeda keistis”[9]. Išdžiūvimo laipsnis priklauso nuo džiūvimo sąlygų. Lauke, medžio drožlių biokuras gali išdžiūti iki 20-25%, kai tuo tarpu vidaus sąlygomis 8-15%.

Drėgmės kiekis biokure vienas pagrindinių faktorių įtakojančių jėgainių efektyvumą, kadangi degimo procesas vyksta tik tada, kai iš kuro išgarinama visa drėgmė. Išgarinimo procesui reikalinga energija – šiluma, kurią per kondensacinį ekonomazerį dalinai susigražiname. Nors per kaminą pavėjui paleidžiame sąlyginai žemo potencialo šilumą, tačiau bendrame šilumos balanse, tai sudaro milžiniškus šilumos kiekius.



9 paveikslėlis. Kuro degimo dalelės procesai [19]

Kitas svarbus faktorius, įtakojantis jėgainės efektyvumą, tai kuro šilumingumas (jo šiluminė vertė, nes šilumingumas, rodos, neleistinas terminas), kuris matuojamas MJ/kg. Kuro šilumingumas gali būti skaičiuojamas pagal jo viršutinio arba apatinio šilumingumo reikšmes. „Viršutiniojo šilumingumo reikšmė apskaičiuojama darant prielaidą, kad vandens garai degimo produktuose, tiek išsiskyrę dėl medienos drėgnumo, tiek ir susidarę kaip vandenilio degimo produktas, pilnai kondensavosi. Apatinio šilumingumo reikšmės skaičiavime neatsižvelgiama į vandens garų kondensacijos šilumą degimo produktuose” [9].

4 lentelė. Labiausiai paplitusių medžių rūšių apatinis šilumingumas, MJ/kg [9]

Medžio rūšis	Kamienas be žievės	Žievė	Visas kamienas	Šakos ir viršūnės	Visas medis
Paprastoji pušis	19,31	19,53	19,33	20,23	19,52
Paprastoji eglė	19,05	18,80	19,02	19,17	19,29
Plaukuotasis beržas	18,68	22,75	19,19	19,94	19,30
Karpotasis beržas	18,61	22,52	19,15	15,53	19,29
Baltalksnis	18,67	21,57	19,00	20,03	19,18
Juodalksnis	18,89	21,48	19,31	19,37	19,31
Drebulė	18,67	18,57	18,65	18,61	18,65

Kaip matome 4 lentelėje, kieto kuro šilumingumas mažai priklauso nuo medienos rūšies. Galime pastebėti, kad kai kurios medžio dalies šilumingumas yra sąlyginai aukštesnis už kitas, tačiau žiūrint bendrą medžio šilumingumą šis skirtumas tampa minimalus.

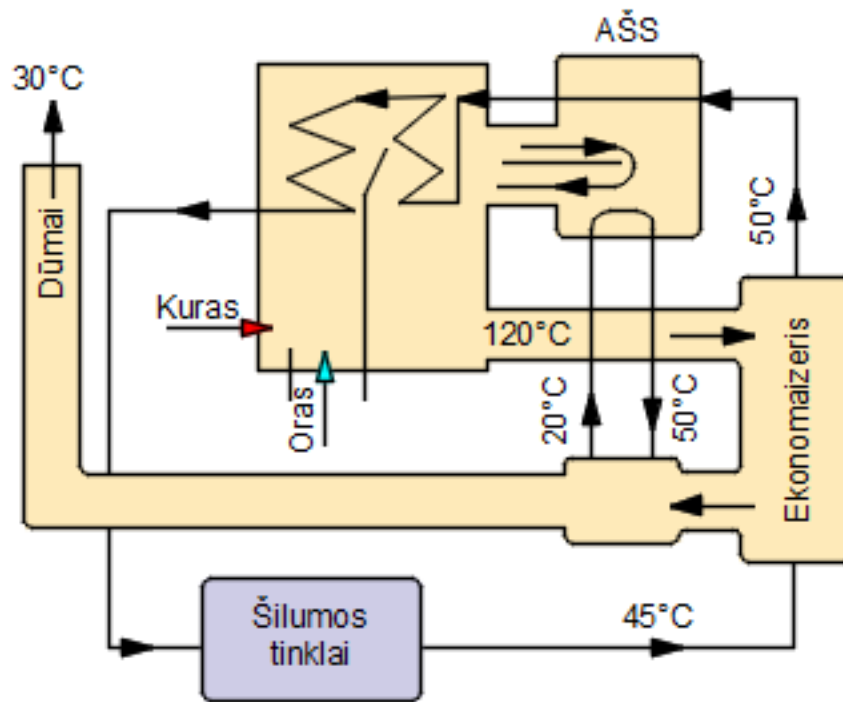
Apibendrinant šį paragrafą galima teigti, kad biokuro jėgainių efektyvumą labiausiai įtakoja drėgmės kiekis esantis kure, kuris neleidžia pasiekti aukštų degimo temperatūrų ir tai įtakoja žemą garo temperatūrą, bei slėgį prieš turbiną.

Kondensacinius ekonomiaizerių technologija leidžia išnaudoti didelę atliekinės (žemo potencialo) šilumos dalį. Tačiau dar beveik tiek pat šios šilumos lieka nepanaudota ir patenka į aplinką per kaminą. Kogeneracinės jėgainės, deginančios šviečiai drožliuotą medieną, susiduria efektyvumo trūkumu, todėl labai svarbu kuo pilniau išnaudoti visą šio kuro energiją.

2.2 Žemo potencialo šilumos atgavimo technologijos

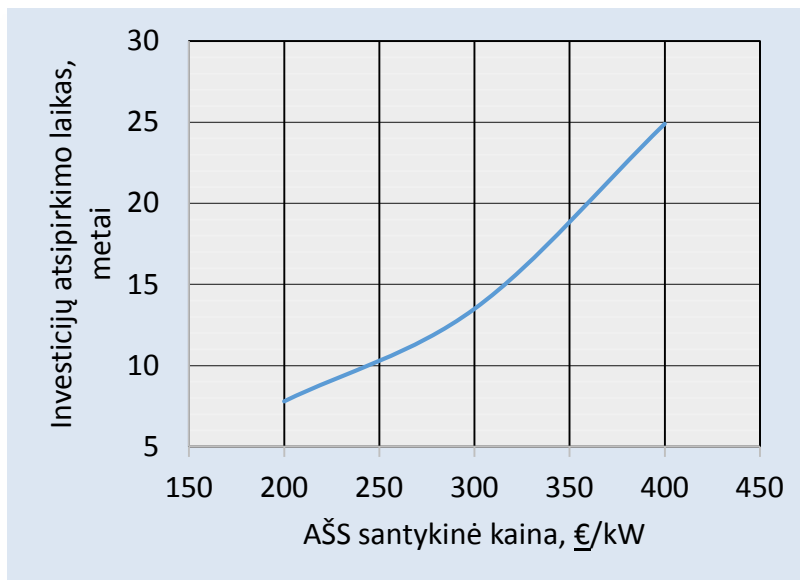
Kalbant apie žemo potencialo šilumos atgavimo technologijas, pirmiausiai minimos šilumos siurblio technologijos. Tai absorbcinius ir kompresorinius šilumos siurblius, kurie savo paskirtimi vienodi, tačiau skiriasi veikimo principu. Jėgainėse didžiuliai šilumos kiekiai pašalinami pro kaminą su dūmais, kurių temperatūra dažnai nesiekia 50⁰C, tačiau šios šilumos panaudojimas neįmanomas, kadangi iš tinklų grįžtančio termofikatinio vandens temperatūra aukštesnė. Norint panaudoti žemo potencialo šilumą, reikalingos technologijos, kurios sugeba transformuoti šią energiją į aukštesnio potencialo šilumą ir be abėjo ji turi būti aukštesnės temperatūros už grįžtančio termofikatinio vandens.

Absorbcinis šilumos siurblys, tai sudėtingas įrenginys, turintis ne vieną šilumos ir masės mainų įrenginį. Pagrindiniai šilumos siurblio aparatai, tai kondensatorius ir garintuvas. Šiuos įrenginius sutinkame ir kompresoriniuose ir absorbciniuose šilumos siurbliuose, nes juose vykdomi analogiški garinimo ir kondensacijos procesai. Absorbcinis šilumos siurblys neturi kompresoriaus – pagrindinio įprastinių siurblių įrenginio. Aukšto slėgio garai čia gaunami vykdant kelių procesų kombinaciją – lakesniojo komponento garų absorbciją skysčiu, šio skysčio suspaudimą siurblio pagalba ir gauto mišinio garinimu (desorbcija), panaudojant aukštesnės temperatūros šilumą.“ Absorbcinio šilumos siurblio sistemoje galime sutikti papildomų šilumos ir masės mainų aparatų, kurių paskirtis didinti šilumos siurblio efektyvumą. Papildomi aparatai fiziškai didina mainų plotą, taip gerindami rektifikacijos bei absorbcijos procesus, tačiau kartu sukelia papildomus hidraulinius nuostolius sistemoje“[16]. Kitas svarbus faktorius šilumos siurblio efektyvumo didinime, tai kuo grynesnis lakesniojo komponento garų gavimas garo generatoriuje. Kuo grynesni lakesniojo komponento garai, tuo efektyvesnis šilumos gavimas kondensatoriuje ir atliekinės šilumos sunaudojimas garintuve.



10 paveikslėlis. Biokuro katilinės su absorbciniu šilumos siurbliu schema

Absorbcinio šilumos siurblio panaudojimas biokuro jėgainėse nėra dažnas reiškinys ir tai nėra vien dėl šio siurblio sudėtingo veikimo principo ir žemo šilumos transformacijos koeficiento. Tai labiau susiję su jo pačio kaina ir eksploatacinėmis išlaidomis. Absorbcinio šilumos siurblio integravimas į biokuro jėgainę gali turėti ne vieną variaciją, kiekviena iš jų gali turėti savo plusų ir minusų priklausomai nuo pačios jėgainės tipo, kuro specifikos ir kitų naudojamų įrenginių. Norint pagrįsti ar paneigti tokio šilumos siurblio ekonominę naudą, reikia atlikti kiekvienam konkrečiam atvejui skaičiavimus ir analizę. Kalbant apie atsipirkimo laiką, dažnu atveju jis bus ilgesnis už šilumos siurblio darbo resursą. Kaip minėta anksčiau absorbcinio siurblio atsipirkimą ilgina jo pačio kaina, kuri skaičiuojama 200-400 €/kW. Taip pat reikalingas nerūdijančio plieno šilumokaitis, kurio pagalba būtų paimama žemo potencialo šiluma iš dūmų, šio šilumokaičio kaina taip pat 200-400 €/kW. Vidutiniškai absorbcinio šilumos siurblio diegimo kaina 600 €/kW. Turint omenyje, kad 10MW šiluminės galios jėgainei būtų reikalingas 2100kW galios absorbcinis šilumos siurblys, kurio šilumos transformavimo koef. būtų tik apie 1.65. Tokio šilumos siurblio kaina viršytų 1.2 mln.€ o tai byloja, kad jo atsipirkimas yra komlikuotas. Kaip matome 11 paveikslėlyje, absorbcinis šilumos siurblys komerciškai būtų patrauklus jei jo kaina neviršytų 200 €/kW.



11 paveikslėlis. 10MW katilinės AŠS investicijų nediskontuotas atsipirkimas priklausomai nuo jų kaštų [16]

Norint, kad absorbcinio šilumos siurblio kaina neviršytų 200 €/kW reikia atsisakyti brangaus nerūdijančio plieno šilumokaičio. Tačiau tai įmanoma tik tada, jei jėgainės dūmų kondensacinį ekonomazerį būtų galima panaudoti ir kaip šilumos siurblio šilumokaitį.

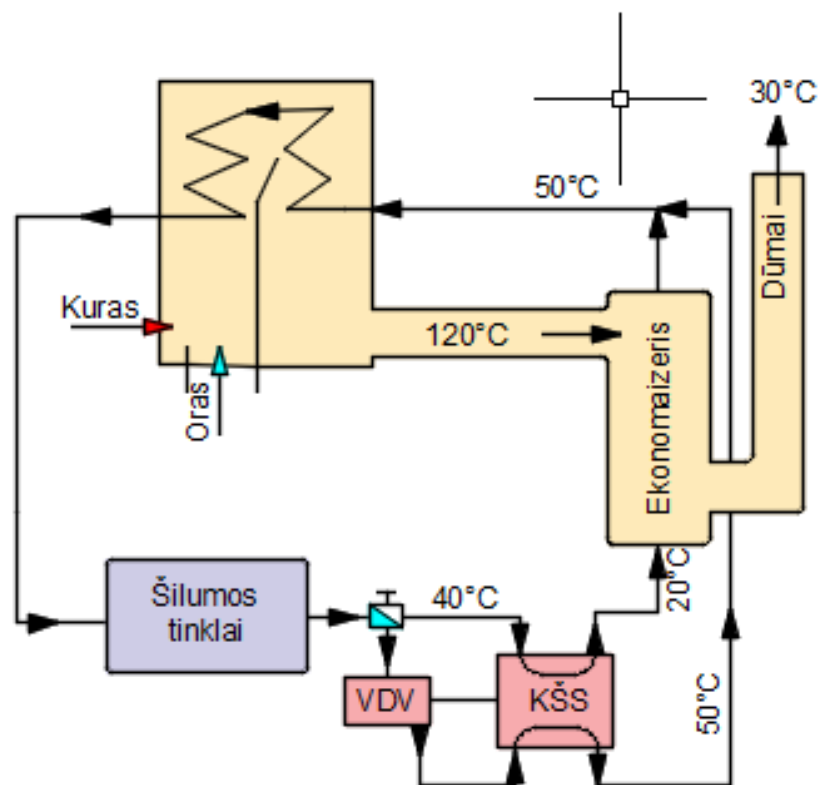
Reziumuodami galime teigti, kad absorbcinis šilumos siurblys gali būti komerciškai patrauklus tik tuo atveju, kai jo kaina neviršija 200 €/kW.

Kompresorinio šilumos siurblio panaudojimas jėgainėse nėra naujiena, kadangi šie siurbliai turi aukštą šilumos transformavimo koef. ir jų pačių kaina nėra labai aukšta. Todėl komercinis šių šilumos siurblių patrauklumas didelis būtent kogeneracinėse jėgainėse, kuriose gaminama sąlyginai pigi elektra. Lyginant reikalingas investicijas kompresoriniui šilumos siurbliui su absorbciniu 10MW šiluminės galios jėgainei, 5 lentelėje matome, kad investicijos kompresoriniui šilumos siurbliui mažesnės bent du kartus. Šilumos transformavimo koef. tarp šių šilumos siurblių taip pat skiriasi kartais, absorbcinio šilumos siurblio transformavimo koef. svyruoja nuo 1.5 iki 1.7, kai tuo tarpu kompresorinio nuo 7 iki 9, priklausomai nuo jo integravimo schemas (geriausiai dirba schemas, kurios pakelia termofikato temperatūrą iki tarpinės, o ne iki galinės temperatūros). Aukštą kompresorinių šilumos siurblių transformavimo koef. lemia nedidelis skirtumas tarp kondensacijos ir virimo temperatūrų.

5 lentelė. KŠS investicinių kaštų sudėtis 10MW katilinei [16]

Investiciniai kaštai	Tūkst.€
Kondensatorius	25,2
Garintuvas	34,3
Kompresorius	33,9
VDV	16,5
Reguliuoj. vožt.	0,4
Armatūra ir kt.	2,5
Viso:	112,8
Sistemos montav.	50,9
Paleidimas –derin.	10,7
Kitos išlaidos (+7%)	
Viso investicijų:	174,4

Kompresorinį šilumos siurblių gali sukurti elektrinis variklis, kaip dažniausiai ir būna, tačiau yra galimybė panaudoti ir vidaus degimo variklį. Variklis sukdamas kompresorių degintų brangų kurą (dizelinas, suskystintos dujos ir pan.), tačiau variklio atliekinę šilumą galima panaudoti grįžtančio iš šiluminių tinklų termofikato pašildymui. Šimto kilovatų galios vidaus degimo variklių efektyvumas siekia 40%, o kartu su šilumos gamyba ir 80%. Nors dideli vidaus degimo varikliai nėra brangūs, nes tai masinės gamybos produktas, tačiau jie reikalauja daugiau priežiūros (tepalų ir jų filtrų keitimas, bei kiti profilaktiniai tvarkymai, didesnė priežiūra).



12 paveikslėlis. Biokuro katilinės schema su integruotu kompresoriniu šilumos siurbliu

Apibendrinant galime paminėti šiuos kompresorinio šilumos siurblio privalumus:

- paprasta siurblio sistema, kurią galima sumontuoti savomis jėgomis;
- šilumos transformacijos koeficientas yra aukštas net įvertinus šilumos/elektros konversijos santykį;
- kompresorių gali sukurti ne tik elektros, bet ir vidaus degimo variklis, kuris yra masinės gamybos produktas ir kainuoja santykinai nedaug;
- vidaus degimo variklio atliekinė šiluma gali būti panaudojama šilumai gaminti;
- vidaus degimo variklio kuro sąnaudos, išsilaikant dabartinėms naftos kainoms, nėra didelės, ypač jei naudojamos suskystintos dujos.

3. KOGENERACINIŲ BIOKURO JĖGAINIŲ PALYGINAMOJI ANALIZĖ

Elektros gamybos ciklo efektyvumas priklauso nuo daugybės faktorių, tokių kaip: ciklo tipo, deginamo kuro rūšies, įrenginių modernumo ir t.t. Elektros energijos gamyboje kaip ir kitose pramonės šakose, stengiamasi iš pradinės žaliavos išgauti kuo įmanoma didesnę ir kokybiškesnę galutinį produktą. Elektros energijos gamyboje pirminis energijos šaltinis – kuras, jo šiluminė vertė, o galutinis produktas elektros energija bei šiluma, tinkanti pastatų šildymui. Kuras elektros gamyboje gali būti naudojamas labai įvairus: skystas kuras, kietas kuras, dujinis kuras. Kiekvienas iš šių kuro turi savo degimo specifiką, jos teigiamas ir neigiamas puses, kurios tiesiogiai įtakoja ciklo efektyvumą.

Šiame skyriuje bus pateikta biokurą deginančių garo ciklo kogeneracinių jėgainių termodinaminė analizė, kuri pavadinta palyginamąja, nes termodinaminiai parametrai yra palyginami su kitu Lietuvoje priimtinu kuru – gamtinėmis dujomis - deginamomis jėgainėmis ir jų pagrindiniais parametrais. Ši palyginamoji analizė pasitarnauja siekiant įvertinti kitą technologiją, kuri yra pristatoma šiame darbe. Ketvirtame šio darbo skyriuje pristatoma nauja biokuro jėgainių šilumos panaudojimo technologija panaudojant masės mainų regeneraciją. Pateikti energetiniai vertinimai byloja, kad ši technologija sąlygoja tolesnę atsinaujinančios biokuro energetikos plėtrą regione, nežiūrint to, kad gamtinės dujos darosi vis patrauklesnis kuras tiek dėl sumažėjusių jo kainų, tiek dėl tokių jėgainių santykinai mažesnių kaštų.

