



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Biokuro katilinės įrenginių darbo ir efektyvumo didinimo galimybių analizė

Baigiamasis magistro projektas

Aurimas Nečionis
Projekto autorius

Doc. dr. Algimantas Balčius
Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Biokuro katilinės įrenginių darbo ir efektyvumo didinimo galimybių analizė

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Aurimas Nečionis

Projekto autorius

Doc. dr. Algimantas Balčius

Vadovas

Dr. Rolandas Jonynas

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Aurimas Nečionis

Biokuro katilinės įrenginių darbo ir efektyvumo didinimo galimybių analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Aurimas Nečionis

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui – Aurimui Nečioniui

1. Projekto tema

Biokuro katilinės įrenginių darbo ir efektyvumo didinimo galimybių analizė

(Lietuvių kalba)

Analysis of Operation and Possibilities for Increasing Efficiency of Biofuel Boiler House Facilities

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: išanalizuoti biokurų katilinių šilumos gamybos procesą, nustatyti katilinės efektyvumo gerinimo galimybes, palyginti skaičiavimo rezultatus su realios katilinės darbo parametrais.

Uždaviniai:

1. atlikti biokuro katilinių efektyvumo tematika literatūros analizę;
2. atlikti tiekiamo biokuro savybių palyginamąją analizę;
3. išnagrinėti biokurų katilinių šilumos gamybos procesą kondensaciniame ekonomiaizeryje ir absorbciniame šilumos siurblyje;
4. išanalizuoti šiluminių skaičiavimų rezultatus ir įrangos parinkimo aspektus;
5. palyginti gautus skaičiavimo ir eksperimentinius rezultatus, pateikti išvadas.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Projektas turi atitikti KTU rašto darbų rengimo metodinių nurodymų reikalavimus ir MIDF baigiamųjų projektų rengimo ir gynimo metodinius reikalavimus.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Rekomenduojamas tyrimų rezultatų pristatymas MIDF konferencijoje „Industrial Engineering 2023“.

Projekto autorius	Aurimas Nečionis <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2023-02-09 <i>(Data)</i>
Projekto vadovas	Algimantas Balčius <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2023-02-09 <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovas	Algimantas Balčius <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2023-02-10 <i>(Data)</i>

Nečionis, Aurimas. Biokuro įrenginių darbo ir efektyvumo didinimo galimybių analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algimantas Balčius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: biokuras, biokuro katilinės, efektyvinimas, absorbcinis šilumos siurblys, ekonomazeris.

Kaunas, 2023. 49 p.

Santrauka

Šiame darbe analizuojamas šilumos gamybos katilinėje, naudojančioje biokurą (smulkintą medieną), efektyvumas. Pažymima, kad smulkintoje medienoje paprastai yra tam tikras kiekis drėgmės, nes kuras dažniausiai vežamas tiesiai iš kirtaviečių. Surinkti duomenys, kokiose ribose drėgmės kiekis biokure kinta skirtingais metų laikais. Drėgmę, esančią biokure, degimo metu reikalinga išgarinti ir tam sunaudojama energija, kuri išmetama su dūmais. Kad susigražinti šią energiją reikalinga ataušinti dūmus žemiau dūmų rasos taško temperatūros. Ataušinus dūmus žemiau rasos taško, dūmuose esantis vanduo kondensuojasi ir taip atgaunama garinimo / kondensavimosi energija. Kuo žemesnė dūmų temperatūra, tuo daugiau energijos atgaunama nuo dūmų, tuo didesnis ir katilinės efektyvumas. Dūmų temperatūrai sumažinti reikalinga papildoma įranga, tokia kaip kondensacinis ekonomazeris arba absorbcinis šilumos siurblys. Darbe pateikiami skaičiavimai bei realioje katilinėje gauti rezultatai, kiek papildomai energijos galima atgauti dūmų kondensaciniame ekonomazeriulyje, aušinant dūmus grįžtamam šilumos tinklų vandeniui ir kiek papildomai energijos galima atgauti aušinant dūmus absorbcinio šilumos siurblio (iš)garintuvo kontūre atgaunama šiluma. Biokuro katilinės efektyvumas priklauso nuo išmetamų dūmų temperatūros. Kuo dūmų temperatūra žemesnė, tuo daugiau energijos paimama iš to paties kuro kiekio, arba kitaip tariant, tam pačiam energijos kiekiui pagaminti sunaudojama mažiau kuro.

Nečionis, Aurimas. Analysis of Operation and Possibilities for Increasing Efficiency of Biofuel Boiler House Facilities. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Algimantas Balčius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering, Engineering Studies.

Keywords: biofuel; boiler house; energy efficiency; absorption heat pump, economizer.

Kaunas, 2023. 49 pages.

Summary

This paper analyses the efficiency of heat production in a boiler house using biofuel (shredded wood). It is noted that chopped wood usually contains a certain amount of water, since the fuel is usually transported directly from the logging sites. The collected data show the limits within which the amount of water in biofuel varies in different seasons. During combustion, the water contained in biofuel needs to be evaporated, and for this energy is consumed, which is emitted with the smoke. To capture this energy, it is necessary to cool the smoke below the smoke dew point temperature. After cooling the smoke below the dew point, the water in the smoke condenses and thus the evaporation / condensation energy is recovered. The lower the temperature of the smoke, the more energy is removed from the smoke, and the boiler house efficiency is higher. Additional equipment such as a condensing economizer or an absorption heat pump is required to reduce the flue gas temperature. The study presents calculations and results obtained in a real boiler house, how much additional energy can be recovered in the smoke condensation economizer, cooling the smoke with the return water of the heat networks and how much additional energy can be recovered when cooling the smoke by the heat removed in the circuit of the absorption heat pump evaporator. The efficiency of the biofuel boiler house depends on the temperature of the flue gas. The lower the smoke temperature, the more energy is extracted from the same amount of fuel, or in other words, less fuel is used to produce the same amount of energy.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė.....	13
2. Biokuras.....	14
2.1. Biokuro (smulkintos medienos) drėgmė	14
2.2. Biokuro elementinė sudėtis ir biokuro energetinė vertė.....	14
2.3. Kuro deginimas, dūmų sudėtis, dūmų energija	15
3. Katilinės įrenginiai	18
3.1. Kuro poreikis	18
3.2. Degimo produktų kiekiai	18
4. Šilumos gamybos procesas.....	20
4.1. Šilumos gamybos schema.....	21
5. Aušinimo terpė.....	24
5.1. Klimatinės sąlygos.....	24
6. Kondensacinio ekonomizerio veikimas.....	26
6.1. Kondensacinio ekonomizerio atgaunamos šilumos skaičiavimo principas.....	28
6.2. Skaičiavimo rezultatai (atgaunama šiluma).....	30
7. Absorbcinis šilumos siurblys (AŠS)	32
7.1. LiBr ir vandens tirpalas	32
7.2. AŠS veikimas	33
7.3. AŠS atgaunamos šilumos skaičiavimo principas	35
7.4. Skaičiavimo rezultatai (Atgaunama šiluma)	35
7.5. Skaičiavimo ir katilinės darbo rezultatų palyginimas	37
8. Kompresorinis šilumos siurblys	43
Išvados	46
Literatūros sąrašas	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Kuro sudėtis.....	15
2 lentelė. Degimo reakcijos.....	16
3 lentelė. Skaičiavimai sudeginus 1 kg kuro.....	16
4 lentelė. Kuro poreikis.....	18
5 lentelė. Degimo produktų kiekiai.....	18
6 lentelė. Degimo produktų šiluminė talpa $\text{kJ}/(\text{nm}^3 \text{ K})$	20
7 lentelė. Vidutinė lauko oro temperatūra.....	25
8 lentelė. Dūmų sudėtis už kondensacinio ekonomizerio.....	30
9 lentelė. CO_2 , N_2 , O_2 atiduodama šiluma DKE.....	31
10 lentelė. Dūmų sudėtis už AŠS.....	35
11 lentelė. AŠS atgaunamos šilumos suvestinė.....	36
12 lentelė. CO_2 , N_2 , O_2 atiduodama šiluma AŠS.....	36
13 lentelė. Katilinės darbas. Reali kuro sudėtis.....	38
14 lentelė. Katilinės darbas. Skaičiavimai sudeginus 1 kg kuro.....	39
15 lentelė. Katilinės darbas. Kuro poreikis.....	39
16 lentelė. Katilinės darbas. Degimo produktų kiekiai.....	39
17 lentelė. Katilinės darbas. Dūmų sudėtis už kondensacinio ekonomizerio.....	40
18 lentelė. Katilinės darbas. CO_2 , N_2 , O_2 atiduodama šiluma DKE.....	40
19 lentelė. Katilinės darbas. Dūmų sudėtis už AŠS.....	41
20 lentelė. Katilinės darbas. CO_2 , N_2 , O_2 atiduodama šiluma AŠS.....	41
21 lentelė. Šaldymo agentų parametrai.....	43

Paveikslų sąrašas

1 pav. Biokuro drėgmė 2021 metų skirtingais mėnesiais	14
2 pav. Degimo produktų kiekiai.....	19
3 pav. Šilumos gamybos schema	22
4 pav. Katilinės katilo K1 realūs darbo duomenys	23
5 pav. Katilinės katilo K2 realūs darbo duomenys	23
6 pav. Temperatūrinis grafikas šildymo sezonui	24
7 pav. Lauko temperatūra (valandų skaičius per metus).....	25
8 pav. Supaprastinta kondensacinio ekonomizerio schema	26
9 pav. Kondensacinio ekonomizerio schema iki AŠS įrengimo	27
10 pav. Kondensaciniame ekonomizeryje gaunamos šilumos kiekis %, nuo katilinės galios	28
11 pav. Šilumos atgavimas kondensaciniame ekonomizeryje iš H ₂ O, iš CO ₂ , iš N ₂ , iš O ₂	29
12 pav. Pagrindinės AŠS dalys	33
13 pav. Kondensacinio ekonomizerio ir AŠS principinė pajungimo schema	34
14 pav. Katilinės bendrųjų įrenginių schema ir darbiniai parametrai	37
15 pav. Kondensacinio ekonomizerio ir AŠS schema ir darbiniai parametrai.....	38
16 pav. Šilumos transformacijos koeficiento COP priklausomybė nuo virimo temperatūros.....	44
17 pav. Šilumos transformacijos koeficiento COP priklausomybė nuo kondensacijos temperatūros	44
18 pav. Šilumos siurblio ciklas log p – h diagramoje	45

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AŠS – absorbcinis šilumos siurblys.

DKE – dūmų kondensacinis ekonomizeris.

AL – atsipirkimo laikas;

NK – naudingumo koeficientas.

NVK - naudingo veikimo koeficientas

KŠS – Kompresorinis šilumos siurblys

LiBr - Ličio Bromidas

Terminai:

Degimo produktai – tai dūmų sudedamosios dalys (CO_2 ; H_2O ; N_2 ; O_2 ; SO_2) atskirai, dūmai – minėtos dalys paimtos kartu, kaip visuma.

Molinė masė – cheminės medžiagos parametras – vieno molio medžiagos kiekio masė. Molio masės gramais skaitinė vertė lygi molekulinei masei, išreikštai atominiais masės vienetais.

Įvadas

Geologinėje Žemės istorijoje klimatas keitėsi dėl natūralių procesų: planetos orbitos parametrų kaitos, atmosferos sudėties pokyčių, tektoninių plokščių dreifo, saulės aktyvumo ciklų, ugnikalnių išsiveržimų. Paskutinius 200 metų fiksuojami klimato pokyčiai išsiskiria tuo, kad pagrindinė kaitos priežastis - žmonių veikla. Dėl nuolatinio pramonės, žemės ūkio ir transporto augimo į atmosferą išmetama vis daugiau ir daugiau šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Vienas iš šiltnamio efektą sukeliančių veiksnių yra iškastinio kuro deginimo dujų (CO₂) išmetimas į atmosferą [1].

Klimato atšilimas turi begalės neigiamų veiksnių: greitas vandenynų lygio kilimas, vegetacijos pakitimai, sausrų pagausėjimas, kritulių kiekio kaita, pagausėja upių potvyniai. Taip pat fiksuojama daugiau ekstremalių reiškinių: tropinių ciklonų, viesulų, liūčių, speigų, karščio bangų ir t. t [1]. Klimato kaita – tai vienas didžiausių mūsų laikų pavojų ir iššūkių. 2021 m. lapkričio mėn. pradžioje daugiau kaip 120 valstybių ir vyriausybių vadovų susirinko į 26-ąją JT klimato kaitos konferenciją (COP26) Glazge, kur buvo nubrėžtas kursas, vedantis žmoniją tolyn nuo katastrofinio pasaulinio atšilimo. Šios konferencijos susitarimo projekte šalys buvo raginamos iki 2022-ųjų – trejais metais anksčiau nei numatyta – padidinti savo tikslus dėl taršos mažinimo, paaiškėjus, kad pasauliui galimybė klimato atšilimą apriboti 1,5 °C laipsnio dar yra labai tolima.

2022 metų lapkričio 7–8 d. Šarm el Šeiche pasaulio vadovai pradėjo 27-ąją JT klimato kaitos konferenciją (COP27). ES pozicija šioje konferencijoje: nekeisti užsibrėžto tikslo (visuotinis atšilimas ne didesnis, kaip 1,5 °C, lyginant su iki pramoninio laikotarpio lygiu), užtikrinti poveikio klimatui neutralumą [2] (nepaisant energetinės krizės keliamų iššūkių, kuriuos dar paaštrino tai, kad Rusija energijos tiekimu naudojami kaip ginklu).

Klimato atšilimui mažinti organizacinių priemonių nepakanka. Turi būti remiamasi ir techninėmis inovacijomis, tokiomis kurios leistų efektyvinti energijos gamybą, mažinti pagamintos energijos nuostolius, efektyviau panaudoti gaunamą energiją. Baigiamajame darbe nagrinėjamas energijos gamybos efektyvinimas biokuro katilinėse, kaip aušinant dūmus būtų galima gauti didesnę energijos kiekį (iš to paties biokuro kiekio).

Darbo tikslas - išanalizuoti biokuro katilinių darbinius parametrus ir efektyvumo didinimo galimybes.

Darbo uždaviniai:

1. atlikti literatūros analizę biokuro katilinių efektyvumo tematika;
2. atlikti tiekiamo biokuro savybių palyginamąją analizę;
3. išnagrinėti biokuro katilinių šilumos gamybos procesą kondensaciniame ekonomizaizeryje ir absorbciniame šilumos siurblyje;
4. išanalizuoti šiluminių skaičiavimų rezultatus ir įrangos parinkimo aspektus;
5. palyginti gautus skaičiavimo ir eksperimentinius rezultatus, pateikti išvadas.

Projekto tyrimo objektas

Projekto tyrimo objektu pasirinkta E-energijos įmonių grupės suprojektuota, pastatyta ir įrengta, bei eksploatuojamą katilinė, nes buvo aktualu palyginti skaičiavimo rezultatus su realiai katilinėje gaunamais rezultatais. Katilinės esama vieta yra Geologų g. 12A, Vilnius. Katilinė yra išskirtinė tuo, kad čia yra įrengtas ne tik kondensacinis ekonomaizeris, bet ir absorbcinis šilumos siurblys. Šiai katilinei buvo sukonstruoti ir pagaminti kuro sandėlis, du katilai, dūmų valymo įrangą ir kondensacinis ekonomaizeris. Katilinėje įrengtam absorbciniam šilumos siurbliui buvo pagamintas dūmų aušinimo įrenginys (kamera), kuriame šilumą nuo dūmų atgaunama išpurškiant didelį kiekį atvėsinto kondensato. Šioje katilinėje sukonstruota ir įrengta dūmų aušinimo kamera yra pirmasis Lietuvoje dūmų aušinimo įrenginys skirtas darbui su absorbciniu siurbliu.

Tyrimo metodai ir modeliai

Termocheminiai biomasės degimo procesai yra pakankamai sudėtingi dėl nevienalytės ir neapibrėžtos kuro sudėties, bei daugybės cheminių junginių, dalyvaujančių reakcijose. Darbe naudojama klasikinė šiluminių skaičiavimų metodika, degimo procesų teorinės lygtys. Skaičiavimuose priimti kai kurie supaprastinimai, pavyzdžiui, kuro kaloringumas pagal sudėtį, skaičiuotas naudojant Mendelejevo formulę, „nesudegimai“ priimti $CO = 0\%$, nors realiai jie gali siekti ir iki kelių procentų; temperatūra iš pakuros priimta $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (paprastai temperatūra yra aukštesnė, dūmų srautas mažesnis, bet priimamas konservatyvus variantas); dūmų recirkuliacija paskaičiuota, pagal tuos pačius priimtus $950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kondensacinio proceso rasos taškas skaičiuotas pagal vandens garų parcialinį slėgį dūmuose, priimta, kad santykinis dūmų drėgnumas, tiek už kondensacinio ekonomaizerio, tiek už absorbcinio šilumos siurblio yra 100% .

1. Literatūros analizė

Svarbu suvokti ir ištirti technologijų įtaką klimato kaitai. Viena iš tokių technologijų, susijusių su gamtosauga, yra biokuro katilinės. Atlikta daug tyrimų šioje srityje. Šiame skyriuje pateikiama biokuro katilinių efektyvumo literatūros analizė.

- biokuro katilų – Vengrijos Miskols universiteto autoriai parodė, kad programiškai sujungus liepsnos stebėjimo kameros duomenis su momentiniais katilo parametrais, iš anksto galima prognozuoti katilo režimų nukrypimą dar jiems neprasidėjus (skirtingai nuo atgalinio ryšio iš jutiklių) [3].
- biokuro – Italijos Pisa universiteto autoriai nagrinėjo, kaip katilo efektyvumui įtakoja deginamo kuro dalelių frakcijos dydis [4].
- katilinių efektyvumo didinimo – Tailando Thammasat universiteto autorius nagrinėja ekonomizaizerių, oro šildytuvų naudojimo tikslingumą katilinės efektyvumui pakelti. Straipsnyje minimi trys įrenginiai galintys tą padaryti. 1. Ekonomaizeris naudojamas padidinti tiekiamo į katilą vandens temperatūrą (dūmai atiduoda dalį šilumos tiekiamam į katilą vandeniui (dūmų / vandens šilumokaityje). 2. Oro šildytuvas naudojamas tiekiamo į kūryklą oro šildymui (dūmai atiduoda dalį šilumos tiekiamam į kūryklą orui). 3. Kuro džiovintuvas. Kuras šildomas ir džiovinamas karštais dūmais. Dūmai atiduoda dalį šilumos šlapiam kurui. Dalis drėgmės iš jo išgaruoja ir nebereikia jo garinti pakuroje. Kuro temperatūra dėl karštų dūmų pakyla ir mažiau kurą reikia šildyti pakuroje. To pasėkoje į kūryklą patenka sausesnis ir šiltesnis kuras, tai yra sutaupoma dalis energijos. Be to sumažėja ir išeinančių dūmų temperatūra. Abu minėti veiksniai didina katilinės naudingo veiksmo koeficientą [5].
- šiame straipsnyje aprašomas netiesioginio kontakto kondensacinis ekonomizaizeris, sudarytas iš dūmų vamzdžių šilumokaičio, kondensato išpurškimo ir kondensato valymo sistemų. Ekonomaizeryje kondensatas išpurškiamas per specialiai suprojektuotus purkštukus į dūmų traktą. Taip apipurškiant dūmus, jie pasiekia rasantą tašką ir dūmuose esantys vandens garai lengvai kondensuojasi ant dūmų vamzdžių šilumokaičio sienelių ir tokiu būdu perduoda sienelėms kondensacijos (slaptą garavimo) šilumą. Taip yra šildomas kitoje sienelės pusėje esantis grįžtamas iš tinklų (sąlyginai šaltas) termofikacinis vanduo. Taip pat nagrinėjama teorinių ir praktinių rezultatų skirtumai ir jų atsiradimo priežastys [6].
- efektyvesnio energijos naudojimo – Prancūzijos Savoie Mont Blanc universiteto autoriai nagrinėja absorbcinio šilumos siurblio panaudojimo galimybes miesto tinklų šilumos punktuose skirtingais režimais [7].
- šiame straipsnyje aprašomas tiesioginio kontakto kondensacinis ekonomizaizeris, kuriame į dūmus išpurškiamas didelis kiekis kondensato. Tarp išpurškto kondensato ir dūmų vyksta šilumos perdavimas kondensatui, kondensatas sušildomas, o dūmų temperatūra tampa artima kondensato temperatūrai. Toliau kondensatas šilumokaityje perduoda paimtą iš dūmų šilumą aušinimo terpei, pavyzdžiui šilumos tinklų vandeniui [8].
- straipsnyje aprašomas absorbcinio šilumos siurblio panaudojimas, atgaunant šilumą iš žemos temperatūros atliekinės šilumos. Straipsnis aktualus tuo, kad katilinėse kaip atliekinės šilumos šaltinis gali būti naudojami 40 – 50 °C dūmai už kondensacinio ekonomizaizerio [9].
- straipsnis apie biokuro panaudojimo pramoninėse katilinėse evoliuciją [10].
- pateikiama informacija apie LiBr ir jo tirpalų savybes, slėgio-temperatūros-koncentracijos bei entalpijos-temperatūros-koncentracijos diagramos ir AŠS siurblio schema [11].
- Straipsnyje nagrinėjama absorbcinio šilumos siurblio įrengimo miesto šildymo katilinėje aspektai, pateikiama bendrą atliekinių šilumos šaltinių ir šilumos siurblių apžvalga [12].

