



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Miesto katilinės taršos analizė ir emisijų mažinimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Eimantas Jasevičius**

Projekto autorius

**Doc. Kęstutis Buinevičius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## **Miesto katilinės taršos analizė ir emisijų mažinimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (6211EX023)

---

**Eimantas Jasevičius**  
Projekto autorius

**Doc. Kęstutis Buinevičius**  
Vadovas

**Prof. Gintautas Miliauskas**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Eimantas Jasevičius

## **Miesto katilinės taršos analizė ir emisijų mažinimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Eimanto Jasevičiaus, baigiamasis projektas tema „Miesto katilinės taršos analizė ir emisijų mažinimas“ 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**

Studijų programa: 6211EX023 Termoinžinerija

## **MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS**

Studentui (-ei)

Eimantui Jasevičiui

---

*(Vardas, Pavardė)*

### **1. Baigiamojo Projekto tema –**

Miesto katilinės taršos analizė ir emisijų mažinimas

---

*(Lietuvių kalba)*

Analysis of Urban Boiler-House Pollution and Emission Reduction

---

*(Anglų kalba)*

### **2. Darbo tikslas ir uždaviniai –**

Tikslas – atlikti katilinės išmetamų teršalų analizę ir parinkti emisijų mažinimo priemones.

Uždaviniai – surinkti medžiagą apie katilus ir jų teršalų koncentracijas, suskaičiuoti metinius teršalų kiekius, palyginti emisijų koncentracijas su LAND 43-2013 ir vidutinių KDĮ normų ribinėmis vertėmis, nustatyti kuriems katilams reikės diegti taršą mažinančias priemones, parinkti taršą mažinančias priemones, įvertinti investicijų dydį, apskaičiuoti metinių teršalų kiekio sumažėjimą.

---

Studentas

Eimantas Jasevičius

2020-02-18

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

---

Baigiamojo  
projekto vadovas

Kęstutis Buinevičius

2020-02-18

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Jasevičius, Eimantas. Miesto katilinės taršos analizė ir emisijų mažinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Kęstutis Buinevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: aplinkosauga, teršalų emisijos, emisijų mažinimas.

Kaunas, 2020. 58 p.

## Santrauka

Griežtėjantis aplinkosauginiai reikalavimai turi įtakos visuose pramonės šakose. Energijos gamybos pramonė yra glaudžiai susijusi su aplinkosauga, energijos gamybos metu susidaro eilė kenksmingų teršalų, kurių didžioji dalis yra išmetami pro kaminą. Išmetamus teršalų kiekius ir katilų emisijas riboja Europos Sąjungos direktyvos, kurios galioja Europoje ir Lietuvoje. Siekiant neviršyti direktyvose nustatytų emisijų ribinių verčių, energijos gamintojai turi ieškoti būdų kaip sumažinti katilų taršos emisijas. Lietuvoje buvo priimtas įsakymas dėl išmetamų teršalų iš vidutinių kurą deginančių įrenginių normų, kuris sugriežtino galiojančias CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ir KD ribinės vertes. Esamiems vidutiniams kurą deginantiesiems įrenginiams, kurių vardinė šiluminė galia yra 1 MW ar didesnė ir 5 MW ar mažesnė, išskyrus variklius ir dujų turbinas, nuo 2030 m. sausio 1 d. taikomos naujos išmetamų teršalų ribinės vertės;

Baigiamojo darbo tiriamasis objektas yra miesto katilinė, kurioje esančių katilų galia yra nuo 1,76 iki 5 MW, todėl nuo 2030 m. jiems bus taikomos naujos išmetamų teršalų ribinės vertės. Katilinėje naudojamos kuro rūšys yra biokuras ir skalūnų alyva, daugiau nei 80 % energijos yra pagaminama deginat biokurą.

Atliekant baigiamąjį darbą buvo surinkta informacija apie katilus ir jų teršalų emisijas. Katilų emisijos palygintos su esamomis ir įsigaliojančiomis normų ribinėmis vertėmis, nustatyta, kuriems katilams bus reikalingi sprendimai dėl taršos mažinimo. Buvo atlikta taršos mažinimo priemonių apžvalga ir palyginti keli galimi variantai. Atlikta investicijų ir išlaidų analizė taršos mažinimo priemonėms. Apskaičiuojamas metinis išmetamas teršalų kiekis prieš mažinimo priemones ir po jų.

Padarytos išvados, kad skysto kuro katilams reikalingas sprendimas dėl SO<sub>2</sub> emisijų mažinimo. Pasirinktas mažinimo variantas yra kuro rūšies pakeitimas, skalūnų alyva pakeičiama į dyzelinį kurą. Deginant dyzelinį kurą SO<sub>2</sub> yra nenormuojama, vienintelis normuojamas teršalas yra NO<sub>x</sub>, kurio ribinė vertė 200 mg/Nm<sup>3</sup>. Siekiant neviršyti naujos NO<sub>x</sub> ribinės vertės, senus skysto kuro degiklius galima pakeisti į naujus mažų NO<sub>x</sub> degiklius.

Biokuro katilu atveju, reikalingas sprendimas dėl kietųjų dalelių išmetimų vasaros laikotarpiu, nedirbant DKE. Galimas sprendimas leisti DKE dirbti vasaros metu. Kitas sprendimas statyti elektrostatinį arba audeklinį filtrą.

Jasevičius, Eimantas. Analysis of Urban Boiler-House Pollution and Emission Reduction. Master's Final Degree Project / assoc. prof. Kęstutis Buinevičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: environmental protection, pollutant emissions, emission reductions.

Kaunas, 2020. 58 pages.

### Summary

More strict environmental requirements are affecting all industries. The energy production industry is closely linked to the environment, energy production generates a number of harmful pollutants, most of which are emitted through the stack. Boiler emissions are limited by European Union directives which apply in Europe and Lithuania. In order not to exceed the emission limit values set out in the directives, energy producers must look for ways to reduce emissions from boilers. In Lithuania, an order was adopted on emission standards for average combustion plants, which tightened the existing limit values for CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and particles. For existing medium combustion plants with a rated thermal capacity of 1 MW or more and 5 MW or less, excluding engines and gas turbines, from 2030 onwards. January 1 new emission limit values apply;

The research object is the city boiler house, where the thermal capacity of the boilers is from 1.76 to 5 MW, therefore from 2030 year they will be subjected to new emission limit values. The fuels used in the boiler house are biomass and shale oil, more than 80% of energy is produced by burning biomass.

Information on boilers and their pollutant emissions was collected. Boiler emissions have been compared with current and prospective limit values and it was established which boilers will require pollution reduction measures. An overview of measures was carried out and several possible options were considered and compared. An analysis of investments and costs for pollution reduction measures was performed. Annual pollutant emissions before and after establishing pollutant reduction measures was calculated.

It was concluded that shale oil boilers need a solution to reduce SO<sub>2</sub> emissions. The reduction option is to change the fuel type, shale oil is changed to diesel fuel. When burning diesel fuel, SO<sub>2</sub> is non-standardized, the only standardized pollutant is NO<sub>x</sub> with a limit value of 200 mg/Nm<sup>3</sup>. In order not to exceed the new NO<sub>x</sub> limit value, old shale oil burners can be replaced by new low NO<sub>x</sub> burners.

In the case of a biomass boiler, a solution is needed for particulate emissions which during the summer exceeds the new limit value without the smoke condensing economizer. A possible solution is to allow smoke condensing economizer to work during the summer. Another solution is to build an electrostatic precipitator or baghouse filter.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	9
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	11
<b>Įvadas</b> .....	12
<b>1. Teršalų emisijų mažinimo metodų apžvalga</b> .....	13
1.1. Kietųjų dalelių susidarymas ir mažinimo būdai.....	13
1.1.1. Ciklonas .....	14
1.1.2. Elektrostatinis filtras.....	15
1.1.3. Audeklinis filtras .....	17
1.1.4. Elektrostatinio ir audeklinio filtrų palyginimas .....	18
1.1.5. Šlapi skruberiai.....	19
1.1.6 Dūmų kondensacinis ekonomaizeris .....	20
1.2. Azoto oksidų (NO <sub>x</sub> ) susidarymas ir mažinimo būdai.....	22
1.2.1. Mažų NO <sub>x</sub> degikliai.....	24
1.3. Išmetamų teršalų esami ir įsigaliojantys normatyvai .....	25
1.3.1. LAND 43-2013.....	25
1.3.2. Išmetamų teršalų iš vidutinių kurą deginančių įrenginių normos .....	26
<b>2. Katilinės ekologinių rodiklių analizė</b> .....	27
2.1. Situacijos vertinimas .....	27
2.1.1. Deginamo kuro charakteristika .....	28
2.2. Teršalų kiekių skaičiavimas.....	29
2.2.1 Teršalų kiekių apskaičiavimas deginant skystą kurą.....	29
2.2.2. Teršalų kiekių apskaičiavimas deginant biokurą.....	30
2.3. Katilų išmetamų teršalų koncentracijos.....	31
2.4. Teršalų koncentracijų palyginimas su normatyvų ribinėmis vertėmis.....	34
2.5. Metiniai išmetamų teršalų kiekiai .....	36
<b>3. Teršalų emisijų mažinimo sprendimai</b> .....	37
3.1. Kietųjų dalelių emisijų mažinimo variantai biokuro katilams.....	37

3.1.1. Dūmų kondensacinio ekonomizerio variantas.....	38
3.1.2. Elektrostatinio filtro variantas.....	40
3.1.3. Audeklinio filtro variantas .....	44
3.2. Kietųjų dalelių mažinimo priemonių investicijų ir išlaidų palyginimas .....	46
3.3. Teršalų mažinimo sprendimas skysto kuro katilams.....	47
3.3.1. Mažų NO <sub>x</sub> degiklių variantas .....	47
3.4. Teršalų kiekio sumažėjimas įrengus emisijų mažinimo priemones .....	49
<b>Išvados</b> .....	<b>52</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>53</b>
<b>Priedai</b> .....	<b>56</b>
1 Priedas. Elektrostatinio filtro brėžinys .....	56
2 Priedas. Audeklinio filtro FRIR - 250 brėžinys.....	57



## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Elektrostatinio ir audeklinio filtrų palyginimas ir rekomendacijos.....	19
<b>2 lentelė.</b> Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normų LAND 43-2013 2 priedo ribinės vertės .....	26
<b>3 lentelė.</b> Vidutinių KDĮ normų 2 priedo ribinės vertės (mg/Nm <sup>3</sup> ).....	26
<b>4 lentelė.</b> Katilų charakteristika.....	27
<b>5 lentelė.</b> Skalūnų alyvos parametrai.....	28
<b>6 lentelė.</b> Biokuro parametrai.....	28
<b>7 lentelė.</b> Dyzelino parametrai .....	29
<b>8 lentelė.</b> SIMPLEX SM 175 teršalų koncentracijos.....	31
<b>9 lentelė.</b> CLANSMAN skysto kuro katilo teršalų koncentracijos .....	32
<b>10 lentelė.</b> CLANSMAN katilo teršalų koncentracijos, išmatuotos laboratorijos .....	32
<b>11 lentelė.</b> THERMAX skysto kuro katilo teršalų koncentracijos (dūmų analizatorius).....	32
<b>12 lentelė.</b> THERMAX katilo teršalų koncentracijos (inventorizacija) .....	32
<b>13 lentelė.</b> COMPACT-500 DH biokuro katilo teršalų koncentracijos.....	33
<b>14 lentelė.</b> KALVIS K-1250M-2 biokuro katilo teršalų koncentracijos .....	33
<b>15 lentelė.</b> Išmatuotų teršalų koncentracijos palyginimas su LAND 43-2013 ir vidutinių KDĮ ribinėmis vertėmis.....	34
<b>16 lentelė.</b> Į aplinkos orą išmestų teršalų kiekis deginant biokurą.....	36
<b>17 lentelė.</b> Į aplinkos orą išmestų teršalų kiekis deginat skalūnų alyvą .....	36
<b>18 lentelė.</b> DKE ir Biokuro išlaidų ir pajamų analizė .....	39
<b>19 lentelė.</b> Biokuro katilų išmatuotas tūrio debitas .....	40
<b>20 lentelė.</b> Elektrostatinio filtro investicijos .....	41
<b>21 lentelė.</b> Elektrostatinio filtro elektros sąnaudos ir išlaidos .....	42
<b>22 lentelė.</b> Gamintojo apibrėžtos elektrostatinio filtro energijos sąnaudos .....	42
<b>23 lentelė.</b> Filtro išlaidos elektros energijai .....	42
<b>24 lentelė.</b> Elektrostatinio filtro investicijos, eurai .....	43
<b>25 lentelė.</b> Audeklinių filtrų dūmų su filtravimo medžiaga santykis .....	44
<b>26 lentelė.</b> Audeklinio filtro FRIR – 250 parametrai .....	45

<b>27 lentelė.</b> Audeklinio filtro investicijos .....	45
<b>28 lentelė.</b> Audeklinio filtro elektros sąnaudos.....	46
<b>29 lentelė.</b> Filtruojančių maišų keitimo išlaidos .....	46
<b>30 lentelė.</b> KD mažinimo būdų investicijų ir išlaidų palyginimas .....	46
<b>31 lentelė.</b> Taršalų emisijos deginant dyzeliną pagal EN 267 standartą .....	47
<b>32 lentelė.</b> Investicijos mažų NO <sub>x</sub> degiklių įdiegimui.....	49
<b>33 lentelė.</b> Teršalų kiekis deginant skystą kurą po mažinimo priemonių įrengimo.....	49
<b>34 lentelė.</b> Teršalų kiekis deginant biokurą po mažinimo priemonių pritaikymo.....	50

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Dūmų valymo priemonių klasifikacija.....	13
<b>2 pav.</b> Ciklonas.....	14
<b>3 pav.</b> Ciklonų tipai .....	15
<b>4 pav.</b> Supaprastinta dalelių surinkimo įelektrinant elektriniu lauku schema .....	15
<b>5 pav.</b> Vamzdinių ir plokštelių elektrostatių filtrų schemas .....	16
<b>6 pav.</b> Rankovinio ir kišeninio filtrų schemas .....	17
<b>7 pav.</b> Šlapių skruberių tipai .....	20
<b>8 pav.</b> Dūmų kondensacinis ekonomaizeris (DKE) .....	21
<b>9 pav.</b> Dūmų kondensacinio ekonomaizerio principinė schema.....	21
<b>10 pav.</b> Pirminės azoto oksidų mažinimo priemonės.....	24
<b>11 pav.</b> Mažų NO <sub>x</sub> degiklis su oro laipsniavimu.....	25
<b>12 pav.</b> Skysto kuro katilai CLANSMAN ir VK-21 .....	27
<b>13 pav.</b> Dūmtakis sujungtas su kaminu .....	43
<b>14 pav.</b> TBL 160 P degiklis .....	48
<b>15 pav.</b> LNTA 1.3 tipo degiklis .....	48
<b>16 pav.</b> GI 350 DSPG tipo degiklis.....	48
<b>17 pav.</b> Išmetamų teršalų kiekio palyginimas įdiegus taršą mažinančias priemones skystam kurui (2018 m. duomenys) .....	50
<b>18 pav.</b> Išmetamų teršalų kiekio palyginimas įdiegus taršą mažinančias priemones biokurui (2018 m. duomenys) .....	51

## Įvadas

Kylantis susirūpinimas aplinkosauginiais aspektais paveikė daugelį pramonės šakų, energetikai esant vienai iš jų. Energijos gamybos metu susidaro eilė atliekinių medžiagų, šios gali būti perdirtos, saugomos ar kitaip utilizuojamos, tačiau sunkiausiai sukontroliuojami teršalai susidaro kuro degimo metu. Šio proceso metu neišvengiamai yra gaunami degimo produktai, kurie išmetami į aplinkos orą. Didelės šių produktų koncentracijos kelia grėsmę žmonių sveikatai, bei daro įtaka gamtai ir klimatui. Energetikoje jau kurį laiką yra stengiami, kiek įmanoma labiau sumažinti išmetamų teršalų kiekį, tam tikslui yra sudaromi normatyvai ribojantys galimus išmetimus. Pagrindė yra ribojami anglies monoksido (CO), azoto oksidų (NO<sub>x</sub>), sieros dioksido (SO<sub>2</sub>) ir kietųjų dalelių (KD) išmetimai. Lietuvoje buvo priimtas įsakymas dėl išmetamų teršalų iš vidutinių kurą deginančių įrenginių normų, kuriose išmetamų teršalų ribinės vertės dar labiau sugriežtintos. Norint pasiekti naujas ribines vertes, daugelis Lietuvoje veikiančių energijos gamintojų turės ieškoti sprendimų, kaip sumažinti turimų katilų emisijas. Paprastai emisijų mažinimas yra brangus procesas, reikalaujantis nemažų pradinių investicijų ir atitinkamai didelių operacinių sąnaudų. Tuo tikslu svarbi yra galimybių analizė, ieškant optimaliausio metodo galinčio sumažinti išmetimus.

Baigiamajame darbe bus atlieka miesto katilinės, kurioje deginamos kuro rūšys yra biokuras ir skalūnų alyva, taršos analizė. Bus nustatomos katilų CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ir KD emisijų koncentracijos. Šios koncentracijos lyginamos su dabartinėmis ir įsigaliojančiomis normatyvų ribinėmis vertėmis, nustatoma, kurie teršalai viršija normų ribines vertes. Toliau parenkami taršalų mažinimo būdai ir atliekama jų investicijų ir kitų išlaidų analizė. Suskaičiuojami metiniai išmetamų teršalų kiekiai prieš mažinimo priemones ir po jų.