3.1 Biokuro jėgainės garo ciklo termodinaminis efektyvumas ir jo priklausomybė nuo darbo režimo.

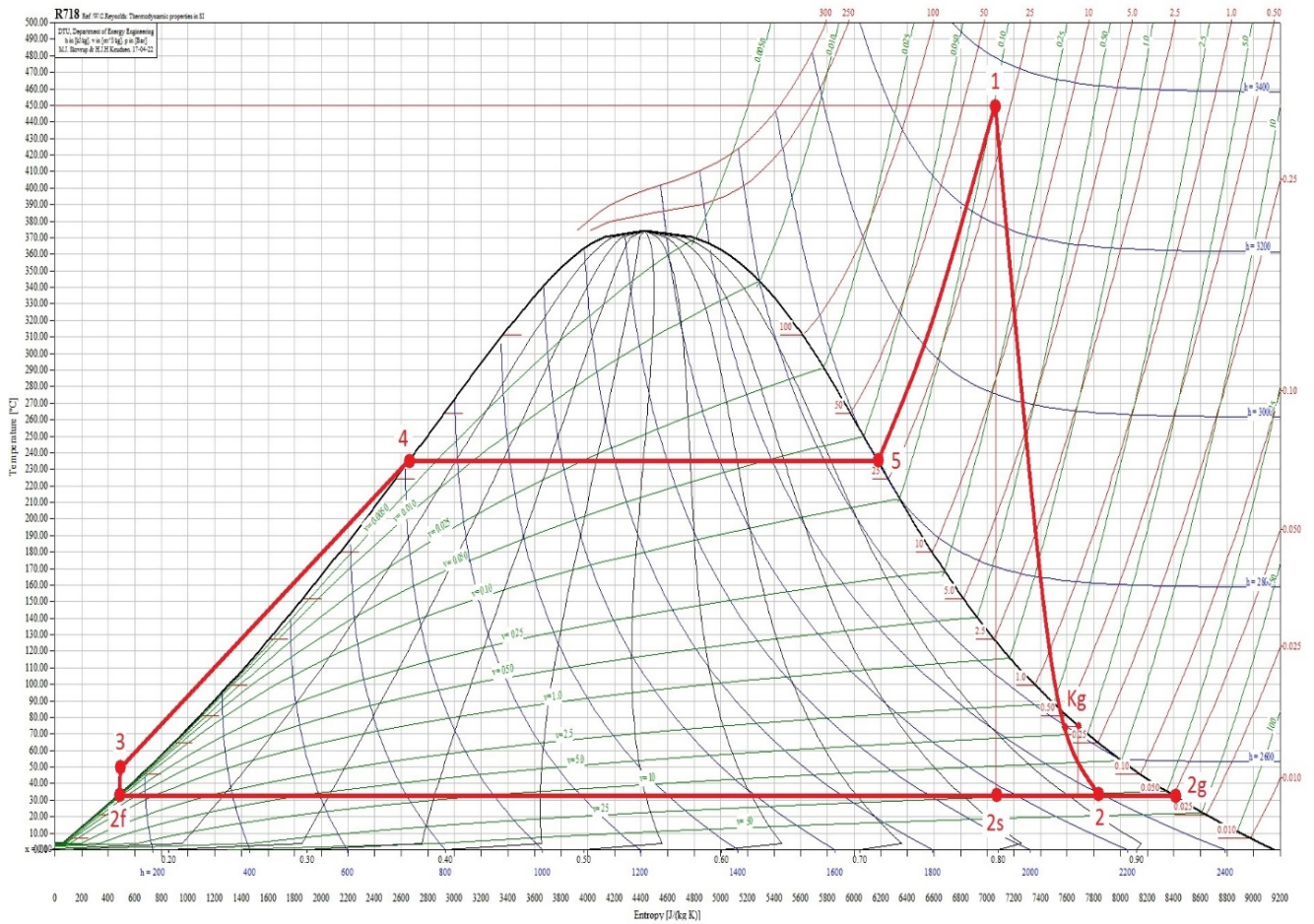
Kaip minėta anksčiau, pagrindiniai parametrai užtikrinantys aukštą ciklo efektyvumą, tai garo slėgis prieš turbiną ir jo temperatūra. Jei jėgainė gamina vien elektrą, jos efektyvumas yra aukštesnis, tačiau ekonomiškai ji duoda mažiau pajamų, nes neparduoda šilumos – pagrindinės biokuro kogeneracinių jėgainių pajamų dalies. Tokios jėgainės dar vadinamos kondensacinėmis, kai garas išplečiamas iki aplinkos temperatūrą atitinkančio vandens garo slėgio (0,05-0,08bar). Jau minėta, kad deginant medieną nepasiekama aukštų garo parametrų – pirmiausiai temperatūros, o po to ir slėgio, nes šį apriboja žemesnė temperatūra. Žinoma, kad vien didinant slėgį, susiduriama su turbinos darbo patikimumu, kadangi galines mentis veikia stipresnė erozija. Eroziją sukelia per didelis vandens kondensato lašelių dydis, atsirandantis būtent dėl per aukšto slėgio. Šią problemą galima spręsti tik keliant garo temperatūrą prieš turbiną, kad yra problematiška naudojant drėgną medžio drožlių kurą.

Pagrindiniai parametrai reikalingi ciklo skaičiavimui pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Biokuro jėgainės parametrai kondensacinio darbo režime

Turbinos η_{iz} , %	80
Garų slėgis prieš turbiną p_1 , bar	32
Garų temperatūra t_1 , °C	450
Drėgmės kiekis po turbinos gd , %	10
Vandens siurblio η_s , %	80
Kondensacinis slėgis p_2 , bar	0.05
Vandens temp. po kondensatoriaus t_2 , °C	33

Turint temperatūrą 450 °C ir slėgį 32 bar apskaičiuojamas ciklo termodinaminis efektyvumo koeficientas η_{iz} ir atliekamas patikrinamasis skaičiavimas ar drėgmės kiekis neviršija 10 procentų po turbinos.



13 paveikslėlis. Garo ciklo kondensacinio režimo T-s diagrama

Naudodami CoolPack programą randame ciklo termodinaminis parametrus:

$h_1 = 3342 \text{ kJ/kg}$; $s_1 = s_{2s} = 7053 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; $h_{2f} = 138 \text{ kJ/kg}$; $s_{2f} = 478 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; $h_{2g} = 2561 \text{ kJ/kg}$; $s_{2g} = 8391 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; $h_{1-g} = 2423 \text{ kJ/kg}$.

Apskaičiuojama garo entalpija h_{2s} :

$$h_{2s} = h_{2f} + (h_{2g} - h_{2f}) \frac{s_{2s} - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} = 138 + (2561 - 138) \frac{7053 - 478}{8391 - 478} = 2151 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

čia $\frac{s_{2s} - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}}$ - parodo garo po turbinos sausumo laipsnį. Skaičiavimams tęsti jis turi būti

mažesnis, nei 90 proc. Matoma, kad 83 proc. sausumo laipsnis pakankamas turbinos darbui.

Pagal balanso lygtį randama, kad garo entalpija po turbinos:

$$h_2 = h_1 - (h_1 - h_{2s}) \cdot \eta_{iz} = 3342 - (3342 - 2151) \cdot 0,8 = 2389 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (2)$$

$$h_3 = h_{2f} + v_{2f} \cdot \frac{\Delta p}{\eta_s} = 138 \cdot 10^3 + 0,001 \cdot \frac{(32 \cdot 10^5 - 0,05 \cdot 10^5)}{0,8} = \frac{142 \text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3)$$

Kondensacinio ciklo termodinaminis efektyvumo koeficientas:

$$\eta_T = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2f})}{h_1 - h_3} \cdot 100 = \frac{(3342 - 2388) - (142 - 138)}{3342 - 142} \cdot 100 = 29,65 \% \quad (4)$$

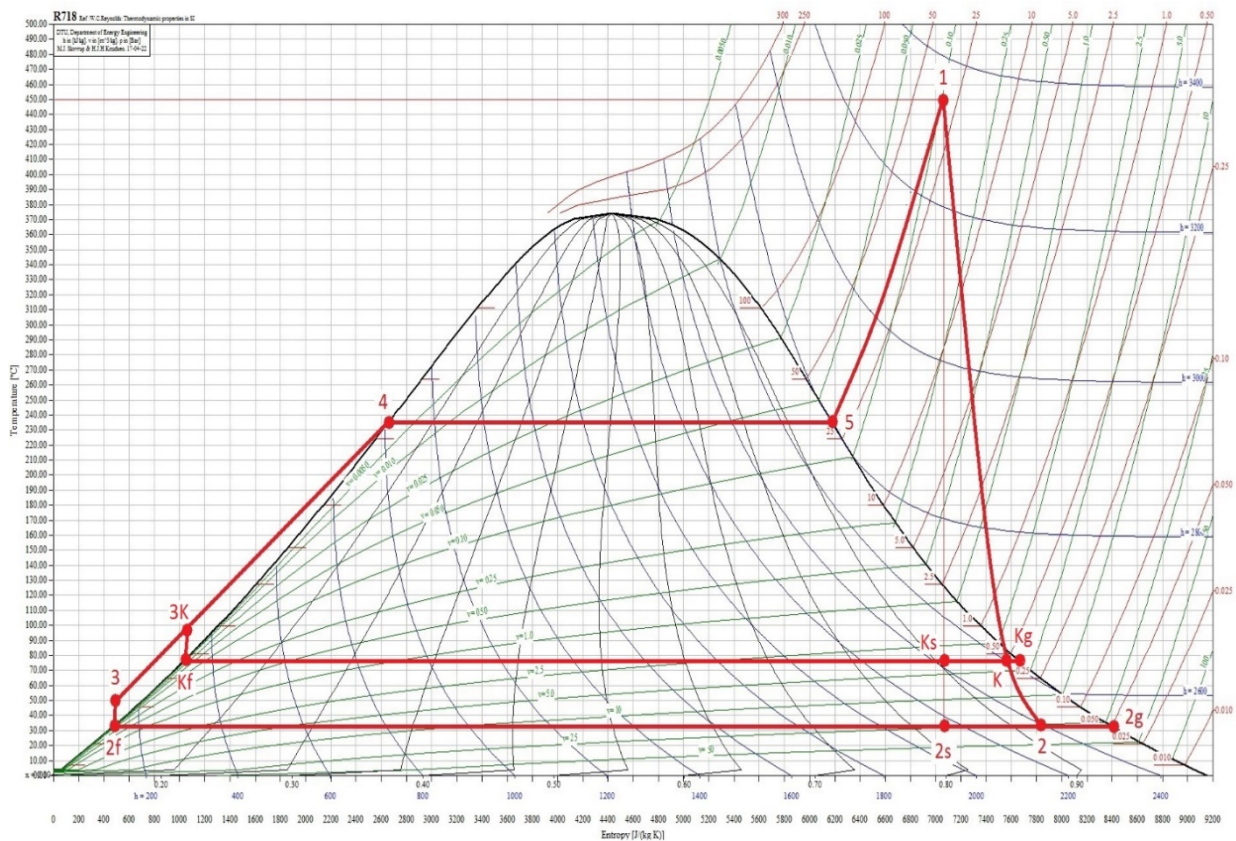
Kogeneracinių biokuro jėginių termodinaminio ciklo efektyvumas žemesnis, nei kondensacinio, kadangi dalis aukštesnio slėgio garo „nuimama“ iš turbinos termofikato ruošimui. Norint pasiekti kuo aukštesnį ciklo efektyvumą, garas turbinoje turi būti išplėstas iki mažesnio slėgio, todėl termofikacinį vandenį tikslinga šildyti su kuo mažesniais nepilnos rekuperacijos nuostoliais. Paprastai paduodamo garo į kondensatorių slėgis būna apie 0.4 bar, kas atitinka 76°C temperatūrą. Tokios temperatūros dažnai nepakanka, todėl reikalingos papildomos technologijos šią temperatūrą padidinti, ypač šalčiausiais šildymo sezono mėnesiais.

Pagrindiniai parametrai reikalingi kogeneracinio ciklo skaičiavimui, pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Biokuro jėgaines parametrai kogeneracinio darbo režime

Turbinos η_{iz} , %	80
Garo slėgis prieš turbiną p_1 , bar	32
Garo temperatūra t_1 , C	450
Kogeneracinio garo slėgis P_k , bar	0.40
Kogeneracinio garo temperatūra. T_k , °C	76
Drėgmės kiekis po turbinos gd , %	10
Vandens siurblio η_s , %	80

Turint temperatūrą 450 °C ir slėgį 32 bar apskaičiuojamas ciklo termodinaminis efektyvumo koeficientas η_{iz} ir atliekamas patikrinamasis skaičiavimas ar drėgmės kiekis neviršija 10 procentų po turbinos.



14 paveikslėlis. Garo ciklo kogeneracinio režimo T-s diagrama

Naudodami CoolPack programą randame ciklo termodinaminius parametrus:

$$h_1 = 3342 \text{ kJ/kg}; s_1 = s_{2s} = 7053 \text{ J/kg} \cdot \text{K}; h_{kf} = 138 \text{ kJ/kg}; s_{kf} = 1028 \text{ J/kg} \cdot \text{K}; h_{kg} = 2636 \text{ kJ/kg}; s_{kg} = 7667 \text{ J/kg} \cdot \text{K}; h_{1-g} = 2318 \text{ kJ/kg}.$$

Kitus parametrus apskaičiuojame analogiškai prieš tai skaičiuotam režimui.

$$h_{ks} = h_{kf} + (h_{kg} - h_{kf}) \frac{s_{ks} - s_{kf}}{s_{kg} - s_{kf}} = 138 + (2636 - 138) \frac{7053 - 1028}{7667 - 1028} = 2422 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

Pagal balanso lygtį randama, kad garo entalpija po turbinos:

$$h_k = h_1 - (h_1 - h_{ks}) \cdot \eta_{iz} = 3342 - (3342 - 2422) \cdot 0,8 = 260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (2)$$

$$h_{3k} = h_{kf} + v_{kf} \cdot \frac{\Delta p}{\eta_s} = 138 \cdot 10^3 + 0,001 \cdot \frac{(32 \cdot 10^5 - 0,4 \cdot 10^5)}{0,8} = 322 \text{ kJ/kg} \quad (3)$$

Kondensacinio ciklo termodinaminis efektyvumo koeficientas:

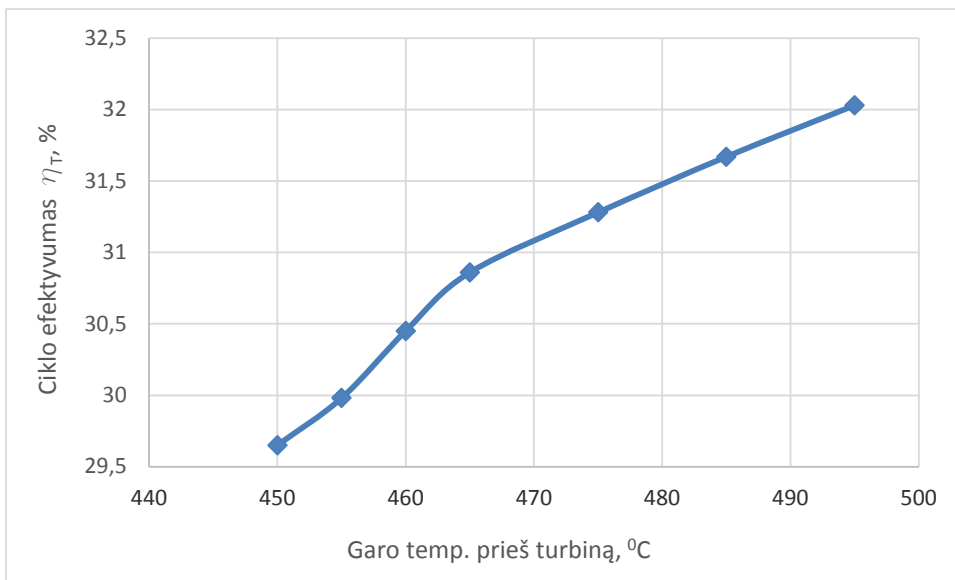
$$\eta_T = \frac{(h_1 - h_k) - (h_{3k} - h_{kf})}{h_1 - h_{3k}} \cdot 100 = \frac{(3342 - 2606) - (322 - 318)}{3342 - 322} \cdot 100 = 24,24 \% \quad (4)$$

3.2 Biokuro jėginių efektyvumo analizė ir jos palyginimas su dujomis kūrenamomis jėginėmis

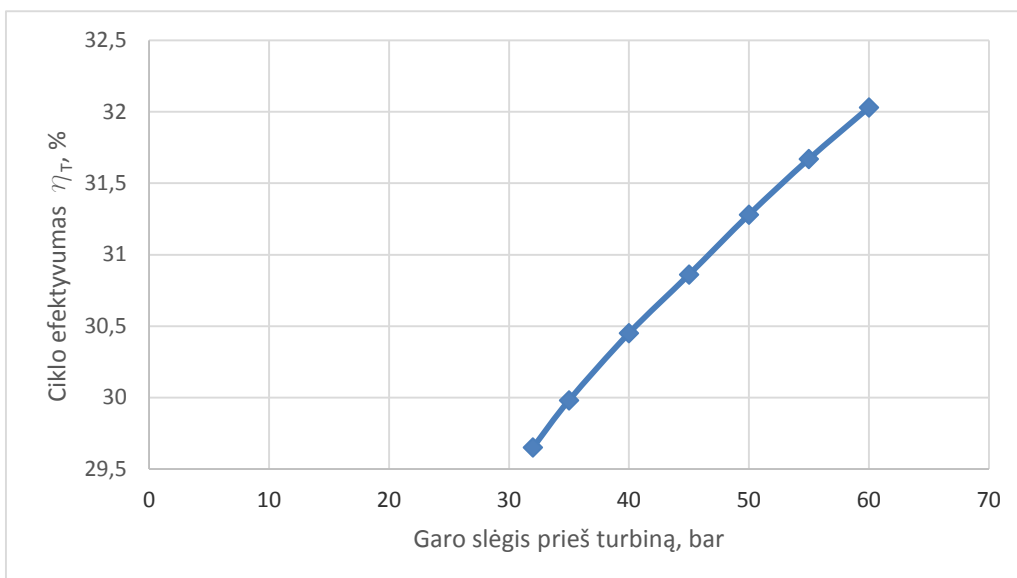
Ciklo termodinaminis naudingumo koef. η_T apskaičiuojamas pagal 3.1 skyriaus metodiką. Skaičiavimai atliekami esant skirtingiems garo parametrams prieš turbiną, parametrai pateikti 8 lentelėje. Kiti skaičiavimams reikalingi parametrai randami 6 lentelėje.