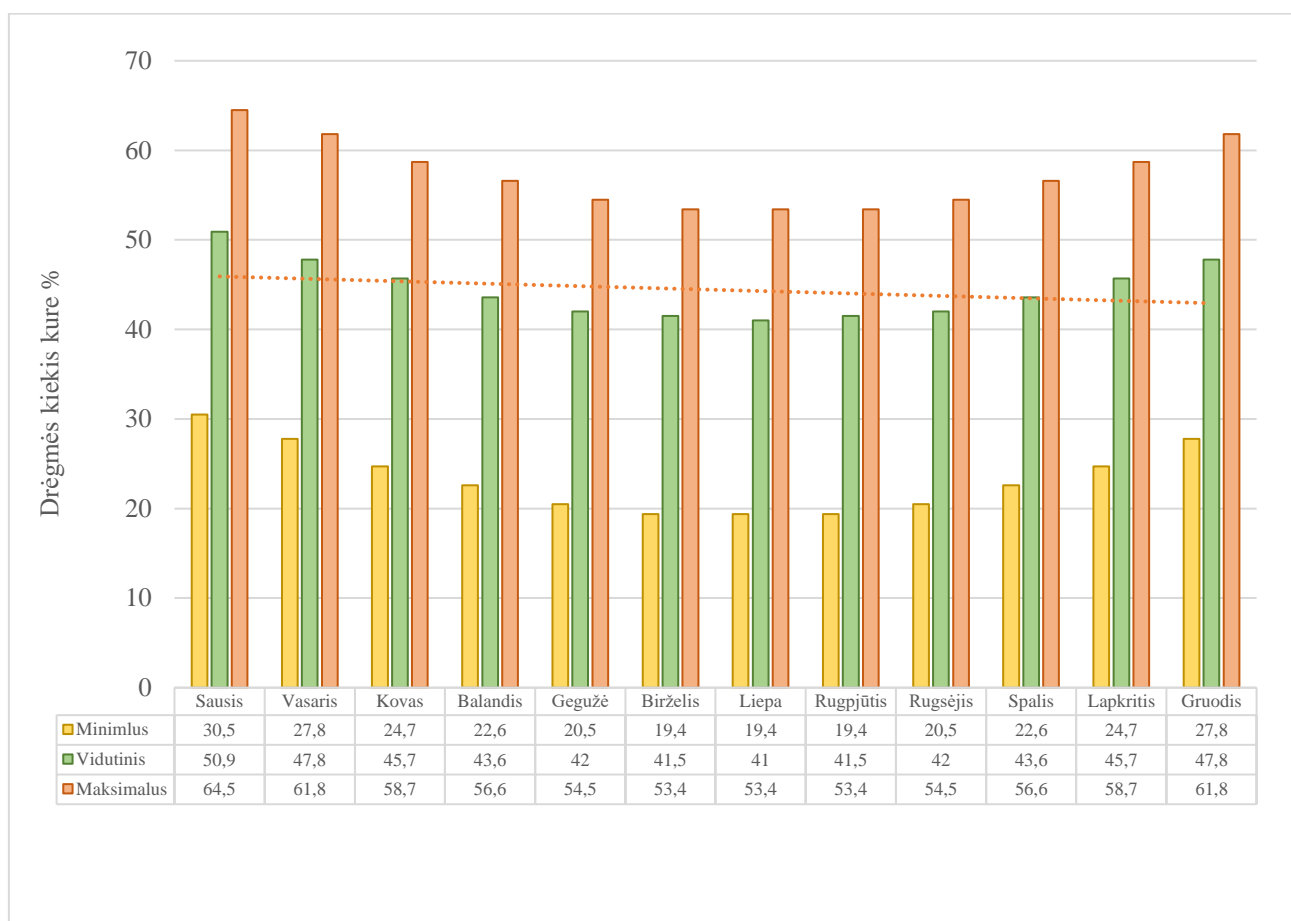
2. Biokuras

Biokuras katilinėms perkamas iš kuro biržos „Baltpool“. „Baltpool siūlomi produktai yra smulkinta mediena (SM1, SM2, SM3), medienos granulės (MG1, MG2, MG3, IG), kuro durpės (KD), bei lignino ir medienos mišinys (LBM) [13]. Nagrinėjamoje katilinėje naudojama tik smulkinta mediena. Dalis smulkintos medienos yra perkama iš kuro biržos „Baltpool“, o kitą dalį įmonė pasigamina pati, nes turi savo smulkintuvą. Todėl toliau bus nagrinėjama tik smulkinta mediena.

2.1. Biokuro (smulkintos medienos) drėgmė

Biomasės kuras paprastai yra tiekiamas tiesiai iš kirtaviečių, smulkinamas ir dažnai laikomas lauko sąlygomis, todėl niekada nėra sausas, jame yra tam tikras drėgmės kiekis. Išnagrinėjus į katilinę pristatomo kuro žurnalus (tyrimų rezultatus), pastebėta, kad drėgmės kiekis priklauso nuo sezono.

1 paveiksle grafiškai pateikiami 2021 metų rezultatai ir iš grafiko galime matyti, kad drėgmės kiekis biokure mažiausias yra vasarą, o didžiausias yra žiemą.



1pav. Biokuro drėgmė 2021 metų skirtingais mėnesiais (Sudaryta autoriaus)

2.2. Biokuro elementinė sudėtis ir biokuro energetinė vertė

Kietojo kuro sudėtis paprastai reiškia ją sudarančių elementų masės procentais [14]. Degieji elementai kure yra anglis (C%), vandenilis (H%) ir sieras (S%). Taip pat kure yra deguonies (O%), azoto (N%), vandens (H₂O W%) ir kitų nedegusių mineralinių priemaišų (pelenų A%). Kietojo kuro sudėtis be vandens vadinama sausąja kuro mase, o kietojo kuro sudėtis be vandens ir be pelenų vadinama degiąja kuro mase. Žinant kuro elementų sudėtį iš empirinių formulų galima suskaičiuoti

kuro degimo šilumą. Skaičiavimuose naudota Mendelejevo formulė, o tipinė biokuro sudėtis (smulkinta mediena) paimta iš į katilinę tiekiamo kuro laboratorijos tyrimų protokolų. 1 lentelėje pateikiama naudojamo kuro sudėtis.

1 lentelė. Kuro sudėtis (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	Žymėjimas	Sausos masės sudėtis (tipinė)	Realios masės sudėtis	Mato vnt.
Drėgmės kiekis kure	W	0,00	45,000	%
Kuro pelningumas	As	5,00	2,750	%
Anglis	C	48,45	26,648	%
Vandenilis	H	5,97	3,281	%
Deguonis	O	39,90	21,945	%
Azotas	N	0,67	0,366	%
Siera	S	0,02	0,010	%
Iš viso:	Σ	100,00	100,000	%
Kuro degimo šiluma	Q ⁿ	18252	8914	kJ / kg
		5,07	2,48	kWh / kg

Mendelejevo formulė (1) kuro degimo šilumai suskaičiuoti [14]:

$$Q^n = 339 * C^n + 1035 * H^n + 109 * S^n - 109 * O^n - 25 * W^n \quad (1)$$

čia Q^n – degimo šiluma (kJ/kg);

C^n – anglies kiekis (kg), esantis viename kilograme kuro ;

H^n – vandenilio kiekis (kg), esantis viename kilograme kuro;

S^n – sieros kiekis (kg), esantis viename kilograme kuro;

O^n – deguonies kiekis (kg), esantis viename kilograme kuro;

W^n - vandens kiekis (kg), esantis viename kilograme kuro.

Degimo šiluma (kuro kaloringumas) vadinamas šilumos kiekis, išsiskyręs visiškai sudeginus vieną kilogramą kuro.

Kuo daugiau drėgmės biokure, tuo jo energetinė vertė mažesnė. Tai yra dėl to, kad deginant kurą dalis kuro šiluminės vertės sunaudojama drėgmei išgarinti. Šilumos dalis, skirta drėgmei iš medienos išgarinti, dar vadinama slaptąja garavimo šiluma. Kuo daugiau drėgmės kure, tuo daugiau šilumos sunaudojama drėgmei išgarinti, ir tuo mažiau šilumos gali būti panaudojama. Išgarintas vanduo esantis dūmuose, kartu su jam išgarinti sunaudota energija, yra išmetamas per kaminą. Kuo aukštesnės temperatūros dūmai yra išmetami, tuo daugiau energijos prarandama, tuo mažesnis katilinės naudingo veikimo koeficientas.

Tai reiškia, kad padidinti katilinės efektyvumą galima išnaudojant karštų dūmų energiją. Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad aušinant dūmus dalis juose esančių garų kondensuosis, tai yra „gražins“ garinimui sunaudotą šilumą (slaptąja garavimo šilumą).

2.3. Kuro deginimas, dūmų sudėtis, dūmų energija

Kuro degimas – tai kure esančių cheminių elementų reakcija su deguonimi. Reakcijos metu išsiskiria šiluma. Po reakcijos gaunamos lakios medžiagos sudaro dūmus. Dūmai susideda iš skirtingų degimo

produktų (CO₂, H₂O; SO₂, pelenu). Dūmų sudėtis skaičiuojama pagal cheminių reakcijų lygtis. 2 lentelėje pateikiamos reakcijos lygtys.

2 lentelė. Degimo reakcijos [14]

Degimo reakcijos lygtis, medžiagų kiekiai	1 kg degiojo elemento sudeginti reikalingas deguonies kiekis	Degimo produktų kiekis sudeginus 1 kg degiojo elemento
$C + O_2 = CO_2; M^C + M^{O_2} = M^{CO_2}; 12 + 32 = 44$	$M^{O_2} : M^C = 32 : 12 = 2,667$	$M^{CO_2} : M^C = 44 : 12 = 3,667$
$2H_2 + O_2 = 2H_2O; M^{2H_2} + M^{O_2} = M^{2H_2O}; 4 + 32 = 36$	$M^{O_2} : M^{2H_2} = 32 : 4 = 8$	$M^{H_2O} : M^{2H_2} = 36 : 4 = 9$
$S + O_2 = SO_2; M^S + M^{O_2} = M^{SO_2}; 32 + 32 = 64$	$M^{O_2} : M^S = 32 : 32 = 1$	$M^{SO_2} : M^S = 64 : 32 = 2$

čia, M^C – anglies atominis svoris, atominė masė;

M^{O_2} – deguonies atominis svoris, atominė masė;

M^{H_2} – vandenilio atominis svoris, atominė masė;

M^S – sieros atominis svoris, atominė masė;

M^{CO_2} – anglies dioksido atominis svoris, atominė masė;

M^{H_2O} – vandens atominis svoris, atominė masė;

M^{SO_2} – sieros dioksido atominis svoris, atominė masė;

2 lentelės paaiškinimas: anglies C atominė masė yra 12,01 g/mol (priimta 12), deguonies atominė masė yra 15,999 g/mol (priimta 16), tai O₂ atominė masė bus 2 * 16 = 32, gauto CO₂ atominė masė bus 32 + 12 = 44. Antrame stulpelyje matyti, kad sudeginti 1 kg anglies reikės 2,667 karto daugiau deguonies negu turime anglies, tai yra 2,667 kg. Analogiškai matyti, kad CO₂ kiekis, sudegus 1 kg anglies, bus 3,667 karto didesnis negu turėta anglies, tai yra 3,667 kg. Taigi turint kuro sudėtį, žinant deguonies poreikį ir oro pertekliaus koeficientą galima suskaičiuoti kiek deguonies reikia (papildomai negu yra pačiame kure) kurui sudeginti, kiek reikia paimti degimui, kad jame būtų reikalingas kiekis deguonies, kiek papildomai su oru paimama azoto, ir kokia gauta degimo produktų (dūmų) sudėtis. Šių skaičiavimų rezultatai pateikiami 3 lentelėje.

3 lentelė. Skaičiavimai sudeginus 1 kg kuro (Sudaryta autoriaus)

1.	C ⁿ sudeginti reikalingas deguonies kiekis	0,7106	kg
2.	Sudeginus C ⁿ gaunamų degimo produktų kiekis (CO ₂)	0,9771	kg
3.	H ⁿ sudeginti reikalingas deguonies kiekis	0,2625	kg
4.	Sudeginus H ⁿ gaunamų degimo produktų kiekis (H ₂ O)	0,2953	kg
5.	S ⁿ _d sudeginti reikalingas deguonies kiekis	0,0001	kg
6.	Sudeginus S ⁿ _d gaunamų degimo produktų kiekis (SO ₂)	0,0002	kg
7.	Pačiame kure esančio deguonies kiekis	0,2195	kg
8.	Kilogramui kuro sudegti reikalinga papildomai deguonies M _{O2}	0,7538	kg
9.	Oro kiekis reikalingas degimui (priimta deguonies 23% oro masės)	3,2772	kg
10.	Oro pertekliaus koeficientas	1,4000	
11.	Reikalingas oro kiekis (su pertekliaus koef.)	4,5881	kg
12.	Deguonies kiekis degimo produktuose	0,3015	kg
13.	Nn kiekis paimtame ore (priimta 77% (su priemaišomis) oro masės)	3,5328	kg
14.	Nn kiekis iš kuro	0,0037	kg
15.	Iš viso Nn kiekis degimo produktuose	3,5365	kg

16.	Vandens garų kiekis paimtas su oru (priimta 10g/1kg oro)	0,0459	kg
17.	Sudeginus 1 kg kuro iš kuro išgarinta vandens	0,4500	kg
18.	Visas dūmuose esantis vandens kiekis	0,7912	kg
19.	Sudeginus 1 kg kuro iš viso gautų lakių degimo produktų kiekis M_L	5,6065	kg
20.	Sudeginus 1 kg kuro gautų kietų produktų (pelenų) kiekis M_K	0,0275	kg
	Iš viso:	5,6340	kg

3 lentelės paaiškinimas:

- 3 lentelėje pateikti duomenys deginant vieną kilogramą pasirinkto kuro (žiūrėti 1 lentelę);
- anglies C kiekis esantis 1 kg kuro paimtas iš 1 lentelės $1\text{kg} * 26,648\% = 0,26648\text{ kg}$;
- deguonies kiekis šiam kurui sudeginti skaičiuotas paėmus duomenis iš 2 lentelės, tai yra $0,26648\text{ kg} * 2,667 = 0,7106\text{ kg}$ (žiūrėti 1 eilutę);
- sudeginus viename kilograme kuro esančią anglį (iš 1 lentelės anglies kiekis viename kilograme kuro yra $0,26648\text{ kg}$) gaunamas CO_2 kiekis skaičiuotas paėmus duomenis iš 2 lentelės $0,26648\text{ kg} * 3,667 = 0,9771\text{ kg}$ (žiūrėti 2 eilutę).
- 3 ir 4 eilutėje analogiškai skaičiuotas vandeniliui sudeginti reikalingas deguonies kiekis ir sudeginus vandenilį gautų vandens garų kiekis;
- 5 ir 6 eilutėje analogiškai skaičiuotas sierai sudeginti reikalingas deguonies kiekis ir sudeginus sierą gauto sieros dioksido kiekis;
- 7-15 eilutėje skaičiuojamas reikalingas oro kiekis degimui bei su oru paimamo azoto kiekis;
- 16-18 eilutėje skaičiuotas vandens kiekis dūmuose;
- 19-20 eilutėje skaičiuotas lakių degimo produktų ir pelenų kiekis.

3. Katilinės įrenginiai

Pasirinka katilinė yra Vilniuje Geologų gatvėje 12A. Katilinė, kurioje įrengti:

- du katilai, kurių kiekvieno galia yra po 8 MW (iš viso 16 MW);
- kondensacinis ekonomaizeris, kurio didžiausia projektinė galia 4 MW;
- absorbcinis šilumos siurblys, kurio didžiausia projektinė galia 1,6 MW.

3.1. Kuro poreikis

Žinant katilų galią (16 MW), kuro kaloringumą ir katilo naudingo veikimo koeficientą galima suskaičiuoti kuro poreikį. Skaičiavimas pateikiamas 4 lentelėje.

4 lentelė. Kuro poreikis (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas		Reikšmė	Vnt.
Katilo agregato galia (katilo ir sauso tipo eko galia)	Q^k	16000	kW
Katilo agregato NVK	η	88,2*	%
Pakuros galia	Q^p	$16000 : 0,882 = 18140,5$	kW
Kuro poreikis per valandą	M_{kuro}	$18141kW : 2,48 \text{ kW/kg} = 7326,42$	kg/h

Pastaba: * katilo agregato NVK paimtas iš 4.1 poskyrio

3.2. Degimo produktų kiekiai

3 lentelėje turimi duomenis, kiek degimo produktų susidaro sudeginus 1 kg kuro, o 4 lentelėje skaičiuota, kiek kuro reikia sudeginti katilinės galiai pasiekti. Taigi dabar galima suskaičiuoti, kiek kg gausis degimo produktų. Taip pat svarbu žinoti ir degimo produktų tūrį, kurį suskaičiuojant imama, kad vienas molis užima 22,4 l tūrį (norminėmis sąlygomis, esant 0° C temperatūrai ir $1,013 \cdot 10^5$ Pa slėgiui. Dūmų kiekiai ir sudėtis, katilinei dirbant 16 MW galia, pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Degimo produktų kiekiai (Sudaryta autoriaus)

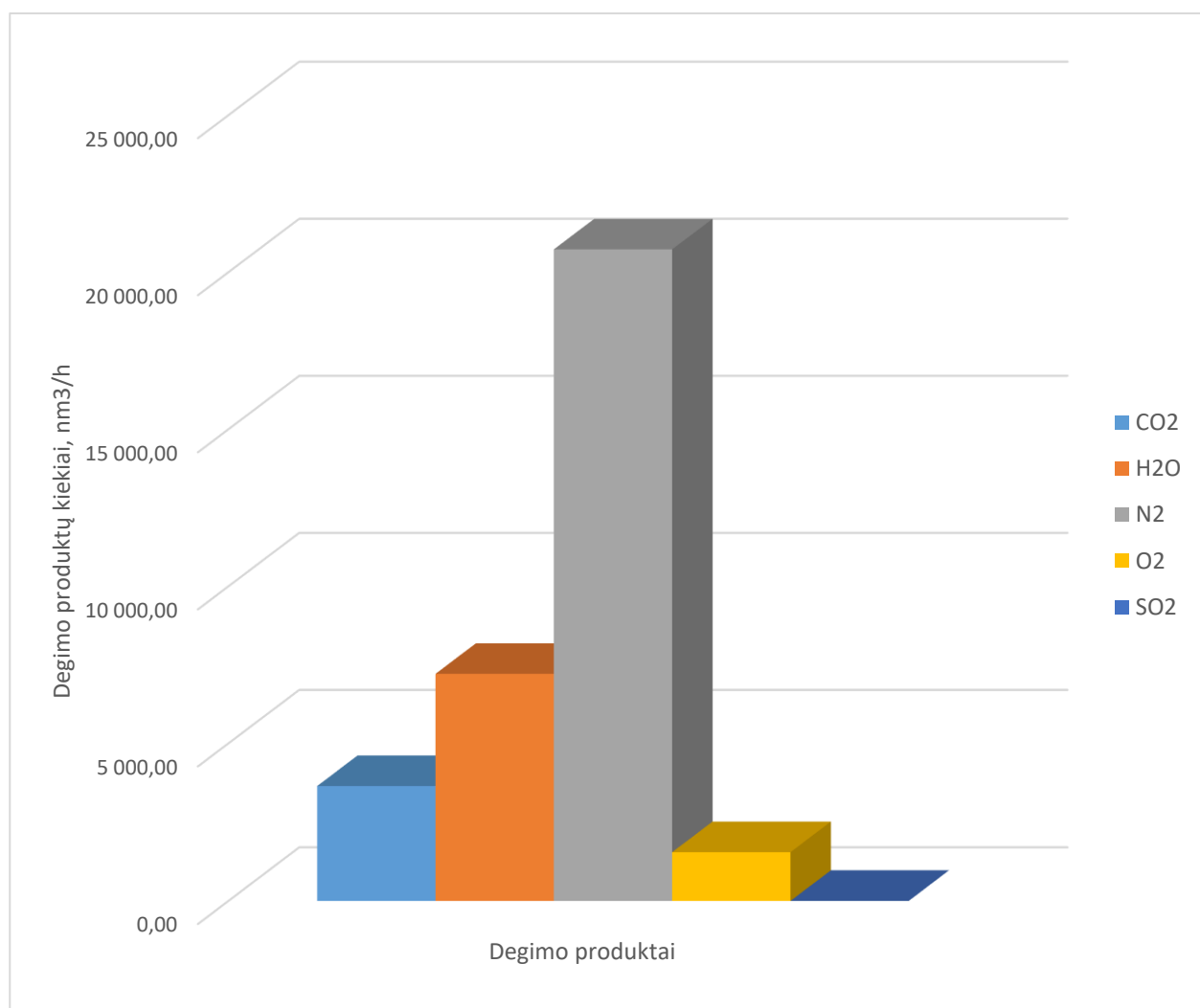
Dūmų sudėtis	Molinė masė	Kiekis per s		Parcialinis sl	Dūmų srautas	
	g/mol	g/s	mol/s	bar(a)	kg/h	nm ³ /h
CO ₂	44	1 988,46	45,19	0,109992	7 158,6	3 644,3
H ₂ O	18	1 610,18	89,45	0,217720	5 796,6	7 213,6
N ₂	28	7 197,17	257,04	0,625604	25 909,9	20 727,9
O ₂	32	613,59	19,17	0,046669	2 208,9	1 546,3
SO ₂	64	0,43	0,01	0,000016	1,5	0,5
Iš viso:		11 409,84	410,87	1,000000	41 075,4	33 132,6

5 lentelės paaiškinimas:

- atominė masė paimta iš 2 lentelės. Molinė masė – cheminės medžiagos parametras – vieno molio medžiagos kiekio masė. Molio masės gramais skaitinė vertė lygi molekulinei masei, išreikštai atominiais masės vienetais [15].
- dūmų srautas gaunamas paėmus iš 3 lentelės degimo produktų kiekį (gautą sudeginus 1 kg kuro) ir padaugintas iš kuro poreikio, paimto iš 4 lentelės;

- parcialinis dūmų sudedamųjų dalių slėgis yra skaičiuotas priėmus dūmų slėgį 1 bar(a) ir konkrečios dūmų sudedamosios dalies mol/s skaičių padalijus iš bendro mol/s skaičiaus (arba konkrečios dūmų sudedamosios dalies nm^3/h skaičių padalijus iš bendro nm^3/h skaičiaus).
- parcialinis vandens garų slėgis skaičiuotas todėl, kad jis bus reikalingas nustatant dūmų rasos taško temperatūrai, kai bus kalbama apie kondensacinį ekonomizerį ir AŠS.
- SO_2 kiekis yra labai mažas, palyginus su kitų degimo produktų kiekiu, todėl tolimesniuose skaičiavimuose jis bus nevertinamas.