**Darbo tikslas** – atlikti miesto katilinės išmetamų teršalų analizę ir parinkti emisijų mažinimo priemones.

**Darbo uždaviniai** – surinkti medžiagą apie katilus ir jų teršalų koncentracijas, suskaičiuoti metinius teršalų kiekius, palyginti emisijų koncentracijas su LAND 43-2013 ir vidutinių KDI normų ribinėmis vertėmis, nustatyti kuriems katilams reikės diegti taršą mažinančias priemones, parinkti taršą mažinančias priemones, įvertinti investicijų dydį, apskaičiuoti metinių teršalų kiekio sumažėjimą.

**Tyrimo objektas** – miesto kalinė, kurioje ruošiamas termofikacinis vanduo pastatų šildymui ir karšto vandens ruošimui. Katilinėje yra du biokuro katilai, kuriais pagaminama apie 80 – 90 % visos energijos ir skysto kuro katilai, kurie naudojami įvykus biokuro katilo gedimui arba vykdant jo aptarnavimą.

**Tyrimo aktualumas** – nuo 2030 m. katilams nuo 1 iki 5 MW įsigalioja vidutinių KDI normos, kurios stipriai sugriežtiną leidžiamas išmetamų teršalų ribines vertes. Sugriežtintos vertės skatins daugelį energijos gamintojų ieškoti būdų, kaip sumažinti savo turimų katilų teršalų emisijas.

# 1. Teršalų emisijų mažinimo metodų apžvalga

## 1.1. Kietųjų dalelių susidarymas ir mažinimo būdai

Kietosios dalelės susidaro deginant kūrą, kai stambūs angliavandeniai skyla į smulkesnes frakcijas, kurios kartu su kitais degimo produktais išnešamos iš pakuros. Kietosios dalelės skiriasi savo didžiu, jų skersmuo svyruoja nuo 0,1 iki 50 μm ir daugiau. Kuro degimo metu susidarančių kietųjų dalelių kilmės priežastys yra dvi [1]:

- nevisiškai sudegusi kuro dalis, susidariusi iš organinės kuro dalies – nesudegę angliavandeniai, kokso dalelės, anglies dariniai – suodžiai;
- neorganinės kuro dalies pelenai.

Nesudegę angliavandeniai susidaro nespėjus sudegti kuro dalelėms būnant liepsnoje, tai yra greito liepsnos atšaldymo pasekmė. Kuro dalelei išlėkus iš liepsnos ribų, staigiai mažėja dalelės temperatūra ir degimo reakcijos sulėtėja arba net visai sustoja. Didžiausia nesudegusių angliavandenių dalis susidaro esant oro trūkumui tam tikroje liepsnos zonoje, taip pat esant pernelyg dideliame kuro lašeliui dėl blogo kuro išpurškimo [1].

Dūmams valyti bei kietąsias daleles sugauti naudojamus technologinius įrenginius galima suskirstyti pagal skirtingą veikimo principą ir valymo būdą – gravitaciją, inerciją, panaudojant elektros srovę ir naudojančius filtruojantį – audeklinį pluoštą arba kai kuriais atvejais garso bangas [2].



1 pav. Dūmų valymo priemonių klasifikacija [2]

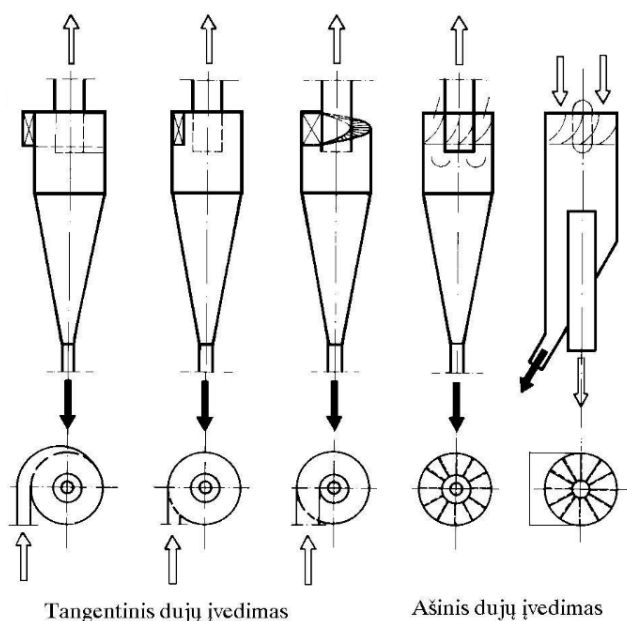
### 1.1.1. Ciklonas

Vienas dūmų valymo pavyzdys, kur galima pritaikyti gravitacines ir inercines jėgas yra ciklonas. Pramonėje ciklonas yra plačiai naudojamas kaip pirminis dūmų nuo kietųjų dalelių valymo įrenginys, todėl dažnai eina kaip komplektas su katilu. Ciklonai pasižymi nesudėtinga konstrukcija, kurioje nėra judančių dalių, todėl jų eksploatacijos ir įrengimo kaina yra maža. Keletas ciklonų gali būti sujungti ir sudaryti multicikloną, kurie ypač dažnai yra naudojami biokuro katilinėse sugaudyti stambias kietąsias daleles. Kaip buvo minėta, ciklono veikimo principas naudoja inercinę jėgą, šiuo atveju išcentrinę jėgą. Ciklono viduje dūmai sudaro besisukantį dūmų verpetą, taip sukuriant išcentrinę jėgą, kuri veikia kietąsias daleles, jas spaudžiant prie ciklono sienelių, o dėl gravitacinės jėgos dalelės atsидuria ciklono dugne, kur gali būti pašalinamos pelenų sraigtu arba kaupiamos pelenų bunkeryje. Ciklono išvalymo efektyvumas labai priklauso nuo kietųjų dalelių dydžio, didelis efektyvumas gali būti pasiektas kai valomame dūmų sraute dalelės yra didesnės nei 10  $\mu\text{m}$ , tuomet išvalymo efektyvumas gali siekti 80–95 % [1, 3, 4].



2 pav. Ciklonas [5]

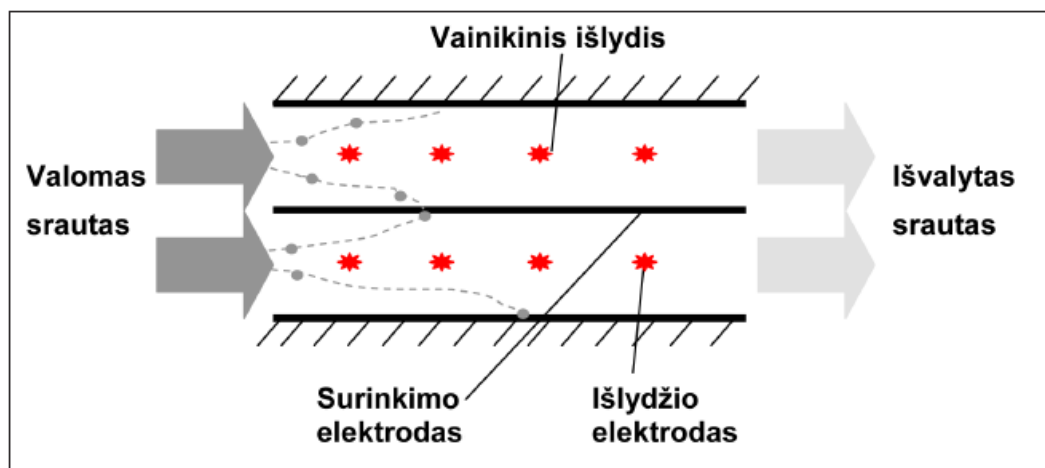
Ciklonai būna įvairių konstrukcijų, bet dažniausiai yra skirstomi į ašinius ir tangentinius. Kuriai grupei ciklonas priskiriamas, priklauso nuo dūmų patekimo į cikloną būdą. Ašiniai ciklonai savo sandara yra paprastesni ir labiau taikomi, kada yra dideli dūmų debitai, tačiau jų išvalymo efektyvumas yra žemesnis už tangentinių ciklonų [3].



3 pav. Ciklonų tipai [3]

### 1.1.2. Elektrostatinis filtras

Vienas iš pavyzdžių, kaip gali būti panaudota elektros srovė kietųjų dalelių valymui yra elektrostatinis filtras. Šie filtrai pasižymi itin dideliu valymo efektyvumu (iki 99 %) ir sugeba sugaudyti labai mažo skersmens daleles ( $\leq 1 \mu\text{m}$ ). Filto konstrukciją paprastai sudaro jonizuojantis elektrodai ir surinkimo elektrodai, kurie yra nuosekliai arba lygiagrečiai sujungtose sekcijose, per kurias teka valomas dūmų srautas. Sekcijų valymo efektyvumas priklauso nuo srauto greičio, temperatūros, kietųjų dalelių savitosios elektrinės varžos, elektrinio lauko stiprumo, kuris priklauso nuo įtampos sekcijoje ir išlydžio bei surinkimo elektrodų geometrijos. Galimi du įtampos poliarumo atvejai: išlydžio elektrodai teigiami, surinkimo elektrodai neigiami arba išlydžio elektrodai neigiami, surinkimo elektrodai teigiami [6, 7].



4 pav. Supaprastinta dalelių surinkimo įelektrinant elektriniu lauku schema [6]

Esant pakankamai aukštam elektrinio lauko stiprumui tarp elektrodų, prie išlydžio elektrodo prasideda smūginė dujų jonizacija ir vyksta vainikinis išlydis. Jo metu laisvieji elektronai tolsta nuo išlydžio elektrodo prarasdami greitį ir dalis jų prisijungia prie neutralių dujų molekulių – susidaro neigiami dujų jonai. Neigiami dujų jonai juda link teigiamo elektrodo ir susiduria su teršalų

dalelėmis, kur absorbuojasi jų paviršiuje, taip suteikdami dalelėms neigiamą elektros krūvį. Neigiamą elektros krūvį įgavusios kietosios dalelės nusėda ant teigiamo surinkimo elektrodo ir išsielektrina [6, 7].

Galimas ir kitas atvejis, kada išlydžio elektrodas yra teigiamas, surinkimo elektrodas – neigiamas. Tokiu atveju prie išlydžio elektrodo iš neutralių dujų molekulių yra išplėšiami elektronai ir sukuriama teigiami dujų jonai, kuriuos pagreitina elektrinis laukas. Pagreitėję teigiami dujų jonai susiduria su teršalų dalelėmis, absorbuojasi jų paviršiuje ir suteikia teigiamą krūvį. Šios dalelės toliau keliauja link neigiamo surinkimo elektrodo ir su juo susidūrus gauna trūkstamus elektronus, taip išsielektrindamos [6, 7].

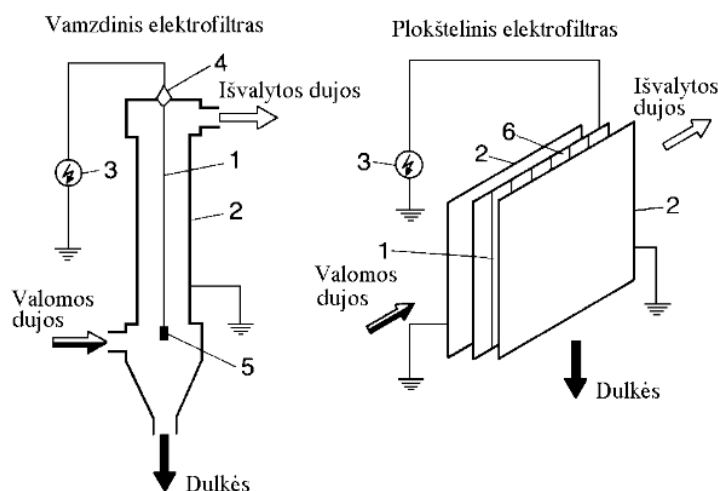
Kitas mechanizmas, suteikiantis taršos dalelėms įkrovą yra difuzinis, kai dujų jonai nusėda ant teršalų dalelių paviršiaus dėl jonų šiluminio judėjimo. Difuzinis įelektrinimo būdas vyksta kartu su smūginiu, tačiau smūginis įelektrinimas pasireiškia labiau, kai dalelės yra didesnės nei 1  $\mu\text{m}$ , difuzinis – jei mažesnės nei 0,2  $\mu\text{m}$ . 0,2 – 1  $\mu\text{m}$  dydžio dalelėms efektyvūs abu mechanizmai [6, 7].

Nusėdusios taršos dalelės ant surinkimo elektrodo turi būti pašalintos, nes priešingu atveju didėja elektrodo varža ir tai gali turėti įtakos nusodinimo procesui. Kadangi surinkimo elektrodų valymas yra būtinas, elektrostatiniai filtrai turi nuvalymo ir teršalų surinkimo sistemas. Pagal valymo būdą elektrostatiniai filtrai skirstomi į šlapio arba sauso tipo. Sauso tipo filtruose elektrodai valomi mechaniškai – purtant, daužant, vibruojant. Šlapio tipo filtruose elektrodų valymui naudojamas vanduo [6, 3].

Sauso tipo elektrostatiniai filtrai naudojami katilinėse, kur deginamas įvairių rūšių kuras, naftos perdirkimo pramonėje. Šlapio tipo elektrostatiniai filtrai naudojami esant agresyviai aplinkai, susiduriant su rūgščiais dūmais.

Pagal formą elektrostatiniai filtrai yra skirstomi į plokštelines ir vamzdinius, iš kurių labiau naudojami plokšteliniai. Plokšteliuose surinkimo elektrodai yra lygiagrečios plokštelės, išdėstytos viena nuo kitos 20–60 cm atstumu. Įkrovimo elektrodai yra ištempti tarp šių plokštelių (5 pav.) [3].

Vamzdiniai elektrostatiniai filtrai įrengti, kaip kryžiaus ar korių pavidalo metalinių vamzdelių blokas. Kiekvienas vamzdelis atlieka surinkimo elektrodo funkciją, o vamzdelio centre yra vielinis įkrovimo elektrodas. Vamzdelių ilgis būna iki 6 m, o skersmuo nuo 10 iki 30 cm. (5 pav.) [3].



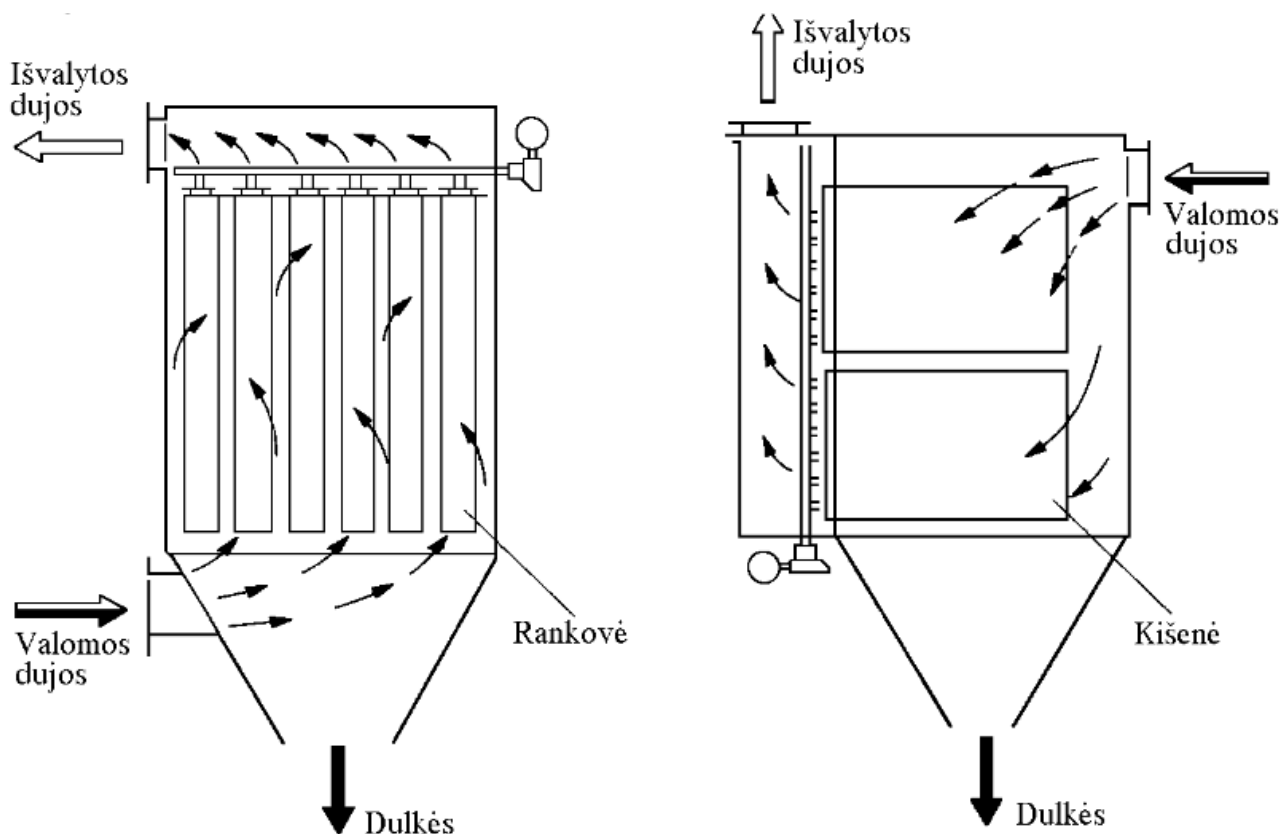
5 pav. Vamzdynių ir plokštelių elektrostatinų filtrų schemas [3]



### 1.1.3. Audeklinis filtras

Audekliniai oro filtrai naudojami mažiausios dalelės atskirti iš valomų dujų. Audekliniais oro filtrais gali būti bet kokia porėta medžiaga, kuri gali sulaikyti įvairaus dydžio daleles, oro srauto judėjimo metu. Tokie filtrai naudojami ten, kur yra keliami aukšti oro kokybės standartai – pastatų ventiliacijai ar itin švaraus oro reikalaujančiuose technologiniuose procesuose. Šių filtrų valymo efektyvumas gali siekti daugiau kaip 99 proc. Jų trūkumai – reikalinga reguliari priežiūra, eksploatacijos metu greitai užsikemša ir dėl to filtravimo sistemose kyla hidraulinis pasipriešinimas (slėgio nuostoliai) [1, 8, 9].