8 lentelė. Biokuro jėginės parametrai ir naudingumo koef. kondensacinio darbo režime

Parametrai prieš turbinę		Naud. Koef. η_T , %	Drėgmės kiekis, %	Turbinos naudingumo koef. η_{iz} , %
Slėgis, bar	Temperatūra, °C			
32	450	29.65	83.08	0.8
35	455	29.98	82.71	
40	460	30.45	82.04	
45	465	30.86	81.46	
50	475	31.28	81.16	
55	485	31.67	80.93	
60	495	32.03	80.74	



1 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo coef. η_T priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną

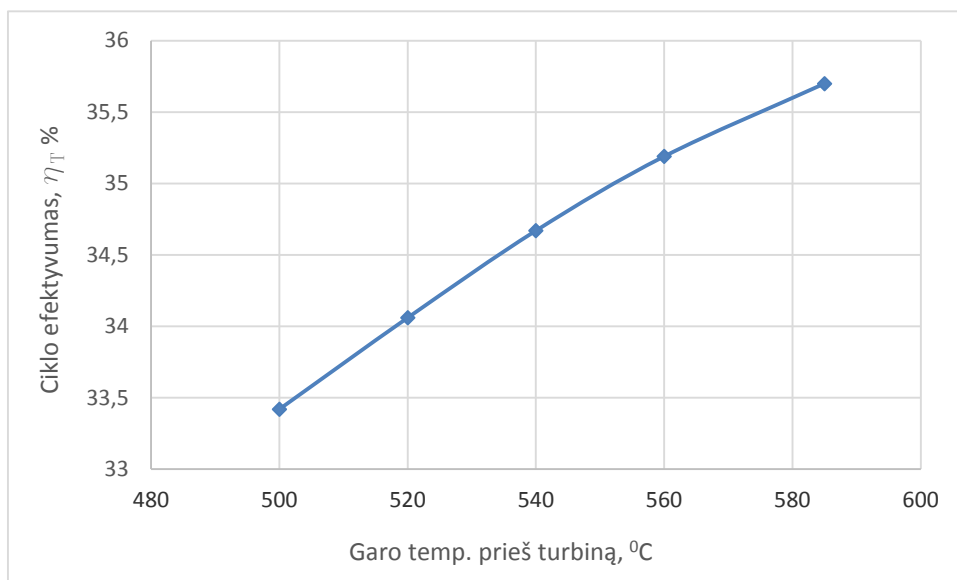


2 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo coef. η_T priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną

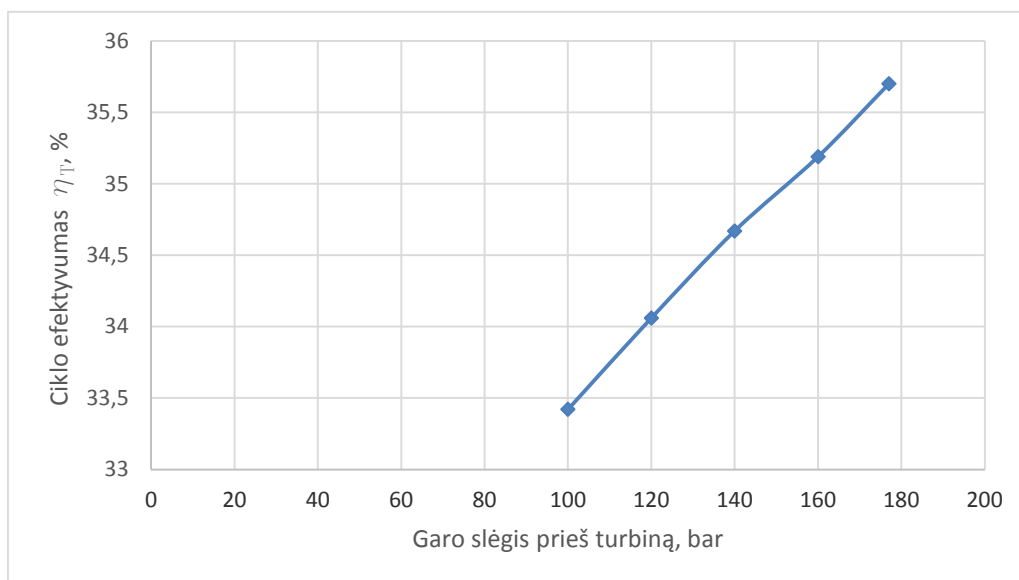
Žemiau pateikiami skaičiavimai ir analizė atitinkamoms garo ciklo jėgainėms, kurios naudoja gamtines dujas. Tokių jėgainių efektyvumas yra didesnis, jų kaina yra mažesnė, tačiau kuro kainos dedamoji sudaro 2-2,5 karto didesnę dalį produkcijos savikainoje. Skaičiavimai atliekami esant skirtingiems garo parametrams prieš turbiną, parametrai pateikti 9 lentelėje. Kiti skaičiavimams reikalingi parametrai randami 6 lentelėje.

9 lentelė. Dujų jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kondensacinio darbo režime

Parametrai prieš turbiną		Naud. Koef. η_T , %	Drėgmės kiekis, %	Turbinos naudingumo koef. η_{IZ} , %
Slėgis, bar	Temperatūra, °C			
100	500	33.42	77.35	0.8
120	520	34.06	76.84	0.8
140	540	34.67	76.5	0.8
160	560	35.19	76.31	0.8
177	585	35.7	76.54	0.8



3 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną



4 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną

Biokuro jėgainių garo slėgio parametrai prieš turbiną beveik tris kartus žemesni (biokuro jėgainės garo slėgis prieš turbiną 60bar, dujų jėgainės 177bar). Garo slėgis tiesiogiai veikia elektros energijos gamybos apimtį, nes kuo aukštesnis garo slėgis prieš turbiną, tuo daugiau gaunama mechaninės energijos, kuri paverčiama elektros energija. 8 ir 9 lentelėse pateikti termodinaminiai

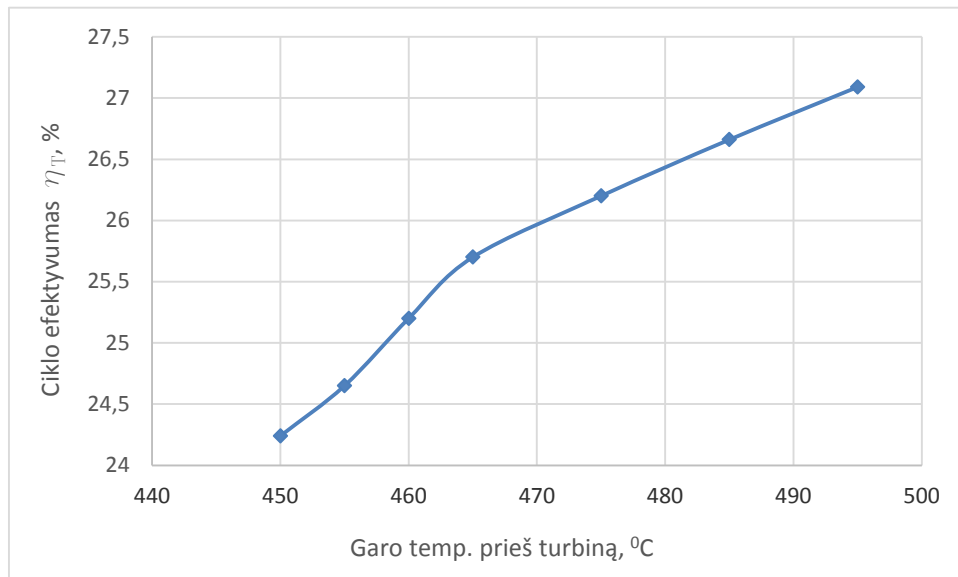
efektyvumai η_T biokuro ir dujomis kurenamų jėgainių skiriasi vos keliais procentais, tačiau net 1% galutiniame jėgainės pajamų balanse duoda akivaizdžius pokyčius.

3.3 Kogeneracinių režimų palyginimas.

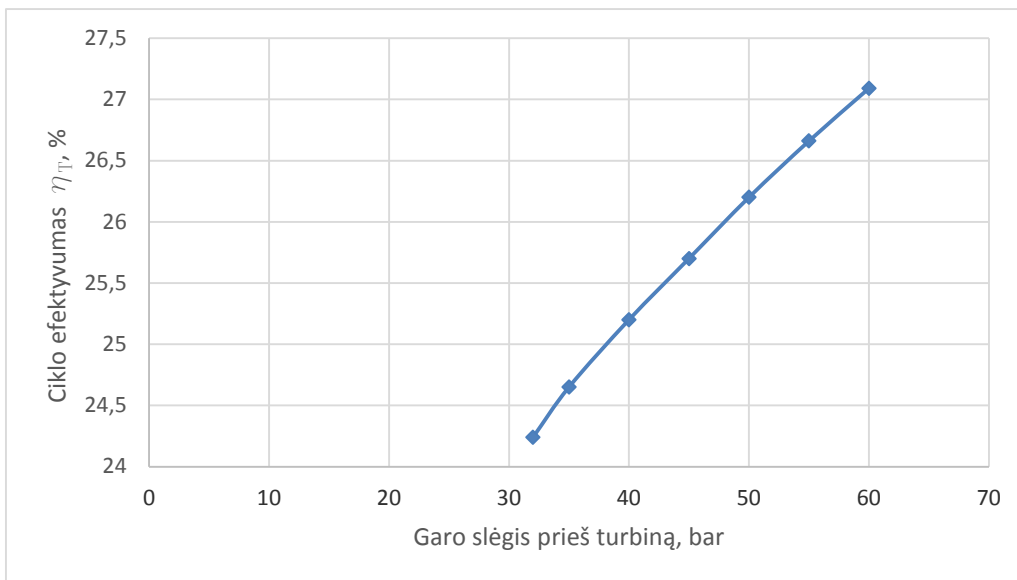
Ciklo termodinaminis naudingumo koef. η_{tv} apskaičiuojamas pagal 3.1 skyriaus metodiką. Skaičiavimai atliekami esant skirtingiems garo parametrams prieš turbiną, esant skirtingiems turbinos naudingumo koef. ir kogeneracinio garo slėgiams. Parametrai pateikti 10...13 lentelėse. Kiti skaičiavimams reikalingi parametrai randami 7 lentelėje.

10 lentelė. Biokuro jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kogeneracinio darbo režime

Parametrai prieš turbiną		Naud. Koef. Ntv η_T , %	Drėgmės kiekis, %	Turbinos naudingumo koef. η_{iz} , %
Slėgis, bar	Temperatūra, °C			
32	450	24.24	90.75	0.8
35	455	24.65	90.3	
40	460	25.2	89.5	
45	465	25.7	88.82	
50	475	26.2	88.46	
55	485	26.66	88.18	
60	495	27.09	87.95	



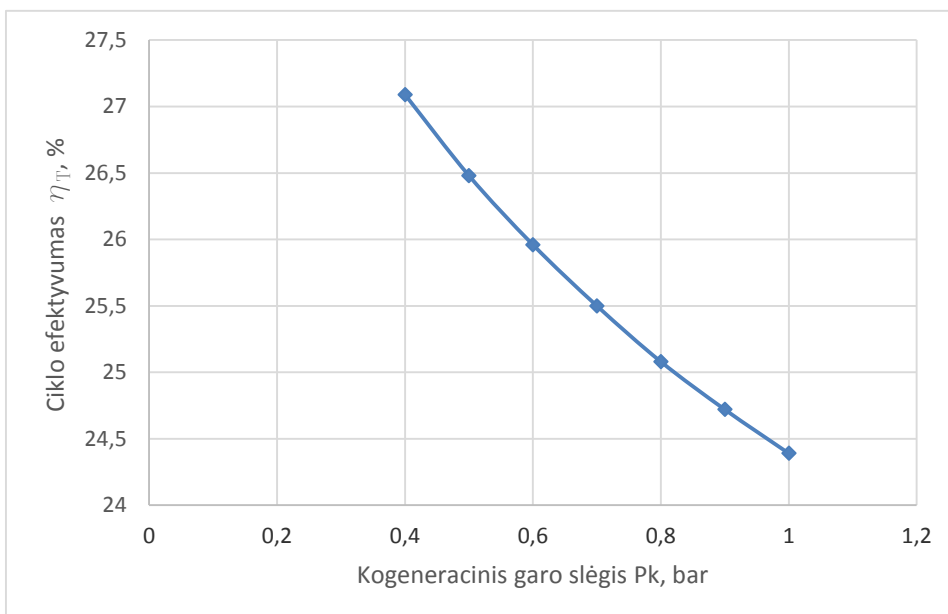
5 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną



6 grafikas. Biokuro jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną

11 lentelė. Biokuro kogeneracinės jėgainės naudingumo koef. esant skirtingiems kogeneraciniams slėgiams Pk

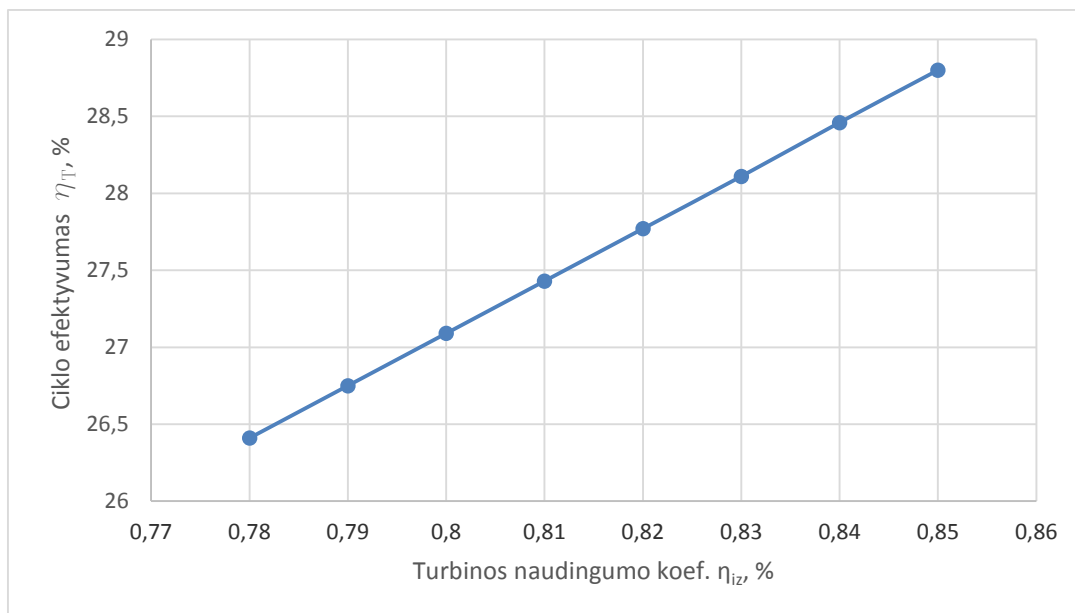
Parametrai prieš turbiną		Naud. koef. η_T , %	Kogeneracinis garo slėgis Pk, bar	Kogeneracinė garo temp. Tk, °C	Turbinos naudingumo koef. η_{iz} , %
Slėgis, bar	Temperatūra, °C				
60	495	24.39	1	99.7	0.8
		24.72	0.9	96.7	
		25.08	0.8	93.5	
		25.5	0.7	89.9	
		25.96	0.6	85.9	
		26.48	0.5	81.3	
		27.09	0.4	76	



7 grafikas. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo kogeneracinio garo slėgio Pk

12 lentelė. Dujų jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kogeneracinio darbo režime

Parametrai prieš turbiną		Naud. Koef. η_T %	Kogeneracinis garo slėgis P_k , bar	Turbinos naudingumo koef. η_{iz} , %
Slėgis, bar	Temperatūra, °C			
60	495	26.41	0.4	0.78
60	495	26.75	0.4	0.79
60	495	27.09	0.4	0.8
60	495	27.43	0.4	0.81
60	495	27.77	0.4	0.82
60	495	28.11	0.4	0.83
60	495	28.46	0.4	0.84
60	495	28.8	0.4	0.85



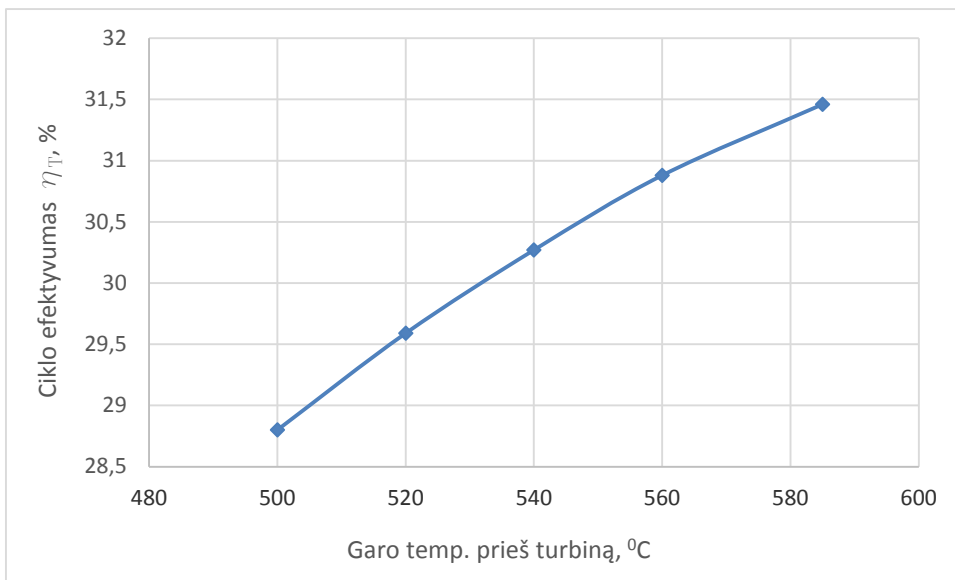
8 grafikas. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo turbinos naudingumo koef. η_{iz}

Toliau pateikiami skaičiavimai ir analizė dujomis kūrenamų jėgainių, kurios dirba atitinkamu kogeneraciniu (kaip ir biokuro jėgainių) režimu

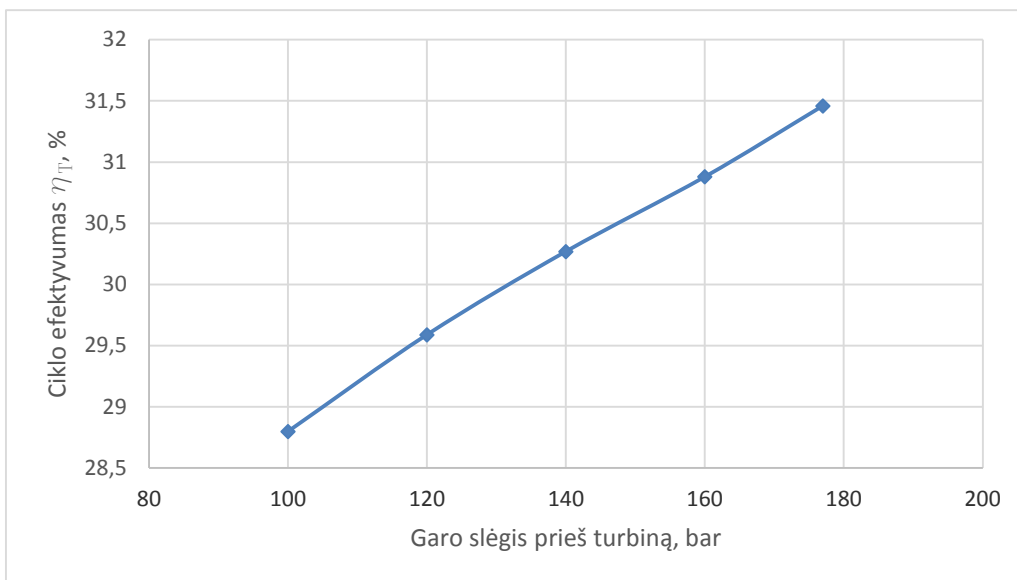
Ciklo termodinaminis naudingumo koef. η_T apskaičiuojamas pagal 3.1 skyriaus metodiką. Skaičiavimai atliekami esant skirtingiems garo parametrams prieš turbiną. Parametrai pateikti 13 lentelėje. Kiti skaičiavimams reikalingi parametrai randami 7 lentelėje.