Degimo produktų kiekiai yra pavaizduoti grafiškai 2 paveiksle iš grafiko galime matyti, kad didžiausia degimo produktų dalį sudaro N_2 , kuris patenka su degimui paimtu oru. SO_2 kiekis yra nežymus, todėl tolimesniuose skaičiavimuose nevertinamas.



2 pav. Degimo produktų kiekiai (Sudaryta autoriaus)

4. Šilumos gamybos procesas

Lentelėje 4 skaičiuotas kuro poreikis, kuris reikalingas 16 MW katilo galiai pasiekti. Lentelėje 5 skaičiuota kiek ir kokių degimo produktų gaunama sudeginus nurodyta kuro poreikį. Degimo produktų degimo temperatūra gali viršyti 1100 – 1200 °C, tačiau saugant pakuros mūrą, paprastai dūmų temperatūra mažinama įrengus dūmų recirkuliaciją. Skaičiavimuose pasirinkta, kad dūmų temperatūra iš pakuros bus 950 °C.

Kad šiluma būtų perduota šilumos vartotojui iš katilinės į šilumos tinklus, reikalinga degimo produktų šilumą perduoti šilumos tinklų termofikaciniam vandeniui. Tai yra perduodant šilumą dūmų temperatūra mažėja, o termofikacinio vandens temperatūra didėja. Esant pakankamai aukštam temperatūrų skirtumui tarp terpių, pigiausias ir paprasčiausias būdas atlikti šilumos mainus yra šilumokaitis. Šiuo atveju katilinėje kaip dūmų / vandens šilumokaitis naudojamas katilas. Žinodami dūmų kiekį, dūmų temperatūrų skirtumą prieš katilą ir už katilo, bei dūmų šiluminę talpumą galime skaičiuoti dūmų katilui atiduotą galią. Šiluminė talpa pateikta 6 lentelėje ir nurodytas intervalais kas 100 °C, todėl norėdami gauti temperatūrą intervalo viduje yra naudojamas tiesinės interpoliacijos principas

6 lentelė. Degimo produktų šiluminė talpa kJ/(nm³ K) [16]

T, °C	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Iš viso	Mato vnt.
Srautas	3 644,3	20 727,9	1 546,3	7 213,6	33 132,6	nm ³ /h
0	1,5998	1,2946	1,3059	1,4943	1,3722	kJ/(nm ³ K)
100	1,7003	1,2958	1,3176	1,5052	1,3869	kJ/(nm ³ K)
200	1,7874	1,2996	1,3352	1,5223	1,4034	kJ/(nm ³ K)
300	1,8627	1,3067	1,3561	1,5424	1,4215	kJ/(nm ³ K)
400	1,9297	1,3163	1,3775	1,5655	1,4409	kJ/(nm ³ K)
500	1,9887	1,3276	1,398	1,5897	1,4607	kJ/(nm ³ K)
600	2,0411	1,3402	1,4168	1,6149	1,4807	kJ/(nm ³ K)
700	2,0884	1,3536	1,4344	1,6412	1,5008	kJ/(nm ³ K)
800	2,1311	1,367	1,4499	1,668	1,5204	kJ/(nm ³ K)
900	2,1692	1,3796	1,4645	1,6957	1,5392	kJ/(nm ³ K)
1000	2,2035	1,3917	1,4775	1,7229	1,5571	kJ/(nm ³ K)
1100	2,2349	1,4034	1,4893	1,7501	1,5744	kJ/(nm ³ K)
1200	2,2638	1,4143	1,5006	1,7769	1,5907	kJ/(nm ³ K)

Lentelės paaiškinimas:

- degimo produktų srautas paimtas iš 5 lentelės;
- degimo produktų atskirų junginių šiluminė talpa prie nurodytų temperatūrų paimta iš literatūros [16];
- bendra visų degimo produktų (dūmų) šiluminė talpa prie nurodytos temperatūros gauta sudėjus atskirų degimo produktų (CO₂, N₂, O₂, H₂O) kiekius padaugintus iš jų šiluminės talpos ir sumą padalijus iš bendro degimo produktų kiekio; pavyzdžiui prie 0 °C gaunasi $(3644,3 * 1,5998 + 20727,9 * 1,2946 + 1546,3 * 1,3059 + 7213,6 * 1,4943) : 33132,6 = 1,3722$ kJ/(nm³K)

4.1. Šilumos gamybos schema

Pakuros ir katilo šilumos gamybos schema parodyta 3 paveiksle. Sudarant schemą priimta projektinė dūmų temperatūra į katilą 950°C , o dūmų temperatūra iš katilo 165°C . Degimo produktų šiluminė talpa $\text{kJ}/(\text{nm}^3 \text{K})$ prie minėtų temperatūrų paskaičiuota naudojant 6 lentelės duomenis. Tačiau, jeigu per katilą leisime tokių temperatūrų dūmų srautą, kuris buvo skaičiuotas 5 lentelėje $33\,132,6 \text{ nm}^3/\text{h} = 9,203 \text{ nm}^3/\text{s}$, tai šilumos nepakaks 16 MW katilo galiai išvystyti. Todėl per katilą turi būti papildomai recirkuliuojama dalis dūmų. Taigi skaičiuojame koks dūmų kiekis reikalingas, kad prie $950^{\circ}\text{C} / 165^{\circ}\text{C}$ temperatūrų skirtumo gautume reikalingą 16 MW galią.

$$(16000 + 10,5) \text{ kW} : (950^{\circ}\text{C} * 1,548171 \text{ kJ}/(\text{nm}^3 \text{K}) - 165^{\circ}\text{C} * 1,397627 \text{ kJ}/(\text{nm}^3 \text{K})) = 12,916 \text{ nm}^3/\text{s}$$

Recirkuliacijos srautas yra:

$$12,916 \text{ nm}^3/\text{s} - 9,203 \text{ nm}^3/\text{s} = 3,713 \text{ nm}^3/\text{s}$$

Taip pat pagal schemą gauname, kad į katilą iš pakuros ateina 18140,5 kW. Tai ir yra kuro suvartojimas.

Pagamintos šilumos ir sunaudoto kuro santykis (katilo agregato nvk) yra lygus:

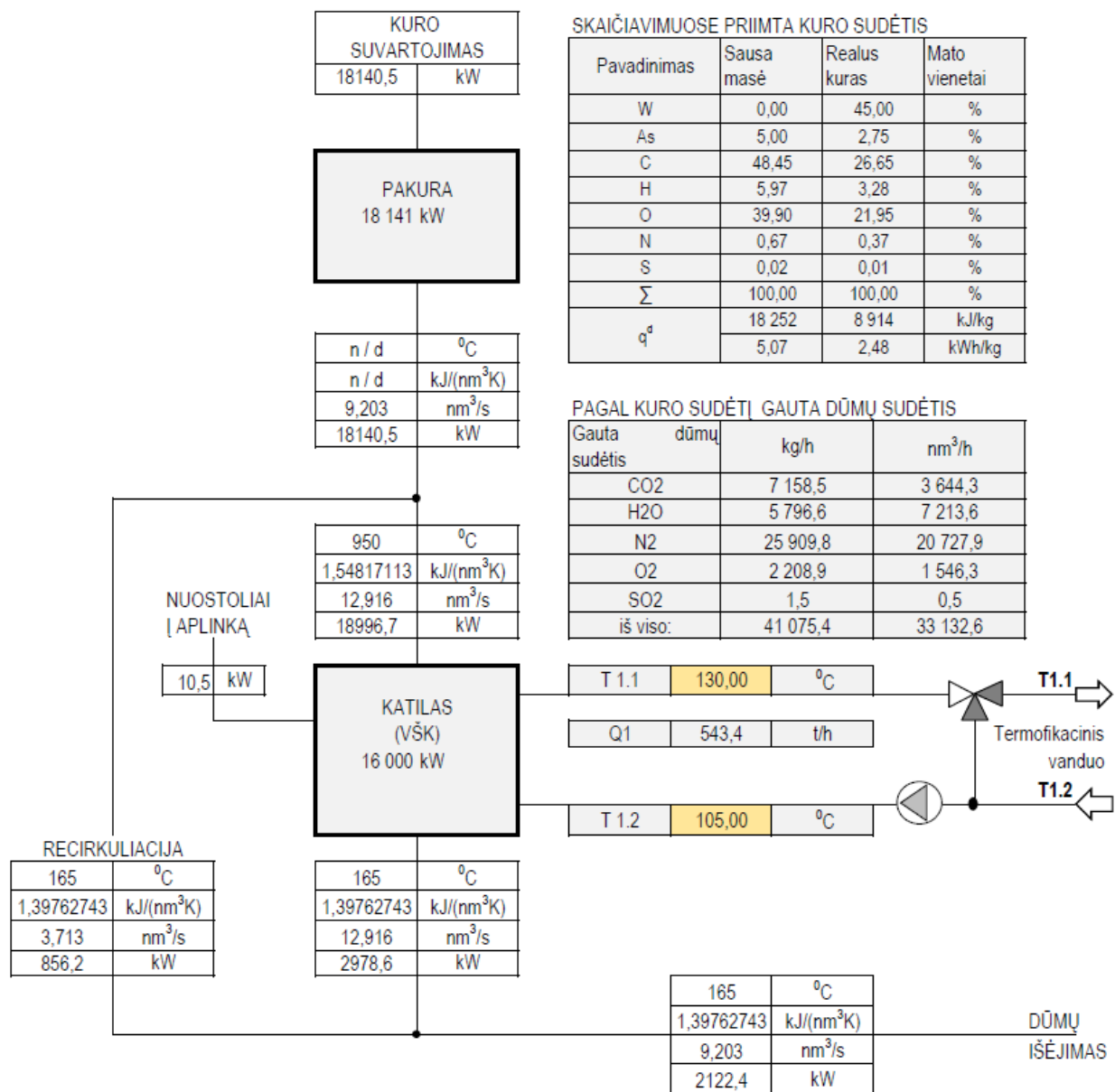
$$16000 \text{ kW} : 18140,5 = 0,882$$

Preliminarus vandens srautas per katilą paskaičiuojamas pagal formulę (2) projektines termofikacinio vandens temperatūras

$$\text{Iš } Q [\text{kW}] = M [\text{kg}/\text{s}] \times c [\text{kJ}/(\text{kg K})] \times dt [\text{K}] \text{ išreiškiame } M: \quad (2)$$

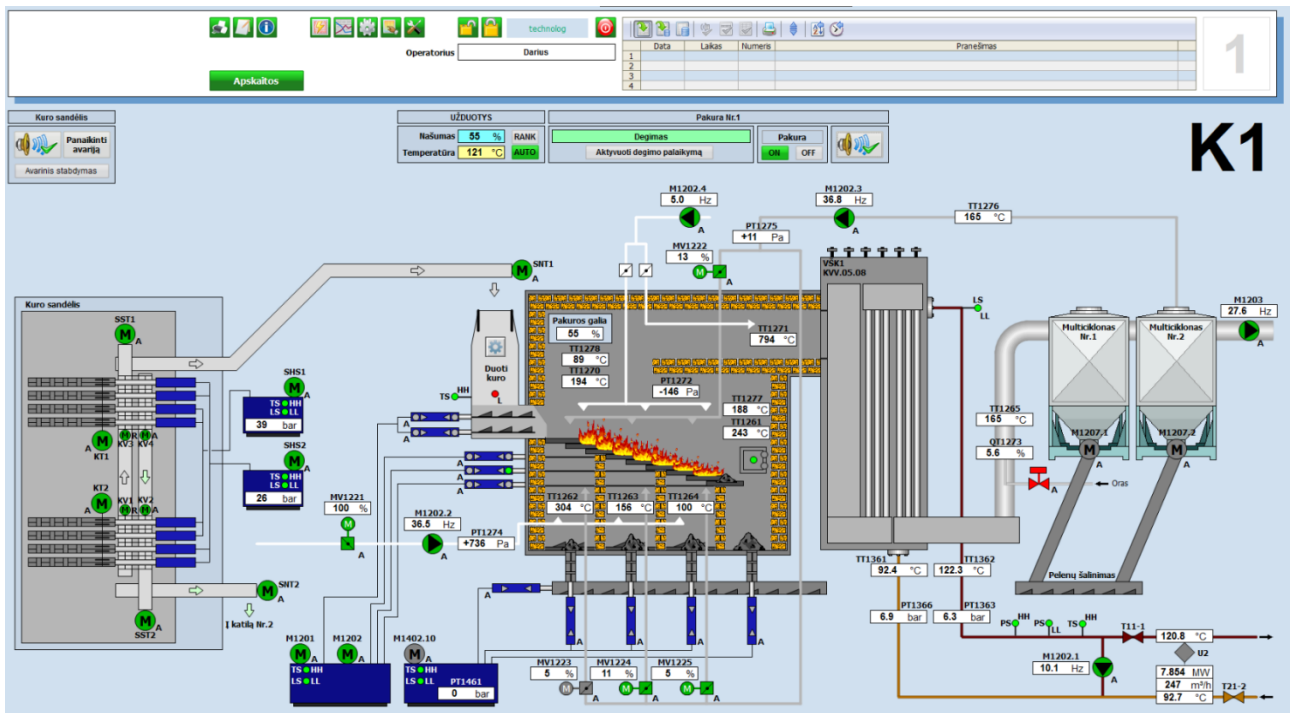
$$M = 16000 \text{ kW} / (4,24 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \times (130 - 105) \text{ K}) = 150,94 \text{ kg}/\text{s} = 543396 \text{ kg}/\text{h} \approx 543,4 \text{ t}/\text{h}$$

Degimo produktų kiekiai paimti iš 5 lentelės, o šiluminė talpa iš 6 lentelės

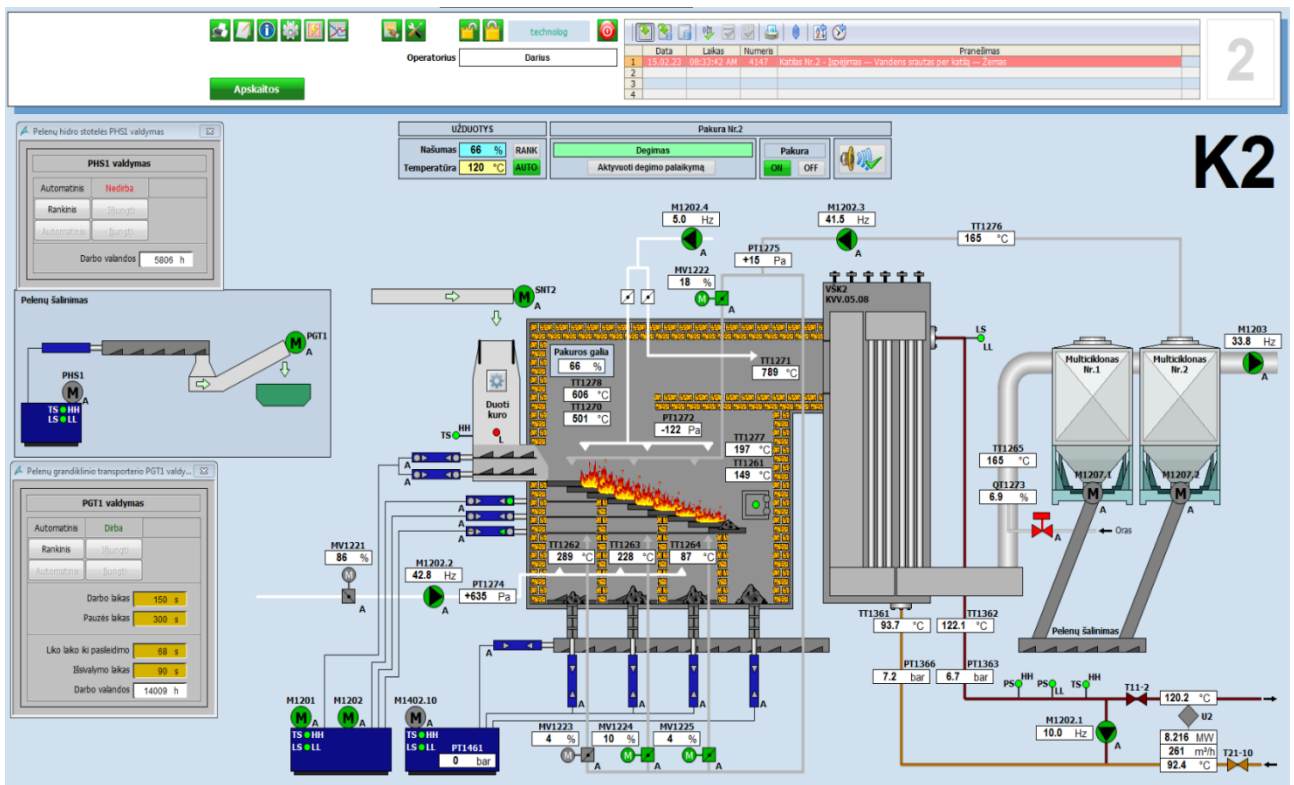


3 pav. Šilumos gamybos schema (Sudaryta autoriaus)

Šilumos gamybos schemoje pavaizduota bendra šilumos gamyba dviejuose katiluose. Toliau pateikti realūs katilinės duomenys, atskirai kiekvienam katilui. Juos galite matyti 4 ir 5 paveiksluose.