Audekliniai filtrai yra pagrindinė alternatyva elektrostatiniam filtrui. Audekliniai filtrai paprastai būna rankoviniai ir kišeniniai (6 pav.). Populiarsnė yra rankovinių filtrų forma, kurią sudaro metalinis rėmas ir ant jo išvilkta 12–20 cm skersmens ir iki 5 m ilgio cilindrinė rankovė. Šių rankovių gali būti šimtai, priklausomai nuo reikalingo filtravimo medžiagos paviršiaus ploto. Rankovės yra pakabinamos tam skirtame korpusė, kuris turi užterštų dujų įėjimo angą ir išvalytų dujų išėjimo angą, rankovės dar gali turėti atskirus įdėklus priklausomai nuo filtro konstrukcijos. Veikimo principas paprastas – nešvarus dujų srautas patenka pro įėjimo angą, kur toliau skverbiasi pro išorinę rankovės pusę į jos vidų, kietosios dalelės lieka rankovės išorėje, o išvalytos dujos toliau keliauja dūmtakiu link kamino ir gražinamos į aplinką. Galimas ir kitas variantas – priešingos krypties valomų dujų eiga, kur dujos skverbiasi iš rankovės vidinės pusės į išorinę [3, 10, 11].



6 pav. Rankovinio ir kišeninio filtrų schemas [3]

Pradėjus eksploatuoti naujai pastatytą audeklinį filtrą, jo valymo efektyvumas iš pradžių dides, nes ant filtruojančio audinio paviršiaus nusės sulaikomų kietųjų dalelių sluoksnis, kuris sustiprins mažesnių dalelių sulaikymą. Susiformavęs dalelių sluoksnis taip pat padidins hidraulinį pasipriešinimą, todėl pasipriešinimui pasiekus tam tikrą ribą, reikalingas periodinis šio sluoksnio

pašalinimas. Pašalinimo metu dalelių sluoksnis gali būti mechaniškai nupurtomas nuo filtrų, kitas variantas – naudoti priešpriešinį oro srautą, oro impulsus arba vibracijos metodą. Visais valymo atvejais nuvalytas sluoksnis surenkamas apačioje esančiame bunkeryje. Valymas turi būti sukontroliuotas, nes per dažnai nupurtant susikaupusių dalelių sluoksnį, nebus pasiektas didžiausias efektyvumas ir trumpinamas filtruojančios medžiagos gyvavimo laikas [3, 12, 13].

Eksplotacija audeklinių filtrų atveju vyksta panašioje temperatūroje (120–250 °C), tačiau filtrai taip pat gali būti gaminami iš mineralinio pluošto (300 °C), plieninio pluošto (450–600 °C) ir keraminės medžiagos (iki 1000 °C), tokie filtrai turi didesnę terminę atsparumą ir leistina valomų dujų temperatūra yra aukštesnė. Jų pranašumas, lyginant su elektrostatiniais filtrais, yra dalelių elektrinės varžos nepaisymas, todėl tokie filtrai yra konkurencingi, kada dalelės turi didelę elektrinę varžą. Kaip buvo minėta, jų trūkumas, lyginant su elektrostatiniais filtrais, yra didesnis hidraulinis pasipriešinimas, kuris lemia didesnius slėgio nuostolius [3, 12, 13].

#### **1.1.4. Elektrostatinio ir audeklinio filtrų palyginimas**

Dūmų valymo metodo pasirinkimas priklauso nuo daugelio sąlygų. Lyginant audeklineis filtrus su elektrostatiniais, pastarasis gali būti naudojamas prie aukštesnių temperatūrų ir be papildomų išlaidų aukštai temperatūrai atspariems pluoštams. Elektrostatinis filtras yra geresnis pasirinkimas už audeklinį filtrą, kada dalelės yra daug drėgmės turinčiame dūmų sraute, tai turi įtakos dalelių elektrinei varžai. [8, 10]

Elektrostatinio filtro darbui nėra reikalinga filtruojanti medžiaga ir nėra barjero, per kurį reikia prastumti dūmus, todėl dūmtraukių darbas yra lengvesnis ir reikalauja mažesnių energijos sąnaudų, o pagrindinis rezultatas – mažesni slėgio nuostoliai nei audekliniame filtre. [10]

Lyginant filtrų eksploatacijos trukmę, elektrostatinis filtras yra geresnis pasirinkimas, nes jo tarnavimo laikas yra 15 – 20 metų. Audeklinis filtras reikalauja filtravimo medžiagos pakeitimo bent kas 5 metus ir korpuso pakeitimo kas 15 metų. [10]

Audekliniai filtrai yra naudingi, kada reikia sugaudyti labai didelę arba labai mažą varžą pasižyminčias kietąsias daleles, kurios yra sunkiai sugaunamos elektrostatiu filtru. Užtat, audekliniai filtrai yra geras pasirinkimas, kada deginamos mažai sieros turinčios anglis arba sugaunamos kietosios daleles, kuriose yra didelis nesudegusios anglies (C) kiekis. [10]

Su audekliniu filtru yra lengviau pašalinami SO<sub>x</sub>, HCl, HF it kt. medžiagos nei su elektrostatiu filtru. Paleidus elektrostatinį filtrą šis dažniausiai nesugauja susidariusių alyvos suodžių iš skysto kuro paleidimo degiklių, kurie reikalingi uždegant anglį, todėl susidaro trumpalaikis padidėjęs teršalų kiekis dūmuose. Šio reiškinio galima išvengti su audekliniu filtru, kadangi filtras užtikrina pastovų ir nuolatinį kietųjų dalelių surinkimą nepaisant anglies rūšies ar kokybės. [10, 14]

Renkantis kurį (elektrostatinį ar audeklinį) filtravimo būdą pasirinkti, galima naudotis rekomendacijomis pateiktomis 1 lentelėje.

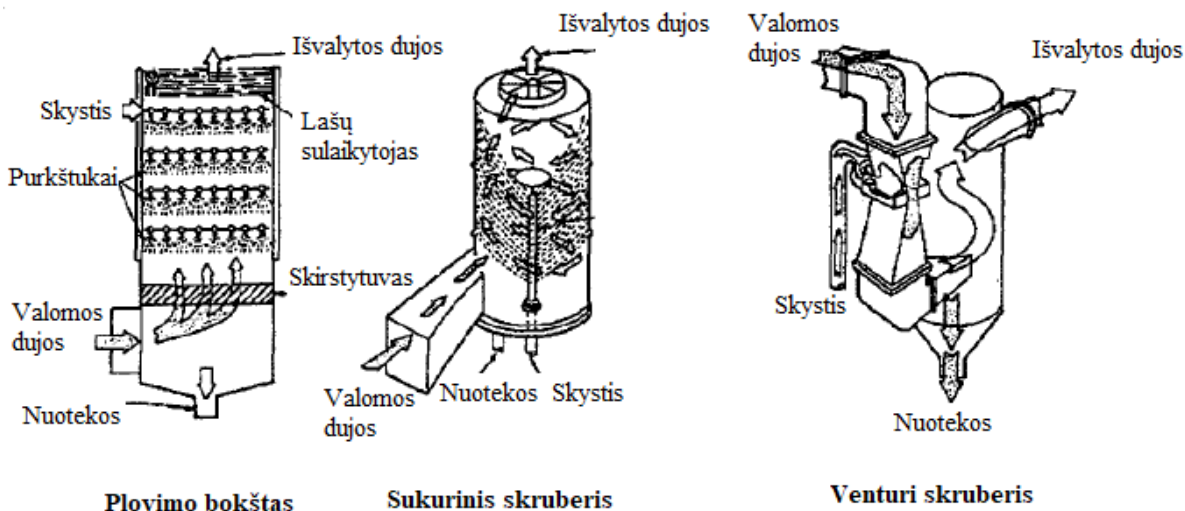
**1 lentelė.** Elektrostatinio ir audeklinio filtrų palyginimas ir rekomendacijos [8]

–	Audeklinis filtras	Elektrostatinis filtras
Didžiausia dūmų temperatūra	200 – 250 °C (didesnė su keramikos ar metalo pluoštu)	400 – 500 °C
Vandens kiekio įtaka	Turi būti vengiama vandens kondensacijos	Efektyvumas priklauso nuo vandens kiekio
Slėgio nuostoliai, Pa	1000 - 1500	50 – 130
Kietųjų dalelių > 10 mg/Nm <sup>3</sup>	X	X
Kietųjų dalelių < 10 mg/Nm <sup>3</sup>	X	
Sunkieji metalai	X	
Dioksinas/Furanas	X	
Gyvsidabris	X	
Rūgštinės dujos	X	
Kiti komentarai	Optimalus variantas, kai reikalingas labai aukštas dūmų išvalymo efektyvumas. Gali būti naudojamas tūriniam dujų debitui esant nuo 0,05 m <sup>3</sup> /s iki 500 m <sup>3</sup> /s	Nepatariama naudoti, kai dujų debitas yra mažesnis nei 5–10 m <sup>3</sup> /s dėl didelių investicijų poreikio, kietųjų dalelių varža turi būti tam tikrose ribose, dalelių savybės yra svarbios norint pasiekti efektyvų valymą

### 1.1.5. Šlapi skruberiai

Kietųjų dalelių pašalinimui iš dujų srauto dažnai yra naudojami šlapi skruberiai, kuriuose pagrindinis valymo agentas yra vanduo. Šio tipo įrenginiai yra tarpinis variantas tarp ciklonų (multiciklonų) ir aukšto valymo efektyvumo įrenginių (elektrostatinis filtras ir audeklinis filtras). Žvelgiant iš išlaidų pusės, šlapieji skruberiai reikalauja mažesnių investicijų nei elektrostatiniai ar audekliniai filtrai, tačiau reikia atsižvelgti į eksploatacijos išlaidas. Dirbant šlapiam skruberiui susidaro didelis nuotekų kiekis, bei didelis slėgio kritimas, kas reikalauja papildomų išlaidų. Dar reikia atsižvelgti į korozijos pavojų agresyviose terpėse bei dideles cheminių medžiagų (rūgšties ir šarmo) sąnaudas. [3, 15]

Šlapi skruberiai dėl savo veikimo principo paprastumo naudojami jau ilgą laiką. Skruberiuose svarbiausia yra geras vandens ir kietųjų dalelių kontaktas, kuriam įvykus dalelės toliau koaguliuoja tarpusavyje, todėl jas galima pašalinti inerciniais metodais. Yra keletas skirtingų konstrukcijų skruberių: skruberiai su įrengtais purkštukais, šlapieji dinaminiai skruberiai, cikloninio veikimo skruberiai su purkštukais, susidūrimo veikimo principo skruberiai, venturi tipo skruberiai bei elektrostatiniai skruberiai. Visuose šiuose įrenginiuose kietosios dalelės, esančios dūmų sraute kontaktuoja su vandeniu ar jo lašeliais, taip prilipdamos prie vandens paviršiaus, toliau išvalytas dūmų srautas toliau juda link dūmtakio ar kamino. Užterštas vanduo yra pašalinamas ir išvalomas, toliau vėl gražinamas į skruberio valymo ciklą [3, 16]. Keli šlapių skruberių tipai pavaizduoti 7 pav.



7 pav. Šlapių skruberių tipai [12]

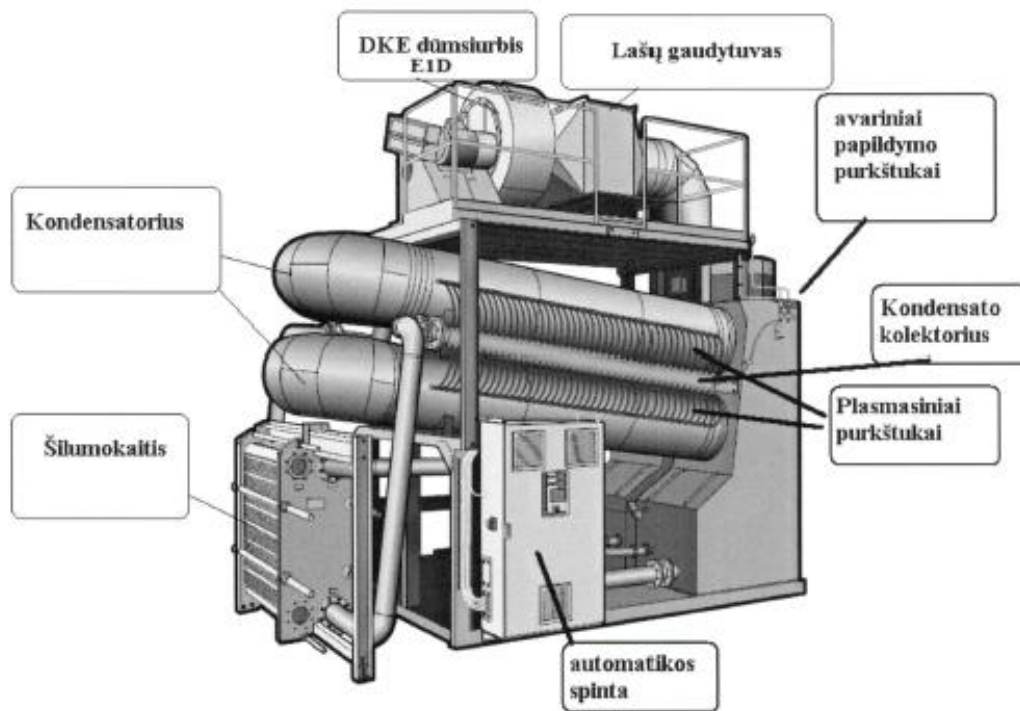
Žinant, kad geram kietųjų dalelių sugaudimui reikalingas geras kontaktas su vandeniu ar jo lašeliais, svarbu paminėti kas turi įtakos kontaktui:

- kietųjų dalelių skersmuo ir tankis;
- skysčio lašų skersmuo ir kiekis;
- kietųjų dalelių ir lašelių susidūrimo santykinis greitis.

### 1.1.6 Dūmų kondensacinis ekonomaizeris

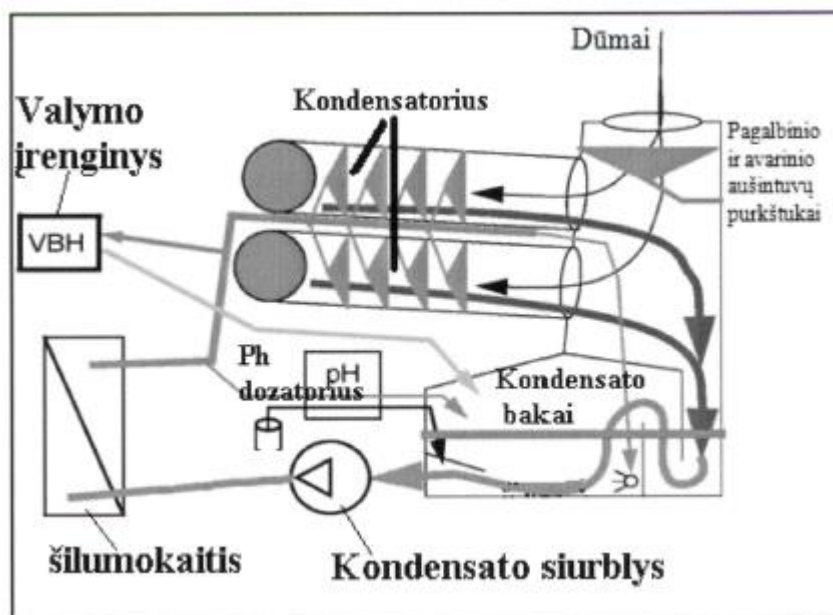
Prie šlapiųjų skruberių yra priskiriami ir kondensaciniai ekonomaizeriai. Nors šių įrenginių priminė funkcija yra energijos regeneracija iš dūmų, jie taip pat atlieką dūmų valymo funkciją.