13 lentelė. Dujų jėgainės parametrai ir naudingumo koef. kogeneracinio darbo režime.

Parametrai prieš turbiną		Naud. Koef. η_T %	Drėgmės kiekis, %	Turbinos naudingumo koef. η_{iz} , %
Slėgis, bar	Temperatūra, °C			
100	500	28.8	83.92	0.8
120	520	29.59	83.3	0.8
140	540	30.27	82.91	0.8
160	560	30.88	82.67	0.8
177	585	31.46	82.95	0.8



9 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo garo temp. prieš turbiną



10 grafikas. Dujų jėgainės termodinaminio naudingumo koef. η_T priklausomybė nuo garo slėgio prieš turbiną

Dujomis kūrenamos jėgainės, termodinaminio ciklo efektyvumu akivaizdžiai pranoksta biokuro jėgainės, kurios nepasiekia aukštų garo parametrų. Kaip matome 10 lentelėje šiuolaikinės biokuro jėgainės pasiekia 32...60 bar garo slėgį atitinkamai garo temperatūrą 450...495°C, kai tuo tarpu dujomis kūrenamos jėgainės pasiekia 100...177 bar garo slėgį ir 500...585°C (13 lentelė). Kuo aukštesni garo prieš turbiną parametrai tuo termodinaminio ciklo efektyvumas aukštesnis. Kai jėgainės dirba maksimaliu režimu t.y biokuro jėgainės garo parametrai prieš turbiną 60 bar ir temperatūra 495°C ciklo naudingumo koef. kondensaciniu režimu 32.03%, kogeneraciniu 27.09%. Dujų jėgainės 177 bar ir 585°C ciklo naudingumo koef. kondensaciniu režimu 35.7%, kogeneraciniu 31.46%. Svarbu pabrėžti, kad garo temperatūra ir slėgis po turbinos kogeneraciniams ir

kondensaciniams režimams, skaičiuojant ciklo termodinaminį efektyvumą buvo priimti vienodi pagal atitinkamą režimą (žiūrėti 6-7 lenteles).

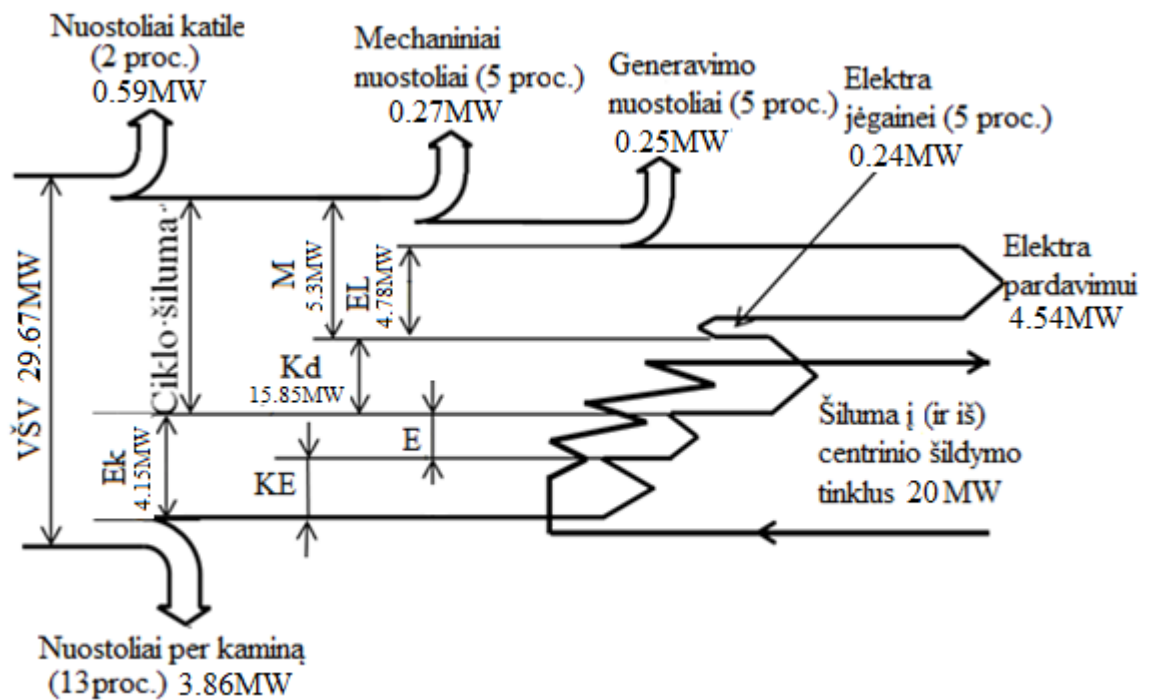
3.4 Jėgainės energetinė ir ekonominė analizė

Energetinė analizė atliekama siekiant paskaičiuoti elektros ir šilumos apimtį bei suvartojamą energiją. Priimama, kad jėgainės šiluminis galingumas 20 MW žiemą, o vasarą – 5 MW. Analizei naudojami 3.1 skyriaus duomenys iš 7 lentelės.

Analizei reikia žinoti jėgainės šilumos taip pat ir elektros nuostolius bei jos poreikį pačiai jėgainei. Energijos nuostolius sudaro konversijos ir elektros suvartojimas įmonėje. Konversijos nuostoliai didesni didesnėse jėgainėse nei mažesnėse. Analizuojamos jėgainės nuostoliai susidaro:

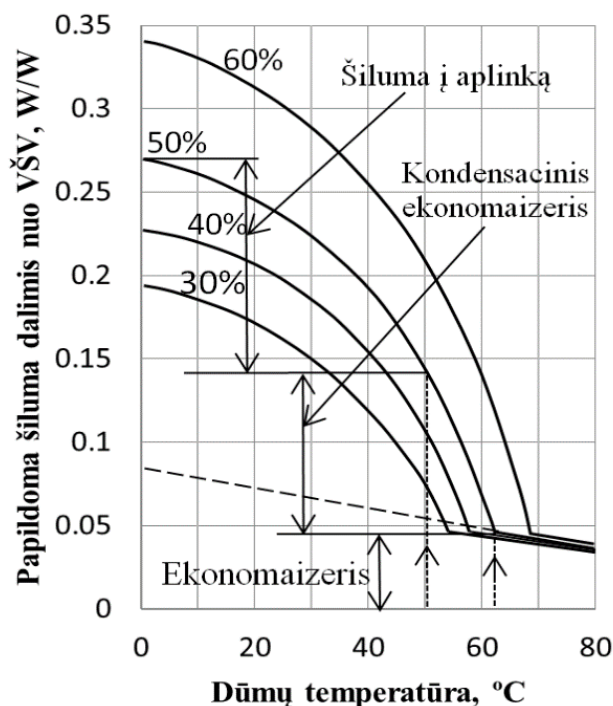
1. Deginant biokurą (šiluminiai nuostoliai). Nuostoliai atsiranda dėl nevisiško sudegimo, šalinamų pelenų, šiluminių nuostolių (degimo kameros). Visi šie nuostoliai sudaro 1-3 proc. Priimama, kad 2 proc. sudaro degimo nuostolius.
2. Mechaniniai nuostoliai (konversijos nuostoliai). Šie nuostoliai atsiranda turbinos, rekuperatoriaus ir generatoriaus guoliuose. Nuostoliai sudaro ne daugiau nei 5 proc.
3. Elektriniai nuostoliai (konversijos nuostoliai). Nuostoliai apvijose, magnetiniai nuostoliai statoriuje, sinchronizavimo nuostoliai. Nuostoliai sudaro apie 5 proc.
4. Kiti nuostoliai susiję su ciklo šiluminiais nuostoliais, kai dirbama kogeneraciniu ciklu. 5 proc. elektros sunaudojama savo reikmėms.

Sudaroma jėgainės termodinaminė analizės schema žiemos periodui, kurioje pateikiami pagrindiniai parametrai MW arba MWh. Kadangi panaudojamas ekonomizeris sunaudojamas šilumos kiekis MW skaičiuojamas sudėtingiau, nes panaudojama ženkli slaptosios šilumos dalis, kuri nevertinama perkant kurą (kuro kaina yra vertinama pagal žemutinę šiluminę vertę, kurioje minėtos šilumos dalies nėra). Todėl analizė atliekama viršutinės kuro šiluminės atžvilgiu, tačiau priimama, kad vieneta arba 100% šiluminės vertės sudaro žemutinę vertę. Sudaromos 3 tiesinės algebrinės lygtys, kurių sistemos sprendimas duoda sunaudojamos šilumos galią, kai užduota projektinė jėgainės šiluminė galia, pavyzdžiui 20MW. Įvertinami visi jėgainės nuostoliai, tačiau priimama, kad ekonomizeriuose atgaunama ir termofikatui šildyti panaudojama 4,15MW šilumos galia (žr. 15 pav.).



15 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema šildymo sezonui [16]

Schemoje naudojami dydžiai: VŠV – kuro viršutinė šiluminė vertė; M – mechaninė jėgainės galia, gauta termodinaminės analizės būdu (nevertinant nuostolių); EL – elektrinė jėgainės galia įvertinus konversijos nuostolius (ją sudaro elektros galia skirta pardavimui ir vidaus vartojimui skirta galia); Kd – šiluma, kuri gaunama vykdant garo ciklą (tai šiluma jėgainės kondensatoriuje); E – šiluminė galia, gaunama aukštos temperatūros (sausajame) ekonomizaizeryje; KE – kondensacinio ekonomizaizerio šiluminė galia; Ek- abiejų ekonomizaizerių šiluminė galia ($E_k = KE + E$);



16 paveikslėlis. Papildomos šilumos dalis nuo VŠV priklausomai nuo dūmų ataušinimo temperatūros [1]

Pagal schemą matoma, kad jėgainės termodinaminis η_T :

$$\eta_T = \frac{M}{M + Kd}; \quad (5)$$

čia: M- mechaninė galia; Kd – kondensatoriuje gaunama šiluma.

Šilumos galia Q (20 MW) susideda:

$$Q = Kd + E + KE = Kd + Ek; \quad (6)$$

Viršutinės šilumos vertės galia:

$$V\check{S}V = \frac{M + Q}{\eta_K \cdot \eta_D}; \quad (7)$$

3 lygtis nuostolių dėl degimo koeficientas, kurį priimame 2 proc. tai η_D yra 0,98. η_K – šilumos nuostolių per kaminą koeficientas. Jį randame remiantis 16 paveikslėliu: matome, kad esant 50 proc. drėgnumo medienai, esant išeinančių iš ekonomazerio 50 °C dūmų temperatūrai papildomai atgauname 14 proc. arba 0,14 šilumos nuo viršutinės šiluminės vertės; tuo tarpu iš viso galėtume atgauti 27 proc. kas reiškia, kad nuostoliai per kaminą sudaro $27 - 14 = 13\%$. taigi, η_K lygu 0,87.

$$\eta_P = \frac{E_k}{V\check{S}V}; \quad (8)$$

8 lygtį gauname žinodami, kad papildomos šilumos gautos ekonomazeriye dalis sudaro η_P lygu 0,14 nuo VŠV (16 pav.). Šis koeficientas įvertina papildomos šilumos galią.

Išspręsdami šią lygčių sistemą išreiškiame VŠV galią, kai žinomi dydžiai yra: $Q = 20MW$; $\eta_T = 0,251$; $\eta_D = 0,98$; $\eta_P = 0,14$; ir $\eta_K = 0,87$; Gaunama 9 lygtis

$$V\check{S}V = \frac{Q}{\eta_K \cdot \eta_D(1 - \eta_T) + \eta_T \cdot \eta_P} = \frac{20}{0,87 \cdot 0,98(1 - 0,251) + 0,251 \cdot 0,14} = 29,67 \text{ MW} \quad (9)$$

PASTABA: vasarą antroji algebrinė lygtis negalioja, nes ekonomazeris nedirba.

Su kuro tiekėjais atsiskaitoma pagal ŽŠV žemutinę šiluminę vertę. Iš VŠV/ŽŠV santykio pagal medienos drėgnumo priklausomybę randame, kad 50 proc. drėgnumo kurui ŽŠV sudaro 0,82 nuo VŠV.

$$\check{Z}\check{S}V = V\check{S}V \cdot 0,82 = 29,67 \cdot 0,82 = 24,33 \text{ MW} \quad (10)$$

Pagal 4 lygtį randame ekonomazeriuose gaunamą galią:

$$E_k = \eta_P \cdot V\check{S}V = 0,14 \cdot 29,67 = 4,15 \text{ MW} \quad (11)$$

Pagal 2 lygtį gauname kondensatoriuje gaunamą galią:

$$Kd = Q - E_k = 20 - 4,15 = 15,85 \text{ MW} \quad (12)$$

Pagal 7 lygtį gauname mechaninę galią:

$$M = V\check{S}V \cdot \eta_K \cdot \eta_D - Q = 29,67 \cdot 0,87 \cdot 0,98 - 20 = 5,3 \text{ MW} \quad (13)$$

Jėgainės elektrinių ir konversijos nuostolių skaičiavimas

Mechaninės galios nuostoliai yra 5 proc.:

$$W_M = M \cdot 0,05 = 5,3 \cdot 0,05 = 0,265 \text{ MW} \quad (14)$$

$$W_G = (M - 0,265) \cdot 0,05 = (5,3 - 0,265) \cdot 0,05 = 0,25 \text{ MW} \quad (15)$$

Elektros nuostoliai dėl elektros poreikio pačiai jėgainei

$$W_E = (M - 0,265 - 0,25) \cdot 0,05 = (5,3 - 0,265 - 0,25) \cdot 0,05 = 0,24 \text{ MW} \quad (16)$$

Elektra pardavimui:

$$W_P = M - 0,265 - 0,25 - 0,24 = 5,3 - 0,265 - 0,25 - 0,24 = 4,54 \text{ MW} \quad (17)$$

14 lentelė. Energetinės analizės metu gauti dydžiai (šildymo sezonas)

Ekonomaizeriuose gaunama papildoma šilumos galia	4,15 MW
Kogeneracinio ciklo šilumos galia kondensatoriuje	15,85 MW
Ciklo mechaninio darbo galia	5,3 MW
Mechaninio darbo nuostoliai (5%)	0,265 MW
Konversijos į elektrą nuostoliai (5%)	0,25 MW
Jėgainės elektrinė galia	4,78 MW
Elektros galia jėgainės reikmėms (5%)	0,24 MW
Elektros galia į tinklus (pardavimui)	4,54 MW
Šilumos nuostoliai į aplinką per kamina	3,86 MW
Šilumos nuostoliai degimo kameroje	0,59 MW
Jėgainės šiluminė galia pagal ŽŠV	24,33 MW

Kogeneracinės biokuro jėgainės ekonomika šildymo sezono metu.

Jėgainės pajamas sudaro šilumos ir elektros pardavimas, išlaidos:

1. Išlaidos kapitalo grąžai;
2. Išlaidos kurui;
3. Gamybos išlaidos (savoms reikmėms reikalingos išlaidos).

Pagrindinė išlaidų dalis – kapitalo grąža, kuri priklauso nuo paskolos dydžio, paskolos ilgio metais ir palūkanų normos. Nagrinėjami du variantai. Šiuo atveju jėgainės pelningumas (rentabilumo koeficientas) bus neaukštas, nes rinka nustato ir šilumos ir elektros kainas. Kita vertus jėgainė nauja, efektyvesnė ir papildomai gamina elektrą. Tokiu atveju, atsipirkimo laikotarpį projektuojame visam jėgainės resursui, kurie būtų apie 20-40 metų. Priimkime, kad šis laikotarpis – 25 metų. Tokiu atveju paskolos ir palūkanų suma daliname į 25 lygias dalis. Tai suma, kurią kasmet metų pabaigoje sumokame kreditoriams.

Priimkime, kad jėgainės 1 kW elektros kapitalo kaštai 4000€ Visos jėgainės kaina yra $4,54 \cdot 4000 = 18,16$ mln. €. Pusę šios sumos skolinamės pirmais metais, kurių pabaigoje sumokame

7 proc. nuo tos sumos, tai yra 0,635 mln. € Antraisiais metais sumokama du kartus tiek 1,271 mln. € Viso per statybos laikotarpį sumokama 1,90 mln. € o bendra paskola išauga iki 20,06 mln. € vadinasi, kas metai bankui turime gražinti 0,80 mln. € paskolos.

Vidutinė kasmetinė bankams mokama diskontuota pinigų suma a_1 , apskaičiuojama:

$$a_1 = P \left[\frac{j \cdot (1 + j)^n}{(1 + j)^n - 1} \right] = 20,06 \left[\frac{0,07 \cdot (1 + 0,07)^{25}}{(1 + 0,07)^{25} - 1} \right] = 1,72 \text{ mln. €} \quad (18)$$

Diskontuota pinigų suma mokama per visą laikotarpį a_2 :

$$a_2 = P \left[\frac{j \cdot (1 + j)^n}{(1 + j)^n - 1} \right] \cdot n = 20,06 \left[\frac{0,07 \cdot (1 + 0,07)^{25}}{(1 + 0,07)^{25} - 1} \right] \cdot 25 = 43,03 \text{ mln. €} \quad (19)$$

Kreditoriams per 25 metus turima sumokėti apie 43,03 mln. € kasmet po 1,72 mln. € kapitalo kaštų (pay back costs).