4 pav. Katilinės katilo K1 realūs darbo duomenys (iš katilinės monitoringo programos) [17]



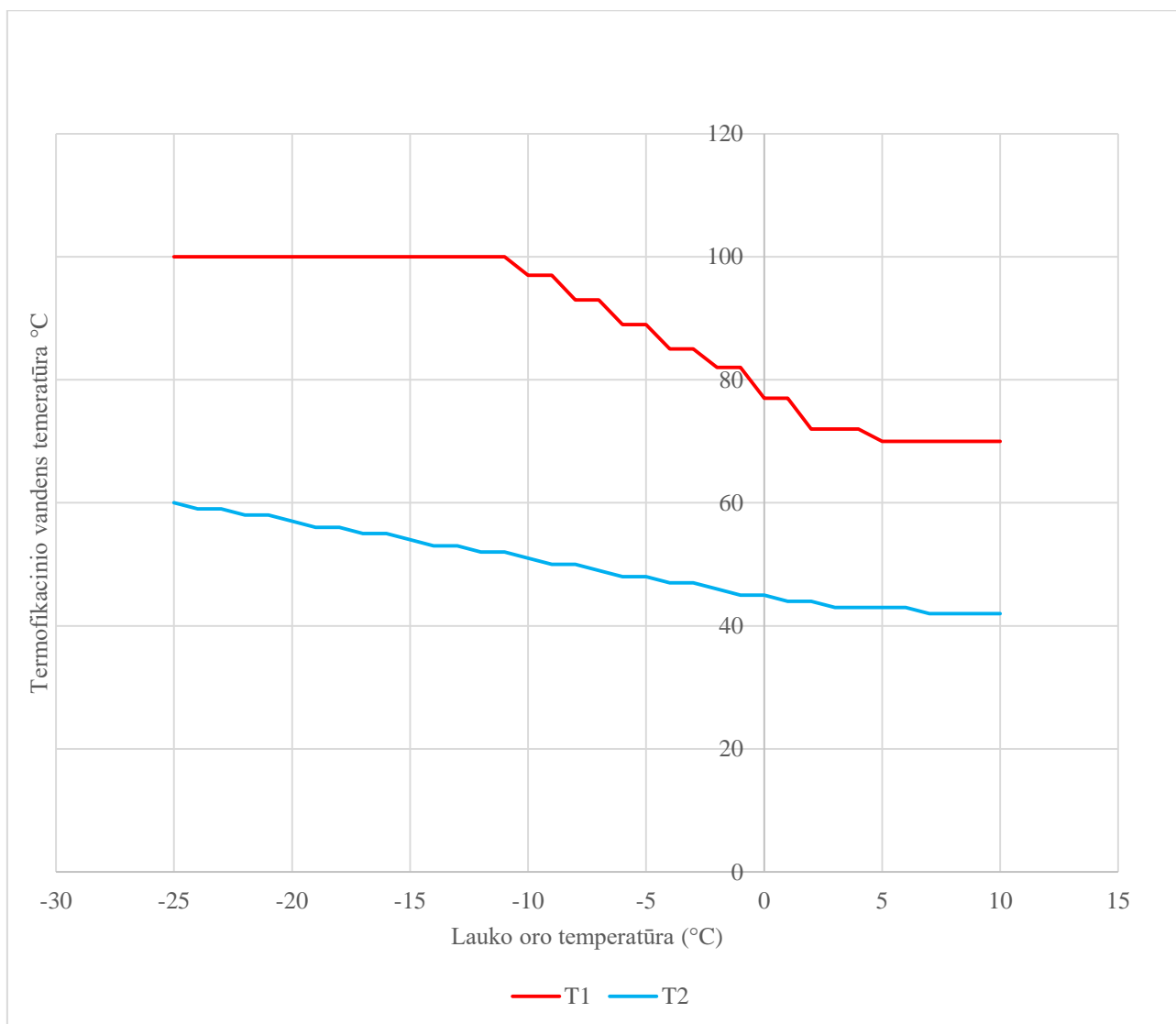
5 pav. Katilinės katilo K2 realūs darbo duomenys (iš katilinės monitoringo programos) [17]

4 ir 5 paveiksluose pateikiami gautų duomenų palyginimai su projektiniais. Galima teigti, kad pagrindiniai parametrai pasiekiami: katilinės galia $7,854\text{MW} + 8,216\text{MW} = 16,07\text{MW}$ (pagal projektą 16MW), termofikacinio vandens temperatūrų skirtumas $122,3^{\circ}\text{C} - 92,4^{\circ}\text{C} = 29,9^{\circ}\text{C}$ ir $122,1^{\circ}\text{C} - 93,7^{\circ}\text{C} = 28,4^{\circ}\text{C}$ (projektinis 25°C), dėl didesnio termofikacinio vandens temperatūrų skirtumo per katilus, savaime suprantama, kad srautas per abu katilus $247\text{t/h} + 261\text{t/h} = 508\text{t/h}$ mažesnis už projektinį $543,4\text{t/h}$.

5. Aušinimo terpė

Dūmų temperatūrai sumažinti reikalinga terpė, kuriai dūmai gali perduoti savo energiją, tai yra terpės temperatūra turi būti mažesnė už dūmų temperatūrą.

Jei katilinė skirta tiekti šilumą į miesto šilumos tinklus, tai tokia terpė galėtų būti grįžtantis šilumos tinklų vanduo. Paprastai, naudojant dūmų kondensacinį ekonomaizerį, už ekonomaizerio pasiekama dūmų temperatūra nuo 3 °C iki 5 °C, aukštesnė, nei aušinančios terpės temperatūra. Šildymo sezono metu grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra nėra pastovi. Tai matyti iš katilinės temperatūrinio grafiko pavyzdžio, kuris parodytas 6 paveiksle. Grįžtamo termofikacinio vandens temperatūra priklauso nuo lauko oro temperatūros, tai yra nuo klimatinių sąlygų.



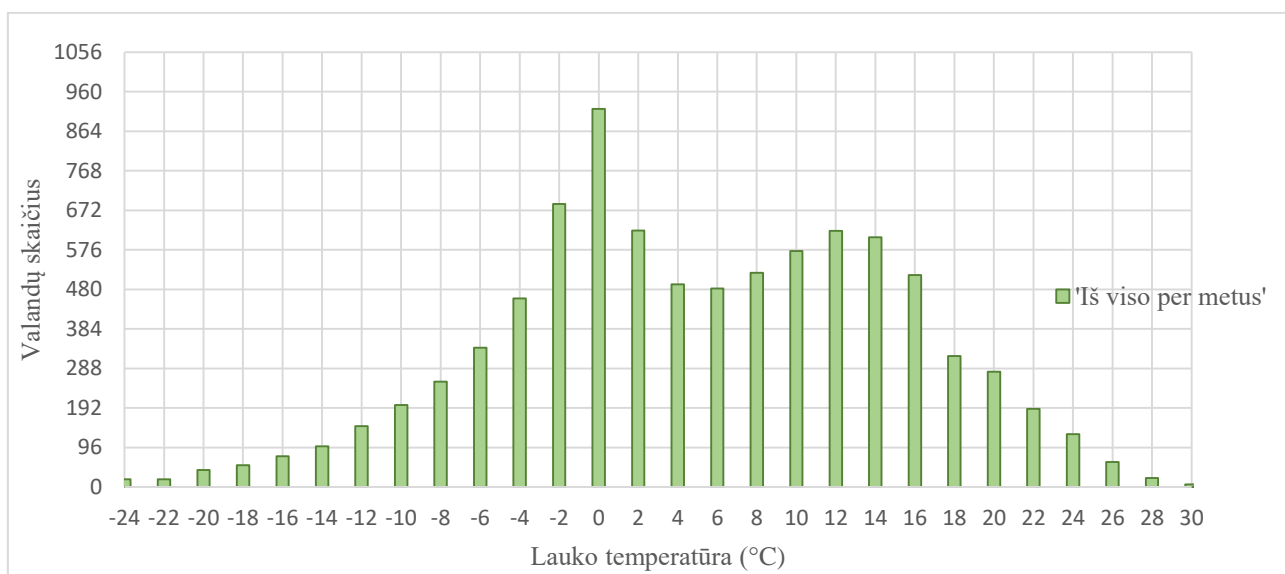
6 pav. Temperatūrinis grafikas šildymo sezonui [18]

5.1. Klimatinės sąlygos

Turėdami temperatūrinį grafiką, galima nustatyti / suskaičiuoti kiek valandų per metus katilinė dirba vienokiu ar kitokiu režimu. Pagal RSN 196-54 "Statybinė klimatologija" (naudojantis Vilniaus meteorologijos stoties stebėjimo kas 3 valandos duomenimis 6 metų laikotarpyje) sudaryta 7 lentelė ir grafikas kurį galima matyti 7 paveiksle.

7 lentelė. Vidutinė lauko oro temperatūra [19]

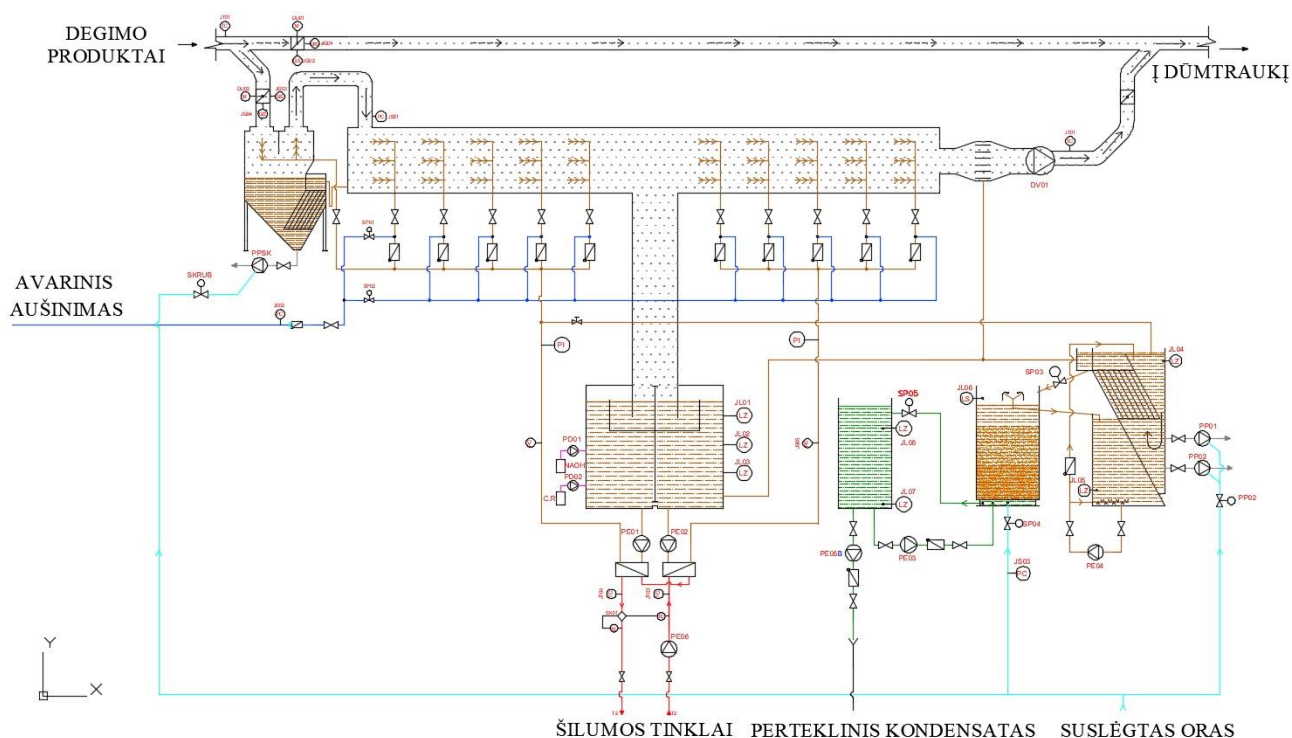
Lauko oro temperatūra		Mėnuo												Iš viso per metus	Iš viso per metus
nuo °C	iki °C	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	val.	%
-32,0	-30,1	1	1											2	0,02
-30,0	-28,1		2											2	0,02
-28,0	-26,1	2	2	1										5	0,06
-26,0	-24,1	2	2										2	6	0,07
-24,0	-22,1	8	6	2									3	19	0,22
-22,0	-20,1	8	5	2									4	19	0,22
-20,0	-18,1	17	10	7									7	41	0,47
-18,0	-16,1	21	17	9									6	53	0,61
-16,0	-14,1	28	21	13							1		12	75	0,86
-14,0	-12,1	32	32	14								3	18	99	1,13
-12,0	-10,1	48	43	20	1						2	4	30	148	1,69
-10,0	-8,1	61	57	35							2	11	33	199	2,27
-8,0	-6,1	69	59	50	2						4	20	52	256	2,93
-6,0	-4,1	73	74	55	6						6	44	80	338	3,86
-4,0	-2,1	73	80	98	21					2	15	66	103	458	5,24
-2,0	-0,1	113	133	112	50	2				3	34	108	132	687	7,85
0,0	1,9	152	97	160	108	7			1	16	66	158	153	918	10,49
2,0	3,9	31	31	89	122	26	1		2	28	90	127	76	623	7,12
4,0	5,9	3	5	36	110	53	3		7	47	114	89	25	492	5,62
6,0	7,9	2		17	89	74	18	1	12	85	132	46	6	482	5,51
8,0	9,9			10	68	102	43	18	22	107	121	27	2	520	5,94
10,0	11,9			6	46	109	77	49	78	115	79	14		573	6,55
12,0	13,9			3	35	106	96	94	124	115	46	3		622	7,11
14,0	15,9			4	28	86	106	122	146	94	20			606	6,93
16,0	17,9			1	15	66	102	130	133	56	12			515	5,89
18,0	19,9				9	47	109	101	49	3				318	3,64
20,0	21,9				6	31	77	80	66	20				280	3,20
22,0	23,9				4	18	41	64	48	15				190	2,17
24,0	25,9					11	27	46	35	9				128	1,46
26,0	27,9					5	14	25	13	4				61	0,70
28,0	29,9					1	5	10	5	1				22	0,25
30,0	31,9						1	3	2					6	0,07
32,0	33,9							1	1					2	0,02
Iš viso per mėnesi val.		744	677	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8748	100,00
Metuose %		8,50	7,74	8,50	8,23	8,50	8,23	8,50	8,50	8,23	8,50	8,23	8,50	100,00	



7 pav. Lauko temperatūra (valandų skaičius per metus) (Sudaryta autoriaus)

6. Kondensacinio ekonomaizerio veikimas

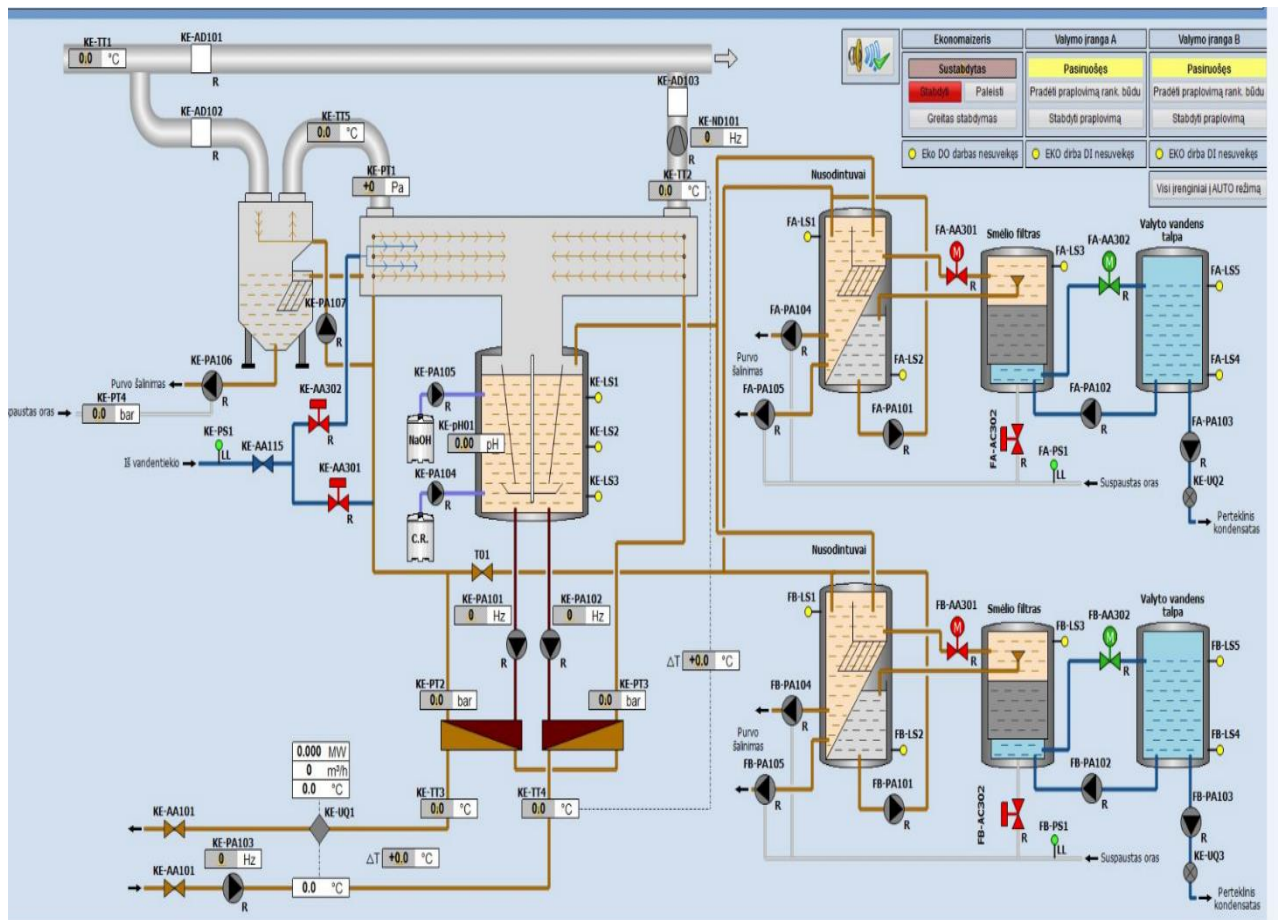
Biomosės kuras paprastai nėra sausas, jame yra tam tikras drėgmės kiekis. Didėjant drėgmės kiekiui biokure, jo šiluminė (energetinė) vertė mažėja. Tai yra dėl to, kad deginant kurą dalis kuro šiluminės vertės sunaudojama drėgmei išgarinti. Kuo daugiau drėgmės kure, tuo daugiau šilumos sunaudojama drėgmei išgarinti, ir tuo mažiau šilumos gali būti panaudojama. Išgarintas vanduo esantis dūmuose, kartu su jam išgarinti sunaudota energija yra išmetamas per kaminą. Kuo aukštesnė temperatūros dūmai yra išmetami, tuo daugiau energijos prarandama, tuo mažesnis katilinės naudingo veikimo koeficientas. Taigi, norint padidinti katilinės efektyvumą reikalinga išnaudoti karštų dūmų šilumą ir kondensuoti kaip galima daugiau vandens garų esančių dūmuose. Kondensacinio ekonomaizerio veikimas yra pagrįstas slaptosios garavimo šilumos atgavimu iš degimo produktų, tai yra aušinant degimo produktus ir kondensuojant degimo produktuose esančius vandens garus, taip iš jų atgaunama šiluma, kuri buvo sunaudota drėgmės išgarinimui iš kuro. Aprašomoje katilinėje naudojamas taip vadinamas tiesioginio kontakto ekonomaizeris. Tiesioginio kontakto reiškia, kad dūmai aušinami ne dūmų / vandens šilumokaityje, bet šilumą nuo dūmų atgaunama tiesiai į dūmus išpurškiamas didelis kiekis kondensato (paskui kondensatas ataušinamas kondensato / termofikacinio vandens šilumokaityje). Taigi šiame kondensaciniame ekonomaizeryje kondensatas išpurškiamas per specialiai suprojektuotus purkštukus į dūmų traktą (dūmų kamerą) [8]. Supaprastinta kondensacinio ekonomaizerio schema parodyta 8 paveiksle.



8 pav. Supaprastinta kondensacinio ekonomaizerio schema (Sudaryta autoriaus)

Taip apipurškiant dūmus, dūmai perduoda šilumą skysčio lašeliams. Be to aušinami dūmai pasiekia rasos tašką ir dūmuose esantys vandens garai taip pat kondensuojasi. Kuo daugiau dūmai yra aušinami, tuo daugiau kondensato yra sukuriama. Kondensatas yra renkamas apatinėje kondensacinio ekonomaizerio dalyje. Surinkimo inde pastoviai atliekamas vandens rūgštingumo matavimas. pH reikšmė palaikoma ribose tarp 5,5 ir 8,5. Jei kondensato pH < 5,5, tai kondensatas neutralizuojamas dozatoriaus pagalba dozuojuant į kondensatą natrio šarmo tirpalą, jei kondensato pH > 8,5, tai

kondensatas neutralizuojamas dozuojant į kondensatą citrinos rūgšties tirpalą. Surinktas kondensatas vėl grąžinamas į purkštukus. Kondensacinio ekonomaizerio reali schema iki AŠS įrengimo pavaizduota 9 paveiksle.



9 pav. Kondensacinio ekonomaizerio schema iki AŠS įrengimo (iš katilinės monitoringo programos) [17]

Numačius įrengti AŠS prie dviejų esamų dūmų kamerų su purkštukais, papildomai buvo įrengta trečia dūmų kamera su purkštukais, skirta papildomam šilumos nuėmimui nuo dūmų ir perdavimui į absorbcinio šilumos siurblio išgarinimo kontūrą. Taigi pirmosios dvi kameros su purkštukais pagal dūmų kryptį yra kondensacinio ekonomaizerio, o paskutinė kamera su purkštukais yra skirta absorbcinio šilumos siurblio išgarintuvo šildymui. Dūmų srautas parodytas 6.2 poskyryje 13 paveiksle. Dūmai praėję per kondensacinio ekonomaizerio ir AŠS kamerą per lašų gaudytuvą šalinami į atmosferą. Visi kondensacinio ekonomaizerio ir AŠS paviršiai, kurie kontaktuoja su degimo produktais yra gaminami iš rūgštims atsparaus nerūdijančio plieno.

Dėl dūmų apipurškimo vandeniu, kondensacinio ekonomaizerio (ir absorbcinio šilumos siurblio) kameros su purkštukais taip pat veikia kaip dūmus valantis įrenginys. Stambios pelenų dalelės paprastai surenkamos multiciklonuose, o likusios pelenų dalelės yra „išplaunamos“ iš degimo produktų ir kartu su kondensatu nukreipiamos į vandens valymo įrenginius. Visi kondensacinio ekonomaizerio paviršiai yra drėgni, todėl degimo produktuose esančios dulės nesikaupia ir neužsikemša, nėra nereikalingų nuosėdų.