Dūmų kondensacinis ekonomaizeris (toliau – DKE) – įrenginys, regeneruojantis energiją, kondensuodamas išeinančiuose iš katilo dūmuose garus, susidariusius degant biokurui. DKE leidžia efektyviai panaudoti gaunamą šilumą, išvalyti iš katilo išeinančius dūmus, pašalinant lakiuosius pelenus ir kietąsias daleles, kurios išsiskiria degant biokurui. DKE skirstomas į karštąją pusę ir šaltąją pusę. Karštoji pusė – tai dūmų įėjimo į DKE iš katilo pusė, šaltoji pusė – dūmų išėjimo iš DKE į kaminą pusė. DKE darbo principas paremtas šilumos išsiskyrimu kondensuojantis drėgmei iš dūmų, t.y. išeinančių dūmų temperatūrai sumažėjus žemiau rasos taško ir panaudojant slaptąją garavimo šilumą. Tam specialiai suprojektuoti purkštukai į dūmus išpurškia mažus vandens lašelius.[17]



8 pav. Dūmų kondensacinis ekonomizeris (DKE) [17]

Dūmų valymo principas yra toks pat kaip ir kitų skruberių – valomų dūmų kontaktas su vandeniu arba šiuo atveju – vandens lašeliais. Dūmai patekę į DKE prateka lygiagrečiai du nuolaidžius DKE dūmų kanalus ir išteka į antros eigos dūmų kanalus, vienoje ir kitoje pusėje kontaktuoja su įpurškiamais vandens lašeliais ir kondensuojasi. Kietosios dalelės yra išvalomos iš dūmų ir su kondensatu nukreipiamos į kondensato valymo sistemos įrenginius. Pateiktoje schemoje (9 pav.) atvaizduotas dūmų įvadas, toliau kondensato siurblys, pH palaikymo įranga, kondensato surinkimo talpa, šilumokaitis, pirminiai vamzdžiai ir kondensato srautas. [17]



9 pav. Dūmų kondensacinio ekonomizerio principinė schema [17]

## 1.2. Azoto oksidų (NO<sub>x</sub>) susidarymas ir mažinimo būdai

Kuro degimo metu be kietųjų dalelių formuojasi ir dujiniai teršalai. Vienas iš pagrindinių dujinių teršalų yra azoto oksidai (NO<sub>x</sub>), kurie susidaro oksiduojantis kure, esančiam azotui ir degimo ore, esančiam molekuliniam azotui. Azoto oksidai yra bendras pavadinimas apimantis azoto monoksidą NO ir azoto dioksidą NO<sub>2</sub>. Vykstant degimo procesui daugiausiai išsiskiria azoto monoksido (NO) dujų (iki 95-98 %), o į NO<sub>2</sub> virsta gana nedidelė dalis (iki 2-5 %). Teršalus išmetus į aplinką dėl saulės ultravioletinių spindulių ir atmosferoje esančio ozono (O<sub>3</sub>), patekęs NO į atmosfera, reakcijų metu visiškai virsta NO<sub>2</sub> junginiu.[18, 19, 20]

Plačiai yra priimta, kad azoto oksidai susidaro trimis būdais:

- terminiai azoto oksidai – susidaro degimo metu, oksiduojantis ore esančiam azotui, priklauso nuo liepsnos fakelo zonos temperatūros;
- greitieji azoto oksidai – susidaro reaguojant nevisiško degimo angliavandenilių radikalams su azoto atomu;
- kuro azoto oksidai – priklauso nuo elementinio azoto kiekio kuro sudėtyje bei oro pertekliaus koeficiento.

Iš šių trijų būdų dominuojantys yra kuro azoto oksidai, kurie sudaro daugiau nei 80 % visų degimo metu susidariusių NO<sub>x</sub>. Greitieji azoto oksidai yra tiesiogiai proporcingi N<sub>2</sub> koncentracijai ir angliavandenilinių radikalų kiekiui liepsnos fakelo zonoje. Greitieji azoto oksidai skiriasi nuo terminių tuo, kad nėra tokie priklausomi nuo temperatūros ir susidaro, esant mažesnėms jos vertėms. Terminių azoto oksidų reakcijos vyksta labai trumpą laiką ir yra priklausomos nuo temperatūros. [19, 20]

Azoto oksidams, kaip ir kitiems teršalams, pagal poreikį yra taikomos taršą mažinančios priemonės. Šios priemonės yra skirstomos į dvi pagrindines kategorijas [18]:

1. pirminės mažinimo priemonės – integruojamos priemonės į degimo šaltinį, kurių pagalba emisijos yra mažinamos pačiame kuro deginimo šaltinyje ar degimo procese, įskaitant ir kuro padavimo priemones bei degimo modifikacijas;
2. antrinės mažinimo priemonės – išorinės priemonės naudojamos jau susiformavusių NO<sub>x</sub> pašalinimui iš išmetamųjų dujų. Šis mažinimo būdas gali būti naudojamas nepriklausomai nuo prieš tai panaudotų pirminių mažinimo priemonių, nes azoto oksidai mažinami ne pačio degimo proceso metu, bet iš jau susidariusių degimo produktų.

Kur tik tai yra įmanoma, prieš naudojant antrines NO<sub>x</sub> koncentracijų mažinimo priemones, pradiniam NO<sub>x</sub> išmetimų sumažinimo etape, visuomet taikomi pirminiai NO<sub>x</sub> koncentracijos sumažinimo būdai.

Pats paprasčiausias priminis NO<sub>x</sub> ir kitų teršalų mažinimo būdas – kuro rūšies pakeitimas į tokį, kuris generuoja mažesnes taršalų koncentracijas. Tai gali būti mazuto pakeitimas į mažesnio sieringumo kurą ar skysto kuro pakeitimas į dujinį. Kitos priminės mažinimo priemonės gali būti [18]:

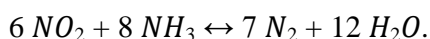
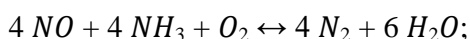
- degimas esant mažam oro pertekliaus koeficientui;
- oro laipsniavimas;

- degimui reikalingo oro temperatūros mažinimas;
- išmetamųjų dūmų recirkuliacija;
- vandens ar garo įpurškimas į liepsnos fakelo zoną;
- kuro degimo laipsniavimas;
- mažų NO<sub>x</sub> degikliai;
- galios sumažinimas.

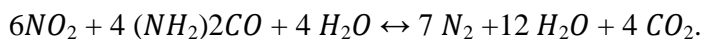
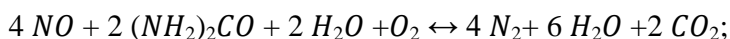
Antrinės azoto oksidų koncentracijų mažinimo priemonės naudojamos, kada reikiama NO<sub>x</sub> koncentracija nepasiekama pritaikius pirmines priemones. Antrinių priemonių technologija yra pagrįsta NO<sub>x</sub> pašalinimu sausais cheminiais procesais. Antriniam azoto oksidų kieki sumažinimui į išmetamųjų dujų srautą įpurškiama amoniako, karbamido ar kito sorbento, kuris gali reaguoti su azoto oksidais ir redukuoti juos iki molekulinio azoto. Dažniausiai naudojamos šios antrinės NO<sub>x</sub> emisijų mažinimo technologijos [19, 20]:

- selektyvusis katalitinis dūmų valymas (SKV);
- selektyvusis nekatalitinis dūmų valymas (SNKV).

*Selektyvusis katalitinis dūmų valymas* – šis metodas pagrįstas dūmuose, esančio NO<sub>x</sub> pavertimu į vandens garus ir molekulinį azotą, kai į degimo produktus yra įpurškiama amoniako arba karbamido. Amoniakas arba karbamidas įpurškiamas už degimo kameros prieš katalizatoriaus sluoksnį, kur degimo produktų temperatūra yra 200 - 400°C. Degimo produktai prateka pro katalizatorių, kur pašalinami CO ir nesudegę angliavandeniliai, o po to sumaišomi su amoniaku. NO<sub>x</sub> virsmai vyksta ant katalizatoriaus paviršiaus, esant 300 – 450 °C temperatūrai, vykstant reakcijoms su amoniaku [18, 19, 21]:



arba su karbamidu:



Matyti, kad po reakcijos susidaro nekenksmingos medžiagos: grynas azotas N<sub>2</sub>, vandens garai bei CO<sub>2</sub>.

*Selektyvusis nekatalitinis dūmų valymas* – šis metodas nenaudoja katalizatoriaus, o reakcijos vysta esant 850 – 1100 °C temperatūrai, kurios ribos priklauso nuo įpurškiamo reagento (amoniakas arba karbamidas). Pasirinktas reagentas yra tiesiogiai paduodamas į degimo zoną, kur sąveikauja su azoto oksidais [18, 19, 21].

Naudojant amoniaką, degimo produktuose vyksta šios reakcijos:

- naudinga:
 
$$4 NO + 4 NH_3 + O_2 \rightarrow 4 N_2 + 6 H_2O \text{ (redukcija);}$$
- žalinga:
 
$$4 NH_3 + 5 O_2 \rightarrow 4 NO + 6 H_2O \text{ (oksidacija).}$$

Temperatūra būtina išlaikyti nustatytose ribose, nes kitu atveju esant mažesnei nei 850 °C temperatūrai reakcijos bus per lėtos ir neįtakos NO<sub>x</sub> koncentracijos, o temperatūrai pakilus virš 1100 °C reakcija tampa žalinga ir dar labiau išauga koncentracija [19, 20].

### 1.2.1. Mažų NO<sub>x</sub> degikliai

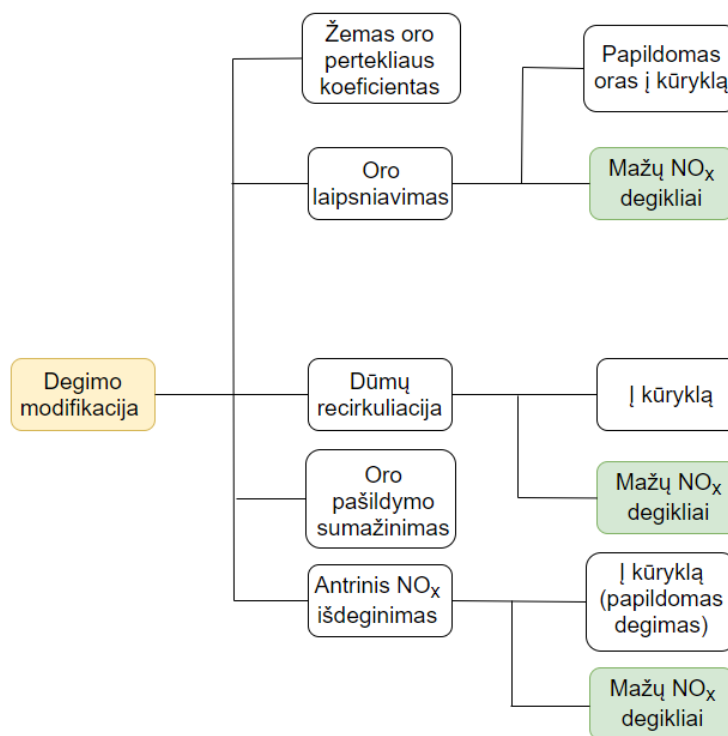
Visi pirminiai NO<sub>x</sub> mažinimo būdai susiję su pačia degimo modifikacija. Klasikiniuose kurą deginančiuose įrenginiuose degalų ir oro/deguonies mišinys susimaišo juos įterpiant toje pačioje vietoje. Dėl to liepsną sudaro karšta pirminio oksidavimo zona liepsnos šaknyje ir šaltesnė antrinio degimo zona ties liepsnos pabaiga. Pirminėje zonoje, susidaro dauguma NO<sub>x</sub> ir jų susidarymas eksponentiškai didėja, kylant pirminės zonos temperatūrai, antrinės zonos įtaka NO<sub>x</sub> susidarymui yra maža [18].

Žemų NO<sub>x</sub> degikliai (*Low NO<sub>x</sub> burners or LNB*) pakeičia oro ir kuro įvedimą vėlindami susimaišymą, sumažindami deguonies prieinamumą ir sumažindami pikinę fakelo liepsnos temperatūrą. Tai atitinkamai sumažina kuro azoto vortimą į NO<sub>x</sub> ir terminių NO<sub>x</sub> formavimąsi, išlaikant aukštą degimo efektyvumą. Užtikrinamas geras kuro išpurškimas ir aerodinaminės mažų NO<sub>x</sub> degiklių savybės leidžia suderinti pilną kuro išdegimą ir mažas NO<sub>x</sub> koncentracijas [18].

Pagal naudojamus NO<sub>x</sub> sumažinimo būdus, mažų NO<sub>x</sub> degikliai skirstomi į šias pagrindines grupes[18]:

- su oro laipsniavimu;
- su degimo produktų recirkuliacija;
- su kuro laipsniavimu;
- nauji mišraus tipo Ultra žemų NO<sub>x</sub> degikliai.

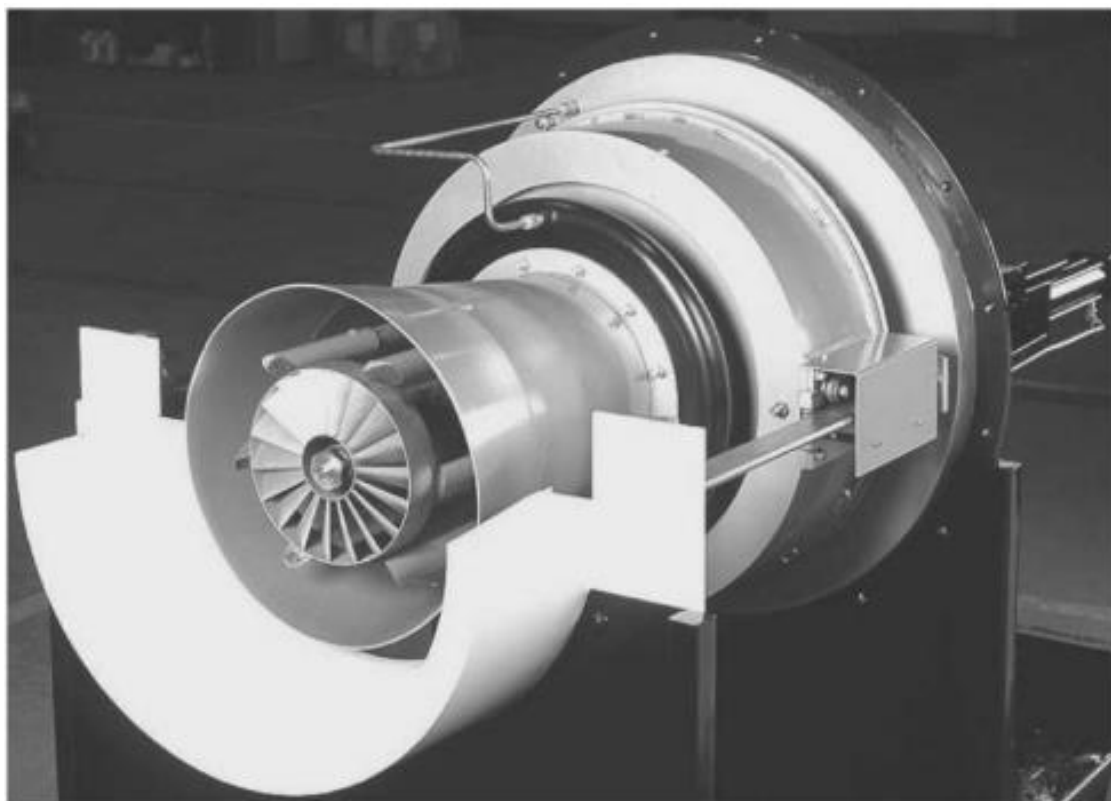
Mažų NO<sub>x</sub> degikliuose gali būti naudojami keli paminėti NO<sub>x</sub> sumažinimo būdai.



10 pav. Pirminės azoto oksidų mažinimo priemonės.



Didžiausias efektas gaunamas, senus degiklius keičiant mažų  $\text{NO}_x$  degikliais, jei naujais žemų  $\text{NO}_x$  degikliais keičiami jau katile sumontuoti senos kartos žemų  $\text{NO}_x$  degikliai, efektas yra kelis kartus mažesnis ir dažnai ekonomiškai nenaudingas. [18] Pagrindinė kliūtis, įrengti tokius degiklius senuose katiluose – mažų  $\text{NO}_x$  degiklių liepsna yra didesnės apimties – didesnis skersmuo ir ilgis. Todėl dažnai pasitaiko, kad diegiant mažų  $\text{NO}_x$  degiklį, tenka sumažinti katilo galią, kad į esamą kūryklą tilptų liepsna [18].



**11 pav.** Mažų  $\text{NO}_x$  degiklis su oro laipsniavimu [22]

### **1.3. Išmetamų teršalų esami ir įsigaliojantys normatyvai**

#### **1.3.1. LAND 43-2013**

LAND 43-2013 yra išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normos, taikomos kurą deginantiems įrenginiams, kurių vardinė (nominali) šiluminė galia lygi arba didesnė kaip 0,12 MW, bet nesiekia 50 MW. Normatyve nustatomos ribinės vertės į aplinkos orą išmetamiems teršalams tokiems, kaip sieros dioksidas ( $\text{SO}_2$ ), azoto oksidai ( $\text{NO}_x$ ), anglies monoksidas (CO) ir kietosios dalelės (KD) [23].

**2 lentelė.** Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normų LAND 43-2013 2 priedo ribinės vertės [23]

Kuro rūšis	Kurų deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Išmetamų teršalų ribinė vertė, mg/Nm <sup>3</sup>								Standartinė O <sub>2</sub> koncentracija, tūrio proc.
		SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>		CO		KD		
		Esamas įrenginys	Naūjas įrenginys	Esamas įrenginys	Naūjas įrenginys	Esamas įrenginys	Naūjas įrenginys	Esamas įrenginys	Naūjas įrenginys	
Skystasis kuras	1 ≥ MW < 20	1700 <sup>2</sup>	1700	650	450 <sup>3</sup>	500	500	250	200	3 %
Kietasis kuras	1 ≥ MW < 20	2000	2000	650 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>	2000 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>	700	400	6 %

<sup>2</sup> Dūmavamzdžių katilams – 750 mg/Nm<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Deginant biokurą – 750 mg/Nm<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> Deginant biokurą – 4 000 mg/Nm<sup>3</sup>.