Išlaidos kurui

Žinoma, kad jėgainės sunaudojama šiluminė galia pagal ŽŠV yra 24,33 MW. 1MWh biokuro kainuoja 1 tne – 145€, 11,6 MW, gaunama, kad $145/11,6 = 12,5€$ Galios išnaudojamo koeficientas žiemą yra vienetas, tai reiškia, kad jėgainė dirba nuolat visą šildymo sezoną 180 dienų per sezoną. Per žiemos sezoną reikės: $24,33 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h/para} \cdot 180 \text{ parų} = 105,1 \text{ GW}$ energijos, kuri kainuos 12,5 €/tne gaunam 1,31 mln. € Bendri metiniai gamybos kaštai 3-5 proc. didelėms jėgainėms, 5- 6,5 proc. prie kurių priskiriame projektuojamą nuo kapitalo kaštų (capital cost). Šiandieninės Lietuvos sąlygomis gamybos kaštai yra 5 proc. $18,16 \text{ mln.} \times 0,05 = 0,908 \text{ mln. €}$

Piniginė parama

Paramą galima tikėtis gauti dėl trijų faktų arba aplinkybių:

1. Atsinaujinantis energijos šaltinis -biokuras
2. Kogeneracija-skatinamas energijos gamybos būdas
3. Centralizuota šilumos sistema.

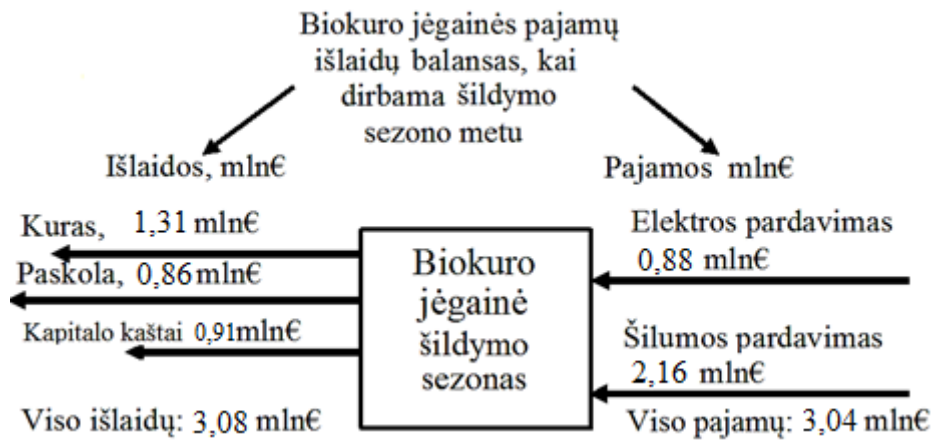
Paramą galima tikėtis gauti tiek iš ES tiek iš vidaus biudžeto. Tokiu būdu kapitalo našta gali sumažėti 50 proc. iki 9,08 mln. €

Pajamos pardavus elektrą ir šilumą

Elektros rinkos kaina vidutiniškai yra 45 €/MW, o šilumos – 25 €/MW per sezoną. Apskaičiuojamos gautos pajamos pardavus elektrą ir šilumą žiemos sezone.

$$\text{Šiluma} - 20 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h/para} \cdot 180 \text{ parų} \cdot 25 \text{ €/MW} = 2,16 \text{ mln. €} \quad (20)$$

$$\text{Elektra} - 4,54 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h/para} \cdot 180 \text{ parų} \cdot 45 \text{ €/MW} = 0,883 \text{ mln. €} \quad (21)$$



17 paveikslėlis. Pajamų ir išlaidų balansas šildymo sezono metu

15 lentelė. Ekonominės analizės metu gautos sumos (šildymo sezonas).

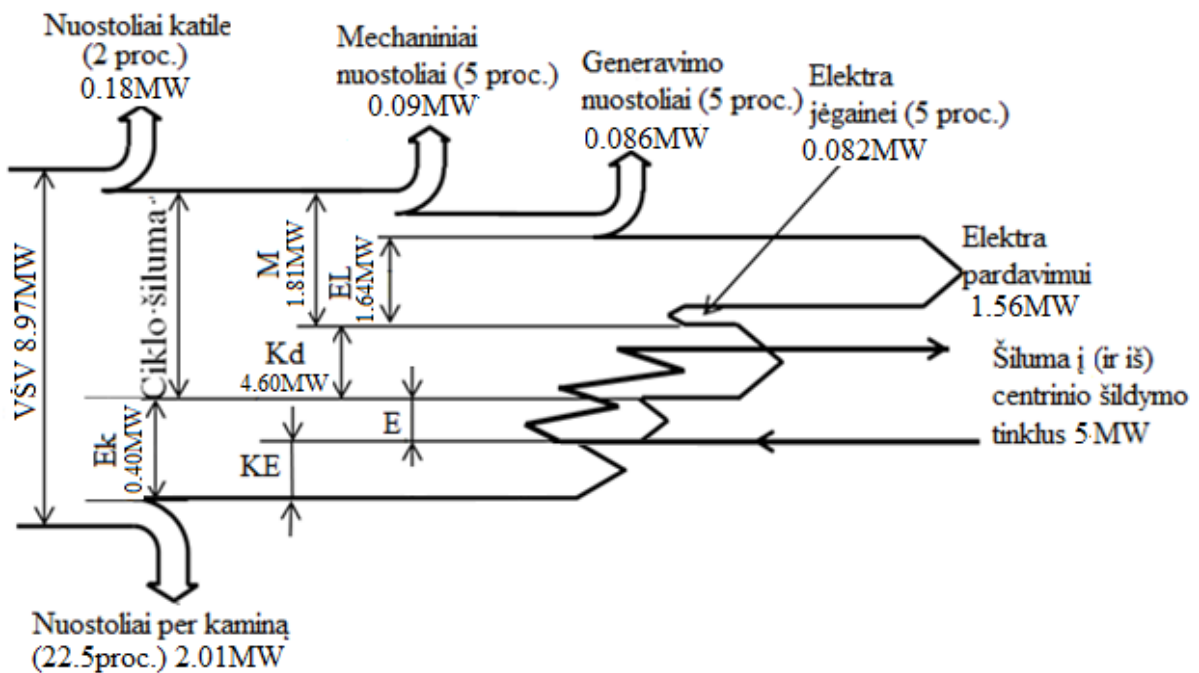
	Šildymo sezonas
Pagamintos elektros galia, MW	4,54
Pagamintos šilumos galia, MW	20
Pajamos pardavus elektrą, mln. €	0,88
Pajamos pardavus šilumą, mln. €	2,16
Viso pajamų, mln. €	3,04
Jėgainės kaina, mln. €	18,16
Kaina su paramą (50%)	9,08
Skola prieš darbo pradžią, mln. €	20,06
Palūkanos per 25 metus, mln. €	22,97
,0,333, Viso mokėti bankui, mln. €	43,03
Kasmetinė suma bankui, mln. €	1,72
Jėgainės kaina su paramą (50%)	21,51
Išlaidų pajamų balansas, mln. €	-0,04

Jėgainės ekonomika ne šildymo sezonu.

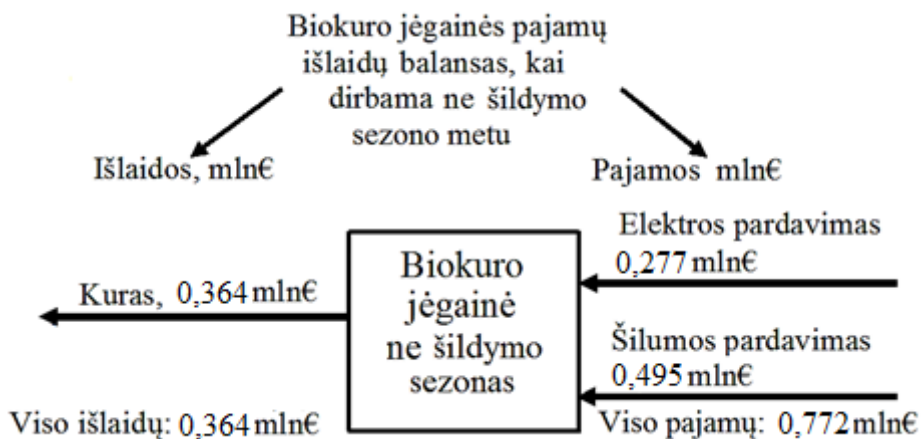
Vasaros sezono metu jėgainės šilumos galia sumažėja iki 5MW. Kondensacinis ekonomizaizeris nedirba, todėl dalį šilumos susigrąžiname tik iš sausojo ekonomizaizerio. Nuostoliai per kaminą sudaro $27 - 4,5 = 22,5\%$ taigi, $\eta_k = 0,775$. Sumažėjusi šilumos galia reiškia mažesnes elektros gamybos apimtis. Skaičiavimų eiga tokia pati kaip ir žiemos sezono, todėl gauti rezultatai pateikiami lentelėse.

16 lentelė. Energetinės analizės metu gauti dydžiai (ne šildymo sezonas).

Ekonomaizeriuose gaunama papildoma šilumos galia	0,40 MW
Kogeneracinio ciklo šilumos galia kondensatoriuje	4,60 MW
Ciklo mechaninio darbo galia	1,81 MW
Mechaninio darbo nuostoliai (5%)	0,091 MW
Konversijos į elektrą nuostoliai (5%)	0,086 MW
Jėgainės elektrinė galia	1,64 MW
Elektros galia jėgainės reikmėms (5%)	0,082 MW
Elektros galia į tinklus (pardavimui)	1,56 MW
Šilumos nuostoliai į aplinką per kamina	2,01 MW
Šilumos nuostoliai degimo kameroje	0,18 MW
Jėgainės šiluminė galia pagal ŽŠV	7,36 MW



18 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema ne šildymo periodui.



19 paveikslėlis. Pajamų ir išlaidų balansas ne šildymo sezono metu.

17 lentelė. Ekonominės analizės metu gautos sumos (ne šildymo sezonas)

	Ne šildymo sezonas
Pagamintos elektros galia, MW	1,56
Pagamintos šilumos galia, MW	5
Pajamos pardavus elektrą, mln. €	0,277
Pajamos pardavus šilumą, mln. €	0,495
Viso pajamų, mln. €	0,772
Išlaidų pajamų balansas, mln. €	0,408

Ne šildymo sezono metu atliktoje ekonominėje analizėje, išlaidose neįvertinama paskola ir kapitaliniai kaštai, kadangi jie jau įvertinti šildymo sezono ekonominėje analizėje. Ne šildymo sezono metu jėgainė dirba nepilną sezono laiką dėl remonto ir profilaktikos darbų. Ne šildymo sezono laikas 165 dienos. Matome, kad jėgainė ne šildymo sezono metu dirba pelningai ir gali padengti gautą neigiamą pajamų balansą šildymo sezono metu. Šių jėgainių plėtra be valstybės subsidijavimo sunkiai įsivaizduojama, kadangi atsipirkimo laikotarpis būtų ilgesnis už jėgainės darbo resursą.

3.5 Kiti jėgainės ekonomiką įtakojoantys parametrai

Ankstesniuose skyriuose buvo minėta, kad biokuro kogeneracinių jėgainių efektyvumą labiausiai riboja pats kuras, dėl kurio nepasiekiamas aukštas garo slėgis ir temperatūra prieš turbiną. Jėgainės efektyvumą riboja ir jos dydis, kitaip sakant galia. Didelių jėgainių efektyvumas didesnis. Viena to priežasčių, geresni turbinos naudingumo rodikliai (žr. 18 lent.).

18 lentelė. Garo turbinos parametrai ir kaina [4]

Garų turbinos parametrai	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Nominali elektrinė galia, MW	0,5	3	15
Turbinos tipas	Galinio slėgio	Galinio slėgio	Galinio slėgio
Įrangos kaina, €kW	504	210	190
Visa instaliuota kaina, €kW	857	360	326
Turbinos izoentropinis naudingumas, %	50	70	80
Elektros generatoriaus naudingumas, %	94	94	97
Garų temp. prieš turbiną, °C	288	302	343
Garų slėgis prieš turbiną, bar	34,5	41	48
Kogeneracinis elektrinis naudingumas, %	6,4	6,9	9,3
Didžiausias elektrinis našumas, %	75,6	75,1	77,8
Elektrinės/šiluminės galios santykis	0,09	0,10	0,13
Katilo naudingumas, %	80	80	80

Kaip matome 18 lentelėje, didėjant nominaliai turbinos galiai gerėja ir naudingumo parametrai. Natūralu, kad didėjant turbinos galiai, didėja ir gabaritai. Mažos turbinos turi sukčius didesniais sūkiiais, kad pasiektų efektyvų garo išsiplėtimą su minimaliais garo pratekėjimo nuostoliais per judančias mentis. Dideli turbinos sūkiiai iššaukia ne tik didesnius trinties nuostolius, tačiau ir energijos praradimus papildomose pavarose. Mažesnių turbinų pratekėjimo nuostoliai santykinai didesni, nes jie yra tiesiog proporcingi skersmeniui, kai turbinos našumas ir galia – skersmens kvadratui. Be to mažesnių elektros variklių ir generatorių energijos transformavimo nuostoliai didesni. Vienas iš labiausiai krentančių į akis parametru, tai kaina, kuri lyginant 0,5MW ir 3MW galios garo turbinas skiriasi daugiau kaip du kartus.

Didesnė jėgainės galia daugeliu atveju garantuoja didesnę jos efektyvumą, tačiau šioje vietoje atsiranda kita svarbi problema. Kuo jėgainės galia didesnė tuo daugiau kuro ji suvartoja. Daugelyje literatūros šaltinių galime surasti optimalų atstumą biokuro pristatymui į jėgainę, dažnai jis neviršija 50km. Tai vadinamas kuro tiekimo logistikos spindulys. Šis atstumas gali kisti priklausomai nuo šalies kelių infrastruktūros, miškų tankumo, regiono darbuotojų darbo užmokesčio ir pan.

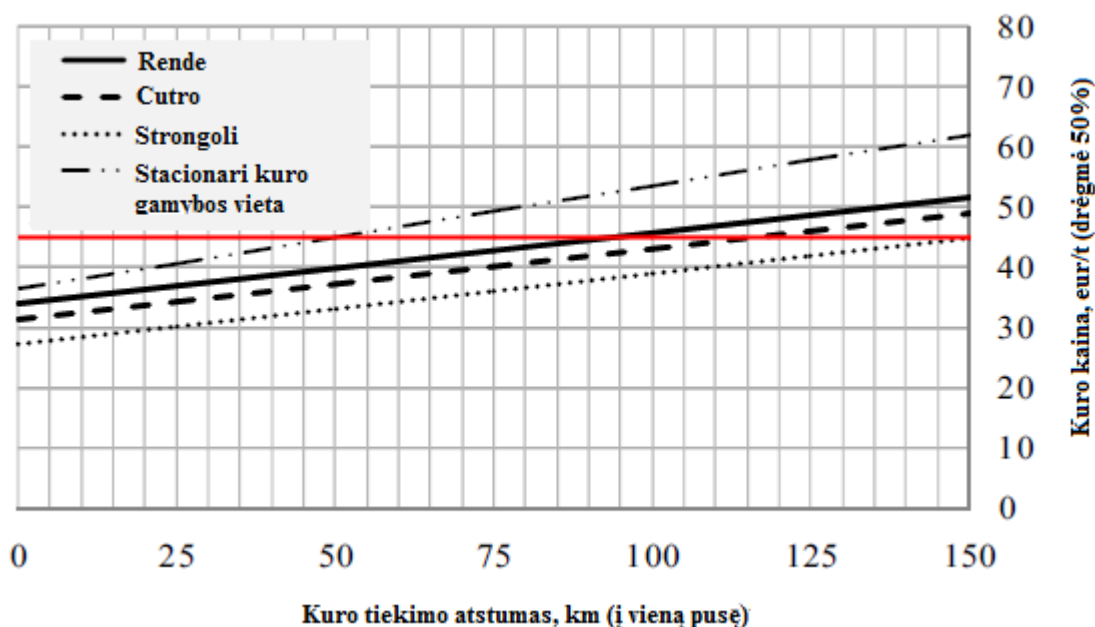
19 lentelė. Biokuro (medienos drožlių arba dar vadinamų čipsų) kainos sudedamosios dalys [10]

Atliekami darbai	Biokuro gamyba pakelėje, €/MWh	Biokuro gamyba teritorijoje, €/MWh	Biokuro gamyba jėgainės teritorijoje, €/MWh
Miško kirtimo leidimas	0,50	0,50	0,50
Kirtimo atliekų krovimas	0,67	0,67	0,67
Kirtimo atliekų rišimas	-	-	-
Kirtimo atliekų/ryšulių transportavimas į biokuro gamybos teritoriją (200m)	2,60	-	2,60
Biokuro gamyba teritorijoje	-	6,11	-
Biokuro gamyba pakelėje	3,90	-	-
Kuro transportavimas (50km), max 60t	3,11	4,10	4,80
Biokuro gamyba jėgainėje	-	-	2,40
Tiekimo organizavimas	0,50	0,50	0,50
Galutinė kaina	11,28	11,88	11,47

Kaip matome 19 lentelėje, galutinė biokuro kaina už MWh, priklausomai nuo jo gamybos technologijos, skiriasi labai nežymiai, tačiau reikia nepamiršti, kad biokuro pristatymo spindulys nuo jėgainės neviršija 50km. Straipsnyje „Wood energy plants and biomass supply chain in southern Italy“ pateikiama trijų biokuro kogeneracinių jėgainių analizė, kurioje aptariamos biokuro gamybos ir transportavimo problemos priklausomai nuo jėgainės galios ir kuro transportavimo spindulio.

20 lentelė. Vakarų Italijos kogeneracinių jėgainių parametrai [6]

Jėgainės lokacija	Jėgainės galia, MWe	Biokuro poreikis	
		t/h (drėgnumas50%)	t/y (drėgnumas50%)
Cutro	16,5	20	160000
Stron goli	46	57	460000
Rende	14	16	130000



20 paveikslėlis. Jėgainėms tiekiamo kuro kainos priklausomybė nuo atstumo [6]

Jėgainėms esančioms Rende ir Cutro provincijose, biokuras tiekiamas iš stacionarių kuro gamybos vietų, kurios yra arti miško, tuo tarpu Strongoli jėgainėje naudojamas biokuras gaminamas jėgainės teritorijoje. Reikia paminėti, kad dalis biokuro importuojama iš užsienio. Kaip matome 20 paveikslėlyje galingiausiai jėgainiai (46MWe) Strongoli provincijoje biokuro kaina siekia apie 45 €/t ir ji lygi tokiai pačiai biokuro kainai, kuris būtų tiekiamas iš stacionarios kuro gamybos vietos, kai ji nutolusi nuo jėgainės ne daugiau kaip 50km. Paprastai, kuo didesnė jėgainė, tuo didesnis kuro tiekimo atstumas, kadangi reikalingas didesnis kiekis kuro, tačiau šį atstumą įtakoja regiono miškingumas ir kiekvienam atskiram atvejui jis bus vis kitoks.