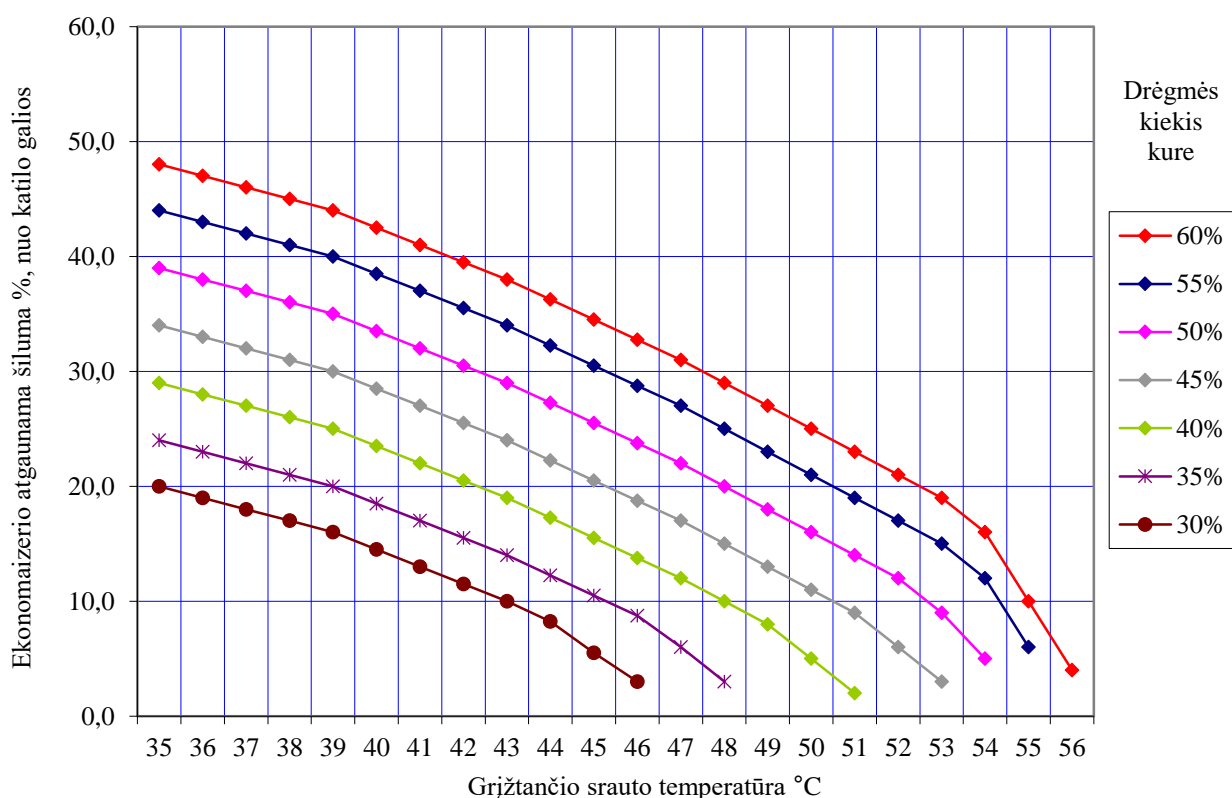
Kadangi kondensatas pastoviai išskrenta iš degimo produktų, jo kiekis didėja, todėl reikalingas kondensato pertekliaus neutralizavimas ir pašalinimas iš sistemos. Kondensato valymui naudojami vandens valymo įrenginiai. Iš vandens valymo įrenginių dalis išvalyto vandens grąžinama į

kondensato srautą (purkštukus). Kita dalis užteršto kondensato filtruojama, neutralizuojama ir išleidžiama į nuotekų tinklus.

6.1. Kondensacinio ekonomizaierio atgaunamos šilumos skaičiavimo principas

Kondensacinio ekonomizaierio atgaunamas šilumos kiekis priklauso nuo į ekonomizaierį tiekiamos dūmų temperatūros, nuo drėgmės kiekio deginame kure, nuo tiekiamo į kondensacinį ekonomizaierį termofikacinio vandens temperatūros. Analizuojama katilinė skirta tiekti šilumą į miesto šilumos tinklus, tai tokia terpė yra grįžtantis šilumos tinklų vanduo. Skyriuje 5 aprašytos klimatinės sąlygos ir 6 paveiksle pateikta grįžtamo šilumos tinklų vandens temperatūra metų (sezono) bėgyje. Antrame skyriuje, 1 paveiksle pateiktas drėgmės kiekis biokure metų bėgyje. Kondensaciniame ekonomizaieryje atgaunamos šilumos kiekis %, nuo katilinės galios pavaizduotas 10 paveiksle.

PRELIMINARI KONDENSACINIO EKONOMAIZERIO GALIOS PRIKLAUSOMYBĖ NUO DRĖGMĖS KIEKIO KURE IR GRĮŽTANČIO VANDENS TEMPERATŪROS



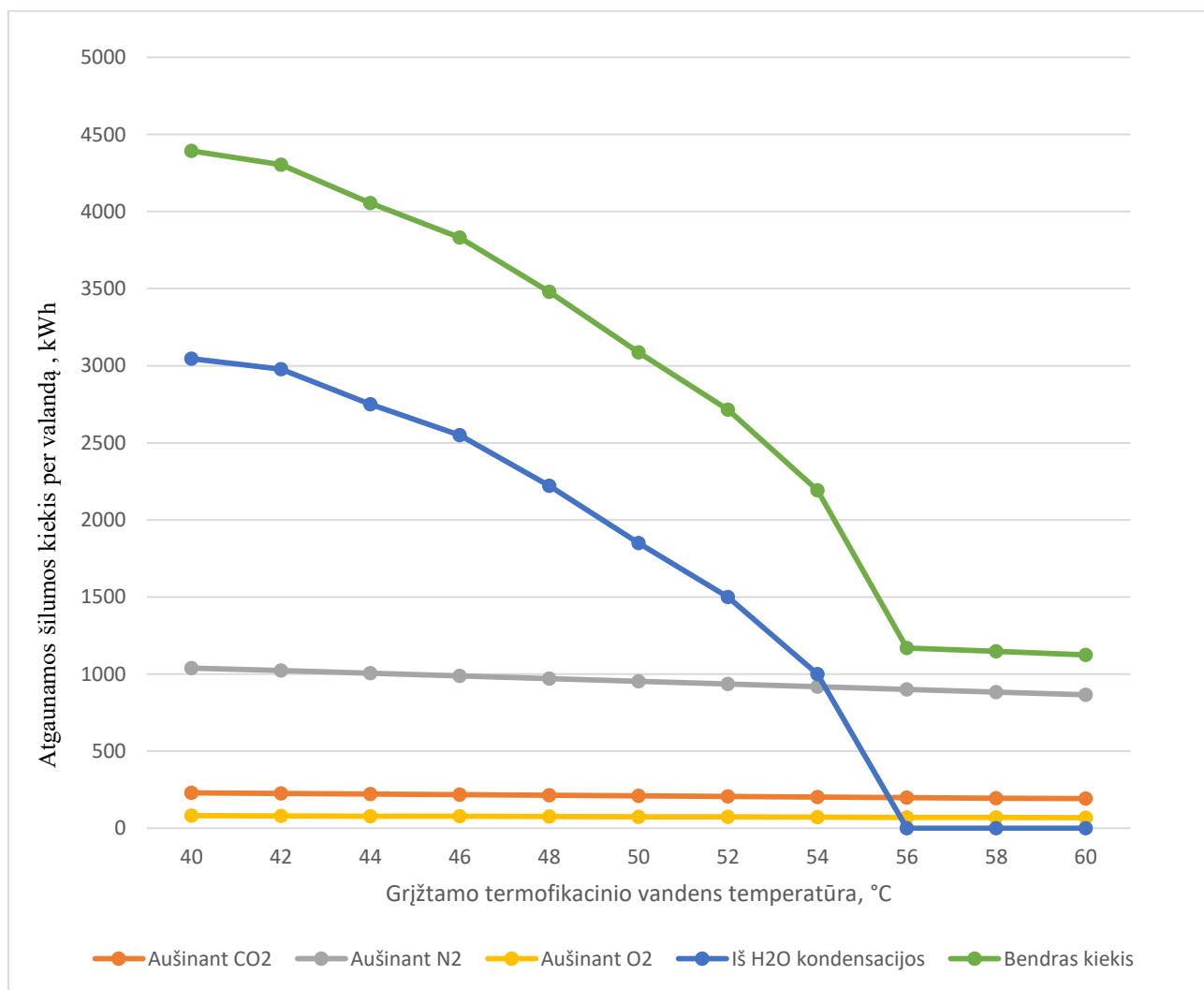
10 pav. Kondensaciniame ekonomizaieryje gaunamos šilumos kiekis %, nuo katilinės galios (Sudarytas autorias)

Iš grafiko matyti, kad didžiausia galia pasiekama esant didžiausiam drėgmės kiekiui kure ir žemiausiai grįžtančio vandens temperatūrai. Mažėjant drėgmės kiekiui kure ir didėjant grįžtamo termofikacinio vandens temperatūrai sąlygos kondensacijai blogėja ir atgaunamos šilumos kiekis mažėja.

Kondensacinio ekonomizaierio šilumos atgavimo skaičiavimą sąlyginai galima padalinti į dvi dalis:

- degimo produktų CO₂, N₂, O₂ (išskyrus vandens garus) atiduodama šiluma suskaičiuojama degimo produktų kiekius imant iš 5 lentelės, o šiluminę talpumą imant iš 6 lentelės ir žinant temperatūrų skirtumą prieš kondensacinį ekonomizaierį ir už kondensacinio ekonomizaierio.
- vandens garų H₂O atiduodama šiluma gali būti suskaičiuojama iš vandens garų energijos prieš dūmų kondensacinę ekonomizaierį atimant likusių vandens garų ir sukondensuoto vandens energiją už dūmų kondensacinio ekonomizaierio.

Šilumos atgavimo dedamosios (iš H₂O, iš CO₂, iš N₂, iš O₂ ir bendras atgaunamos šilumos kiekis pavaizduotos 11 paveiksle.



11 pav. Šilumos atgavimas kondensaciniame ekonomizaieryje iš H₂O, iš CO₂, iš N₂, iš O₂ (Sudarytas autoriaus)

Dūmams einant per dūmų kondensacinį ekonomizaierį ir kondensuojant vandens garus iš dūmų, vandens garų kiekis dūmuose mažėja. Dūmų kondensacinio ekonomizaierio dūmų kameroje dūmai intensyviai apipurškiami vandeniu, tai išeinančių iš ekonomizaierio dūmų santykinis drėgnumas priimamas 100%.

6.2. Skaičiavimo rezultatai (atgaunama šiluma)

Pagal projektą, naudojant dūmų kondensacinį ekonomaizerį, už jo pasiekama dūmų temperatūra 5 °C, aukštesnė, nei aušinančios terpės temperatūra. Toliau atliekami skaičiavimai, kai dūmų temperatūra į kondensacinį ekonomaizerį yra 165 °C (iš pav. Nr.3), grįžtamas termofikacinis vanduo 45 °C ir dūmų temperatūra už kondensacinio ekonomaizerio 45 °C + 5 °C = 50 °C.

Parcialinis vandens garų slėgis dūmuose skaičiuotas 5 lentelėje ir yra lygus 0,217720 bar(a). Prie šio slėgio rasos taško temperatūra yra 61,93 °C. Dūmų temperatūra už kondensacinio ekonomaizerio yra 50 °C, tai yra žemesnė už 61,93 °C, tai reiškia, kad dalis dūmuose esančių vandens garų kondensuos. Skaičiuojant svarbu žinoti, koks vandens garų kiekis buvo prieš ir koks liko už kondensacinio ekonomaizerio. Dūmuose esančių degimo produktų šiluminė talpa vertinama atskirai. Katilinės schemoje buvo vertinamas bendra dūmų (visų degimo produktų) šiluminė talpa.

Prie 50 °C dūmų temperatūros (esant 100 % santykiniam dūmų drėgnumui) vandens garų parcialinis slėgis yra 1,2335 bar(a). Degimo produktų kiekiai (prieš kondensacinį ekonomaizerį) pateikti 5 lentelėje. Už kondensacinio ekonomaizerio vandens garų parcialinis slėgis pasikeitė, nes dalis vandens buvo sukondensuota. Dūmų sudėtis už kondensacinio ekonomaizerio pateikta 8 lentelėje.

8 lentelė. Dūmų sudėtis už kondensacinio ekonomaizerio (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	mol/s	g/s	bar(a)	kg/h	nm ³ /h
CO ₂	45,19	1 988,46	0,123260	7 158,5	3 644,3
H ₂ O	45,23	912,25	0,123350	3 284,1	4 086,9
N ₂	257,04	7 197,17	0,701073	25 909,8	20 727,9
O ₂	19,17	613,59	0,052299	2 208,9	1 546,3
SO ₂	0,01	0,43	0,000018	1,5	0,5
iš viso:	366,64	10 711,91	1,000000	38 562,9	30 005,9

Palyginus 5 ir 8 lentelės duomenis matome, kad duotomis sąlygomis (dūmai ataušinami iki 50 °C) dūmų kondensaciniame ekonomaizeryje per valandą sukondensuojama 5796,6 - 3284,1 = 2512,5 kg/h vandens. Prieš ekonomaizerį turėjome 5796,6 kg/h dūmų srautą, 165 °C, 0,217720 bar(a) vandens garų parcialinį slėgį, kurių entalpija 2810,935 kJ/kg. Už kondensacinio ekonomaizerio turime 3284,1 kg/h dūmų srautą, 50 °C, 0,123350 bar(a) vandens garų parcialinį slėgį, kurių entalpija 2591,858 kJ/kg, ir 2512,5 kg/h, 50 °C ir 1 bar(a) vandens srautą, kurio entalpija yra 209,3 kJ/kg. Taigi teoriškai iš vandens garų, esančių dūmuose, per valandą galima atgauti tokį šilumos kiekį:

$$5796,6 \text{ kg/h} * 2810,935 \text{ kJ/kg} - 3284,1 \text{ kg/h} * 2591,858 \text{ kJ/kg} - 2512,5 \text{ kg/h} * 209,3 \text{ kJ/kg} = 7256078,7132 \text{ kJ} = 2015 \text{ kWh}$$

Kitų degimo produktų CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma pateikta 9 lentelėje (skaičiuota degimo produktų kiekius imant iš 5 lentelės, o šiluminį talpumą imant iš 6 lentelės ir žinant temperatūrų skirtumą prieš dūmų kondensacinį ekonomazerį ir už dūmų kondensacinio ekonomazerio:

9 lentelė. CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma DKE (Sudaryta autoriaus)

Degimo produkto pavadinimas	CO ₂	N ₂	O ₂	Vnt.
Degimo produkto kiekis	3 644,3	20 727,9	1 546,3	nm ³
Temperatūra prieš DKE, °C	165	165	165	°C
Artimiausia žemesnė Tz	100	100	100	°C
Entalpija prie Tz	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	200	200	200	°C
Entalpija prie Ta	1,7874	1,2996	1,3352	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 165 °C	1,756915	1,29827	1,32904	kJ/(nm ³ K)
Temperatūra už DKE, °C	50	50	50	°C
Artimiausia žemesnė Tz	0	0	0	°C
Entalpija prie Tz	1,5998	1,2946	1,3059	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	100	100	100	°C
Entalpija prie Ta	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 50 °C	1,65005	1,2952	1,31175	kJ/(nm ³ K)
Atgauta šilumos	755 788	3 097 873	237 666	kJ
	209,94	860,52	66,02	kWh

Iš viso teoriškai gautas šilumos kiekis (iš vandens garų ir CO₂, N₂, O₂) yra
 2015 kWh + 210 kWh + 861 kWh + 66 kWh = 3152 kWh.

Realus atgautos šilumos kiekis yra mažesnis dėl šilumos nuostolių į aplinką (≈ 3 %) ir dėl šilumos nuostolių su kondensatu (≈ 4 %).

7. Absorbcinis šilumos siurblys (AŠS)

Kaip aprašyta 6 skyriuje, kondensacinis ekonomaizeris dūmų aušinimui naudoja iš šilumos tinklų grįžtantį vandenį ir dūmus ataušina iki temperatūros, kuri yra 3 - 5 °C aukštesnė už aušinančio vandens temperatūrą. Norint sumažinti dūmų temperatūrą daugiau negu gali sumažinti kondensacinis ekonomaizeris, reikalinga terpė, šaltesnė už grįžtamą iš šilumos tinklų aušinantį termofikacinį vandenį. Toks žemesnės temperatūros vanduo ir gaunamas naudojant absorbcinį šilumos siurblių.

7.1. LiBr ir vandens tirpalas.

Absorbcinio siurblio darbinę terpę paprastai sudaro absorbentas ir šaltnešis. Šios medžiagos turi atitikti du pagrindinius jiems keliamus reikalavimus: didelis šaltnešio tirpumas, absorbcija absorbente ir žymiai didesnė absorbento virimo temperatūra, palyginti su šaltnešiu [7]. Aprašomoje katilinėje absorbcinis šilumos siurblys naudoja LiBr /vandens tirpalą. Tačiau gali būti naudojamos ir kitos terpių poros:

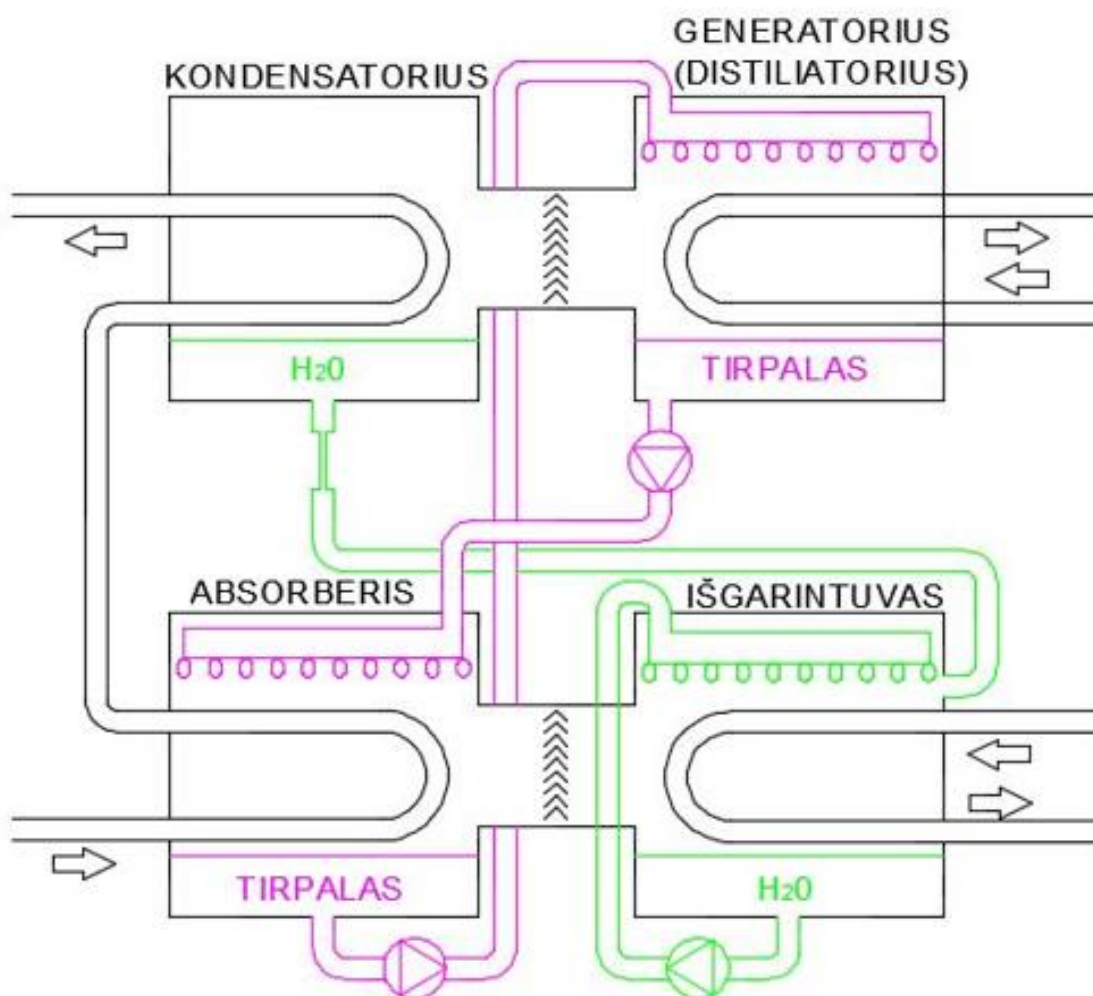
- Terpių poros, kuriose kaip šaltnešis yra amoniakas: H₂O/NH₃; LiNO₃/NH₃; NaSCN/NH₃ ir jų darbinis slėgis yra aukštesnis už atmosferinį;
- Terpių poros, kuriose kaip šaltnešis yra vanduo: LiBr/H₂O; LiI/H₂O; LiCl/H₂O ir jų darbinis slėgis yra mažesnis už atmosferinį;
- Terpių poros, kuriose kaip šaltnešis yra alkoholis: NMP/TFE; E181/TFE; PYR/TFE;
- Terpių poros, kuriose kaip šaltnešis yra hlogeninta anglis; DMETEG/R134a; NMP/R125; DMAC/R124;
- Kitos terpių poros: ZnBr₂/acetonas; (H₂O+LiNO₃)/etilaminas [7].