### 1.3.2. Išmetamų teršalų iš vidutinių kurų deginančių įrenginių normos

Vidutinių kurų deginančių įrenginių (toliau – vidutinių KDI) normos nustato kurų deginančių įrenginių į aplinkos orą išmetamo sieros dioksido (SO<sub>2</sub>), azoto oksidų (NO<sub>x</sub>), ir dulkių (kietųjų dalelių KD) ribines vertes, jų laikymosi kontrolės, išmetamo į aplinkos orą šių teršalų ir anglies monoksido (CO) kiekio apskaitos, visuomenei ir Europos Komisijai teikiamos informacijos reikalavimus. Normos yra taikomos įrenginiams, kurių vardinė (nominali) šiluminė galia lygi arba didesnė kaip 1 MW, bet nesiekia 50 MW, nepriklausomai nuo naudojamos kuro rūšies.[24]

Tolimesni atliekami darbai ir analizė atliekami įvertinant normatyve esanti 13.1 punktą, kuris sako:

Vidutiniams KDI išmetamų teršalų ribinės vertės taikomos esamiems vidutiniams KDI, kurių vardinė šiluminė galia yra 1 MW ar didesnė ir 5 MW ar mažesnė, išskyrus variklius ir dujų turbinas, nuo 2030 m. sausio 1 d. taikomos Normų priedo 2 punkte nurodytos išmetamų teršalų ribinės vertės.[24]

**3 lentelė.** Vidutinių KDI normų 2 priedo ribinės vertės (mg/Nm<sup>3</sup>) [24]

Teršalas	Kieta biomasė	Kitas kietasis kuras	Gazolis	Skystasis kuras, išskyrus gazolį	Gamtinės dujos	Dujinis kuras, išskyrus gamtines dujas
SO <sub>2</sub>	200 <sup>(1)(2)</sup>	1100	–	350	–	200 <sup>(3)</sup>
NO <sub>x</sub>	650	650	200	650	250	250
dulkės	50	50	–	50	–	–

<sup>(1)</sup> Vertė netaikoma vien tik kietąją medieną deginantiems vidutiniams KDI.

<sup>(2)</sup> 300 mg/Nm<sup>3</sup> šiaudus deginančių vidutinių KDI atveju.

<sup>(3)</sup> 400 mg/Nm<sup>3</sup> mažo kaloringumo koksavimo krosnių dujų atveju geležies ir plieno pramonėje.

## 2. Katilinės ekologinių rodiklių analizė

### 2.1. Situacijos vertinimas

Nagrinėjamas objektas yra miesto katilinė. Katilinėje yra ruošiamas ir iš jos tiekiamas termofikacinis vanduo vartotojams. Žiemos sezono metu katilinė tiekia šilumos energiją šildymui ir karštam vandeniui, o vasaros sezono metu tik karštą vandenį.

Pagrindinis kuras katilinėje yra biokuras – mišrios medienos skiedra dar vadinama „čipsais“ ir apie 80 – 90 % energijos pagaminama deginant šį kurą. Kita kuro rūšis naudojama katilinėje yra skalūnų alyva, tai yra skystas kuras, kuris naudojamas kai yra vykdomi biokuro katilo remonto ar aptarnavimo darbai. Katilinėje yra 8 katilai ir ekonomaizeris, šeši iš jų yra skysto kuro ir du biokuro, ekonomaizeris yra kondensacinio tipo ir veikia kartu su biokuro katilu. Visi katilai yra vidutinės galios, galia nuo 1 iki 5 MW (žr. 4 lentelę).

4 lentelė. Katilų charakteristika

Nr.	Katilo tipas	Instaliuota galia, MW	Kuro rūšis	Katilo būklė
1	VK-21	1,90	Skalūnų alyva	Užkonservuotas
2	VK-21	1,90	Skalūnų alyva	Užkonservuotas
3	VK-21	1,90	Skalūnų alyva	Užkonservuotas
4	SIMPLEX SM 175	1,76	Skalūnų alyva	Apyvartoje
5	CLANSMAN	3,50	Skalūnų alyva	Apyvartoje
6	THERMAX	4,70	Skalūnų alyva	Apyvartoje
7	COMPACT-500 DH	5,00	Biokuras	Apyvartoje
8	K-1250 M-2	1,25	Biokuras	Apyvartoje
9	Kondensacinis ekonomaizeris	1,5	–	Apyvartoje



12 pav. Skysto kuro katilai CLANSMAN ir VK-21

Kuo maksimaliau yra stengiamasi išnaudoti biokuro katilus, todėl skalūnų alyva deginama tik remonto ar aptarnavimo atvejais. VK-21 tipo katilai yra užkonservuoti ir gamyboje nenaudojami. Šildymo sezono metu energiją gamina 5 MW biokuro katilas ir 1,5 MW ekonomaizeris, esant didžiausiems šilumos poreikiams sausio ir vasario mėn. kartu paleidžiamas ir 1,25 MW biokuro katilas. Nešildymo sezono metu energiją gamina 1,25 MW biokuro katilas, kurio galios pakanka

patenkinti karšto vandens poreikius. Ekonomaizeris vasaros metu yra nenaudojamas, nes yra sąlyginai mažas apkrovimas ir išlaidos ekonomaizeriui tampa didesnės už jo sukuriamas pajamas. Per metus sudeginamas skalūnų alyvos kiekis yra sąlyginai mažas.

### 2.1.1. Deginamo kuro charakteristika

Skalūnų alyva yra viena iš geriausiai žinomų naftos distiliacijos metu gaunamų frakcijų ir yra gaminama iš degių skalūnų terminio apdirbimo būdu. Šilumos gamyboje naudojama dėl savo savybių, šis kuras reikalauja mažesnių investicijų sandėliavimui ir pašildymui, lyginant su mazutu [25].

**5 lentelė.** Skalūnų alyvos parametrai [26]

tankis prie 15 °C	923 kg/m <sup>3</sup>
drėgnumas (masės)	0,3 %
peleningumas (masės)	0,02 %
sieringumas (masės)	0,9 %
stingimo temperatūra	-30 °C
šilumingumas	9825 kcal/kg

Naudojamas biokuras yra mišri smulkintos medienos skiedra, pagrinde deginama SM2 ir SM3 specifikacijos medienos skiedra.

**6 lentelė.** Biokuro parametrai [27]

Biokuro rūšis	Kodas	Drėgnis %		Peleningumas % nuo sausosios masės	Frakcijos dydis (ilgis-plotis-storis), mm		Vidutinio leistino frakcijos dydžio dalis biokure. Ne mažiau nei (%)	Smulkiųjų frakcijų dydžio dalis biokure, ne daugiau nei (%)
		Min.	Max.		Max.	Vid.		
Medienos skiedra	SM2	35	55	3	50-50-20	150-60-20	80	5
Medienos skiedra	SM3	35	60	5	50-50-20	150-60-20	80	10

SM2, SM3 produkto atveju leidžiama į biokurą papildomai įmaišyti žievės ir (ar) pjuvenų, tačiau visais atvejais privaloma užtikrinti nustatytų kokybinių rodiklių laikymąsi.

Kita kuro rūšis į kurią vertą atkreipti dėmesį yra dyzelinis kuras, nors nagrinėjamoje katilinėje šis kuras ne deginamas, tačiau griežtėjant aplinkosauginiams reikalavimams ir dėl sudėtingumo gauti skalūnų alyvą yra planuojama pakeisti į dyzelinį kurą (krosninį kurą). Dyzelinas yra „švaresnis“ kuras už skalūnų alyvą, turi mažesnę sieringumą ir yra mažiau žalingas žmogaus sveikatai.

**7 lentelė.** Dyzelino parametrai [28]

šilumingumas	9912 kcal/kg
sieringumas	0,2 %
peleningumas	0,02 %
tankis prie 15 °C	870 kg/m <sup>3</sup>

## 2.2. Teršalų kiekių skaičiavimas

Stebima yra ne vien katilų teršalų koncentracija, kiekvieną mėnesį yra skaičiuojamas išmetamas teršalų kiekis. Šis kiekis yra skaičiuojamas tonomis įvertinant sunaudoto kuro kiekį, parametrus (peleningumas, sieringumas, kaloringumas) ir priimtus koeficientus. Skaičiuojami teršalai yra anglies monoksidas (CO), azoto oksidai (NO<sub>x</sub>), sieros dioksidas (SO<sub>2</sub>), kietosios dalelės (KD), lakieji organiniai junginiai (LOJ), manganas, mangano oksidai ir kiti mangano junginiai. Analizuojant ir lyginant teršalų išmetimus su dabartiniais ir 2030 m. įsigaliojančiais normatyvais, pagrindė bus koncentruojamasi į CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ir KD teršalus. Katilinėje išmetami teršalų kiekiai yra skaičiuojami biokurui ir skystam kurui atskirai. Kadangi biokuro yra sudeginama žymiai daugiau negu skysto kuro, daugiausia teršalų išmetama deginant biokurą.

### 2.2.1 Teršalų kiekių apskaičiavimas deginant skystą kurą

#### *Anglies monoksido skaičiavimas*

Anglies monoksido išmetamas kiekis [t/metus] apskaičiuojamas pagal sudegintą kurą lygtimi:

$$M_{CO} = 0,001 \cdot C_{CO} \cdot B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \text{ t/metus}; \quad (2.1)$$

čia  $C_{CO}$  – anglies monoksido išeiga kg/kg iš sudeginto kuro;

$B$  – sunaudotas kuras, t/metus;

$q_4$  – šilumos nuostoliai dėl nepilno mechaninio degimo.

Katilams, kurių našumas yra iki 30 t/h  $C_{CO}$  skaičiuojamas:

$$C_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q_z; \quad (2.2)$$

čia  $q_3$  – šilumos nuostoliai dėl nepilno cheminio degimo;

$R$  – šilumos nuostolius dėl nepilno cheminio degimo įvertinantis koeficientas;

$Q_z$  – kuro šiluminė vertė.

#### *Azoto oksidai*

Azoto oksidų, perskaičiuotų į NO<sub>2</sub>, kiekis mažiems katilams (<30 t/h) [t/metus] apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$M_{NO_2} = 10^{-6} \cdot B \cdot Q_z \cdot K_{NO_2} \cdot (1 - \beta), \text{ t/metus} \quad (2.3)$$

čia B – sunaudotas kuras, t/metus;

$Q_z$  – kuro šiluminė vertė;

$K_{NO_2}$  – parametras, apibūdinantis susidarančių azoto oksidų kiekį, tenkantį vienam GJ šilumos, kg/GJ;

$\beta$  – koeficientas, įvertinantis azoto oksidų susidarymo sumažėjimą dėl panaudotų techninių priemonių. Jei nenaudojamos jokios priemonės azoto oksidų susidarymui sumažinti,  $\beta = 0$ .

### ***Sieros dioksidas***

Sieros dioksido kiekis [t/metus] apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$M_{SO_2} = 0,02 \cdot B \cdot S \cdot (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}), \text{ t/metus} \quad (2.4)$$

čia B – sunaudotas kuras, t/metus;

S – sieros kiekis kure;

$\eta'_{SO_2}$  – į pelenus patenkanti sieros dioksido dalis;

$\eta''_{SO_2}$  – valymo įrenginiuose sugaunama sieros dioksido dalis.

### ***Kietos dalelės***

Mažiems katilams (<30 t/h) pelenų kiekis [t/metus] apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$M_p = B \cdot A \cdot \chi \cdot (1 - \eta), \text{ t/metus} \quad (2.5)$$

čia B – sunaudotas kuras, t/metus;

A – kuro suodiningumas;

$\chi$  - suodžių išnešimą charakterizuojantis koeficientas;

$\eta$  - sugaunamų kietų dalelių dalis.

## **2.2.2. Teršalų kiekių apskaičiavimas deginant biokurą**

### ***Anglies monoksidas***

$$M_{CO} = 0,001 \cdot q_3 \cdot R_{CO} \cdot Q_z \cdot B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \text{ t/metus} \quad (2.6)$$

čia  $q_3$  – šilumos nuostoliai dėl nepilno cheminio degimo;

$R_{CO}$  – anglies monoksido išėiga kg/kg iš sudeginto kuro;

$Q_z$  – kuro šiluminė vertė;

B – sunaudotas kuras, t/metus;

q<sub>4</sub> – šilumos nuostoliai dėl nepilno mechaninio degimo.

### **Azoto oksidai**

$$M_{NO_2} = 0,001 \cdot B \cdot Q_z \cdot K_{NO_2} \cdot (1 - \beta), \text{ t/metus} \quad (2.7)$$

čia B – sunaudotas kuras, t/metus;

Q<sub>z</sub> – kuro šiluminė vertė;

K<sub>NO<sub>2</sub></sub> – parametras, apibūdinantis susidarančių azoto oksidų kiekį, tenkantį vienam GJ šilumos, kg/GJ;

β – koeficientas, įvertinantis azoto oksidų susidarymo sumažėjimą dėl panaudotų techninių priemonių. Jei nenaudojamos jokios priemonės azoto oksidų susidarymui sumažinti, β = 0.

### **Kietos dalelės**

$$M_{k.d.} = B \cdot A_r \cdot CH1 \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100}\right), \text{ t/metus} \quad (2.8)$$

čia B – sunaudotas kuras, t/metus;

A – kuro suodingumas;

CH1 - suodžių išnešimą charakterizuojantis koeficientas;

η - sugaudomų kietų dalelių dalis.

## **2.3. Katilų išmetamų teršalų koncentracijos**

Katilinėje yra matuojamos katilų išmetamų teršalų koncentracijos pagal monitoringo programą. Tyrimus monitoringui katilinėje atlieka reikalingus leidimus turinčios laboratorijos. Buvo išanalizuoti tyrimų rezultatai ir nustatyta, kokios yra skysto kuro ir biokuro katilų emisijos.

### **SIMPLEX SM 175 skysto kuro katilas**

Vandens šildymo katilas, kuriame įmontuotas Riello P200 T/N 631M tipo degiklis. Katilas šiuo metu yra naudojamas retai, tiktai vasaros laikotarpiu sugedus arba prireikus valyti biokuro katilą. Išmatuotos katilo teršalų koncentracijos:

**8 lentelė.** SIMPLEX SM 175 teršalų koncentracijos

Data	Dūmų temp., °C	CO, mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	KD, mg/Nm <sup>3</sup>
2015-01-20	156	4,5	338,8	853,4	30,1
2015-12-15	104	3,2	375,0	1483,6	43,5
2016-01-12	45,5	11,9	293,6	1293,4	46,5
2017-02-22	75,1	30,2	260,03	404,1	40,2
2019-02-26	134,1	1,4	373,0	1420,6	45,7

Matavimai rodo, kad didžiausios koncentracijos yra NO<sub>x</sub> ir SO<sub>2</sub>. SO<sub>2</sub> koncentracija priklauso nuo sieros kiekio kure, skalūnų alyvos sieringumas yra apie 0,9 %, kuris sąlyginai yra didelis jei lygintume su „švaresniu“ skysto kuro tipu.

#### ***CLANSMAN skysto kuro katilas***

Vandens šildymo katile CLANSMAN yra įmontuotas Weishaupt L7Z tipo degiklis. Šiuo metu katilas naudojamas retai ir paleidžiamas šildymo sezono metu, jei įvyksta biokuro katilo gedimas arba yra suplanuotas biokuro katilo valymas. Kadangi katilas yra beveik nenaudojamas, turimi laboratorijos tyrimai yra atlikti inventorizavimo metu. Tačiau jo išmetimai buvo išmatuoti katilinei priklausančiu dūmų analizatoriumi. Gauti tokie analizatoriaus parodymai:

**9 lentelė.** CLANSMAN skysto kuro katilo teršalų koncentracijos

Data	Dūmų temp., °C	CO, mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>
2015-10-12	262,3	57,0	328,0

Rezultatuose matomos, tik CO ir NO<sub>x</sub> koncentracijos, šio tipo analizatorius SO<sub>2</sub> ir KD koncentracijų nematuoja.

**10 lentelė.** CLANSMAN katilo teršalų koncentracijos, išmatuotos laboratorijos

Data	Dūmų temp., °C	CO, mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	KD, mg/Nm <sup>3</sup>
2008-04-24	155,8	1,0	330,0	1137,0	228,1

Iš matavimo rezultatų matyti, kad didžiausi išmetimai yra SO<sub>2</sub>.

#### ***THERMAX skysto kuro katilas***

Vandens šildymo katilas, kuriame įmontuotas Baltur GI 510 DSPG degiklis. Katilas dirba šildymo sezono metu, kai sugenda arba valomas biokuro katilas. Kaip ir CLANSMAN katilui teršalų matavimai buvo atlikti inventorizacijos metu (12 lentelė). Kiti matavimai buvo atlikti pasinaudojant dūmų analizatoriumi, gauti rezultatai pateikti 11 lentelėje.

**11 lentelė.** THERMAX skysto kuro katilo teršalų koncentracijos (dūmų analizatorius)

Data	Dūmų temp., °C	CO, mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/m <sup>3</sup>
2015-01-27	182,1	5,0	399,0
2015-02-23	183,5	1,0	429,0
2015-03-13	182,0	7,0	396,0

**12 lentelė.** THERMAX katilo teršalų koncentracijos (inventorizacija)

Data	Dūmų temp., °C	CO, mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	KD, mg/Nm <sup>3</sup>
2008-04-24	178,7	10,0	295,0	410,0	231,1

#### ***COMPACT-500 DH biokuro katilas***

Vandens šildymo katilas su ardynine pakura. Katilas dirba šildymo sezono metu ir jo galios kartu su kondensaciniu ekonomazeriui, pakanka patenkinti beveik visą šilumos poreikį, išskyrus šalčiausiomis dienomis. Katilui dažnai atliekami laboratoriniai taršos matavimai.