Lietuvoje kogeneracinių jėgainių plėtros strategija - mažos galios, didelio efektyvumo jėgainės. Iki 2020m naujoms ir modernizuojamoms mažos galios biokuro kogeneracinėms jėgainėms,

tai iki 5MW elektrinės galios ir 20MW šiluminės galios, skiriama parama, kurios intensyvumas iki 50% tinkamų finansuoti išlaidų. Nedidelės galios jėgainių efektyvumas mažesnis, tačiau didesnis jų skaičius didina konkurenciją ir taip mažina šilumos kainą vartotojams. Nepaisant to, mažos jėgainės turi dar vieną didelį trūkumą, tai jų kaina. Tokio tipo jėgainių kainą stipriai įtakoja jų dydis arba kitaip sakant jų galia. Gana detalius duomenis apie biokuro kogeneracinių jėgainių kainą pateikia „LEKA“, jų duomenimis tokių jėgainių kaina svyruoja nuo 2000€kWe iki 4000€kWe.

21 lentelė. Biokuro kogeneracinių jėgainių kaina pagal galią.

Biokuro kogeneracinės jėgainės galia	Biokuro kogeneracinės jėgainės kaina
Iki 5MW _e	4000 €kWe
Iki 10MW _e	3000 €kWe
Virš 10MW _e	2000 €kWe

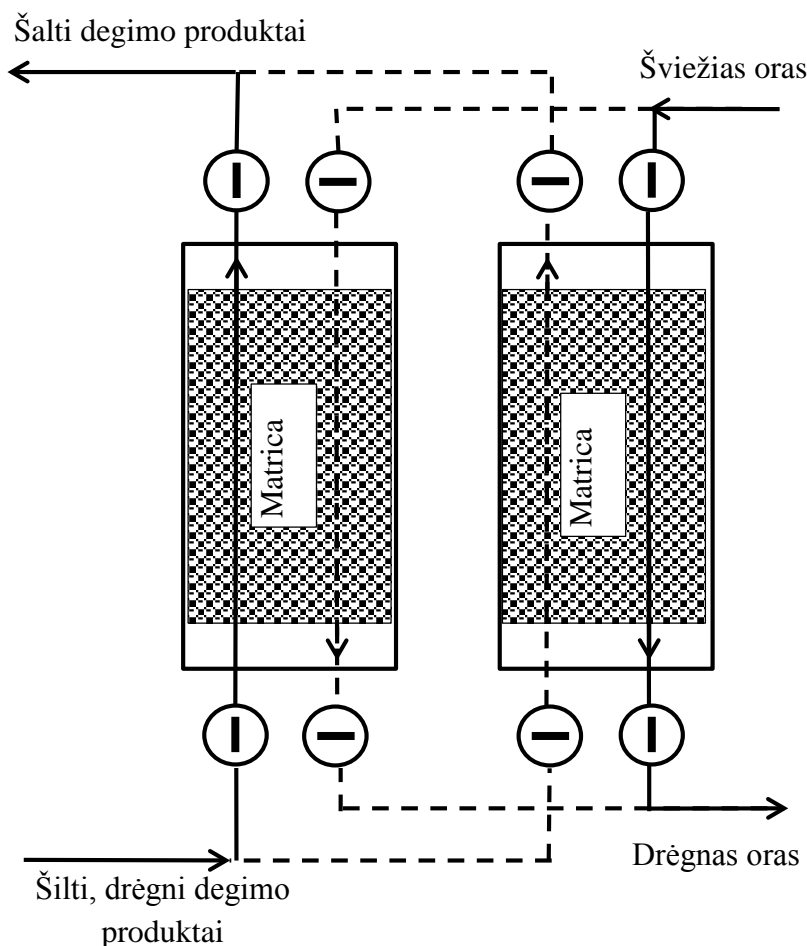
Panašiai jėgainių kainos pateikiamos ir Europos komisijos ataskaitose, nuo 1800-5000 €kWe, kai jėgainių elektrinė galia 1-20MWe.

4. MASĖS MAINŲ REGENERATORIUS ŽEMO POTENCIALO ŠILUMAI ATGAUTI

Šilumos mainų regeneratoriai, tai aparatai sugebantys atgauti šilumą. Dažniausiai jie turi vieną šilumos mainų plotą, kurį paeiliui apiplauna du srautai. Šiltesnis srautas šildo regeneratoriaus šilumos mainų plotą, atiduodamas jam savo šilumą, tuo tarpu antrasis srautas pasiima šilumą, taip jį atšaldydamas. Regeneratorius galima atskirti į dvi grupes, tai regeneratoriai su judama matrica arba fiksuota. Judamos matricos regeneratorių masė pati juda link vieno arba kito srauto. Fiksuotos matricos regeneratoriaus masę, paeiliui apiplauna tai vienas, tai kitas srautai. Didelės galios, gamtinėmis dujomis kūrenamose kogeneracinėse jėgainėse atliekinė šiluma panaudojama pasitelkiant judamos matricos regeneratorių. Tai įrenginys turintis būgno tipo didelį šilumos mainų plotą, kurį besisukantį paeiliui apiplauna išeinantys degimo produktai. Tokio tipo regeneratorių panaudojimas biokuro jėgainėse komplikuoatas, kadangi šalinami degimo produktai turėtų būti sausi, kitu atveju regeneratoriuje esančios ertmės, dujų pratekėjimui greitai užsikimšę kietosiomis dalelėmis. Dėl šios priežasties biokuro jėgainėse naudojami ne regeneratoriai, o ekonomaizeriai, juolab per kondensacinį ekonomaizerį galima susigrąžinti iki penktadalio šilumos iš šalinamų dūmų ir ženkliai sumažinti kietųjų dalelių emisijas. Tačiau per kondensacinį ekonomaizerį susigrąžiname tik pusę atliekinės šilumos, kurios didžiąją dalį sudaro slaptoji šiluma. Kita pusė šilumos tiesiog pašalinama per kaminą ir ji traktuojama kaip šilumos nuostoliai. Norint sumažinti šiuos nuostolius biokuro jėgainėse, kuriose po kondensacio ekonomaizerio degimo produktų temperatūra dar siekia 50°C reikalinga technologija, kuri sąveikaudama su kitais jėgainės įrenginiais sugebėtų žemo potencialo šilumą panaudoti centralizuotų šilumos tinklų sistemoje. Nors tokios technologijos diegimas biokuro jėgainių elektrinio efektyvumo nepadidintų, tačiau ženkliai pagerintų šilumos išnaudojimo efektyvumą ir taip pakeltų bendrą jėgainės naudingumo koeficientą.

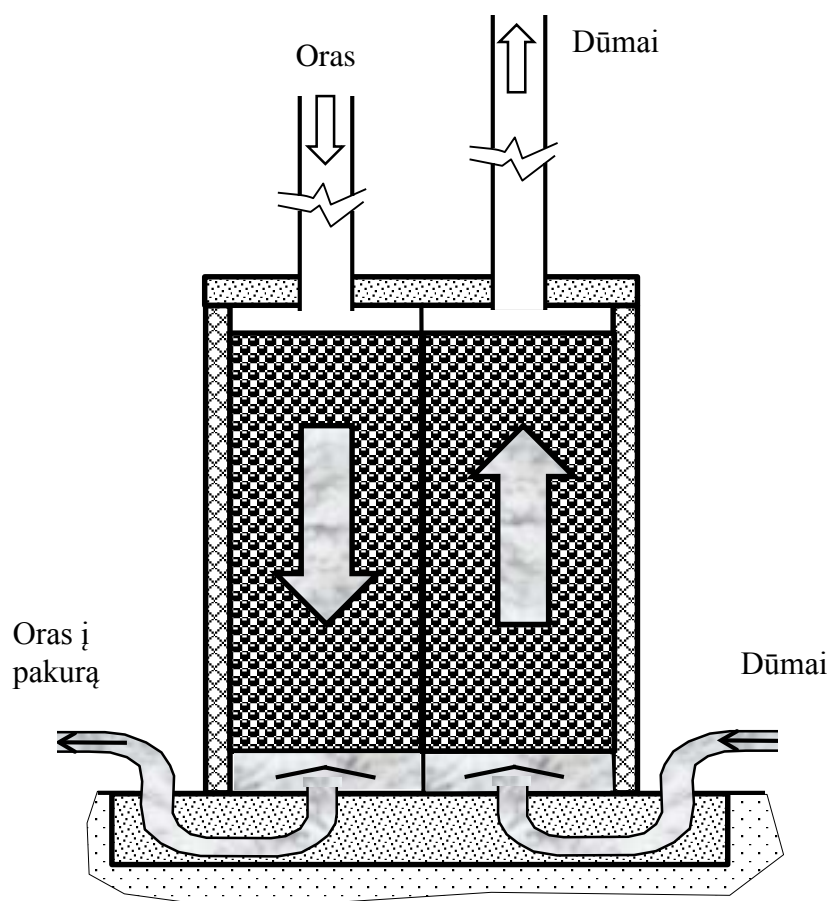
4.1 Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus specifika ir veikimo principas

Vienas iš šio darbo tikslų - masės mainų regeneratorių biokuro jėgainei. Tai fiksuotos matricos regeneratorių, kuris gali būti įrengtas prieš kaminą, tačiau žymiai ekonomiškiau būtų regeneratorių naudoti kaip kaminą. Principinė šilumos ir masės mainų regeneratoriaus schema pateikta 21 paveikslėlyje.



21 paveikslėlis. Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus principinė schema [1]

Iš kondensacinio ekonomizerio išeinantys šilti ir drėgni dūmai šildo pirmąją regeneratoriaus matricą. Jie tekėdami per regeneratoriaus matricą atiduoda įkrovai šilumą, ko pasekoje dūmuose buvęs vandens garas susikondensuoja. Tokio tipo regenerorius veikia cikluodamas t.y. kai pirmojoje matricoje suakumuliuojamas reikiamas šilumos kiekis per ją paleidžiamas tekėti šviežias oras, kuris tiekiamas į pakurą. Šis oras pašyla ir prisisotina drėgmės, tuo metu į kitą matricą nukreipiami šilti ir drėgni dūmai, vyksta reversavimo procesas. Dažnas srautų reversavimas iššaukia nepageidaujamą reiškinį, srautų maišymasi. Su besimaišančiais srautais į pakurą tiekiamas oras su degimo produktų priemaišomis, o tai didina kuro degimo nuostolius. Skaičiuojamasis regeneratoriaus mainų plotas kelis kartus didesnis už reikalingą, kurio reikėtų, kad būtų pasiektas 90% šilumos mainų efektyvumas. Tai daroma dėl to, kad reversavimo procesas būtų kuo retesnis.

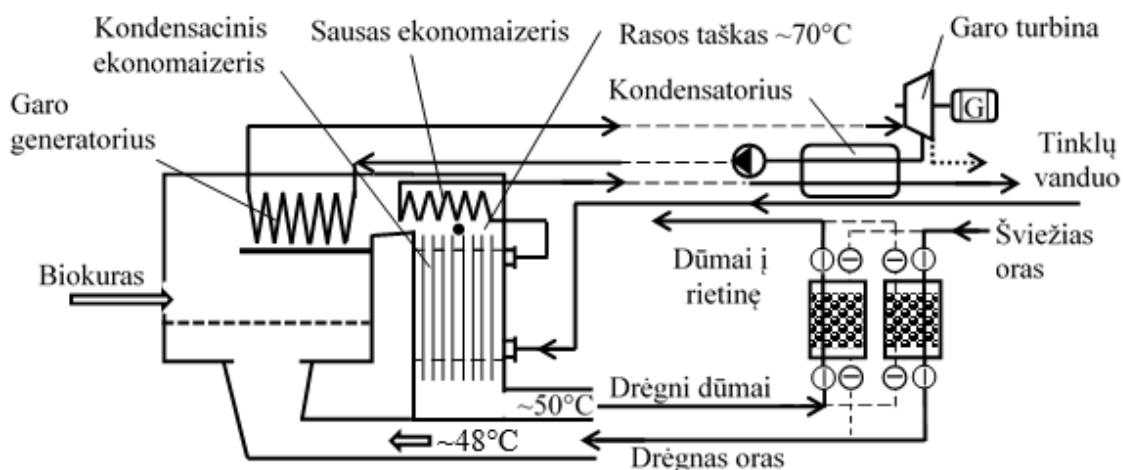


22 paveikslėlis. Regeneratoriaus kolonos schema, ji atlieka ir kamino funkcijas [1]

22 paveikslėlyje pavaizduota šilumos masės regeneratoriaus schema, kur regeneratoriumi gali atlikti ir kamino funkciją, kas gerokai sumažintų naujos jėgainės kaštus. Dar vienas privalumas yra tai, kad šilumos masės regeneratoriumi gali pagerinti išmetamųjų dujų švarumo rodiklius. Kondensacijos metu smulkios dalelės įgauna didesnę svorį ir dėl to neturėtų patekti į aplinką. Tačiau čia atsiranda kita problema, regeneratoriaus įkrovai naudojami akmenys sukuria milžinišką šilumos mainų plotą, taip kartu sukuriama dūmų pratekėjimo kanalai, kurie ilgainiui gali užsikimšti. Sunku numatyti kaip ir kur degimo produkto dalelės kaupsis regeneratoriuje ir svarbiausiai kaip greitai, kad tai būtų išsiaiškinta reikia atlikti realaus masės mainų regeneratoriaus tyrimus.

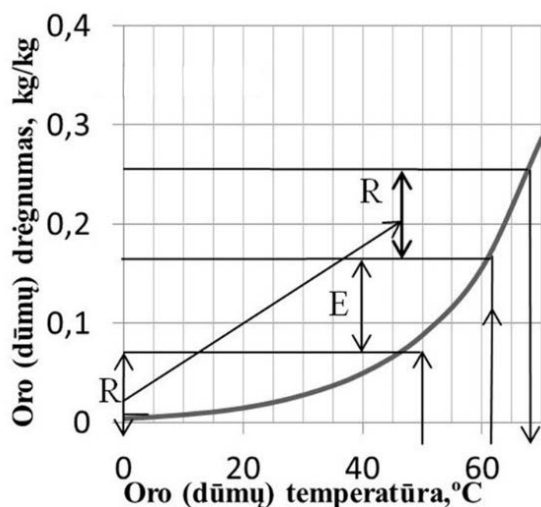
Atsižvelgiant į kitas emisijas, tokias kaip NO_x ir CO, situacija kitokia, mažėjant degimo temperatūrai, dėl tiekiamo drėgno oro į kūryklą NO_x koncentracija turėtų mažėti, o CO didėti. Tačiau remiantis Jonsson and Yen [20] drėgnas oras nebloginas degimo proceso, todėl CO emisija negali didėti.

Vis dar lieka neatsakytas klausimas, kaip žemo potencialo šiluma gauta iš šilumos ir masės mainų regeneratoriaus bus panaudota tiekimui į CŠT.



23 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės su masės regeneratoriumi principinė schema [1]

Po kondensacinio ekonomizaizerio degimo produktų temperatūrą būna apie 50°C , ši šiluma suakumuliuojama regeneratoriaus įkrovos ant kurios susikondensuoja ir degimo produktuose esanti drėgmė. Po reversavimo proceso, praėjęs oras pro regeneratoriaus šiltą ir drėgną įkrovą, pašyla ir prisotina drėgmės. Tiekiamo oro temperatūra nėra lygi prieš tai šalintų degimo produktų temperatūrai, kadangi neišvengiami šilumos nuostoliai su aplinka. Taigi į kūryklą patenka ne tik šiltas, bet ir drėgnas oras, kas lemia didesnį susikondensavusio vandens kiekį kondensaciniame ekonomizaizeryje. „Pavyzdžiui, 50% drėgnumo biokuro degimo produktai kondensaciniame ekonomizaizeryje atvėsta nuo $\sim 62^{\circ}\text{C}$ iki 50°C , tačiau gautas vandens kondensato kiekis yra beveik toks pats, kaip juos ataušinus nuo 50°C iki 0°C (atitinkamai atkarpos E ir R pav.24). Matome, kad pristatomos regeneracinės sistemos pagalba atliekinės šilumos potencialas yra paaukštinamas iki aukštesnės temperatūros [1].“



24 paveikslėlis. Susigrąžintos šilumos kiekis iš kondens. ekonomizaizerio ir regeneratoriaus [1]

Šis atliekinės šilumos paaukštėjimas priklauso nuo parcialinio vandens garo slėgio degimo produktuose, savo ruožtu parcialinis slėgis priklauso nuo garo koncentracijos dūmuose. Pavyzdžiui deginant 50% drėgmės biokurą su 1.5 oro pertekliumi, kondensaciniame ekonomizaizeryje kondensacijos procesas prasideda esant ~62°C, šiuo momentu dūmuose drėgmės koncentracija 0.177kg/kg. Sakykime, kondensaciniame ekonomizaizeryje dūmai ataušinami iki 50°C, o šilumos ir masės mainų regeneratoriuje iki 5°C. Esant pilniems masės mainams, drėgmės kiekis ore, kuris tiekiamas į pakurą, padidėja nuo 0.003kg/kg iki 0.088kg/kg, kai lauko vidutinė temperatūra 0°C, o santykinė lauko oro drėgmė 80%. Taigi regeneracinė sistema padidina drėgmės koncentraciją nuo 0.177kg/kg iki 0.261kg/kg. Naudodamiesi (22) ir (23) formulėmis galime paskaičiuoti kondensacijos pradžios temperatūrą, kuri mūsų atveju 68.4°C.

$$p = \frac{\omega P}{\omega + 0.622} ; \quad (22)$$

$$t = \frac{243.5 \times \ln\left(\frac{p}{6.112}\right)}{17.67 - \ln\left(\frac{p}{6.112}\right)} ; \quad (23)$$

„Vėstant dūmams, aukštesnė kondensacijos pradžios temperatūra reiškia efektyvesnį slaptosios šilumos panaudojimą. Kondensacija smarkiai padidina šilumos atidavimo koeficientą nuo dūmų grįžtančiam iš tinklų termofikaciniam vandeniui. Be to, aukštesnė kondensacijos pradžios temperatūra reiškia didesnę slaptosios šilumos dedamąją (pav.16)“ [1]. Didesnė drėgmės koncentracija kondensaciniame ekonomizaizeryje turi ir kitą teigiamą pusę, jame dūmai efektyviau išvalomi nuo kietųjų dalelių. Regeneratoriaus nauda akivaizdi ne tik šiluminės energijos gamyboje, bet ir sprendžiant aplinkosauginius klausimus.