Ličio Bromidas (LiBr) yra vandenyje tirpi cheminė medžiaga. LiBr - vandens tirpalas (naudojamas kaip šaltnešis) taip pat turi savybę absorbuoti vandenį. LiBr ir vandens tirpalo absorbcija kinta tiesiogiai proporcingai tirpalo koncentracijai ir atvirkščiai proporcingai tirpalo temperatūrai. Be to, yra didelis skirtumas tarp LiBr ir vandens garų slėgio. Tai reiškia, kad kai LiBr vandens tirpalas yra kaitinamas, vanduo garuos, bet LiBr liks tirpale ir tirpalas taps labiau koncentruotas. Absorbcijos sistemos naudoja šilumos energiją, kad sukurtų šaldymo efektą. Šiose sistemose šaltnešis yra vanduo, garuodamas sugeria šilumą žemoje temperatūroje ir žemame slėgyje, o kondensacijos metu išskiria šilumą aukštoje temperatūroje ir aukštame slėgyje. Išgaravusiam šaltnešiui absorbuoti naudojamas LiBr tirpalas, kuris veikia kaip absorbentas. Šaltnešio garavimas vyksta esant žemam slėgiui (vakuumui). Praskiestas tirpalas, kuriame yra absorbuotų šaltnešio garų yra kaitinamas didesniame slėgyje. Dėl to šaltnešis garuoja, todėl tirpalas atkuriamas iki pradinės koncentracijos. Ciklas nuolat kartojasi, kad būtų gautas norimas atšaldymo efektas. Šaldymo agentas dalyvauja daugybėje procesų, kad užbaigtų šaldymo / šildymo ciklą. Tai yra garinimas, absorbcija, slėgio pakėlimas, garavimas, kondensacija, droseliacija ir išsiplėtimas. Šio ciklo metu šaltnešis sugeria šilumą iš žemos temperatūros šilumos šaltinio ir atiduoda ją į aukštos temperatūros terpę [11].

Katilinėje naudojamas absorbcinis šilumos siurblys yra skirtas biokuro vandens šildymo katilų, kurių bendra galia yra 16 MW, efektyvumui gerinti. Katilų efektyvumas gerinamas mažinant iš katilų išeinančių dūmų temperatūrą. Esami katilai jau naudoja kondensacinį 4 MW ekonomaizerį, aušinamą grįžtančiu iš šilumos tiekimo tinklų vandeniu ir dūmų temperatūra už kondensacinio ekonomaizerio yra 50 °C. Norint daugiau sumažinti dūmų temperatūrą, naudojamas absorbcinis šilumos siurblys.

7.2. AŠS veikimas

Absorbcinį šilumos siurblių sudaro generatorius, kondensatorius, išgarintuvas ir absorberis. Absorbcinio šilumos siurblio pagrindinės dalys matomos 11 paveiksle.



12 pav. Pagrindinės AŠS dalys (Sudaryta autoriaus)

Generatoriuje LiBr tirpalas gali būti kaitinamas, naudojant šilumos šaltinį, tokį kaip garas, karštas vanduo, karštos išmetamosios dujos ir panašiai. Nagrinėjamoje katilinėje generatoriaus kaitinimui naudojamas karštas termofikacinis vanduo, paruoštas katilų. Kaitinant tirpalą iš jo garinamas vanduo, nes turi mažesnę garavimo temperatūrą negu LiBr, todėl LiBr koncentracija tirpale didėja. Didėjant koncentracijai tirpalas turi būti atnaujinamas, nes išotintas tirpalas gali pradėti kristalizuotis. Todėl didelės koncentracijos tirpalas iš generatoriaus siurblio pagalba siurbiamas į absorberį, o iš absorberio mažos koncentracijos tirpalas siurblio pagalba paduodamas į generatorių.

Generatoriaus kamera yra sujungta su kondensatoriaus kamera, o kondensatoriaus kontūre cirkuliuoja žemesnės temperatūros termofikacinis vanduo. Todėl tirpalo vandens garai pereina į kondensatorių, nes ten jie atiduoda šilumą žemesnės temperatūros termofikaciniam vandeniui, bei kondensuojasi, dėl ko jų tūris mažėja, todėl jie pastoviai siurbiami iš generatoriaus.

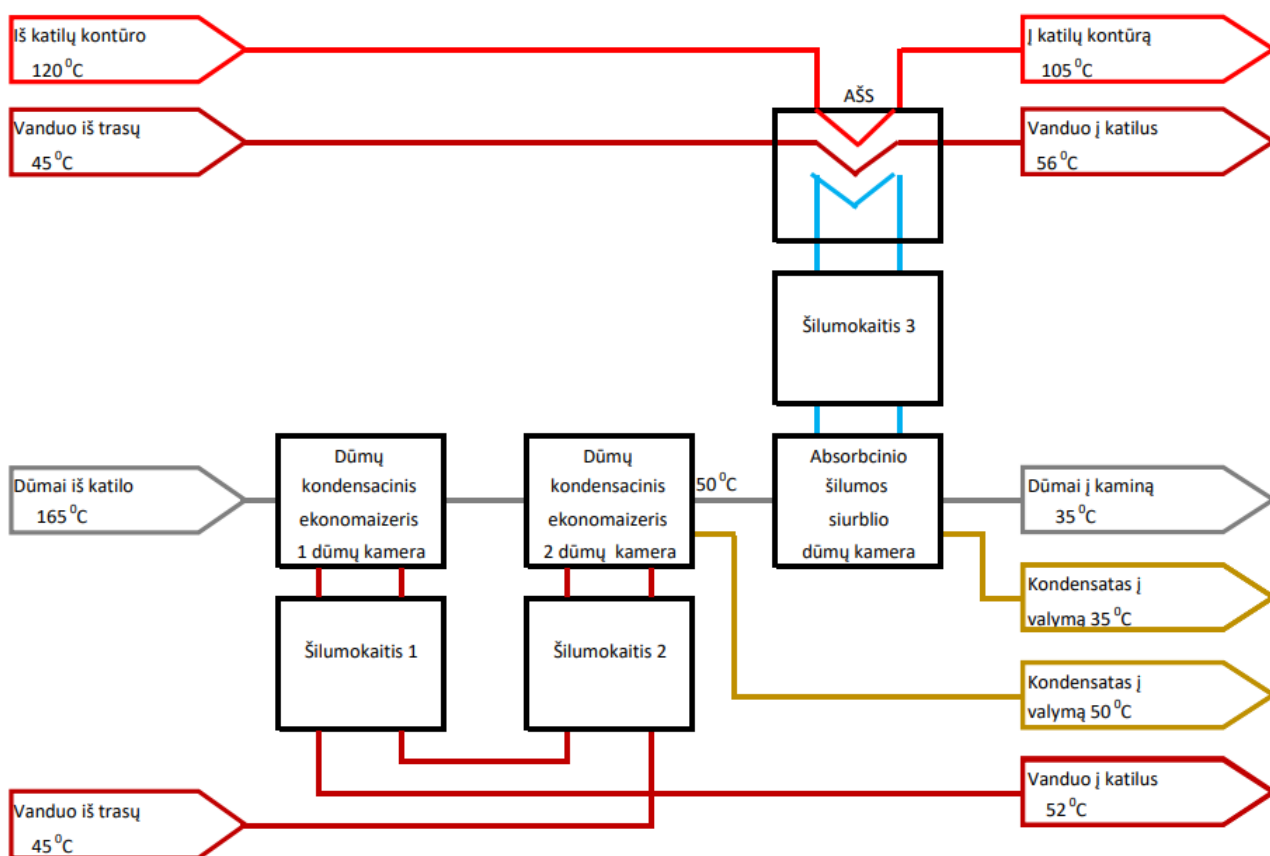
Absorberyje purškiamas aukštos koncentracijos LiBr tirpalas absorbuoja ten esančius vandens garus, todėl tirpalo LiBr koncentracija mažėja. Mažesnės koncentracijos tirpalas gražinamas į generatorių. Absorbuojant vandens garus jų tūris mažėja, todėl čia gaunamas slėgis yra mažesnis už atmosferinį. Be to ličio bromidui absorbuojant garus vyksta egzoterminė reakcija ir išskiriama šiluma, kuri

perduodama į absorberio kontūrą. Absorberio tūris yra sujungtas su garintuvo tūriu, todėl garintuve slėgis irgi mažesnis už atmosferinį. Į garintuvą tiekiamas šiltas / karštas vanduo iš kondensatoriaus per specialų vožtuvą iš aukštesnio į žemesnį slėgį. Patekęs į žemesnio slėgio sritį, vanduo garuoja ir nuo garintuvo kontūro paima šilumą, tai yra jį vėsina. Susidaręs garas juda link absorberio, kur jis absorbuojamas (nes absorbuojant jo tūris mažėja).

Schema parodyta 11 paveiksle turi tris kontūrus: absorberio - kondensatoriaus, generatoriaus ir garintuvo. Priklausomai nuo pasirinktų kontūrų parametrų šis įrenginys gali būti naudojamas:

- nuo garintuvo atgautą papildomą šilumos (jei tai atliekinė šiluma) kiekį panaudoti absorberio – kondensatoriaus kontūrai šildyti;
- nuo generatoriaus paimtą šilumą (jei tai atliekinė šiluma – pavyzdžiui vidaus degimo variklio išmetami dūmai), panaudoti šalčio gamybai (vėdinimas ir kondicionavimas);
- ir taip toliau....

Bendra kondensacinio ekonomaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio principinė pajungimo schema parodyta 13 paveiksle.



13 pav. Kondensacinio ekonomaizerio ir AŠS principinė pajungimo schema (sudaryta autoriaus)

Paveiksle parodyta, kad AŠS generatorius yra maitinamas karštu termofikaciniu vandeniu iš katilų kontūro (termofikacinio vandens grafikas 120 / 105 °C), išgarintuvas paima šilumą per šilumokaitį iš dūmų, einančių per AŠS dūmų kamerą, o absorberis ir kondensatorius pašildo grįžtantį termofikacinį tinklų vandenį nuo 45 °C iki 52 °C

7.3. AŠS atgaunamos šilumos skaičiavimo principas

Absorbacinio šilumos siurblio atgaunama šiluma skaičiuojama analogiškai, kaip dūmų kondensacinio ekonomaizerio atgaunama šiluma:

– degimo produktų CO₂, N₂, O₂ (išskyrus vandens garus) atiduodama šiluma suskaičiuojama degimo produktų kiekius imant iš 8 lentelės, o šiluminį talpumą imant iš 6 lentelės ir žinant temperatūrų skirtumą prieš absorbacinį šilumos siurblį (už kondensacinio ekonomaizerio) ir už absorbacinio šilumos siurblio;

– vandens garų H₂O atiduodama šiluma suskaičiuojama iš garų energijos prieš AŠS (už kondensacinio ekonomaizerio) atimant likusių vandens garų ir sukondensuoto vandens energiją už AŠS.

7.4. Skaičiavimo rezultatai (Atgaunama šiluma)

Už kondensacinio ekonomaizerio santykinis dūmų drėgnumas yra 100%, nes dūmai apipurškiami dideliu kiekiu kondensato. Taigi galime teigti, kad už kondensacinio ekonomaizerio dūmų temperatūra ir dūmų rasos taško temperatūra yra 50 °C, parcialinis slėgis 0,123350 bar(a), dūmų kiekis yra 3284,1 kg/h ir entalpija 2591,858 kJ/kg.

Toliau dūmų temperatūra mažinama AŠS pagalba (išgarintuvui dirbant 30 / 25 °C grafiku). Projekte numatyta dūmų temperatūra už AŠS kameros yra 35 °C.

Toliau atlieku skaičiavimus, kai dūmų temperatūra į AŠS yra 50 °C, dūmų temperatūra už AŠS yra 35 °C. Degimo produktų kiekiai prieš AŠS atitinka degimo produktų kiekius už kondensacinio ekonomaizerio ir yra pateikti 8 lentelėje. Už kondensacinio ekonomaizerio vandens garų parcialinis slėgis pasikeitė, nes dalis vandens garo buvo sukondensuota. Dūmų sudėtis už kondensacinio ekonomaizerio pateikta 10 lentelėje.

10 lentelė. Dūmų sudėtis už AŠS (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	mol/s	g/s	bar(a)	kg/h	nm ³ /h
CO ₂	45,19	1 988,46	0,123260	7 158,5	3 644,3
H ₂ O	19,15	415,76	0,056217	1 496,7	1 862,6
N ₂	257,04	7 197,17	0,701073	25 909,8	20 727,9
O ₂	19,17	613,59	0,052299	2 208,9	1 546,3
SO ₂	0,01	0,43	0,000018	1,5	0,5
iš viso:	340,56	10 215,42	1,000000	36 775,5	27 781,6

Palyginus 8 ir 10 lentelės duomenis matome, kad paimtomis sąlygomis AŠS per valandą sukondensuojama 3284,1 - 1 496,7 = 1787,4 kg/h vandens. Prieš AŠS turėjome 3284,1 kg/h 50 °C 0,123350 bar(a) vandens garų, kurių entalpija 2591,858 kJ/kg. Už AŠS turime 1496,7 kg/h 35 °C 0,056217 bar(a) vandens garų, kurių entalpija 2564,935 kJ/kg ir 1787,4 kg/h 35 °C 1 bar(a) vandens, kurio entalpija yra 146,65 kJ/kg.

Taigi teoriškai AŠS ataušindamas dūmus nuo 50 °C iki 35 °C iš vandens garų, esančių dūmuose, per valandą atgauna tokį šilumos kiekį:

$$3284,1 \text{ kg/h} * 2591,858 \text{ kJ/kg} - 1496,7 \text{ kg/h} * 2564,935 \text{ kJ/kg} - 1787,4 \text{ kg/h} * 146,65 \text{ kJ/kg} =$$

$$= 4410860 \text{ kJ} = 1225 \text{ kWh}$$

Absorbicinio šilumos siurblio atgaunamos šilumos suvestinė pateikta 11 lentelėje.

11 lentelė. AŠS atgaunamos šilumos suvestinė (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	Prieš AŠS	Už AŠS	Matavimo vnt.
Dūmų temperatūra	50	35	°C
Vandens garų parcialinis slėgis	0,123350	0,056217	bar(a)
Vandens garų srautas su dūmais	3 284,1	1 496,7	kg/h
Vandens garų entalpija	2591,858	2564,935	kJ/kg
Šilumos kiekis vandens garuose	2364,42	1066,37	kWh
Sukondensuota kiekis		1787,4	kg/h
Kondensato entalpija		146,65	kJ/kg
Šilumos kiekis kondensate		72,81	kWh
Iš viso atgauta šilumos:		1225,24	kWh

Kitų degimo produktų CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma pateikta 12 lentelėje (skaičiuota degimo produktų kiekius imant iš 5 lentelės, o šiluminį talpumą imant iš 6 lentelės ir žinant temperatūrų skirtumą prieš kondensacinį ekonomaizerį ir už kondensacinio ekonomaizerio).

12 lentelė. CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma AŠS (Sudaryta autoriaus)

Degimo produkto pavadinimas	CO ₂	N ₂	O ₂	Vnt.
Degimo produkto kiekis	3 644,3	20 727,9	1 546,3	nm ³
Temperatūra prieš AŠS, °C	50	50	50	°C
Artimiausia žemesnė Tz	0	0	0	°C
Entalpija prie Tz	1,5998	1,2946	1,3059	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	100	100	100	°C
Entalpija prie Ta	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 50 °C	1,65005	1,2952	1,31175	kJ/(nm ³ K)
Temperatūra už AŠS, °C	35	35	35	°C
Artimiausia žemesnė Tz	0	0	0	°C
Entalpija prie Tz	1,5998	1,2946	1,3059	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	100	100	100	°C
Entalpija prie Ta	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 50 °C	1,634975	1,29502	1,309995	kJ/(nm ³ K)
Atgauta šilumos	92 122	402 831	30 520	kJ
	25,59	111,90	8,48	kWh

Iš viso teoriškai gautas šilumos kiekis (iš vandens garų ir CO₂, N₂, O₂) yra
 1225 kWh + 26 kWh + 112 kWh + 8 kWh = 1371 kWh

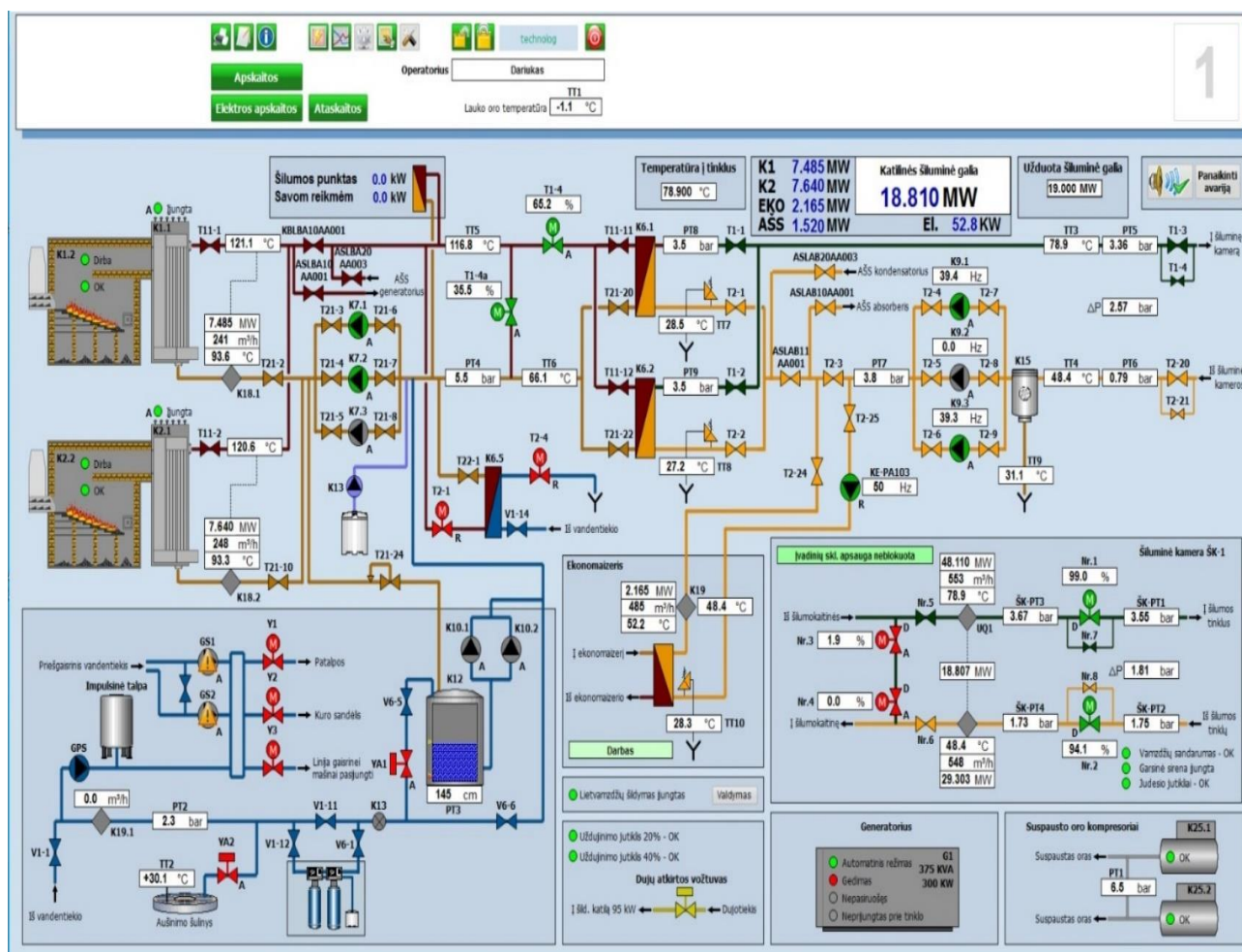
Realus atgautos šilumos kiekis yra mažesnis dėl šilumos nuostolių į aplinką ($\approx 3\%$) ir dėl šilumos nuostolių su kondensatu ($\approx 4\%$), iš viso nuostoliai $\approx 7\%$.

7.5. Skaičiavimo ir katilinės darbo rezultatų palyginimas

Kaip aprašyta 1 skyriuje, matome, kad drėgmės kiekis kure metų bėgyje keičiasi plačiose ribose. Tiriamos Geologų gatvės katilinės įranga skirta deginti biokurą, kuriame drėgmės kiekis kinta nuo 35% iki 55%. Esant didžiausiam drėgmės kiekiui kure 55%, kondensacinis ekonomizeris ir AŠS atgauną didžiausią šilumos kiekį, tai yra didžiausia kondensacinio ekonomizerio galia yra 4 MW, o didžiausia AŠS galia yra 1,6 MW.