**13 lentelė. COMPACT-500 DH biokuro katilo teršalų koncentracijos**

Data	Dūmų temp., °C	CO, mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	KD, mg/Nm <sup>3</sup>	
					Prieš DKE	Po DKE
2015-01-20	164,0	147,3	452,9	0	13,1	-
2015-12-15	148,8	515,9	599,74	0	26,2	-
2016-01-12	141,1	14,8	490,9	0	77,8	25,1
2016-11-30	118,9	169,6	373,2	0	61,9	28,7
2017-09-27	116,0	0	267,9	0	61,7	15,5
2017-11-28	144,7	79,2	435,4	0	106,3	19,6
2018-03-21	177,5	17,5	408,7	0	78,1	16,3
2018-06-05	83,0	22,7	195,6	0	65,9	-
2018-12-17	194,5	0	514,6	0	117,9	15,8
2019-02-26	165,2	22,8	529,4	0	81,5	15,8
2019-10-30	118,5	0	252,3	0	31,6	18,7

Prie katilo yra multiciklonas, kuris valo dūmus nuo kietųjų dalelių, bet yra ir kitas įrenginys, kuris pagal matomus rezultatus mažina kietųjų dalelių išmetimą, tai yra ekonomazeris. Ekonomazeris yra kondensacinio tipo, todėl dūmai dar papildomai išvalomi išpurškiamu vandeniu.

#### ***KALVIS K-1250M-2 biokuro katilas***

Vandens šildymo katilas su ardynine pakura. Katilas buvo pastatytas tam, kad padengtų karšto vandens poreikį vasaros metu, nes 5 MW katilas yra per didelis. Katilas šildymo sezonu metu yra paleidžiamas šalčiausiomis sezono dienomis, kada nepakanka 5 MW biokuro katilo ir ekonomazerio galios. Išmatuotos taršos koncentracijos pateiktos 14 lentelėje.

**14 lentelė. KALVIS K-1250M-2 biokuro katilo teršalų koncentracijos**

Data	Dūmų temp., °C	CO, mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> , mg/Nm <sup>3</sup>	KD, mg/Nm <sup>3</sup>
2016-05-24	134,4	215,9	474,7	0	94,7 / *6,8
2016-09-02	145,6	976,8	381,7	0	75,6
2017-02-22	147,0	372,3	630,9	0	84,45
2017-05-22	141,0	103,5	460,77	0	94,1 / *15,0
2018-09-07	133,4	558,9	445,0	0	65,22
2019-05-14	165,2	151,2	511,7	0	90,0

\* *Matavimai atlikti po kondensacinio ekonomazerio*

Kadangi katilas dirba vasaros sezono metu, jo galios apkrovimas būna apie 0,8 – 1,0 MW. Prie tokios galios kondensacinis ekonomazeris dirba mažu apkrovimu ir paskaičiavus pajamų – sąnaudų skirtumą gaunama, kad dirbti ekonomazeriu vasara yra nuostolinga, todėl vasaros metu ekonomazeris yra stabdomas. Tačiau yra atlikta keletas matavimų dirbant šiuo biokuro katilu kartu su ekonomazeriu ir pastebėta, kad kietųjų dalelių koncentracija yra apie 4 – 6 kartus mažesnė po ekonomazerio.

## 2.4. Teršalų koncentracijų palyginimas su normatyvų ribinėmis vertėmis

Palyginimui buvo pasirinkta naudoti maksimalią (max.) ir vidutinę (vid.) išmatuoto teršalo koncentraciją. Išmatuotos vertės lyginamos su LAND 43-2013 normų ribinėmis vertėmis ir vidutinių KDĮ ribinėmis vertėmis. Vidutinių KDĮ normos įsigalios, darbe nagrinėjamiems katilams, nuo 2030 m. Palyginimo tikslas nustatyti, kurių teršalų koncentracijos viršija vidutinių KDĮ ribines vertes ir kuriems katilams reikės taikyti taršą mažinančias priemones.

**15 lentelė.** Išmatuotų teršalų koncentracijos palyginimas su LAND 43-2013 ir vidutinių KDĮ ribinėmis vertėmis.

Įrenginys	Teršalai		Išmatuota teršalo koncentracija, mg/Nm <sup>3</sup>	LAND 43-2013, mg/Nm <sup>3</sup>	Vidutinių KDĮ ribinės vertės, mg/Nm <sup>3</sup>
SIMPLEX SM 175	CO	Max.	30,2	500	-
		Vid.	10,3		
	NO <sub>x</sub>	Max.	375,0	650	650
		Vid.	328,1		
	SO <sub>2</sub>	Max.	1483,6	1700	350
		Vid.	1091,0		
	KD	Max.	46,5	250	50
		Vid.	41,2		
CLANSMAN	CO	Max.	57	500	-
		Vid.	29		
	NO <sub>x</sub>	Max.	330,0	650	650
		Vid.	329,0		
	SO <sub>2</sub>	Max.	1137,0	1700	350
		Vid.	1137,0		
	KD	Max.	228,1	250	50
		Vid.	228,1		
THERMAX	CO	Max.	10	500	-
		Vid.	5,8		
	NO <sub>x</sub>	Max.	429,0	650	650
		Vid.	379,8		
	SO <sub>2</sub>	Max.	410,0	1700	350
		Vid.	410,0		
	KD	Max.	231,1	250	50
		Vid.	231,1		

COMPACT-500 DH	CO	Max.	515,9	4000	-	
		Vid.	89,9			
	NO <sub>x</sub>	Max.	599,7	750	650	
		Vid.	410,9			
	SO <sub>2</sub>	Max.	0	2000	-	
		Vid.	0			
	KD po ekonomizaizerio	Max.	28,7	700	50	
		Vid.	19,4			
	KD prieš ekonomizaizerį	Max.	117,9	700	50	
		Vid.	65,6			
	K-1250M-2	CO	Max.	976,8	4000	-
			Vid.	396,4		
NO <sub>x</sub>		Max.	630,9	750	650	
		Vid.	484,1			
SO <sub>2</sub>		Max.	0	2000	-	
		Vid.	0			
KD po ekonomizaizerio		Max.	15,0	700	50	
		Vid.	10,9			
KD prieš ekonomizaizerį		Max.	94,7	700	50	
		Vid.	84,0			

Iš palyginimo matyti, kad išmatuotos vertės neviršija LAND 43-2013 ribinių verčių. SO<sub>2</sub> koncentracija yra artima ribinei vertei, kada deginamas skystas kuras. Vertinant KD koncentraciją biokuro atveju matyti, kad iki LAND 43-2013 ribinės vertės yra daug atsargos, tačiau CLANSMAN ir THERMAX skysto kuro katilų atveju, kietųjų dalelių koncentracija yra arti ribinės vertės. NO<sub>x</sub> koncentracija visiems katilams yra artima ribinei vertei.

Toliau lyginant išmatuotas vertes su vidutinių KDĮ normų ribinėmis vertėmis matyti, kad stipriai sugriežtinama KD ribinė vertė. Skystam kurui ji griežtėja 5 kartus, o biokurui 14 kartų. Skysto kuro katilai CLANSMAN ir THERMAX viršija vidutinių KDĮ normų kietųjų dalelių ribinę vertę. Problema su kietosiomis dalelėmis yra ir biokuro katilų atveju. Šie be kondensacinio ekonomizaizerio į vidutinių KDĮ normų ribinę KD vertę netelpa, tačiau su kondensaciniu ekonomizaizeriu jos neviršija.

Žiūrint į vidutinių KDĮ normų sieros dioksido ribinę vertę matyti, kad ši griežtėja beveik 5 kartus skystam kurui, biokurui A. Mackevičiaus katilinės atveju SO<sub>2</sub> yra nevertinama, nes deginama vien tik smulki mediena. Skysto kuro katilai viršija vidutinių KDĮ normų sieros dioksido vertę.

Skystajam kurui NO<sub>x</sub> ribinė vertė abiem LAND 43-2013 ir vidutinių KDĮ atvejais nesikeičia, o biokurui keičiasi nežymiai, todėl tolimesni sprendimai šio teršalo klausimu nėra būtini, nes ribinė vertė neviršijama.

## 2.5. Metiniai išmetamų teršalų kiekiai

Naudojantis 2.2. *Teršalų kiekių skaičiavimas* skyrelio metodika buvo atlikti 2017 m ir 2018 m. teršalų kiekio skaičiavimai įvertinant sunaudotus kuro kiekius, jų kaloringumą, peleningumą ir sieringumą. Skaičiavimuose įvertinamos esamos emisijų mažinimo priemonės ir jų efektyvumai, naudojami priimti koeficientai.

**16 lentelė.** Į aplinkos orą išmestų teršalų kiekis deginant biokurą

pavadinimas	matavimo vnt.	teršalų kiekis	
		2017 m.	2018 m.
Anglies monoksidas (CO)	t/metus	62,735	64,966
Azoto oksidai (NO <sub>x</sub> )	t/metus	6,402	6,629
Sieros dioksidas (SO <sub>2</sub> )	t/metus	0,704	0,729
Kietosios dalelės (KD)	t/metus	9,393	6,275
Iš viso:	t/metus	79,234	78,599

**17 lentelė.** Į aplinkos orą išmestų teršalų kiekis deginat skalūnų alyvą

pavadinimas	matavimo vnt.	teršalų kiekis	
		2017 m.	2018 m.
Anglies monoksidas (CO)	t/metus	0,140	0,479
Azoto oksidai (NO <sub>x</sub> )	t/metus	0,043	0,148
Sieros dioksidas (SO <sub>2</sub> )	t/metus	0,197	0,643
Kietosios dalelės (KD)	t/metus	0,002	0,007
Iš viso:	t/metus	0,382	1,277

Deginant biokurą didžiausi išmetami teršalų kiekiai yra CO ir KD, tačiau KD labai priklauso nuo kuro peleningumo, aiškūs KD skirtumas matosi tarp 2017 ir 2018 m. vidutinis peleningumas 2017 m. buvo 3,179 %, o 2018 m. 2,460 %. Vertinant taršos išmetimus deginant skalūnų alyva, didžiausias teršalų kiekis yra SO<sub>2</sub>, dėl aukšto skalūnų alyvos sieringumo (0,9 %).

### 3. Teršalų emisijų mažinimo sprendimai

Atliktame palyginime matyti, kad reikalingas sprendimas skystą kurą deginantiems katilams dėl SO<sub>2</sub> taršos mažinimo. Buvo pasirinkti du galimi sprendimai:

1. Skalūnų alyva pakeisti kita kuro rūšimi – dyzelinu. Dyzelinis kuras turi apie 5 kartus mažesnę sieringumą, už skalūnų alyva, todėl galima tikėtis stipraus SO<sub>2</sub> emisijų sumažėjimo.
2. Vidutinių KDĮ normose yra punktas, kuris sako, kad aplinkos apsaugos agentūra gali atleisti veiklos vykdytoją nuo pareigos laikytis Normų priedo 2–4 punktuose nustatytos išmetamų teršalų ribinės vertės, esamiems vidutiniams KDĮ, jei jie veikia ne daugiau kaip 500 valandų per metus (taikant slenkantį penkerių metų vidurkį). Jeigu vidutinis KDĮ naudojamas šilumos gamybai, nusistovėjus ypatingai šaltiems orams, šis laikas gali būti prailgintas iki 1000 valandų, tačiau visais atvejais kietąjį kurą deginančių vidutinių KDĮ išmetamoms dulkėms taikoma 200 mg/Nm<sup>3</sup> ribinė vertė. Tokiais atvejais kitiems teršalams taikomos Išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normų LAND 43-2013 2 priede nustatytos ribinės vertės, atsižvelgiant į vidutinio KDĮ vardinę šiluminę galią.[24] Kadangi skalūnų alyva yra naudojama tik biokuro katilo remonto ar aptarnavimo atveju, visi skysto kuro katilai dirba mažiau nei 500 valandų per metus, o kadangi LAND 43-2013 ribinės vertės nėra viršijamos papildomos priemonės taršos mažinimui yra nebūtinės.

Kitas reikalingas sprendimas, dėl biokuro katilų kietųjų dalelių emisijų. Veikiant DKE vidutinių KDĮ normų ribinės vertės neviršijamos, tačiau ekonomazeriui nedirbant ribinė vertė yra viršijama. Kyla problema, kad be kondensacinio ekonomazerio negalės dirbti biokuro katilas. Kita problema, kad vasara ekonomazeris nedirba dėl mažo šilumos poreikio, nes finansiškai nuostolinga. Sprendimas galėtų būti dirbti su ekonomazeriu vasaros metu.

Kietųjų dalelių mažinimui galima įdiegti elektrostatinį ar audeklinį filtrą. Šlapio skruberio variantas, kaip ir atmetamas, nes yra kondensacinis ekonomazeris [6, 18]. Tačiau šie įrenginiai yra didelių gabaritų ir katilinėje gali iškilti problema su tokių įrenginių pastatymų, dėl vietos trūkumo katilinės teritorijoje.

#### 3.1. Kietųjų dalelių emisijų mažinimo variantai biokuro katilams

Teorinėje dalyje buvo aptarti trys pagrindiniai rinkoje taikomi KD mažinimo metodai: elektrostatinis filtras, audeklinis filtras ir šlapias skruberis. Šioje dalyje bus aptariama kiekvieno varianto pritaikymo galimybė, investicijos ir operacinės sąnaudos.

### 3.1.1. Dūmų kondensacinio ekonomizaizerio variantas

Nagrinėjamoje miesto katilinėje DKE atlieka šlapio skruberio funkciją – valo dūmus nuo kietųjų dalelių ir lakiųjų pelenų. Šiuo atveju papildomos investicijos nėra reikalingos, svarbu tik sužinoti, kokios būtų operacinės ekonomizaizerio išlaidos nešildymo sezono metu, kada šis nedirba.

Nešildymo sezono metu biokuro katilo apkrovimas būna apie 0,7 – 1,0 MW, tokiu atveju DKE gamybos koeficientas nuo katilo gamybos būna  $0,04 - 0,05 \frac{MW_{DKE}}{MW_{Biokuras}}$ . Prie tokio koeficiento darbas su DKE tampa neekonomiškas, nes pajamų – išlaidų santykis būna mažesnis, nei biokuro katilo, šiam padengiant DKE energijos gamybą. Dėl tokių priežasčių pasibaigus šildymo sezonui DKE darbas yra sustabdomas, todėl biokuro katilo kietųjų dalelių išmetimai, kai DKE nedirba, būna didesni nei 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Reikalinga išlaidų ir pajamų analizė nustatant, koks būtų patiriamas nuostolis dirbant DKE nešildymo sezono metu.

Reikalingi duomenys sąnaudų ir pajamų skaičiavimui pateikti 18 lentelėje, pasinaudojant turimais duomenimis DKE išlaidos apskaičiuojamos:

$$DKE \text{ išlaidos} = S_{el.energ.} + S_{vand.} + S_{nuotek.} + S_{chem.} \quad (3.1)$$

čia  $S_{el.energ.}$  – elektros energijos išlaidos, eur;

$S_{vand.}$  – technologinio vandens išlaidos, eur;

$S_{nuotek.}$  – nuotekų kanalizavimo išlaidos, eur;

$S_{chem.}$  – cheminių medžiagų išlaidos, eur.

DKE pajamos:

$$DKE \text{ pajamos} = (E_{DKE} - (E_{DKE} * T_{nuost.})) * P_m - DKE \text{ išlaidos} \quad (3.2)$$

čia  $E_{DKE}$  – DKE energijos gamyba, MWh;

$T_{nuost.}$  – Trasų nuostolių dalis nuo katilinės išėjimo, %;

$P_m$  – Energijos pardavimo kaina miestui,  $\frac{eur}{MWh}$ .

DKE nedarbo metu, nepagamintos energijos kiekis yra padengiamas biokuro katilu, pvz. jei DKE per para pagamindavo 1,5 MWh, šis energijos kiekis bus pagamintas biokuro katilu. Kitas žingsnis yra atlikti biokuro katilo išlaidų ir pajamų analizę, kai jis padengia DKE energijos gamybą.

Biokuro katilo darbo išlaidos:

$$Biokuru \text{ darbo išlaidos} = \frac{E_{DKE}}{11,63} * K_{biokuras} \quad (3.3)$$

čia  $K_{biokuras}$  – Biokuro kaina (įvertinus kuro kaloringumą),  $\frac{eur.}{tne}$

Biokuro katilo darbo pajamos:

$$Biokuru \text{ darbo pajamos} = (E_{DKE} - (E_{DKE} * T_{nuost.})) * P_m - Biokuro \text{ darbo išlaidos} \quad (3.4)$$

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikti 18 lentelėje.