4.2 Žemo potencialo šilumos dalis šiuolaikinėje jėgainėje

Biokuro jėgainių efektyvumas per pastaruosius 20 metų stipriai pagerėjo ir šiai dienai jis gali viršyti 90%. Aukštą jėgainių efektyvumą padėjo pasiekti ne tik sparčiai tobulinami jėgainės pagrindiniai agregatai, tai pakuros, katilai, garo turbinos, elektros generatoriai ir ekonomizaizeriai, tačiau ir diegiamos žemo šilumos potencialo atgavimo sistemos, negalime pamiršti automatikos indėlio. Garo turbinos šiai dienai pasiekusios aukštą efektyvumą ir šioje vietoje efektyvumo rezervas jau beveik išsemtas. Norint pasiekti aukštesnį garo turbinos efektyvumą, reikia didinti slėgį prieš turbiną, tačiau deginant biokurą, kurio drėgmė dažnai siekia 50% ar net daugiau, tai tiesiog neįmanoma, nes nepasiekiamas aukšta garo temperatūra. Kondensacinio ekonomizaizerio diegimas į biokuro jėgaines, turbūt vienas iš labiausiai prisidėjusių dalykų, kurie ženkliai padidino tokių jėgainių

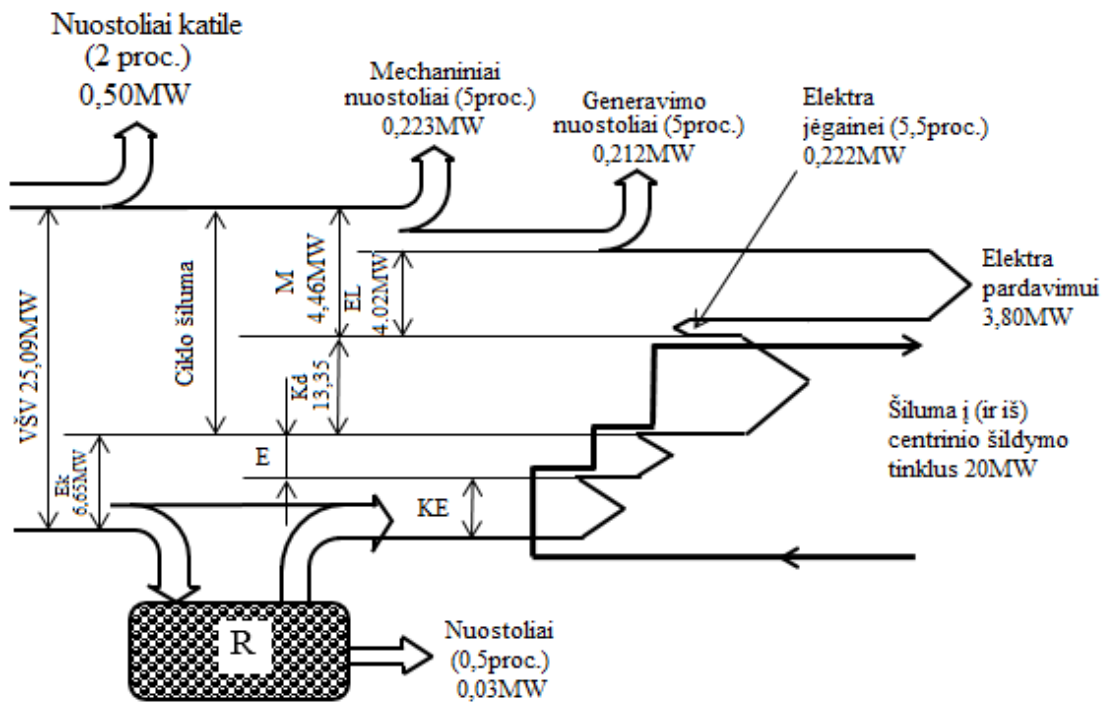
bendrą efektyvumą. 16 paveikslėlyje matome, kad iš dūmų su kondensacinio ekonomizerio pagalba galime atgauti iki 15% šilumos nuo ŽŠV (KE dalis), tačiau net 18% šilumos nuo ŽŠV prarandame šalindami dūmus per kaminą. Tai žemo potencialo šiluma, kurios temperatūra 48-53°C, norint susigrąžinti dalį šios šilumos, reikalingos technologijos apie kurias plačiau jau buvo kalbėta 2.2 skyriuje. Šilumos siurbliai, tai įrenginiai, kurie plačiausiai naudojami žemo šilumos potencialo atgavimo sistemose. Tačiau šių technologijų diegimas reikalauja gilios analizės, kadangi šios technologijos reikalauja didelių investicijų, kurios balansuoja ties neatsipirkimo riba.

Biokuro jėgainėse elektros gamybos technologijos pasiekusios aukštumas ir čia tikėtis didelių efektyvumo rodiklių gerėjimo sunku. Tačiau šilumos gamybos technologijose, efektyvumo didėjimo potencialas kurkas didesnis. Čia šilumos praradimas su dūmais per kaminą sudaro apie 18% nuo ŽŠV, tai milžiniškas žemo potencialo šilumos kiekis, kurį gali padėti susigrąžinti šilumos ir masės mainų regeneratoriumi, apie jį sekančiame skyriuje.

4.3 Energetinė ir ekonominė biokuro kogeneracinės jėgainės su šilumos ir masės mainų regeneracine sistema analizė

Norint pamatyti regeneratoriaus teikiamą naudą, reikia palyginti jėgainės charakteristikas, kai ji dirba su regeneratoriumi ir be jo. Šio darbo 3.4 paragrafe buvo atlikta kogeneracinės jėgainės energetinė ir ekonominė analizė, todėl reikiami duomenys skaičiavimams ir gauti rezultatai bus panaudoti įvertinti regeneratoriaus teikiamai naudai.

Atliekant jėgainės analizę su šilumos ir masės mainų regeneratoriumi, skaičiavimų eiga analogiška kaip ir 3.4 paragrafe, tačiau esminis skirtumas atsiranda įvertinant šilumos nuostolius per kaminą ir atgautos šilumos kiekį kondensaciniame ekonomizeryje. Atgautos šilumos kiekis minėtame ekonomizeryje priklauso nuo dūmų temperatūros už regeneratoriaus. Priimkime, kad po regeneratoriaus dūmai ataušta nuo 50°C iki 10°C, tokiu atveju 16 paveikslėlyje randame, kad per kondensacinį ekonomizerį susigrąžiname 26,5% šilumos iš galimų 27%. Šiuo atveju nuostoliai per kaminą $27-26,5=0,5\%$.



25 paveikslėlis. Biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema su šilumos ir masės regeneratoriumi.

22 lentelė. Energetinės analizės metu gautų dydžių palyginimas.

	Be regeneratoriaus	Su regeneratoriumi
Ekonomiškiau gaunama papildoma šilumos galia	4,15 MW	6,65 MW
Kogeneracinio ciklo šilumos galia kondensatoriuje	15,85 MW	13,35 MW
Ciklo mechaninio darbo galia	5,3 MW	4,46 MW
Mechaninio darbo nuostoliai (5%)	0,265 MW	0,22 MW
Konversijos į elektrą nuostoliai (5%)	0,25 MW	0,21 MW
Jėgainės elektrinė galia	4,78 MW	4,02 MW
Elektros galia jėgainės reikmėms (5-5,5%)	0,24 MW	0,22 MW
Elektros galia į tinklus (pardavimui)	4,54 MW	3,80 MW
Šilumos nuostoliai į aplinką per kamina	3,86 MW	0,03 MW
Šilumos nuostoliai degimo kameroje	0,59 MW	0,50 MW
Jėgainės šiluminė galia pagal ŽŠV	24,33 MW	20,57 MW

23 lentelė. Ekonominės analizės metu gautų sumų palyginimas.

	Be regeneratoriaus	Su regeneratoriumi
Pagamintos elektros galia, MW	4,54	3,80
Pagamintos šilumos galia, MW	20	20
Pajamos pardavus elektrą, mln. €	0,88	0,74
Pajamos pardavus šilumą, mln. €	2,16	2,16
Viso pajamų, mln. €	3,04	2,9
Išlaidos kurui, mln. €	1,31	1,11

Apibendrinant gautus rezultatus 22 ir 23 lentelėse, matome, kad šilumos ir masės mainų regeneratoriumis sumažina kaštus kurui. Tačiau sumažėjusi ciklo šiluma, sumažina elektros energijos gamybos apimtį, todėl prarandame dalį pajamų už parduotą elektros energiją. Dėl regeneratoriaus pajamos už parduotą elektros energiją sumažėjo 0,14 mln.€ tačiau kurui išleista 0,2 mln.€ mažiau. Regeneratorius kiekvieną šildymo sezoną gali papildyti jėgainės pajamas apie 0,06 mln.€ ir užtikrinti, kad per šalčio atakas kondensacinis ekonomizeris veiktų efektyviai.

Esant tokiai situacijai, kai regeneratoriumis būtų diegiamas jėgainės modernizacijos tikslais, jo ekonominė nauda jaustųsi labiau. Jėgainės šiluminė galia padidėtų 17,7% t.y. nuo 20MW išaugtų iki 23,54MW. Regeneratoriaus dėka susigrąžintos šilumos dalis, jėgainės pajamas už parduotą šilumą papildytų dar 0,38 mln.€ Svarbu paminėti, kad regeneratoriuje naudojami elektriniai ventiliatoriai šiek tiek padidins jėgainės elektros energijos suvartojimą savo reikmėms, todėl į tinklus bus parduodama mažiau elektros energijos.

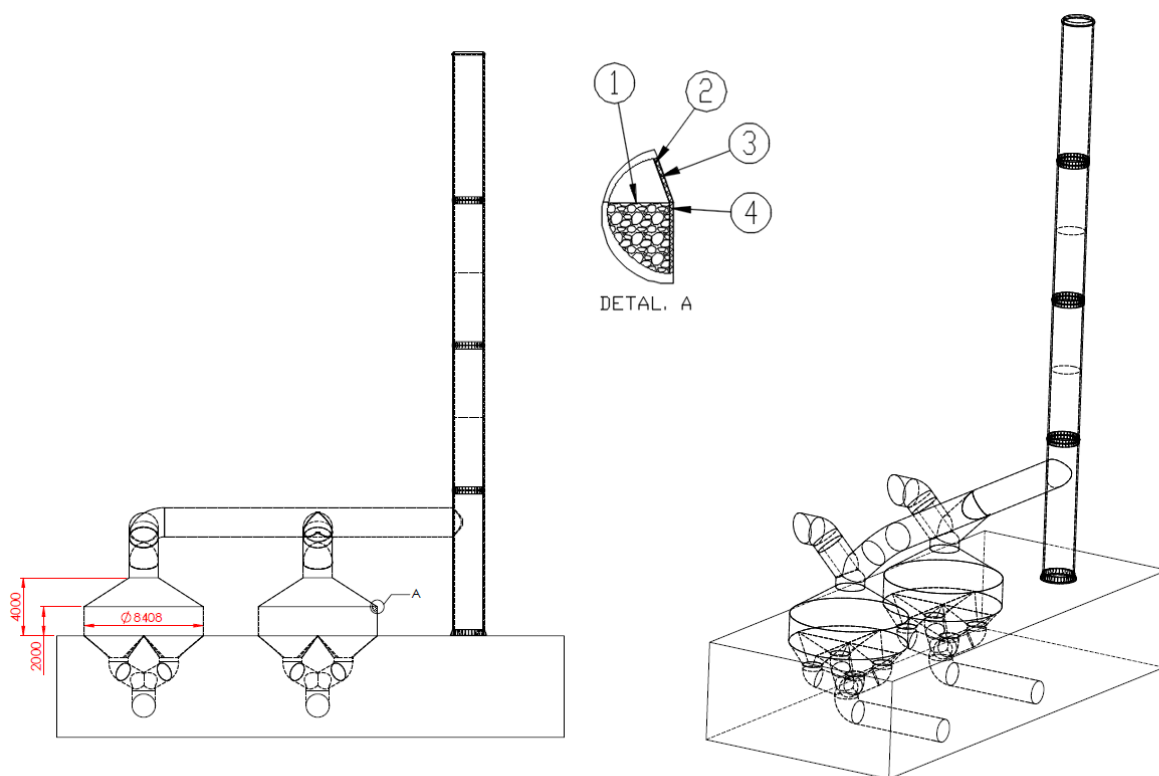
Naujai statomai jėgainei regeneratoriumis turi atlikti ir kamino funkcijas, taip sumažinami investiciniai kaštai. Biokuro kogeneracinės jėgainės su šilumos ir masės mainų regeneratoriumi ekonominė analizė atliekama 20MW šiluminės ir 5MW elektrinės galios jėgainei. Tokių parametru jėgainė pastatyta 2016m. Kaune ir žinoma kaip UAB „Foksita“. Jėgainės kamino aukštis siekia 40m, todėl remiantis šiais duomenimis projektuojamas regeneratoriaus aukštingumas negali būti mažesnis. Šaltinyje [1] pateikiami regeneratoriaus duomenys 30MW šiluminės galios jėgainei. Mūsų projektuojamos jėgainės šiluminė galia 20MW, todėl regeneratoriaus įkrovos reikalingas tūris ir masė proporcingai sumažinama. Įkrova, tai akmens rieduliai, kurių tankis pagal šaltinį [18] svyruoja nuo 2000-2500kg/m³, priimkime vidurkį 2250kg/m³. Sudedant akmens riedulius susidaro tuščios ertmės, kuriomis teka dūmai, todėl bendras įkrovos tankis mažesnis, jį priimame 1800 kg/m³.

24 lentelė. Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus techniniai duomenys.

Regeneracinių kolonų skaičius, vnt.	2
Įkrovos masė vienoje kolonoje, t.	190
Įkrovos darbinis tūris vienoje kolonoje, m ³	105,6
Regeneracinės kolonos aukštis, m.	4
Regeneracinės kolonos vidinis diametras, m.	8,2

Eskizinis regeneratoriaus vaizdas pateikiamas 26 paveikslėlyje. Regeneratorių sudaro dvi kolonos, kurios atlieka ir kamino funkcijas. Regeneracinė kolona susideda iš nerūdijančio plieno korpuso (25 pav. poz.2), juodo plieno kevalo (25 pav. poz.4), šilumos izoliacijos sluoksnio (25 pav. poz.3) ir akmens riedulių įkrovos (25 pav. poz.1). Erdvinis modelis su realiomis medžiagų charakteristikomis sukurtas „SolidWorks“ programine įranga, stipruminiai kolonos skaičiavimai atlikti „TANK“ programine įranga. Regeneracinės sistemos masė 40,78t (juodas plienas 3,93t,

nerūdijantis plienas 36,85t), aptarnavimo aikštelių su kopėčiomis masė primama procentaliai nuo bendros regeneracinės sistemos svorio - 10%.



26 paveikslėlis. Šilumis ir masės mainų regeneratoriaus eskizas.

Įmonė AB „Montuotojas“ montavimo firma Panevėžyje turinti ilgametę patirtį energetikos objektų montavime ir gamyboje, pateikia tokias kainas. Regeneratoriaus juodo plieno dalies gamyba 2900 €t, nerūdijančio plieno 6000 €t, aptarnavimo aikštelių įkainiai mažesni – 1600€t.

25 lentelė. Šilumos ir masės mainų regeneratoriaus kaina.

	Kaina, €t	Svoris, t	Galutinė kaina, €tūkst.
Regeneratoriaus kolonos gamyba (juodo plieno dalis)	2900*	3,93	11,4
Regeneratoriaus kolonos gamyba (nerūdijančio plieno dalis)	6000*	36,85	221,1
Aptarnavimo aikštelių gamyba	1600*	4	6,4
Akmens rieduliai	20	380	7,6
Pamatai	-	-	14
Visi montavimo darbai	-	-	30,4**
Ventiliatoriai	-	-	25
Nenumatyti darbai	-	-	10
		Viso:	325,9

*Į gamybos kainą įeina: dažomų paviršių smėliavimas, gruntavimas, dažymas, šilumos izoliacinės medžiagos (izoliacijos storis iki 100mm), gaminių transportavimas į objektą, dokumentacijos ruošimas.

**Montavimo darbams panaudoti du kranai, kurių keliamoji galia 100t ir 50t. Du kranai reikalingi regeneratoriaus atskirų segmentų pastatymui į vertikalią poziciją. Mažesnės galios kranas naudojamas ir įkrovos pildymo darbams. Keliamosios technikos logistikos kainos pateikiamos Kauno m. ribose.

26 lentelė. Regeneratoriaus montavimo darbų kaina.

	€val	Darbo laikas, d.	Logistikos kaštai, €tūkst.	Galutinė kaina, €tūkst.
Kranas 100t	130	3	1100	4,22
Kranas 50t	80	14	400	9,36
Žmonių darbo jėga	150	14	-	16,80
			Viso:	30,38

Skaičiuojant bendrą jėgainės kainą priimamos tos pačios sąlygos kaip ir 3.4 paragrafe. Visos jėgainės kaina yra $3,80 \cdot 10^6 \cdot 4000 \cdot 10^3 + 0,326 \cdot 10^6 = 15,526$ mln. €. Pusę šios sumos skolinamės pirmais metais, kurių pabaigoje sumokame 7 proc. nuo tos sumos, tai yra 0,543 mln. € Antraisiais metais sumokama du kartus tiek 1,086 mln. € Viso per statybos laikotarpį sumokama 1,63 mln. € o bendra paskola išauga iki 17,16 mln. € Vadinasi, kas metai bankui turime gražinti 0,686 mln. € paskolos.

Vidutinė kasmetinė bankams mokama diskontuota pinigų suma a_1 , apskaičiuojama:

$$a_1 = P \left[\frac{j \cdot (1 + j)^n}{(1 + j)^n - 1} \right] = 17,16 \left[\frac{0,07 \cdot (1 + 0,07)^{25}}{(1 + 0,07)^{25} - 1} \right] = 1,48 \text{ mln. €} \quad (18)$$

Diskontuota pinigų suma mokama per visą laikotarpį a_2 :

$$a_2 = P \left[\frac{j \cdot (1 + j)^n}{(1 + j)^n - 1} \right] \cdot n = 17,16 \left[\frac{0,07 \cdot (1 + 0,07)^{25}}{(1 + 0,07)^{25} - 1} \right] \cdot 25 = 37,03 \text{ mln. €} \quad (19)$$

Paramą galima tikėtis gauti tiek iš ES tiek iš vidaus biudžeto. Tokiu būdu kapitalo našta gali sumažėti 50 proc. iki 7,76 mln. €

Išlaidos kurui

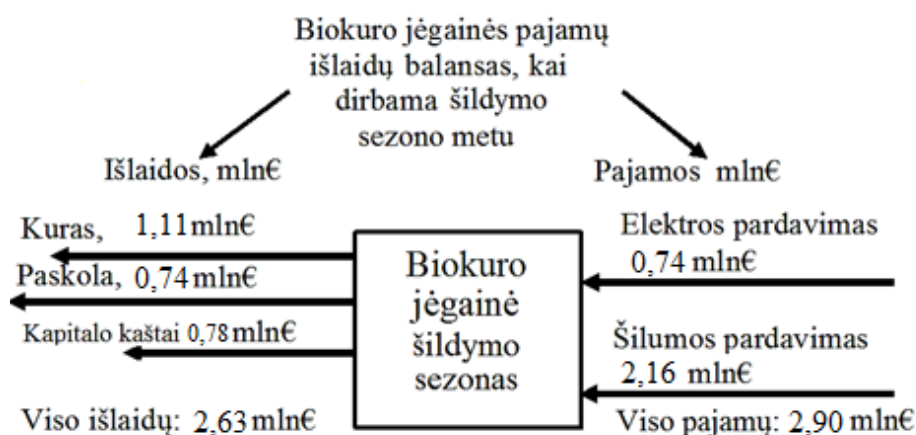
Žinoma, kad jėgainės sunaudojama šiluminė galia pagal ŽŠV yra 20,57 MW. 1MWh biokuro kainuoja 1 tne – 145 €, 11,6 MW, gaunama, kad $145/11,6 = 12,5€$. Galios išnaudojamo koeficientas žiemą yra vienetas, tai reiškia, kad jėgainė dirba nuolat visą šildymo sezoną 180 dienų per sezoną. Per žiemos sezoną reikės: $20,57 \text{ MW} \cdot 24\text{h}/\text{para} \cdot 180 \text{ parų} = 88,87 \text{ GW}$ energijos, kuri kainuos $12,5 / \text{tne}$ gaunam 1,11 mln. € Bendri metiniai gamybos kaštai 3-5 proc. didelėms jėgainėms, 5- 6,5 proc. prie kurių priskiriame projektuojamą nuo kapitalo kaštų (capital cost). Šiandieninės Lietuvos sąlygomis gamybos kaštai yra 5 proc. $15,526\text{mln.} \times 0,05 = 0,78 \text{ mln. } €$

Pajamos pardavus elektrą ir šilumą

Elektros rinkos kaina vidutiniškai yra 45 €/MW, o šilumos – 25 €/MW per sezoną. Apskaičiuojamos gautos pajamos pardavus elektrą ir šilumą žiemos sezone.

$$\text{Šiluma} - 20 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h}/\text{para} \cdot 180\text{parų} \cdot 25€/\text{MW} = 2,16 \text{ mln. } € \quad (16)$$

$$\text{Elektra} - 3,80 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h}/\text{para} \cdot 180\text{parų} \cdot 45€/\text{MW} = 0,740 \text{ mln. } € \quad (17)$$



27 paveikslėlis. Pajamų ir išlaidų balansas šildymo sezono metu (jėgainė su šilumos ir masės mainų regeneratoriumi).