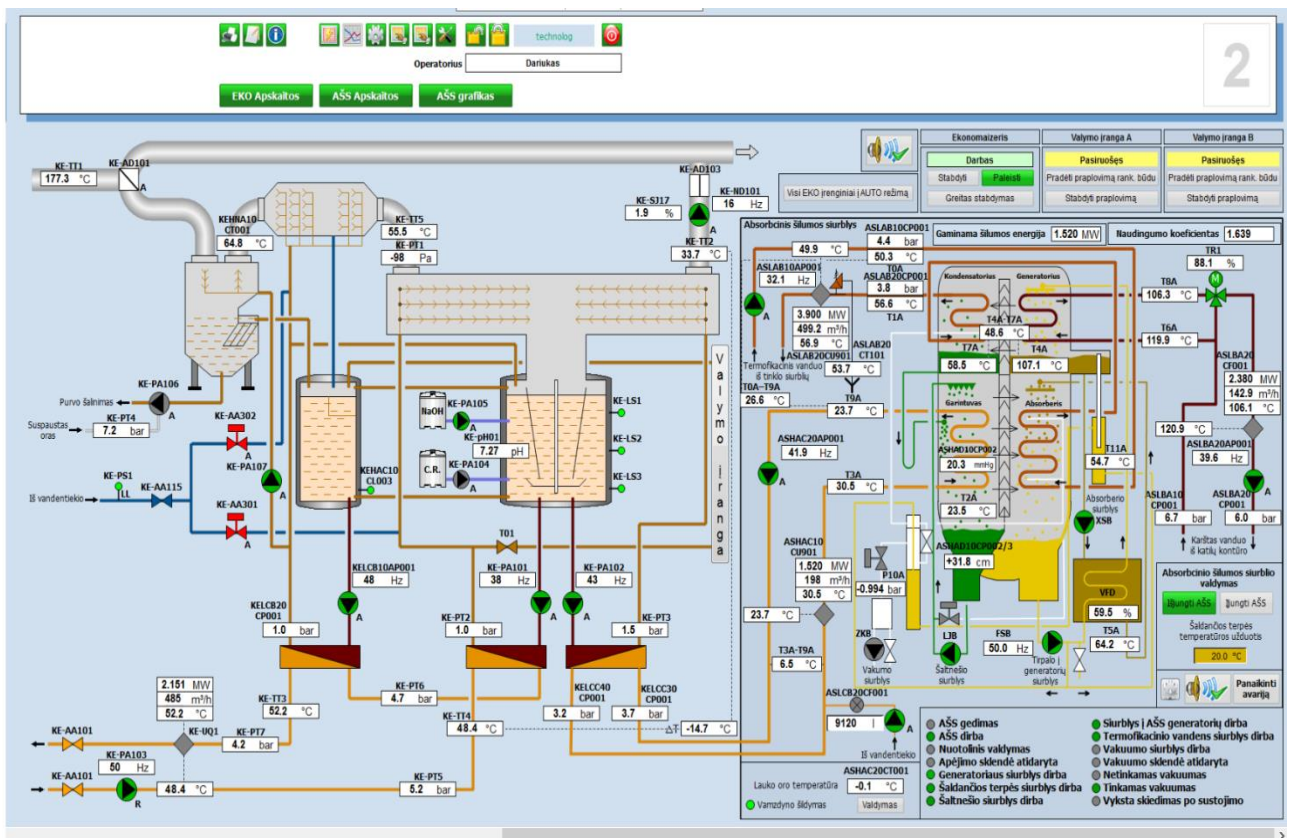
Tuo tarpu pateiktuose skaičiavimuose paimtas vidutinis drėgmės kiekis kure yra 45% ir prie šio parametro gauta kondensacinio ekonomizerio teorinė galia yra 3152 kW, o AŠS galia 1371 kW (įvertinus nuostolius atitinkamai ≈ 2930 kW ir ≈ 1280 kW).

Dirbant katilinei parametrai beveik niekada neatitinka nei maksimalių, nei vidutinių reikšmių. Lyginant katilinėje gaunamus rezultatus su skaičiavimais, yra paimami momentiniai parametrai, kurie vaizduojami katilinės SCADA programoje. Juos galima matyti 14 ir 15 paveiksluose.



14 pav. Katilinės bendrųjų įrenginių schema ir darbiniai parametrai (iš katilinės monitoringo programos)

[17]



15 pav. Kondensacinio ekonomizaierio ir AŠS schema ir darbiniai parametrai (iš katilinės monitoringo) [17]

Toliau visi skaičiavimai atlikti naudojant duomenis iš 14 ir 15 paveikslų. Kaip pavyzdys katilinės galia $7,485 \text{ MW} + 7,640 \text{ MW} = 15,125 \text{ MW}$, dūmų temperatūra už katilo $177,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, iš tinklų grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra $48,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tai dūmų temperatūra už kondensacinio ekonomizaierio $53,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dūmų temperatūra už AŠS $33,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, drėgmės kiekis kure paimtas iš kuro tyrimų protokolo ir lygus 40% . Skaičiavimo eiga tokia pati, kaip jau yra aprašyta, todėl toliau pateikiamos tik lentelės su skaičiavimo rezultatais.

13 lentelė. Katilinės darbas. Reali kuro sudėtis (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	Žymėjimas	Sausos masės sudėtis (tipinė)	Realios masės sudėtis	Mato vnt.
Drėgmės kiekis kure	W	0,00	40,000	%
Kuro peleningumas	As	5,00	3,000	%
Anglis	C	48,45	29,070	%
Vandenilis	H	5,97	3,580	%
Deguonis	O	39,90	23,940	%
Azotas	N	0,67	0,399	%
Siera	S	0,02	0,011	%
Iš viso:	Σ	100,00	100,000	%
Kuro degimo šiluma	Q^n	18252	9 951	kJ / kg
		5,07	2,76	kWh / kg

14 lentelė. Katilinės darbas. Skaičiavimai sudeginus 1 kg kuro (Sudaryta autoriaus)

1.	C ⁿ sudeginti reikalingas deguonies kiekis	0,7752	kg
2.	Sudeginus C ⁿ gaunamų degimo produktų kiekis (CO ₂)	1,0659	kg
3.	H ⁿ sudeginti reikalingas deguonies kiekis	0,2864	kg
4.	Sudeginus H ⁿ gaunamų degimo produktų kiekis (H ₂ O)	0,3222	kg
5.	S ^{n_d} sudeginti reikalingas deguonies kiekis	0,0001	kg
6.	Sudeginus S ^{n_d} gaunamų degimo produktų kiekis (SO ₂)	0,0002	kg
7.	Pačiame kure esančio deguonies kiekis	0,2394	kg
8.	Kilogramui kuro sudegti reikalinga papildomai deguonies M _{O₂}	0,8223	kg
9.	Oro kiekis reikalingas degimui (priimta deguonies 23% oro masės)	3,5751	kg
10.	Oro pertekliaus koeficientas	1,4000	
11.	Reikalingas oro kiekis (su pertekliaus koef.)	5,0052	kg
12.	Deguonies kiekis degimo produktuose	0,3289	kg
13.	N ⁿ kiekis paimtame ore (priimta 77% (su priemaišomis) oro masės)	3,8540	kg
14.	N ⁿ kiekis iš kuro	0,0040	kg
15.	Iš viso N ⁿ kiekis degimo produktuose	3,8580	kg
16.	Vandens garų kiekis paimtas su oru (priimta 10g/1kg oro)	0,0501	kg
17.	Sudeginus 1 kg kuro iš kuro išgarinta vandens	0,4000	kg
18.	Visas dūmuose esantis vandens kiekis	0,7722	kg
19.	Sudeginus 1 kg kuro iš viso gautų lakių degimo produktų kiekis	6,0252	kg
20.	Sudeginus 1 kg kuro gautų kietų produktų (pelenų) kiekis	0,0300	kg
	Iš viso:	6,0552	kg

15 lentelė. Katilinės darbas. Kuro poreikis (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas		Reikšmė	Vnt.
Katilo agregato galia (katilo ir sauso tipo eko galia)	Q ^k	15125	kW
Katilo agregato NVK	η	88,06	%
Pakuros galia	Q ^p	17176	kW
Kuro poreikis	M	6 213,48	kg/h

16 lentelė. Katilinės darbas. Degimo produktų kiekiai (Sudaryta autoriaus)

Dūmų sudėtis	Molinė masė	Kiekis per s		Parcialinis sl	Dūmų srautas	
	g/mol	g/s	mol/s		bar(a)	kg/h
CO ₂	44	1 839,71	41,81	0,112573	6 623,0	3 371,7
H ₂ O	18	1 332,82	74,05	0,199360	4 798,2	5 971,0
N ₂	28	6 658,76	237,81	0,640286	23 971,6	19 177,2
O ₂	32	567,69	17,74	0,047764	2 043,7	1 430,6
SO ₂	64	0,39	0,01	0,000017	1,4	0,5
iš viso:	suma:	10 399,38	371,42	1,000000	37 437,8	29 951,0

17 lentelė. Katilinės darbas. Dūmų sudėtis už kondensacinio ekonomizerio (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	mol/s	g/s	bar(a)	kg/h	nm ³ /h
CO ₂	41,81	1 839,71	0,120110	6 623,0	3 371,7
H ₂ O	50,74	974,45	0,145756	3 508,0	4 365,5
N ₂	237,81	6 658,76	0,683154	23 971,6	19 177,2
O ₂	17,74	567,69	0,050962	2 043,7	1 430,6
SO ₂	0,01	0,39	0,000018	1,4	0,5
iš viso:	348,11	10 041,01	1,000000	36 147,6	28 345,6

Palyginus 16 ir 17 lentelės duomenis matome, kad paimtomis sąlygomis dūmų kondensaciniame ekonomizeryje per valandą sukondensuojama $4798,2 - 3508,0 = 1290,2$ kg/h vandens. Prieš dūmų kondensacinį ekonomizerį turėjome 4798,2 kg/h 177,3 °C 0,199360 bar(a) vandens garų, kurių entalpija 2834,793 kJ/kg. Už dūmų kondensacinio ekonomizerio turime 3508,0 kg/h 53,4 °C 0,145756 bar(a) vandens garų, kurių entalpija 2597,844 kJ/kg ir 1290,2 kg/h 53,4 °C 1 bar(a) vandens, kurio entalpija yra 223,546 kJ/kg. Taigi teoriškai iš vandens garų, esančių dūmuose, per valandą galima atgauti tokį šilumos kiekį:

$$4798,2 \text{ kg/h} * 2834,793 \text{ kJ/kg} - 3508,0 \text{ kg/h} * 2597,844 \text{ kJ/kg} - 1290,2 \text{ kg/h} * 223,546 \text{ kJ/kg} = \\ = 4200248 \text{ kJ} = 1166 \text{ kWh}$$

Kitų degimo produktų CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma pateikta 18 lentelėje (skaičiuota degimo produktų kiekius imant iš 16 lentelės, o šiluminį talpumą imant iš 6 lentelės ir žinant temperatūrų skirtumą prieš dūmų kondensacinį ekonomizerį ir už dūmų kondensacinio ekonomizerio.

18 lentelė. Katilinės darbas. CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma DKE (Sudaryta autoriaus)

Degimo produkto pavadinimas	CO ₂	N ₂	O ₂	Vnt.
Degimo produkto kiekis	3 345,5	19 028,1	1 419,5	nm ³ /h
Temperatūra prieš DKE, °C	177,3	177,3	177,3	°C
Artimiausia žemesnė Tz	100	100	100	°C
Entalpija prie Tz	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	200	200	200	°C
Entalpija prie Ta	1,7874	1,2996	1,3352	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 165 °C	1,767628	1,298737	1,331205	kJ/(nm ³ K)
Temperatūra už DKE, °C	53,4	53,4	53,4	°C
Artimiausia žemesnė Tz	0	0	0	°C
Entalpija prie Tz	1,5998	1,2946	1,3059	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	100	100	100	°C
Entalpija prie Ta	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 50 °C	1,653467	1,295241	1,312148	kJ/(nm ³ K)
Atgauta šilumos	753 090	3 065 432	235 572	kJ
	209,19	851,51	65,44	kWh

Iš viso iš kondensacinio ekonomizerio per valandą teoriškai gauta šilumos

$$1166 \text{ kWh} + 210 \text{ kWh} + 852 \text{ kWh} + 65 \text{ kWh} = 2293 \text{ kWh}$$

Realus atgautos šilumos kiekis yra mažesnis dėl šilumos nuostolių į aplinką ($\approx 3\%$) ir dėl šilumos nuostolių su kondensatu ($\approx 4\%$). Priėmus $\approx 7\%$ realus atgaunamos šilumos kiekis būtų $2293 \cdot 0,93 \approx 2132 \text{ kWh}$. Katilinės monitoringo programoje rodomas šilumos kiekis yra neženkliai didesnis 2165 kWh, todėl galima teigti, kad yra artimas skaičiavimo rezultatams.

19 lentelė. Katilinės darbas. Dūmų sudėtis už AŠS (Sudaryta autoriaus)

Pavadinimas	mol/s	g/s	bar(a)	kg/h	nm ³ /h
CO ₂	41,81	1 839,71	0,133248	6 623,0	3 371,7
H ₂ O	16,42	349,75	0,052314	1 259,1	1 566,9
N ₂	237,81	6 658,76	0,757881	23 971,6	19 177,2
O ₂	17,74	567,69	0,056536	2 043,7	1 430,6
SO ₂	0,01	0,39	0,000020	1,4	0,5
iš viso:	313,79	9 416,31	1,000000	33 898,7	25 546,9

Palyginus 17 ir 19 lentelės duomenis matome, kad AŠS per valandą sukondensuojama 3508,0 kg/h - 1 259,1 = 2248,9 kg/h vandens. Prieš AŠS turėjome 3508,0 kg/h 53,4 °C 0,145756 bar(a) vandens garų, kurių entalpija 2597,844 kJ/kg. Už AŠS turime 1259,1 kg/h 33,7 °C 0,052314 bar(a) vandens garų, kurių entalpija 2562,613 kJ/kg ir 2248,9 kg/h 33,7 °C 1 bar(a) vandens, kurio entalpija yra 141,229 kJ/kg. Taigi teoriškai AŠS ataušindamas dūmus nuo 53,4 °C iki 33,7 °C iš vandens garų, esančių dūmuose, per valandą atgauna tokį šilumos kiekį:

$$3508,0 \text{ kg/h} * 2597,844 \text{ kJ/kg} - 1259,1 \text{ kg/h} * 2562,613 \text{ kJ/kg} - 2248,9 \text{ kg/h} * 141,229 \text{ kJ/kg} = 5569041 \text{ kJ} = 1547 \text{ kWh}$$

Kitų degimo produktų CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma pateikta 20 lentelėje (skaičiuota degimo produktų kiekius imant iš 16 lentelės, o šiluminį talpumą imant iš 6 lentelės ir žinant temperatūrų skirtumą prieš AŠS ir už AŠS).

20 lentelė. Katilinės darbas. CO₂, N₂, O₂ atiduodama šiluma AŠS (Sudaryta autoriaus)

Degimo produkto pavadinimas	CO ₂	N ₂	O ₂	Vnt.
Degimo produkto kiekis	3 345,5	19 028,1	1 419,5	nm ³
Temperatūra prieš AŠS, °C	53,4	53,4	53,4	°C
Artimiausia žemesnė Tz	100	100	100	°C
Entalpija prie Tz	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	200	200	200	°C
Entalpija prie Ta	1,7874	1,2996	1,3352	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 50 °C	1,659711	1,294029	1,309398	kJ/(nm ³ K)
Temperatūra už AŠS, °C	33,7	33,7	33,7	°C
Artimiausia žemesnė Tz	100	100	100	°C

Entalpija prie Tz	1,7003	1,2958	1,3176	kJ/(nm ³ K)
Artimiausia aukštesnė Ta	200	200	200	°C
Entalpija prie Ta	1,7874	1,2996	1,3352	kJ/(nm ³ K)
Skaičiuota entalpija prie 50 °C	1,642553	1,293281	1,305931	kJ/(nm ³ K)
Atgauta šilumos	111 320	485 552	36 782	kJ
	30,92	134,88	10,22	kWh

Iš viso teoriškai per valandą atgauta šilumos

$$1547 \text{ kWh} + 31 \text{ kWh} + 135 \text{ kWh} + 10 \text{ kWh} = 1723 \text{ kWh}$$

Realus atgautos šilumos kiekis yra mažesnis dėl šilumos nuostolių į aplinką ($\approx 3\%$) ir dėl šilumos nuostolių su kondensatu ($\approx 5\%$). Priėmus $\approx 8\%$ realus atgaunamos šilumos kiekis būtų $1723 * 0,92 \approx 1585 \text{ kWh}$. Katilinės monitoringo programoje rodomas šilumos kiekis yra neženkliai mažesnis 1520 kWh, todėl galima teigti, kad yra artimas skaičiavimo rezultatams.

8. Kompresorinis šilumos siurblys

Panašiai, kaip absorbcinis šilumos siurblys, dūmų temperatūrą gali sumažinti ir kompresorinis šilumos siurblys. Skirtumas tik tas, kad AŠS veikimui reikalinga šiluminė energija, o kompresorinio šilumos siurblio veikimui reikalinga elektros energija. Kompresorinio šilumos siurblio ir AŠS ekonominių rodiklių palyginimas pateiktas šiame skyriuje.

Šilumos atgavimas iš dūmų

Biokuro dviejų katilų nominali šiluminė galia 16 MW.

Darbo režimai:

- dūmų temperatūra iš katilo +165 °C;
- dūmų kondensacinis ekonomizeris Nr.1 (DKE1):
 - o šiluminis našumas 4 MW;
 - o dūmų temperatūra išėjime +50 °C
- dūmų kondensacinis ekonomizeris Nr.2 (DKE2):
 - o šiluminis našumas 1,6 MW;
 - o dūmų temperatūra išėjime +35 °C ($t_{DKE2iš}$)

Kompresorinis šilumos siurblys

Virimo temperatūra: $t_0 = t_{DKE2iš} - \Delta t_0 = 35 - 10 = 25$ °C

Kondensacijos temperatūra: $t_K = t_{TAiš} + \Delta t_K = 57 + 10 = 67$ °C

Perkaitinimas garintuve: $\Delta t_{gar} = 6$ °C

Peraušinimas kondensatoriuje: $\Delta t_{kond} = 0$ °C

Izoentropinio efektyvumo koeficientas: $\eta_{iz} = 0,68$ (pagal analogus iš Emerson programos Select 8)

Šaldymo agento pasirinkimas:

Pramoninėse šilumos siurblių sistemose dažniausiai naudojami: R717, R134a, R1234ze(E).

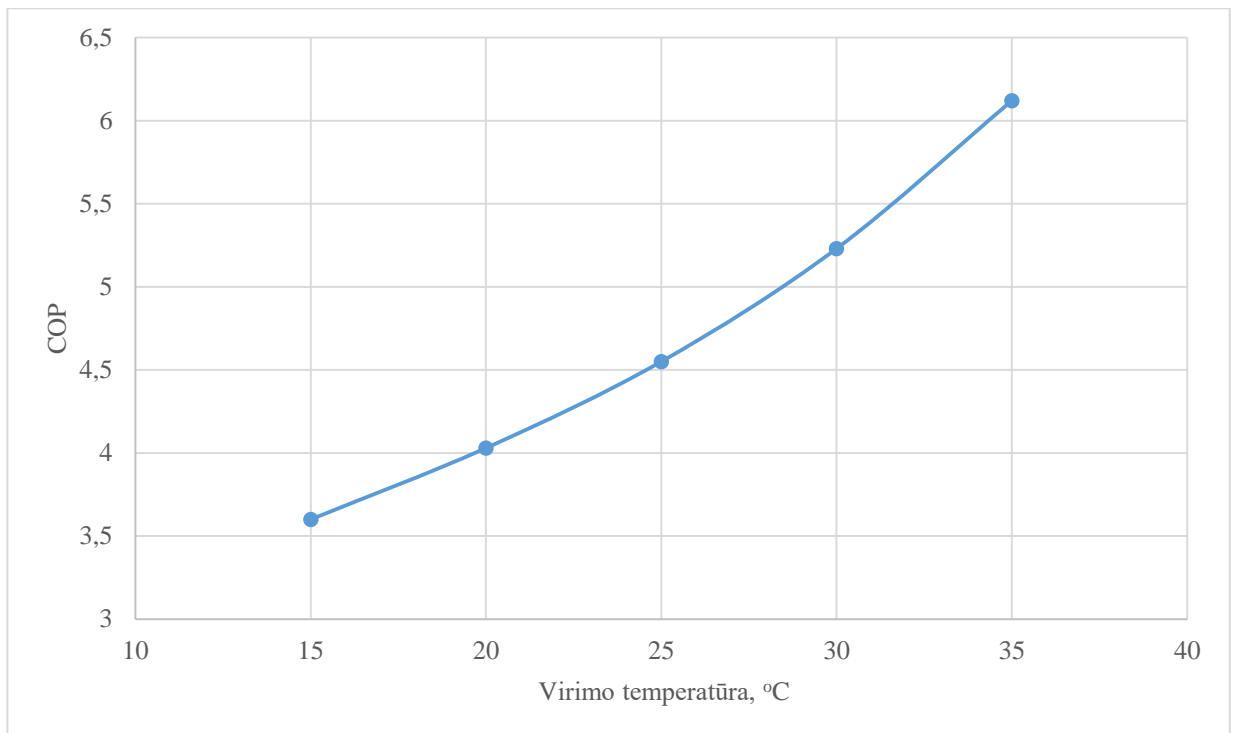
21 lentelė. Šaldymo agentų parametrai

Šaldymo agentas	VAP (GWP) *	Saugos grupė	COP _h **
R717 (amoniakas)	0	B2L	4,95
R134a	1430	A1	4,52
R1234ze(E)	7	A2L	4,55