**18 lentelė.** DKE ir Biokuro išlaidų ir pajamų analizė

Rodiklis	Mato vnt.	Per 1 val.	Per 24 val.
Vidutinė energijos gamyba biokuro katilu	MWh	0,85	20,40
Vidutinė energijos gamyba DKE	MWh	0,06	1,44
DKE elektros energijos sąnaudos	MWh <sub>e</sub>	0,02	0,38
DKE vandens sąnaudos	m <sup>3</sup>	0,08	1,92
DKE nuotekų sąnaudos	m <sup>3</sup>	0,04	0,96
DKE cheminių medžiagų sąnaudos	kg	0,04	0,94
Energijos pardavimo kaina miestui	eur./MWh	69,00	69,00
Biokuro kaina (įvertinus kuro kaloringumą)	eur./t.n.e	130,00	130,00
Trasų nuostolių dalis nuo kat. išėjimo	%	28	28
Elektros energijos kaina	eur./MWh <sub>e</sub>	65,20	65,20
Elektros energijos išlaidos	eur.	1,04	25,04
Technologinio vandens kaina	eur./m <sup>3</sup>	0,99	0,99
Technologinio vandens išlaidos	eur.	0,08	1,90
Nuotekų kanalizavimo kaina	eur./m <sup>3</sup>	1,29	1,29
Nuotekų kanalizavimo išlaidos	eur.	0,05	1,24
Cheminių medžiagų kaina	eur./kg	0,84	0,84
Cheminių medžiagų išlaidos	eur.	0,03	0,79
DKE išlaidos	eur.	1,21	28,96
Biokuro darbo išlaidos	eur.	0,67	16,10
<b><i>Biokuro darbo pajamos</i></b>	eur.	<b>2,31</b>	<b>55,44</b>
<b><i>DKE pajamos</i></b>	eur.	<b>1,77</b>	<b>42,58</b>
<b><i>SKIRTUMAS (Biokuro pajamos – DKE pajamos)</i></b>	eur.	<b>0,54</b>	<b>12,87</b>

Analizės rezultatai rodo, kad DKE gaminamos energijos kiekį padengiant biokuro katilo gamyba gaunamos apie 12,87 eurų didesnės pajamos per parą. Pagrindinės DKE sąnaudos yra elektros energija, padengti DKE gamyba biokuro katilu papildomos elektros energijos nereikia, nes jo įrengimai jau dirba. Papildomos sąnaudas biokuro katilui sudaro tik pats kuras, todėl pajamos dirbant biokuro katilui yra didesnės, nei dirbant DKE. Priimant, kad nešildymo sezonas trunka apie 160 dienų, nuostolis dirbant DKE vasaros metu būtų 2 060 eurų.

### 3.1.2. Elektrostatinio filtro variantas

Nagrinėjant elektrostatinio filtro variantą, reikia įvertinti reikiama filtro dydį, investicijas, operacines sąnaudas ir pastatymo galimybę. Dydžio nustatymui reikia suskaičiuoti reikalingą kolektorių plotą, kurie surinks kietąsias daleles. Šis gali būti apskaičiuojamas taip [29]:

$$A = \frac{-Q}{w} [\ln(1 - \eta)] \quad (3.5)$$

čia  $A$  – kolektorių plotas,  $m^2$ ;

$Q$  – dūmų tūrio debitas,  $m^3/s$ ;

$w$  – dalelių migracijos greitis,  $\frac{m}{s}$ ; Priimamas =  $0,05 \frac{m}{s} = 180 m/h$ ;

$\eta$  – valymo efektyvumas. Priimamas = 0,99.

Katilių tūrio debitas buvo išmatuotas teršalų koncentracijų matavimo metu:

**19 lentelė.** Biokuro katilų išmatuotas tūrio debitas

Katilas	Apkrova, MW	Tūrio debitas	
		Nm <sup>3</sup> /s	Nm <sup>3</sup> /h
BVŠK-7	5,0	5,6	20160
BVŠK-8	1,2	0,76	2736
BVŠK-7 + BVŠK-8	6,2	6,36	22896

Kadangi KD emisijos kelia problemą tik vasaros metu, nedarant DKE, elektrostatinis filtras gali būti pritaikytas 1,2 MW biokuro katilui, kas sumažintų investicijas ir filtro dydį su galimybe šį įrengti katilinės viduje. Iš kitos pusės, aplinkosauginiai reikalavimai nuolatos griežtėja, todėl verta apsvarstyti didesnio elektrostatinio filtro variantą galinti dirbti prie maksimalaus abiejų katilų apkrovimo (6,2 MW). Kolektorių ploto skaičiavimui bus naudojamas tūrio debitas prie 1,2 MW apkrovos ir maksimalios 6,2 MW apkrovos.

Prie 1,2 MW apkrovos:

$$A = \frac{-Q}{w} [\ln(1 - \eta)] = \frac{-2736}{180} [\ln(1 - 0,99)] = 70 m^2$$

Prie 6,2 MW apkrovos:

$$A = \frac{-Q}{w} [\ln(1 - \eta)] = \frac{-22896}{180} [\ln(1 - 0,99)] = 585,8 m^2$$

Jeigu elektrostatinis filtras būtų naudojamas tik vasaros metu, pakaktų 70 m<sup>2</sup> efektyvaus kolektorių ploto. Toks filtras būtų pakankamai kompaktiškas įrengti katilinės viduje. Žvelgiant į didesnio elektrostatinio filtro variantą, reikėtų 586 m<sup>2</sup> kolektorių ploto, filtras būtų žymiai didesnių dimensijų ir jo pastatymas keltų problemų.



Investicijų nustatymui buvo pasiremta metodika, kuri buvo sudaryta analizuojant eilę komercinių pasiūlymų. Remiantis šia metodika, kaina elektrostatiniam filtrams prognozuojama [30]:

$$K_{EF} = (35 \div 50) * G; \quad (3.6)$$

čia  $K_{AF}$  – *Elektrostatinio filtro įrenginių kaina, k€;*

$G$  – *katilo galia, MW*

Ši kaina įvertina tik reikalingą įrangą, be projektavimo, montavimo, paleidimo-derinimo darbų. Šie darbai gali būti įvertinti taikant 40 – 50 % nuo įrangos kainos [30].

**20 lentelė.** Elektrostatinio filtro investicijos

Katilo galia, MW	Išlaidos įrangai, eur.	Išlaidos įrengimo ir kitiems darbams, eur.	Bendra suma, eur.
1,2	42 000 – 60 000	19 000 – 27 000	61 000 – 87 000
6,2	217 000 – 310 000	97 000 – 139 000	314 000 – 449 000

Investicijos gali būti labai skirtingos, net tokio pačio galingumo įrenginiams, tai priklauso nuo naudojamų medžiagų, komponavimo, pagalbinių įrenginių, išdėstyto ir t.t. Todėl tikslios kainos negalima nustatyti, kol nėra paruoštas projektas.

Elektrostatinio filtro sąnaudų skaičiavimui pagrindinės išlaidos yra elektros energija, kurios sąnaudos priklauso nuo elektrodų ir kolektorių naudojamos įtampos, ventiliatorių, dalelių pašalinimo sistemos darbo.

Ventiliatorių energijos sąnaudos gali būti apskaičiuojamos, priimant ventiliatorių naudingumą 65 % ir santykinį dūmų-oro tankį 1,0 [31]:

$$P_{vent.} = 0,000181 * Q * (\Delta P) * t; \quad (3.7)$$

čia  $P_{vent.}$  – *ventiliatorių elektros sąnaudos, kWh/metus;*

$Q$  – *dūmų tūrio debitas, (ACFM);*

$(\Delta P)$  – *aerodinaminis pasipriešinimas, coliai H<sub>2</sub>O stulpelio;*

$t$  – *darbo laikas.*

Filtro elektrodų (kolektorių) ir dalelių valymo sistemos elektros sąnaudos gali būti apskaičiuojamos taip [32]:

$$P_{oper.} = 0,00194 * A * t; \quad (3.8)$$

čia  $P_{oper.}$  – *elektrodų ir dalelių valymo sistemos elektros sąnaudos, kWh/metus;*

$A$  – *kolektorių plotas, ft<sup>2</sup>;*

$t$  – *darbo laikas.*

Taikant (3.7) ir (3.8) formulėmis apibrėžtą elektros sąnaudų skaičiavimo metodiką, suskaičiuojamos elektros sąnaudos filtrams prie 70 m<sup>2</sup> (754 ft<sup>2</sup>) ir 586 m<sup>2</sup> (6308 ft<sup>2</sup>) kolektorių ploto. Aerodinaminis

ventiliatorių pasipriešinimas elektrostatiniais filtrams yra priimamas 50 – 130 Pa (0,2 – 0,52 coliai H<sub>2</sub>O) (žr. 1 lentelę). Darbo laikas yra skirtingas, 1,2 MW biokuro katilo varianto atveju, elektrostatinis filtras dirbtu tik vasaros metu (3840 valandų), vidutinis jo apkrovimas yra 1,0 MW. Jeigu būtų statomas didesnis elektrostatinis filtras, šis dirbtu ištisus metus. Vidutinis katilo apkrovimas šildymo sezonu yra 3,7 MW, didžiausias apkrovimas gali būti tik pačiais šalčiausiais mėnesiais, kada oro lauko temp. yra žemiau -20 °C. Elektros sąnaudos skaičiuojamos prie vidutinių apkrovimų.

**21 lentelė.** Elektrostatinio filtro elektros sąnaudos ir išlaidos

Vidutinis apkrovimas, MW	Kolektorių plotas, m <sup>2</sup> (ft <sup>2</sup> )	Dūmų tūrio debitas, m <sup>3</sup> /h(ACFM)	Darbo laikas, val.	Aerodinaminis pasipriešinimas, coliai H <sub>2</sub> O stulpelio	$P_{vent.}$ , kWh	$P_{oper.}$ , kWh	Elektros kaina, eur/kWh	Išlaidos elektrai, eur.
1,0	70 (754)	2280 (1342)	3840	0,36	336	5617	0,0652	388
3,7	586 (6308)	14918 (8780)	4920	0,36	2815	60209	0,0652	4 109
1,0	586 (6308)	2280 (1342)	3840	0,36	336	46992	0,0652	3 086

Žiūrint į mažo 70 m<sup>2</sup> kolektorių ploto elektrostatinio filtro variantą matyti, kad elektros energijos išlaidos yra 388 eurai per nešildymo sezoną (3840 val.). Didelio elektrostatinio filtro elektros energijos išlaidos per nešildymo sezoną 3 086 eurai, sudėjus šia sumą su šildymo sezono suma (4 109 eurai) gaunamos didelio elektrostatinio filtro (586 m<sup>2</sup>) elektros energijos išlaidos per metus – 7 195 eurai.

Analizės tikslumui įvertinti buvo atlikta elektrostatiinių filtrų apžvalga. Rastas realus elektrostatinis filtras, kurio projektinis kolektorių plotas yra 858 m<sup>2</sup>, efektyvus – 780 m<sup>2</sup>. Matyti, kad filtras yra didesnis nei yra reikalinga, jo operacinis dūmų tūrio debitas yra 31 258 Nm<sup>3</sup>/h, tačiau šis filtrais yra pritaikytas biokuro katilams deginantiems medienos skiedrą ir kiti jo parametrai atitinka reikiamus. Filtro elektros sąnaudos apibrėžtos 22 lentelėje:

**22 lentelė.** Gamintojo apibrėžtos elektrostatinio filtro energijos sąnaudos [33]

Aukštos įtampos įtaisas, kW	8,22
pavaros dalelių nupurtimui, kW	0,07
pavaros dalelių pašalinimui, kW	1
Filtro šildymas, kW*	3,3

\*Filtro darbo metu šildymas nereikalingas, todėl yra išjungtas ir energijos nenaudoja

Įvertinant, kad filtras dirbs ištisus metus, šildymas energijos sąnaudų nesudarys, todėl jo sąnaudos išmetamos.

**23 lentelė.** Filtro išlaidos elektros energijai

Elektros sąnaudos, kW	9,29
Elektros kaina, eur/kWh	0,091
Darbo laikas, val	8760
Išlaidos elektros energijai, eur	7 406

Gamintojo apibrėžta filtro įrangos kaina įrašyta 24 lentelėje. Keletas kitų išlaidų taip pat įrašytos lentelėje.

**24 lentelė.** Elektrostatinio filtro investicijos, eurai [33]

Elektrostatinio filtro dalys	115 000
Atvežimas (Vokietijoje)	4 000
Filtro izoliavimas (Vokietijoje)	44 000
Filtro sumontavimas (Vokietijoje)	25 000
Bendros investicijos	188 000

Galiausiai reikia įvertinti panašaus filtro pastatymo galimybę. Nors pasirinktas nagrinėjimui filtras turi didesnę kolektorių plotą nei yra reikalingas, tačiau jo dydis yra tinkamos gairės, sprendžiant kiek vietos reikės, norint pastatyti filtrą. Tokio filtro aukštis yra apie 12 – 13 m [Pirmas priedas], todėl gali būti statomas tik lauke. Nagrinėjamos katilinės atveju, vieta yra svarbi, katilinės teritorija nėra didelė ir šiuo momentu patogus, tokio filtro sumontavimas nėra galimas. Siekiant sumontuoti tokio dydžio filtrą, būtų reikalingas esminis teritorijos pertvarkymas, kas sudarytų papildomas išlaidas (13 pav.).



**13 pav.** Dūmtakis sujungtas su kaminu

### 3.1.3. Audeklinio filtro variantas

Audeklinių filtrų atveju, labai svarbi yra pasirinkta filtravimo medžiaga, ši turi atlaikyti aukštas temperatūras (iki 200 °C) ir būti atspari korozijai. Šie filtrai, taip pat nėra labai tinkami valant drėgnus dūmus, kas biokuro deginimo atveju yra pastovus reiškinys. Šių filtrų pradinės investicijos yra mažesnės už elektrostatių filtrų. Kas 3 – 5 metai yra reikalingas filtruojančios medžiagos pakeitimas, slėgio nuostoliai yra didesni nei elektrostatiame filtre.

Prenkant, kokio audeklinio filtro reikės, svarbu nustatyti, kiek reikės filtruojančios medžiagos, kiekis kvadratiniais metrais nustatomas [34]:

$$A_c = \frac{Q}{v_f}; \quad (3.9)$$

čia  $A_c$  – filtruojančios medžiagos plotas,  $m^2$ ;

$v_f$  – filtravimo greitis,  $m/s$ ;

$Q$  – dūmų tūrio debitas,  $m^3/s$ .

Dūmų tūrio debitas yra 19 lentelėje, kitas pagrindinis parametras nulemiantis filtruojančios medžiagos plotą yra filtravimo greitis ( $v_f$ ), kuris priklauso nuo dūmų su filtravimo medžiaga santykio. Santykis yra skirtingas priklausomai nuo audeklinio filtro dalelių pašalinimo tipo (purtymas, priešingos krypties oro srautas, oro impulsais) [34, 35].

**25 lentelė.** Audeklinių filtrų dūmų su filtravimo medžiaga santykis [34]

Dūmų su filtravimo medžiaga santykis, (cm <sup>3</sup> /s)/cm <sup>2</sup>		
Priešingos krypties oro srautas	Oro impulsai	Mechaninis purtymas
0,75 – 1,0	3,0 – 4,0	1,25 – 1,5

Matyti, kad didžiausias santykis yra naudojant oro impulsų valymo tipo audeklinį filtrą, tai reiškia, kad šio tipo filtrams reikalingas mažiausias filtruojančios medžiagos plotas. Šiuo atveju tai yra labai svarbi sąlyga dėl filtro pastatymo vietos trūkumo, todėl pasirenkamas šio filtro tipas. Toliau apskaičiuojamas reikalingas filtruojančios medžiagos plotas 1,2 MW biokuro katilo atveju ir 6,2 MW atveju, kada abu biokuro katilai dirba maksimaliu apkrovimu:

1,2 MW biokuro katilui:

$$A_{c(1,2)} = \frac{Q}{v_f} = \frac{76 \text{ cm}^3/\text{s}}{3,5 (\text{cm}^3/\text{s})/\text{cm}^2} = \frac{2736 \text{ m}^3/\text{h}}{126 \text{ m}/\text{h}} = 22 \text{ m}^2$$

6,2 MW apkrovimo atveju:

$$A_{c(6,2)} = \frac{Q}{v_f} = \frac{636 \text{ cm}^3/\text{s}}{3,5 (\text{cm}^3/\text{s})/\text{cm}^2} = \frac{22896 \text{ m}^3/\text{h}}{126 \text{ m}/\text{h}} = 182 \text{ m}^2$$

Audeklinių maišų kiekis priklausys nuo maišo ilgio ir pločio, kuriuos lems pačio filtro konstrukcija. Kaip pavyzdį galime sakyti, kad maišo ilgis – 3,5 m, plotis – 0,15 m tada maišų kiekis  $M_n$ :

$$M_{n(1,2)} = \frac{A_{c(1,2)}}{3,5 * 0,15 * 3,14} = \frac{22}{3,5 * 0,15 * 3,14} = 14 \text{ maišų}$$

$$M_{n(6,2)} = \frac{A_{c(6,2)}}{3,5 * 0,15 * 3,14} = \frac{182}{3,5 * 0,15 * 3,14} = 111 \text{ maišų}$$

Reikiamas specifikacijos atitinkantis audeklinis filtras, kurio tūrio debitas atitinka katilinės prie didžiausi apkrovimo (6,2 MW), buvo rastas filtrų kataloge [36] [Antras priedas], jo parametrai pateikti 26 lentelėje.

**26 lentelė.** Audeklinio filtro FRIR – 250 parametrai [36]

Dūmų tūrio debitas, m <sup>3</sup> /h	Iki 23400
Filtruojančios medžiagos plotas, m <sup>2</sup>	260
Audeklinių maišų kiekis, vnt	196
Audeklinio maišo ilgis, m	3,14
Filtro masė, t	10,2
Suspausto oro debitas, nm <sup>3</sup> /min, max	2,7

FRIR – 250 audeklinio filtro matmenis ir dydis pateikti antrame priede.

Investicijų nustatymui buvo pasiremta metodika, kuri buvo sudaryta analizuojant eilę komercinių pasiūlymų. Remiantis šia metodika kaina audekliniams įrenginiams prognozuojama [30]:

$$K_{AF} = (23 \div 28) * G; \tag{3.10}$$

čia  $K_{AF}$  – Audeklinio filtro įrenginių kaina, k€;

$G$  – katilo galia, MW

Ši kaina įvertina tik reikalingą įrangą, be projektavimo, montavimo, paleidimo-derinimo darbų. Šie darbai gali būti įvertinti taikant 50 – 60 % nuo įrangos kainos [30].