Jėgainės pajamų ir išlaidų balansas teigiamas, pelnas siekia 0,27 mln.€ kai tuo tarpu 3.4 paragrafe jėgainės be šilumos ir masės mainų regeneratoriaus gautas balansas neigiamas -0,04 mln.€ Reikia atkreipti dėmesį, kad jėgainės investiciniai kaštai mažesni lyginant su įprastine jėgaine. Regeneratoriaus pagalba iš dūmų susigrąžinama didelė dalis šilumos, todėl ciklui suteiktos šilumos dalis sumažėjo, ko pasekoje gavome mažesnę mechaninę galią ir elektros galią į tinklus. Jėgainės investiciniai kaštai skaičiuojami nuo elektrinės galios į tinklus, todėl jėgainė atpigo 2,58mln.€ lyginant su jėgaine, kurioje nenaudojamas šilumos ir masės mainų regeneratoriumi. Regeneratorius sumažino jėgainės investicinius kaštus, kuro išlaidas, tačiau ir pajamas už parduotą elektros energiją. Regeneracinės sistemos šiluminė galia 2,5MW, todėl ši sistema atneša pajamų už parduotą šilumos energiją $2,5 \text{ MW} \cdot 24\text{h}/\text{para} \cdot 180 \text{ parų} \cdot 25€/\text{MW} = 0,27 \text{ mln. } €$ sutaupoma biokuro už $1,31\text{mln. } € - 1,11\text{mln. } € = 0,2 \text{ mln. } €$ ir patiriame nuostolių dėl sumažėjusios elektros energijos

pardavimo už 0,74mln. € – 0,88mln. € = –0,14 mln.€ Regeneracinės sistemos indelis į bendras jėgainės pajamas 0,2mln. € – 0,14mln. € = 0,06mln. €. Regeneratoriaus investiciniai kaštai nėra dideli lyginant su visos jėgainės ir sudaro tik 2,1%. Atliekant jėgainės modernizaciją ir net negavus paramos tokios regeneracinės sistemos diegimui, jos atsipirkimas neperžengtų 6 metų laikotarpio.

IŠVADOS

1. Biokuras termodinamiu požiūriu nėra geras ar net optimalus kuras energetikos sektoriuje. Dėl didelio kiekio vandens biokure, jėgainėse garo slėgio ir temperatūros parametrai nėra aukšti, to pasekoje nepasiekiamas aukštas termodinaminio ciklo efektyvumas. Biokuro kogeneraciniu režimu dirbančių jėgainių termodinaminis efektyvumas svyruoja nuo 24-27%, priklausomai nuo garo slėgio ir temperatūros prieš turbiną, tuo tarpu dujomis kūrenamų jėgainių 28-31%. Jėgainės termodinaminio efektyvumo pagerėjimas bent 1% duoda nemažą efektą elektros energijos gamybos apimtims ir žinoma, pajamoms už parduotą elektros energiją.
2. Opi biokuro jėgainių problema yra šilumos nuostoliai per kaminą. Dėl didelio kiekio vandens garo degimo produktuose ir sąlyginai žemos jų temperatūros, prarandama šilumos dalis prilygsta ekonomaižeryje gautos šilumos energijos kiekiui. Žemo potencialo šilumai atgauti iš šalinamų degimo produktų gali būti panaudoti šilumos siurbliai. Tačiau šių įrenginių diegimas reikalauja gilios jėgainės termodinaminės ir ekonominės analizės, kadangi investiciniai kaštai dideli, o atsipirkimas nevisada įmanomas.
3. Vienas iš labiausiai ribojančių biokuro jėgainių galios veiksnių, tai biokuro tiekimo spindulys aplink jėgainę. Jis priklauso nuo šalies vietovės miškingumo, kelių infrastruktūros ir pan. Skaičiuojamas optimalus biokuro tiekimo spindulys, esant gerai kelių infrastruktūrai 50 km, kitu atveju biokuro kaina ženkliai išauga. Didelės galios jėgainėms, kai biokuro pristatymo spindulys viršija 50 km, ekonominiu požiūriu, kuro ruošimas jos teritorijoje yra efektyvesnis.
4. Biokuro kogeneracinių jėgainių plėtra priklauso nuo Europos Sąjungos ir pačios valstybės subsidijavimo, kadangi tokių jėgainių investiciniai kaštai yra ženkliai didesni už analogiškas dujomis kūrenamas. Biokuras turi pranašumą tik pačio kuro kainoje, jis šiuo metu apie du kartus pigesnis už dujas. Lietuvoje statomoms naujoms, efektyvioms biokuro kogeneracinėms jėgainėms galima gauti 50% negražinamą subsidiją, kai jėgainės šiluminė galia ne didesnė 20MW, o elektrinė galia 5MW.
5. Jėgainės energetinė ir ekonominė analizė parodė, kad šilumos ir masės mainų regeneratoriums duoda didelį efektą jos ekonominiams rodikliams. Regeneracinės sistemos investiciniai kaštai siekia tik apie 2,1% lyginant su visos statomos jėgainės kaštais. Šilumos nuostoliai dėl šalinamų dūmų sumažėja apie 15%, kas ženkliai pagerina jėgainės bendrą efektyvumą, taip pat galima pretenduoti į maksimalią 50% subsidiją padengti jėgainės kaštams.

LITERATŪROS SĄRAŠAS:

1. Dagilis Vytautas (2016). Waste heat recovery system for woodfuel heat and power plant.
2. Čiuplys Audrius (2012). Biokuro katilinės energetinio efektyvumo tyrimas. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.] Prieiga per internet: <http://gs.elaba.lt/object/elaba:1896372/index.html>
3. LR ūkio ministerijos ataskaita. Įvairių kogeneracijos technologijų įrengimo galimybių ir sąnaudų studija bei rekomendacijų dėl šių technologijų diegimo parengimas. 2007m. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internet: <https://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/Veikla/Veiklos%20sritys/Nafta%2C%20dujos%2C%20elektra%2C%20šiluma%2C%20energijos%20vartojimo%20efektyvumas/Lietuvos%20šilumos%20sektorius%20-%20Teisės%20aktai/Kogener.pdf>
4. Turbines info. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą: <http://www.turbinesinfo.com/steam-turbine-efficiency/>
5. ECHAINED Report Summary. WP(5) Heat and power production technologies. 2006 rugpjūčio 1d. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą: http://cordis.europa.eu/result/rcn/41484_en.html
6. Russo Diego, Macri Giorgio, Luzzi Giuseppe, De Rossi Alessandro (2016). Wood energy plants and biomass supply chain in Southern Italy. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.] Prieiga per internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042816303706>
7. J. Koorneef, P. Breevoort, C. Hamelinck, C. Hendriks, M. Hoogwijk, K. Koop, M. Koper, T. Dixon, A. Camps (2012). Global potential for biomass and carbon dioxide capture, transport and storage up to 2050. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.] Prieiga per internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583612001843>
8. Ambrulevičius Rimvydas (2010). Biomassės deginimas mažos bei vidutinės galios katilinėse ir emisijų problemos. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą: <http://mokslozurnalai.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2010/2/103-109.pdf>
9. V. Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, S. Soosaar. Biokuro naudotojo žinynas (2007). Vilnius: „Žara“. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą: http://www.ena.lt/doc_atsti/biokuras.pdf
10. VTT Technical Research Centre of Finland (2007). Biomass fuel supply chains for solid biofuels. Suomija: ER-Paino Oy. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą: [http://www.biomassstradecentre2.eu/data/upload/D5_5_Biomass_supply_chains_eubionet_1_\(1\).pdf](http://www.biomassstradecentre2.eu/data/upload/D5_5_Biomass_supply_chains_eubionet_1_(1).pdf)

11. K. Vatopoulos, D. Andrews, J. Carlsson, I. Papaioannou, G. Zubi (2012). Study on the state of play of energy efficiency of heat and electricity production technologies. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą:
<https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/Study-on-the-state-of-play-of-energy-efficiency-of-heat-and-electricity-production-technologies.pdf>
12. Video konferencija „Viskas apie biokuro katilines“ [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą:
<https://www.youtube.com/watch?v=7c1XAKEY2xk&list=PLB6D5A6A773E52B52&index=30>
13. Kogeneracija, jos panaudojimas ir efektyvumas. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą: <http://www.poremo.com/LT/65/KOGENERACIJA-ir-jos-savoka.htm>
14. Kogeneracija. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą:
<http://www.catpower.lt/dujiniai-generatoriai/kogeneracija/>
15. Kogeneracinių jėgainių tipai ir privalumai. . [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internetą:
http://www.ekologija.lt/ekorasčiai/kogeneracines_jegaines_vienu_suviu_ne_maziau_kaip_d_u_zuikiai
16. KTU modulio T140M121 “Darnioji energetika” paskaitų medžiaga.
17. Thermally driven heat pumps [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internet:
<https://hub.globalccsinstitute.com/publications/strategic-research-priorities-cross-cutting-technology/43-thermally-driven-heat-pumps>
18. Guskis Vincas (2008). Statybinės medžiagos. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internet: http://vuzf.asu.lt/wp-content/uploads/sites/6/2015/01/statybinės_medžiagos.pdf
19. Buinevičius Kęstutis (2015). Oro taršos mažinimo strategija. Europos parlamento pozicija. [žiūrėta 2017m. gegužės 20d.]. Prieiga per internet:
http://www.europarl.lt/resource/static/files/Prezentacijos_is_renginiu/2-1-k.-buinevi-ius.pdf
20. Jonsson, M.; Yan, J. (2005). Humidified gas turbines – a review of proposed and implemented cycles. Energy. [žiūrėta 2017m. gegužės 23d.]. Prieiga per internet:
http://staff.www.ltu.se/~lassew/ene/Avd%20Energiteknik/Publikationer/2004/Energy_humid%20GT_041025.pdf

A PRIEDAS
KURĄ DEGINANČIŲ ĮRENGINIŲ IŠMETAMŲ
TERŠALŲ RIBINĖS VERTĖS

A1. Didelių kurą deginančių įrenginių SO₂ teršalo ribinės vertės. [19]

Pagal DKDI normų 1,2,3,4,5,6 priedų A dalyse pateiktas RV				
Nominalus šiluminis našumas, MW	Biomasė	Durpės	Skystasis kuras	Dujos
SO₂ (DKDI taisyklės nuo 2008.01.01), mg/m³				
50-100	2000	2000	1700	35
100-300	2000→1200	2000→1200	1700	35
300-500	1200→400	1200→400	1700 →400	35
>500	400	400	400	35
SO₂ (direktyva 2010/75/ES nuo 2016.01.01), mg/m³				
50-100	200	300	350	35
100-300	200	300	250	35
300-500	200	200	200	35
>500	200	200	200	35
SO₂ įrenginiams statytiems po 2016.01.01, mg/m³				
50-100	200	300	350	35
100-300	200	300 (250 FB)	200	35
300-500	150	150 (200 FB)	150	35
>500	150	150 (200 FB)	150	35

A2. Didelių kurą deginančių įrenginių NO_x teršalo ribinės vertės.[19]

Pagal DKDI normų 1,2,3,4,5,6 priedų A dalyse pateiktas RV				
Nominalus šiluminis našumas, MW	Biomasė	Durpės	Skystasis kuras	Dujos
NO_x (DKDI taisyklės nuo 2008.01.01), mg/m³				
50-100	600	600	450	300
100-300	600	600	450	300
300-500	600	600	450	300
>500	500	500	400	200
NO_x (direktyva 2010/75/ES nuo 2016.01.01), mg/m³				
50-100	300	300	450	100
100-300	250	250	200	100
300-500	200	200	150	100
>500	200	200	150	100
NO_x įrenginiams statytiems po 2016.01.01, mg/m³				
50-100	250	250	300	100
100-300	200	200	150	100
300-500	150	150	100	100
>500	150	150	100	100

A3. Didelių kurą deginančių įrenginių CO teršalo ribinės vertės. [19]

Pagal DKDI normų 1,2,3,4,5,6 priedų A dalyse pateiktas RV				
Nominalus šiluminis našumas, MW	Biomasė	Durpės	Skystasis kuras	Dujos
CO (DKDI taisyklės nuo 2008.01.01), mg/m³				
50-100	700	700	400	300
100-300	500	500	400	300
300-500	500	500	400	300
>500	300	300	300	200
CO (direktyva 2010/75/ES nuo 2016.01.01), mg/m³				
50-100	-	-	-	100
100-300	-	-	-	100
300-500	-	-	-	100
>500	-	-	-	100
CO įrenginiams statytiems po 2016.01.01, mg/m³				
50-100	-	-	-	100
100-300	-	-	-	100
300-500	-	-	-	100
>500	-	-	-	100

A4. Didelių kurą deginančių įrenginių KD teršalo ribinės vertės. [19]

Pagal DKDI normų 1,2,3,4,5,6 priedų A dalyse pateiktas RV				
Nominalus šiluminis našumas, MW	Biomasė	Durpės	Skystasis kuras	Dujos
Kietosios dalelės (DKDI taisyklės nuo 2008.01.01), mg/m³				
50-100	100	100	50	5
100-300	100	100	50	5
300-500	100	100	50	5
>500	50	50	50	5
Kietosios dalelės (direktyva 2010/75/ES nuo 2016.01.01), mg/m³				
50-100	30	30	30	5
100-300	20	20	25	5
300-500	20	20	20	5
>500	20	20	20	5
Kietosios dalelės įrenginiams statytiems po 2016.01.01, mg/m³				
50-100	20	20	20	5
100-300	20	20	20	5
300-500	20	20	10	5

A5. Vidutinių kurą deginančių įrenginių SO₂ teršalo ribinės vertės. [19]

Kuro rūšis	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	SO ₂ , mg/Nm ³	
		esamas įrenginys	naujas įrenginys
Dabartinis LAND 43-2013			
Dujinis kuras	$1 \geq MW < 50$	nenormuojama	35
Skystasis kuras	$1 \geq MW < 20$	1700	1700
	$20 \geq MW < 50$	1700	1700
Kietasis kuras	$1 \geq MW < 20$	2000	2000
	$20 \geq MW < 50$	2000	2000
Direktyva 2013/0442			
Dujinis kuras	$1 \geq MW < 50$	-	-
Skystasis kuras	$1 \geq MW < 50$	170	170
Mazutas	$1 \geq MW < 50$	350	350
Kieta biomasė	$1 \geq MW < 50$	200	200
Kitas kietas kuras	$1 \geq MW < 50$	400	400

A6. Vidutinių kurą deginančių įrenginių NO_x teršalo ribinės vertės. [19]

Kuro rūšis	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	NO _x , mg/Nm ³	
		esamas įrenginys	naujas įrenginys
Dabartinis LAND 43-2013			
Dujinis kuras	1 ≥ MW < 50	350	350
Skystasis kuras	1 ≥ MW < 20	650	450
	20 ≥ MW < 50	650	450
Kietasis kuras	1 ≥ MW < 20	650	650
	20 ≥ MW < 50	650	650
Direktyva 2013/0442			
Dujinis kuras	1 ≥ MW < 50	200	100
Skystasis kuras	1 ≥ MW < 50	200	200
Mazutas	1 ≥ MW < 50	650	200
Kieta biomasė	1 ≥ MW < 50	300	300
Kitas kietas kuras	1 ≥ MW < 50	300	300

A7. Vidutinių kurą deginančių įrenginių KD teršalo ribinės vertės. [19]

Kuro rūšis	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	KD, mg/Nm ³	
		esamas įrenginys	naujas įrenginys
Dabartinis LAND 43-2013			
Dujinis kuras	$1 \geq MW < 50$	nenormuojama	20
Skystasis kuras	$1 \geq MW < 20$	250	200
	$20 \geq MW < 50$	250	100
Kietasis kuras	$1 \geq MW < 20$	700	400
	$20 \geq MW < 50$	500	300
Direktyva 2013/0442			
Dujinis kuras	$1 \geq MW < 50$	-	-
Skystasis kuras	$1 \geq MW < 50$	30	20
Mazutas	$1 \geq MW < 50$	30	20
Kieta biomasė	$1 \geq MW < 50$	30	20
Kitas kietas kuras	$1 \geq MW < 50$	20	20

A8. Vidutinių kurą deginančių įrenginių CO teršalo ribinės vertės. [19]

Kuro rūšis	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	CO, mg/Nm ³	
		esamas įrenginys	naujas įrenginys
Dabartinis LAND 43-2013			
Dujinis kuras	$1 \geq \text{MW} < 50$	400	400
Skystasis kuras	$1 \geq \text{MW} < 20$	500	500
	$20 \geq \text{MW} < 50$	400	400
Kietasis kuras	$1 \geq \text{MW} < 20$	2000	1000
	$20 \geq \text{MW} < 50$	1500	1000
Direktyva 2013/0442			
Dujinis kuras	$1 \geq \text{MW} < 50$	-	-
Skystasis kuras	$1 \geq \text{MW} < 50$	-	-
Mazutas	$1 \geq \text{MW} < 50$	-	-
Kieta biomasė	$1 \geq \text{MW} < 50$	-	-
Kitas kietas kuras	$1 \geq \text{MW} < 50$	-	-