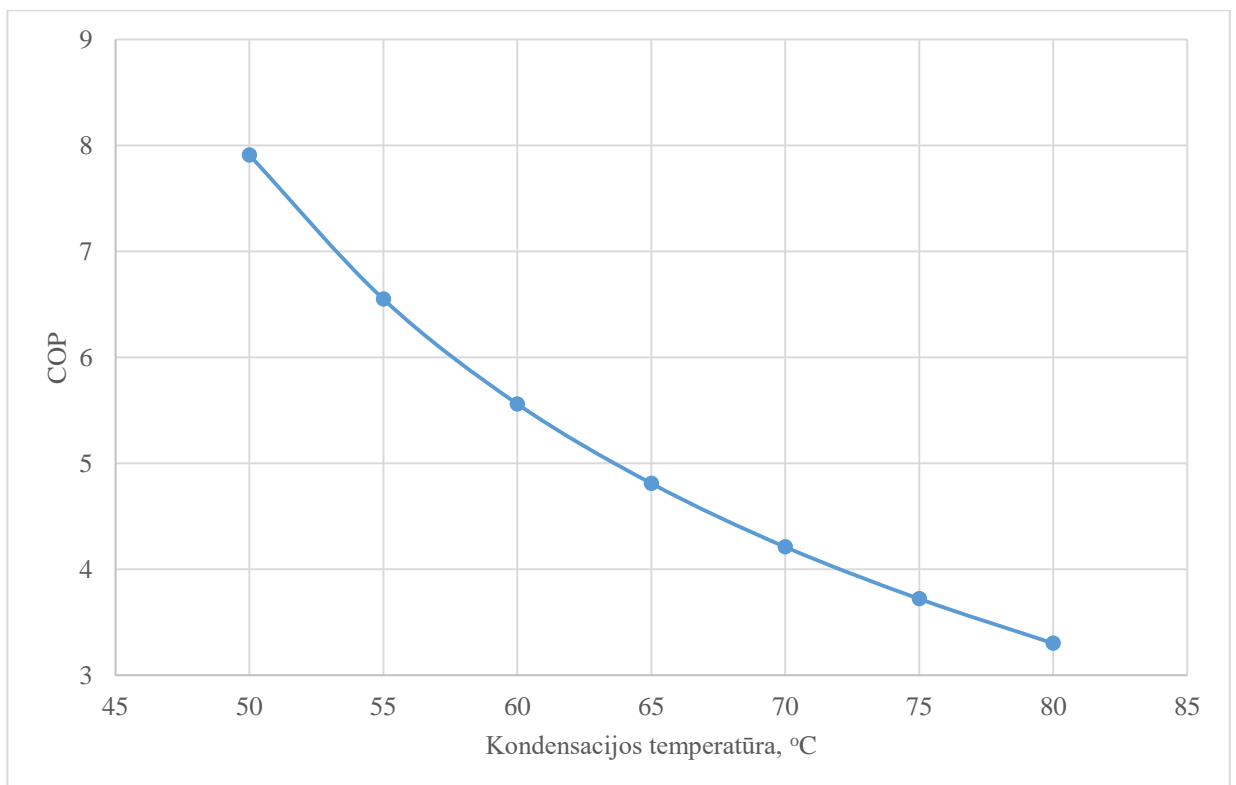
* AR4 ; ** reikšmė šildymui prie aukščiau duotų sąlygų

R134a naudojimas yra apribojamas gana aukšta VAP reikšme (1430 kartų didesnis poveikis visuotiniam atšilimui lyginant su CO₂). R717 saugos klasė yra B2L – toksiška ir šiek tiek degi medžiaga. Todėl dažnai nepageidaujama naudoti medžiaga.

Todėl iš šių medžiagų pasirenkame R1234ze(E), kuri yra naudojama, pavyzdžiui, Viessmann (Vokietija) pramoniniuose šilumos siurbliuose. Šilumos transformacijos koeficiento COP priklausomybė nuo virimo temperatūros matome 16 paveiksle, o šilumos transformacijos koeficiento COP priklausomybė nuo kondensacijos temperatūros matome 17 paveiksle.



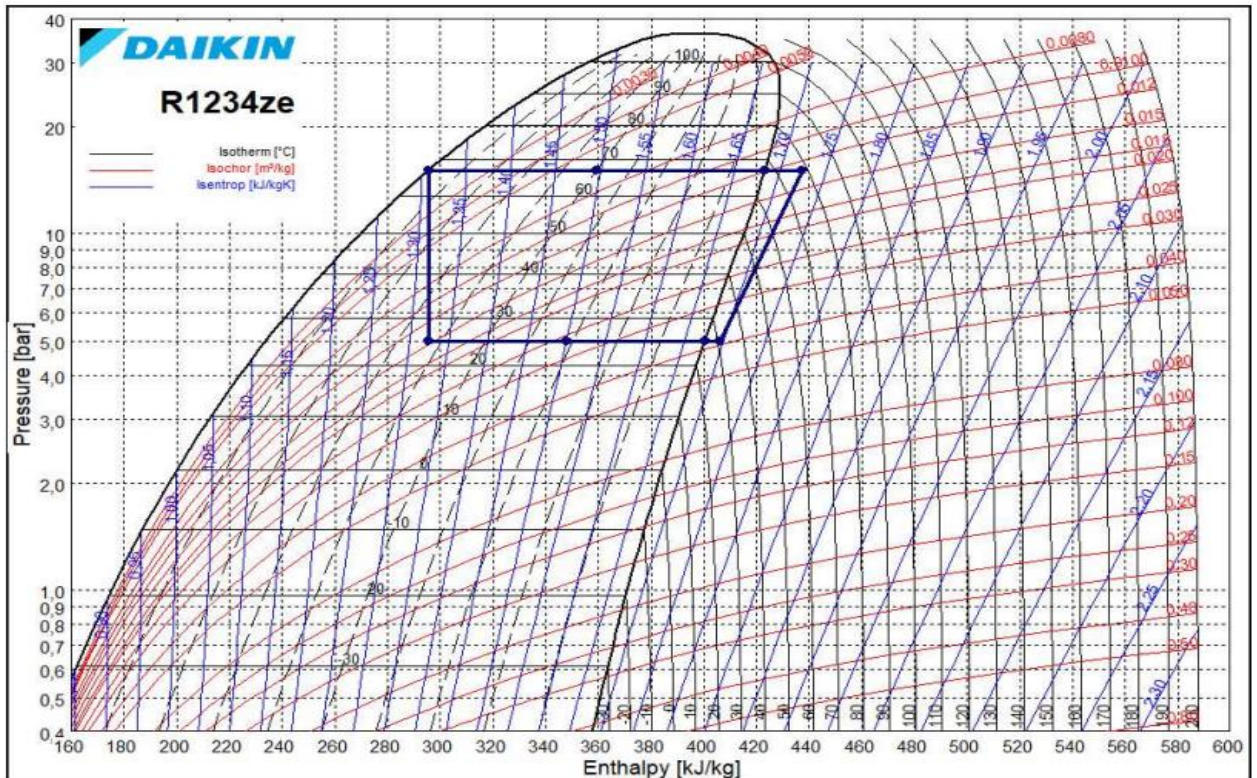
16 pav. Šilumos transformacijos koeficiento COP priklausomybė nuo virimo temperatūros [20]



17 pav. Šilumos transformacijos koeficiento COP priklausomybė nuo kondensacijos temperatūros [20]

Skaičiavimams naudota CoolTools specializuota programinė įranga. Iš skaičiavimo rezultatų matome, kad šilumos siurblio ciklo efektyvumas kyla didinant virimo temperatūrą ir žeminant kondensacijos temperatūrą. Tačiau temperatūrų pasirinkimą apriboja galutinė dūmų ir ruošiamo termofikato temperatūros.

Pasirinktam darbo režimui šilumos siurblio ciklas pateiktas 18 paveiksle



18 pav. Šilumos siurblio ciklas log p – h diagramoje [21]

Kompresorinio šilumos siurblio (KŠS), dirbančio su R1234ze(E), energinė analizė

Iš ciklo skaičiavimo, kai $Q_{gar} = 1600 \text{ kW}$: $Q_{kond} = 2050 \text{ kW}$; $W_{km} = 450 \text{ kW}$

$$Q_{gar} + W_{km} = Q_{kond}$$

Darbo laikas per metus: $\tau = 5040 \text{ h}$

Elektros vartojimas: $E_K = W_{km} \cdot \tau = 450 \cdot 5040 = 2\,268\,000 \text{ kWh}_e$ (elektros poreikis per metus)

Elektros kaina: $c_{el} = 0.28 \text{ EUR/kWh}_e$

Šilumos kaina: $c_{šil} = 0.087 \text{ EUR/kWh}_s$

Išlaidos elektrai: $I_{el} = E_K \cdot c_{el} = 0.28 \text{ EUR/kWh}_e \cdot 2\,268\,000 \text{ kWh}_e = 635\,040 \text{ EUR}$

Pajamos už šilumos pardavimą: $P_{š} = Q_{kond} \cdot \tau \cdot c_{šil} = 2050 \cdot 5040 \cdot 0.087 = 898\,884 \text{ EUR}$

Pelnas KŠS: $P_{š} - I_{el} = 263\,844 \text{ EUR}$

Absorbcinio šilumos siurblio (AŠS):

Šilumos kaina: $c_{šil} = 0.087 \text{ EUR/kWh}_s$

Išlaidos šilumai generatoriuje: $I_G = Q_G \cdot \tau \cdot c_{šil} = 2380 \text{ kWh} \cdot 5040 \cdot 0.087 \text{ EUR/kWh}_s = 1\,043\,582 \text{ EUR}$

Pajamos iš šilumos pardavimo: $P_{š} = (Q_{kond} + Q_{abs}) \cdot \tau \cdot c_{šil} = 3900 \cdot 5040 \cdot 0.087 = 1\,710\,072 \text{ EUR}$

Pelnas AŠS: $P_{š} - I_G = 1\,710\,072 - 1\,043\,582 = 666\,490 \text{ EUR}$

Pajamos iš šilumos pardavimo: $P_{š} = Q_{gar} \cdot \tau \cdot c_{šil} = 1520 \cdot 5040 \cdot 0.087 = 666\,490 \text{ EUR}$

Išvados

1. Išanalizavus paskutinių 10 metų biokuro katilinių mokslinę literatūrą, galima teigti, jog daugiausiai potencialo biokuro katilinių efektyvumo didinimui turi dūmų kondensaciniai ekonomaizeriai kartu su šilumos siurbliais.
2. Smulkinta mediena vežama iš kirtaviečių, skirtingomis meteorologinėmis sąlygomis, skirtingais metų laikais vidutinė drėgmės kiekio biokure reikšmė svyruoja nuo 41,0 iki 50,9%. Šiame darbe analizuota metų laiko įtaka drėgmės kiekiui biokure (smulkintoje miško medienoje) ir drėgmės kiekio biokure įtaka biokuro energetinei vertei. Didžiausias drėgmės kiekis būna sausio mėnesį, o mažiausia drėgmė būna birželio, liepos ir rugpjūčio mėnesiais.
3. Suskaičiuoti degimo produktų, esančių dūmuose, kiekiai, pateikta šilumos gamybos schema katile ir kondensaciniame ekonomaizeryje bei absorbciniame šilumos siurblyje. Grįžtamai iš tinklų vandens temperatūrai mažėjant regeneruojamos šilumos kiekis kondensaciniame ekonomaizeryje didėja, nes gaunami žemesnės temperatūros dūmai (iš dūmų pasisavinama daugiau energijos). Biokuro drėgmei didėjant, didėja vandens garų kiekis dūmuose ir juos kondensuojant atgaunama daugiau energijos. Absorbacinis šilumos siurblys yra taip pat skirtas katilinių efektyvumui gerinti mažinant iš katilinių išeinančių dūmų temperatūrą. Norint daugiau sumažinti dūmų temperatūrą, reikalinga terpė, šaltesnė už grįžtamą iš šilumos tinklų aušinantį termofikacinį vandenį. Minėta terpė ir gaunama naudojant absorbcinį šilumos siurblių. Kondensacinis ekonomaizeris ir AŠS iš to paties kuro kiekio leidžia pagaminti daugiau šilumos. Be to apipurškiant dūmus dideliu kiekiu kondensato iš dūmų „išplaunamos“ kietosios dalelės. Bet kokie energijos taupymo sprendimai reikalauja tam tikrų investicijų ir technologijų.
4. Realios sąlygos katilinėje retai atitinka projektinius duomenis, projektiniai duomenys buvo perskaičiuoti prie realių sąlygų. Perskaičiuoti parametrai palyginti su realios katilinės monitoringo programos duomenimis. Iš rezultatų matyti, kad realiai gauti duomenys, praktiškai nesiskiria nuo skaičiavimo rezultatų.
5. Realiai nagrinėjamoje katilinėje esant pakankamai sausam kurui (drėgmės kiekis kure 40%) kondensacinis ekonomaizeris nuo dūmų papildomai nuėmė 13,33%, o AŠS nuo dūmų papildomai nuėmė 9,9% šilumos, lyginant su katilo gaminama šiluma. Katilinės efektyvumas be kondensacinio ekonomaizerio ir be AŠS būtų 87,0 %, su kondensaciniu ekonomaizeriu pasiekė 98,6 %, o su kondensaciniu ekonomaizeriu bei AŠS pasiekė 107,3%. Katilinėje dūmams aušinti tikslinga naudoti ne tik dūmų kondensacinį ekonomaizerį, bet ir absorbcinį šilumos siurblių, nes iš to paties kuro kiekio gaunama daugiau šilumos.

Literatūros sąrašas

1. Klimato kaitos priežastys ir pasekmės [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-18] Prieiga per: <http://www.meteo.lt/lt/klimato-kaita?inheritRedirect=true>
2. Glasgow Climate Pact. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021. United Nations Framework Convention on Climate Change. [žiūrėta 2023-05-18]. Prieiga per: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf
3. TOTH, Pal, Attila Garami ir Bernadett Csordas. Image-based deep neural network prediction of the heat output of a step-grate biomass boiler. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2017, 200, 155-169 [žiūrėta 2023-02-06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.080>
4. CAPOSCIUTTI, Gianluca, Federica BARONTINI, Chiara GALLETTI, Marco ANTONELLI, Leonardo TOGNOTTI ir Umberto DESIDERI. Woodchip size effect on combustion temperatures and volatiles in a small-scale fixed bed biomass boiler. *Renewable Energy* [interaktyvus]. 2020, 151, 161-174 [žiūrėta 2023-02-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.005>
5. CHANTASIRIWAN, Somchart. Optimum installation of economizer, air heater, and flue gas dryer in biomass boiler. *Computers and Chemical Engineering* [interaktyvus]. 2021, 150, 1-10 [žiūrėta 2023-05-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107328>
6. PRODANTUKS, Toms, Valdis VITOLINS, Ivars VEIDENBERGS, Dagnija BLUMBERGA. Comparison of theoretical and practical energy efficiency values in indirect contact gas condensing unit. *Energy Procedia* [interaktyvus]. 2017, 128, 520–524 [žiūrėta 2023-04-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.072>
7. CHARDON, Gaétan , Nolwenn Le PIERRES ir Julien RAMOUSSE. On the opportunity to integrate absorption heat pumps in substations of district energy networks. *Thermal Science and Engineering Progress* [interaktyvus]. 2020, 20, 1-14 [žiūrėta 2023-03-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100666>
8. WEI, Hongyang, Shifang HUANG, ir Xiaosong ZHANG. Experimental and simulation study on heat and mass transfer characteristics in direct-contact total heat exchanger for flue gas heat recovery. *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2022, 200, 1-13 [žiūrėta 2023-04-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117657>
9. Z.Y, Xua, J.T, Gaoa, H.C, Maoc, D.S, Liuc ir R.Z. Wang. Double-section absorption heat pump for the deep recovery of low-grade waste heat. *Energy Conversion and Management* [interaktyvus]. 2020, 220, 1-13 [žiūrėta 2023-04-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113072>
10. AWAN, Muhammad Bilal, Tanveer IQBAL, Saima YASEEN, Saad NAWAZ ir Chaudhry Haider ALI. Techno-economic sustainability analysis of biomass fired industrial boiler: biomass evolution as heat and power generation source. *The Institution of Engineering and Technology* [interaktyvus]. 2019, 13(4), 650-658 [žiūrėta 2023-04-27]. Prieiga per: DOI:10.1049/iet-rpg.2018.5934
11. Ličio Bromido struktūra, savybės, panaudojimas, rizika [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-19] Prieiga per: <http://docplayer.net/53311383-Lesson-15-vapour-absorption-refrigeration-systems-based-on-water-lithium-bromide-pair.html>

12. Interreg central Europe, Waste heat and heat pumps for district heating, Annex to D.T2.2. Planning Guidelines for small district Heating, Version 1, 2021.04. [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-19] Prieiga per: <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/ENTRAIN.html>
13. Baltpool.eu, medienos skiedrų produktų techninė specifikacija, [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-19] Prieiga per: <https://www.baltpool.eu/biokuro-birza/birzoje-prekiaujami-produktai/>
14. Gimbutis G., Kajutis K., Krukonis V., Pranckūnas A., Švenčianas P. Šiluminė technika. Vilnius. „Mokslas“. 1993.
15. Molio masė [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-18] Prieiga per: https://lt.wikipedia.org/wiki/Molio_mas%C4%97
16. Хзмаян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. Москва. „Энергия“ 1976
17. Įmonės „Kirtimų katilinė“ monitoringo sistemos duomenys.
18. Vilniaus šilumos tinklai [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-19] Prieiga per: <https://chc.lt/data/public/uploads/2021/12/nsg-3-uab-kirtimu-katiline.pdf>
19. RSN 196-54 "Statybinė klimatologija" [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-19] Prieiga per: <https://www.scribd.com/document/54121662/ksn-156-94>
20. CoolTools v1.1.0 programinė įranga, [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-18] Prieiga per: <https://www.ipu.dk/products/cooltools/>
21. Daiking šaltensių skaičiavimo programinė įranga, [interaktyvus], [žiūrėta 2023-05-19] Prieiga per: <https://www.daikinchem.de/products-and-performance/refrigerants>
22. LENG, G., 2018. Keeping global warming within 1.5 °C reduces future risk of yield loss in the United States: A probabilistic modeling approach. *Science of the Total Environment*, 644, 52-59. [žiūrėta 2023-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718324203>
23. LUBIS, Arnas, Jongsoo JEONG, Niccolo GIANNETTI, Seiichi YAMAGUCHI, Kiyoshi SAITO, Hajime YABASE, Muhammad I. ALHAMID ir NASRUDDINB. Operation performance enhancement of single-double-effect absorption chiller. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2018, 219, 299-311 [žiūrėta 2023-05-09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.046>
24. HEARD, C.L, W. Rivera ir R. Best. Characteristics of an ammonia/lithium nitrate double effect heat pump-transformer. *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2016, 99, 518-527 [žiūrėta 2023-04-25]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.031>
25. BUCHMAYR, M, J. GRUBER, M. HARGASSNER, C. HOCHENAUER. Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler. *Biomass and Bioenergy* [interaktyvus]. 2015, 81, 356-363 [žiūrėta 2023-05-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.016>
26. LV, Tai, Linghao YU ir Jinmin SONG. A Research of Simplified Method in Boiler Efficiency Test. *Energy Procedia* [interaktyvus]. 2012, 17, 1007–1013 [žiūrėta 2023-05-02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.200>
27. SUNTIVARAKORN, Ratchaphon ir Wasakorn TREEDETB. Improvement of Boiler's Efficiency Using Heat Recovery and Automatic Combustion Control System. *Energy Procedia* [interaktyvus]. 2016, 100, 193–197 [žiūrėta 2023-05-17]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.164>

28. KOORNNEEF, Joris, Pieter VAN BREEVOORT, Carlo HAMELINCKA, Chris HENDRIKS, Monique HOOGWIJKC, Klaas KOOPD, Michèle KOPER, Tim DIXONB ir Ameena CAMPS. Global potential for biomass and carbon dioxide capture, transport and storage up to 2050. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [interaktyvus]. 2012, 11, 117-132 [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.07.027>
29. LIAO, Xiaohong ir Reinhard RADERMACHERB. Absorption chiller crystallization control strategies for integrated cooling heating and power systems. *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2007,30, 904-911 [žiūrėta 2023-05-03]. Prieiga per: DOI: [10.1016/j.ijrefrig.2006.10.009](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.10.009)
30. ZHAO, Tian, Xi CHEN ir Qun CHEN. Heat current method-based modeling and optimization of the single effect lithium bromide absorption chiller. *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2020, 175, 1-17 [žiūrėta 2023-05-04]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115345>
31. DIEGO, Russo, Macri GIORGIO, Luzzi GIUSEPPE ir De Rossi ALESSANDRO. Wood energy plants and biomass supply chain in Southern Italy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [interaktyvus]. 2016, 223, 849–856 [žiūrėta 2023-05-04]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.291>
32. VOURDA, Nikolaos, Hussam Jouhara, Savvas A. TASSOU ir Vassilis N. STATHOPOULOS. Desing criteria for coatings in next generation condensing economizers. *Energy Procedia* [interaktyvus]. 2019, 161, 412-420 [žiūrėta 2023-04-14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.095>
33. VONŽODAS, Tomas, Nerijus Pedišius ir Mantas Valantinavičius. Mažos galios biokuru kūrenamų vandens šildymo katilų veikimo parametrų tyrimas. *Energetika* [interaktyvus]. 2013, T.59, Nr.2, 93–103 [žiūrėta 2023-04-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.6001/energetika.v59i2.2665>