Pasinaudojant (3.10) formule suskaičiuojamos investicijos:

**27 lentelė.** Audeklinio filtro investicijos

Katilo galia, MW	Išlaidos įrangai, eur.	Išlaidos įrengimo ir kitiems darbams, eur.	Bendra suma, eur.
1,2	29 000 – 35 000	15 000 – 17 000	44 000 – 52 000
6,2	142 000 – 173 000	71 000 – 87 000	213 000 – 260 000

Audeklinio filtro operacinės sąnaudos yra elektros energija, kurią vartoja filtro ventiliatoriai, įveikdami aerodinaminį pasipriešinimą. Ventiliatorių elektros sąnaudos gali būti apskaičiuojamos pasinaudojus (3.7) formule. Aerodinaminis ventiliatorių pasipriešinimas audekliniams filtrams yra priimamas 1000 – 1500 Pa (*4 – 6 coliai H<sub>2</sub>O*) (žr. 1 lentelę). Nagrinėjami tie patys variantai, kaip elektrostatinio filtro analizės atveju.

**28 lentelė.** Audeklinio filtro elektros sąnaudos

Vidutinis apkrovimas, MW	Dūmų tūrio debitas, m <sup>3</sup> /h (ACFM)	Darbo laikas, val.	Aerodinaminis pasipriešinimas, coliai H <sub>2</sub> O stulpelio	Elektros sąnaudos, kWh	Elektros kaina, eur/kWh	Išlaidos elektrai, eur.
1,0	2280 (1342)	3840	5	4664	0,0652	304
3,7	14918 (8780)	4920	5	39094	0,0652	2 549

Prie sąnaudų skaičiavimo, dar reikia įvertinti filtruojančios medžiagos (maišų) keitimą, kuris reikalingas kas 3 – 5 metai. Galima priimti, kad kiekvienais metais bus pakeičiama 25 % maišų, taip per 4 metų laikotarpį įvykdant pilną pakeitimą. Filtravimo maišų kainos priklauso nuo medžiagos ir dydžio, literatūros šaltinyje [32] maišų kaina svyruoja nuo 70 – 125 eurų už vieną. Priimtos išlaidos filtravimo maišų keitimui 29 lentelėje.

**29 lentelė.** Filtruojančių maišų keitimo išlaidos

Filtruojančios medžiagos plotas, m <sup>2</sup>	Maišo matmenys, m	Filtravimo maišų kiekis, vnt.	Filtravimo maišų kaina, eur./vnt.[32]	Išlaidos filtravimo maišams, eur.	Išlaidos per metus pakeičiant 25 % maišų, eur.
22	Ilgis – 3,5 Plotis – 0,15	14	70	980	245
182	Ilgis – 3,5 Plotis – 0,15	111	70	7 770	1 943

### 3.2. Kietųjų dalelių mažinimo priemonių investicijų ir išlaidų palyginimas

Atliktoje KD mažinimo analizėje buvo išnagrinėti keli variantai – dūmų kondensacinio ekonomizerio, elektrostatinio filtro ir audeklinio filtro. Analizuojant elektrostatinio ir audeklinio filtro variantus, buvo pasirinkti du galimi atvejai. Pirmas atvejis - statyti mažesnę filtrą, kuris gali dirbti nešildymo sezono metu, pritaikyta 1,2 MW biokuro katilui. Antras atvejis – statyti didesnę filtrą, kuris veiktų visus metus, esant maksimaliam 6,2 MW biokuro katilų apkrovimui. Reikalingos investicijos ir išlaidos šiems mažinimo būdams pateiktos 30 lentelėje.

**30 lentelė.** KD mažinimo būdų investicijų ir išlaidų palyginimas

-	DKE	Elektrostatinis filtras		Audeklinis filtras	
Apkrova, MW	1,2	1,2	6,2	1,2	6,2
Vidutinės investicijos, eur.	-	74 000	381 000	48 000	236 000
Operacinės išlaidos, eur	2 060	388	7 195	549	4 796

DKE jau yra įrengtas ir veikiantis katilinėje, todėl papildomų investicijų nereikalauja. Operacinės išlaidos DKE atveju yra didesnės, negu elektrostatinio ar audeklinio filtro variantu, prie 1,2 MW, tačiau įvertinius filtrų investicijas gaunamas atsipirkimo laikotarpis yra 30 – 40 metų, kas atitinka įrenginio eksploatacijos trukmę. Galingesnių filtrų atveju, atsipirkimo laikotarpio nėra, nes sąnaudos didesnės už DKE, todėl šie atvejai gali būti svarstomi tik iš ekologinės pusės, nes ekonominės naudos neduos.

### 3.3. Teršalų mažinimo sprendimas skysto kuro katilams

Atlikus skysto kuro katilų emisijų analizę, matyti, kad reikalingas sprendimas dėl SO<sub>2</sub> mažinimo, nes nuo 2030 m. pradėjus galioti naujoms normoms, emisijos viršis ribinę vertę. SO<sub>2</sub> emisijų mažinimui reikalingi brangūs įrenginiai, tačiau kaip buvo aptarta teorinėje dalyje, pats paprasčiausias būdas sumažinti išmetimus, būtų pakeisti kuro rūšį.

Miesto katilinės teritorijoje yra trys skirtingų dydžių skysto kuro rezervuarai: pagrindiniame rezervuare yra laikoma skalūnų alyva, dviejose mažesniuose rezervuaruose dyzelinis kuras, skaitomas, kaip katilinės rezervas. Dėl tokios situacijos, pilnas perėjimas iš skalūnų alyvos į dyzelinį kurą, nebūtų labai sudėtingas. Pakeitus skysto kuro rūšį iš skalūnų alyvos į dyzelinį kurą, pagal įsigaliojančias vidutinių KDI normas, būtų normuojami tik NO<sub>x</sub> išmetimai, kurių ribinė vertė yra 200 mg/Nm<sup>3</sup>. Tokiu atveju, būtų reikalingas sprendimas tik dėl NO<sub>x</sub> išmetamų koncentracijų mažinimo.

Atsižvelgiant, kad skysto kuro katiluose, įmontuoti degikliai yra seni, ir norint deginti dyzelinį kurą būtų reikalingas jų atnaujinimas, optimaliausias variantas būtų sumontuoti naujus mažų NO<sub>x</sub> degiklius, kurie leistų sumažinti NO<sub>x</sub> emisijas ir neviršyti įsigaliojančių ribinių verčių.

Kitas jau minėtas sprendimas, kad aplinkos apsaugos agentūra gali atleisti nuo naujų normų laikymosi, jei vidutinis kurą deginantis įrenginys veikia ne daugiau kaip 500 valandų per metus (taikant slenkanti penkerių metų vidurkį) [24]. Tokiu atveju, būtų toliau laikomasi LAND 43-2013 normose numatytų ribinių verčių. Papildomos emisijų mažinimo priemonės taptų nereikalingos.

#### 3.3.1. Mažų NO<sub>x</sub> degiklių variantas

Nauji degikliai parenkami SIMPLEX SM 175, CLANSMAN ir THERMAX skysto kuro katilams. Kadangi mažų NO<sub>x</sub> degiklių liepsna būna didesnė ir ilgesnė, parenkami šiek tiek mažesnės galios degikliai.

##### *SIMPLEX SM 175 katilui*

Šiam katilui parenkamas Baltur TBL 160 P 50Hz tipo degiklis (14 pav.). Tai yra dviejų pakopų dyzelinis degiklis atitinkantis EN 267 standarto klase 2. [37]

**31 lentelė.** Taršalų emisijos deginant dyzeliną pagal EN 267 standartą

Klasė	NO <sub>x</sub> emisijos, mg/kWh
1	≤ 250
2	≤ 185
3	≤ 120

Degiklio mažiausia galia – 500 kW, didžiausia – 1600 kW.



**14 pav.** TBL 160 P degiklis [37]

*CLANSMAN katilui*

Katilui parenkamas Babcock Wanson gamintojo LNTA 1.3 tipo skysto kuro degiklis, šio degiklio techninėse specifikacijos traktuojama, kad NO<sub>x</sub> išmetimai neviršija 200 mg/Nm<sup>3</sup> koncentracijos. Degiklio galia yra 3400 kW [38].



**15 pav.** LNTA 1.3 tipo degiklis [38]

*THERMAX katilui*

Katilui parenkamas Baltur gamintojo GI 350 DSPG 50 Hz tipo skysto kuro degiklis. Jam yra taikoma teršalų emisijų 1 klasė pagal EN 267 standartą (žiūrėti 31 lentelę), degiklio galia 4743 kW. [39]



**16 pav.** GI 350 DSPG tipo degiklis [39]



Gamintojai degiklių kainos neviešina, todėl investicijų nustatymui bus naudojamos aplinkos apsaugos energijos gamyboje individualaus darbo rekomendacijos santykinai investicijai [40]:

- santykinė investicija lengvam skystam kurui 1–5 MW  $K = 0,025 \text{ M€}/\text{MW}$

Investicijų poreikis NO<sub>x</sub> sumažinimui apskaičiuojamas:

$$I = G * K; \quad (3.11)$$

čia  $I$  – investicijų poreikis, M€;

$G$  – katilo galia, MW;

$K$  – santykinė investicija, M€/MW

**32 lentelė.** Investicijos mažų NO<sub>x</sub> degiklių įdiegimui

Katilas	Degiklio galia, MW	Investicija, eur.
SIMPLEX SM 175	1,6	40 000
CLANSMAN	3,4	85 000
THERMAX	4,743	118 575

Degiklių keitimas reikalautų nemažų investicijų, todėl aplinkos apsaugos atleidimas nuo naujų normų laikymosi, būtų geresnis variantas.

### 3.4. Teršalų kiekio sumažėjimas įrengus emisijų mažinimo priemones

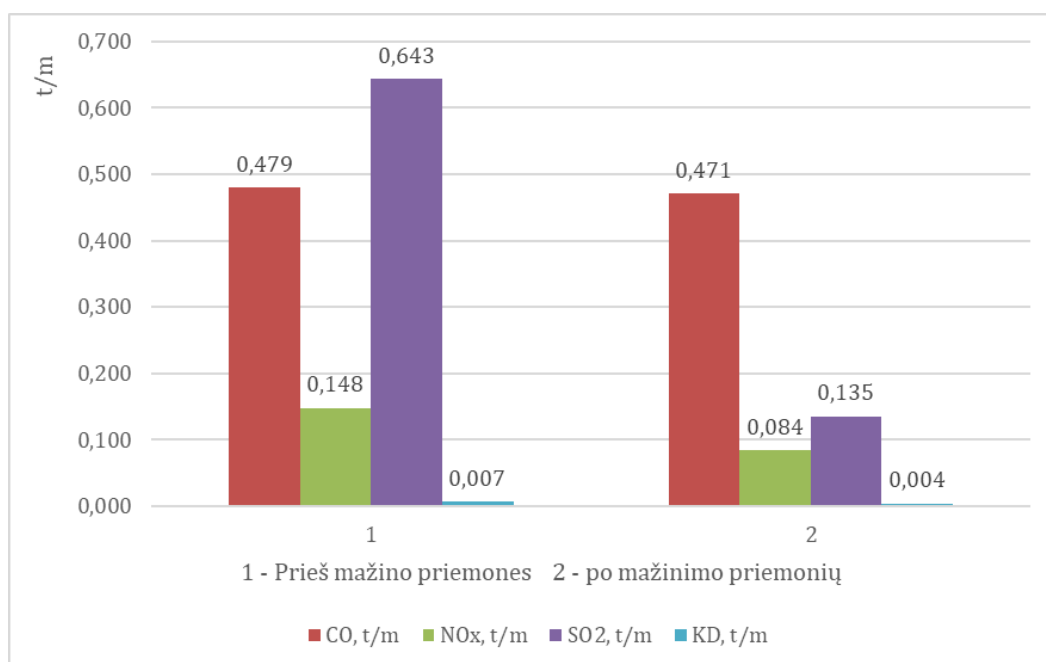
Įdiegus taršą mažinančias priemones, sumažės metinis teršalų kiekio išmetimas. Sumažėjęs teršalų kiekis apskaičiuojamas naudojant 2.2. *Teršalų kiekių skaičiavimas* skyrelio metodika.

Vertinant teršalų sumažėjimą, deginant skystą kurą, buvo pasinaudota 2018 m. duomenimis t.y. energijos gamyba skysto kuro katilais, kuro kaloringumas, peleningumas. Buvo atsižvelgta į tai, kad dyzelinio kuro šiluminė vertė yra didesnė už skalūnų alyvos, todėl tai pačiai energijos gamybai buvo reikalingas mažesnis kuro kiekis.

**33 lentelė.** Teršalų kiekis deginant skystą kurą po mažinimo priemonių įrengimo

Pavadinimas	Matavimo vnt.	Teršalų kiekis po teršalų mažinimo priemonių įrengimo
Anglies monoksidas (CO)	t/metus	0,471
Azoto oksidai (NO <sub>x</sub> )	t/metus	0,084
Sieros dioksidas (SO <sub>2</sub> )	t/metus	0,135
Kietosios dalelės (KD)	t/metus	0,004
Iš viso:	t/metus	0,694

Pakeitus skysto kuro rūšį ir įdiegus taršą mažinančias priemones, bendras išmetamas teršalų kiekis sumažėja 0,583 tonomis arba 45,64 %. 17 paveiksle matyti, kad labiausiai sumažėja NO<sub>x</sub> ir SO<sub>2</sub> išmetimai, dėl mažų NO<sub>x</sub> degiklių ir žymiai mažesnio sieros kiekio kure.



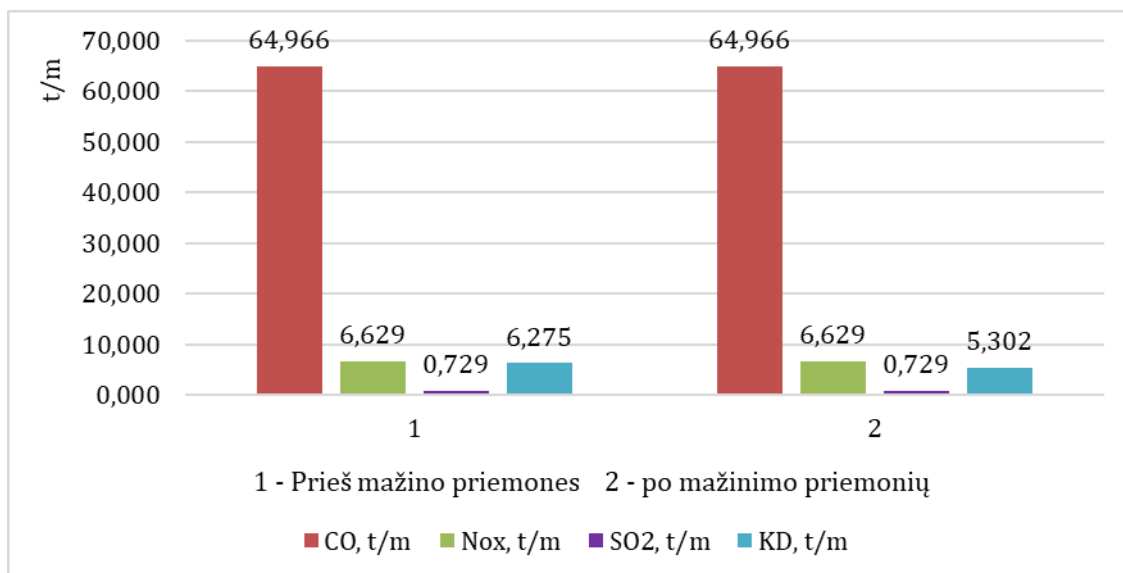
**17 pav.** Išmetamų teršalų kiekio palyginimas įdiegus taršą mažinančias priemones skystam kurui (2018 m. duomenys)

Biokuro deginimo atvejui, taip pat naudosime 2018 m. duomenys, sumažėjusių teršalų nustatymui priimsime DKE variantą t.y. DKE darbas vasaros metu sumažinant iš BVŠK-8 išmetamų kietųjų dalelių kiekį. Šiuo atveju taršos skaičiavimuose priimame, kad DKE išmetamus dūmus valo vasaros metu ir valymo efektyvumas, kuris buvo nustatytas matavimo metu, yra 97,0 %. Biokuro kiekis, peleningumas ir kaloringumas priimamas toks pat.

**34 lentelė.** Teršalų kiekis deginant biokurą po mažinimo priemonių pritaikymo

pavadinimas	matavimo vnt.	teršalų kiekis po teršalų mažinimo priemonių įrengimo
Anglies monoksidas (CO)	t/metus	64,966
Azoto oksidai (NOx)	t/metus	6,629
Sieros dioksidas (SO <sub>2</sub> )	t/metus	0,729
Kietosios dalelės (KD)	t/metus	5,302
Iš viso:	t/metus	77,626

Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad sumažėja kietųjų dalelių kiekis, sumažėjimas yra 0,973 tonos. Kiti teršalų kiekiai išlieka tie patys, nes nežinoma, kokią įtaką DKE daro jų koncentracijai, kadangi dujiniai teršalai buvo matuojami tik po valymo įrenginių, nežinomas jų valymo efektyvumas. Tačiau galima priimti, kad šie irgi turėtų sumažėti.



**18 pav.** Išmetamų teršalų kiekio palyginimas įdiegus taršą mažinančias priemones biokurui (2018 m. duomenys)

## Išvados

1. Atlikus katilų emisijų analizę nustatyta, kad skysto kuro katilams, deginantiems skalūnų alyvą, reikalingas sprendimas dėl  $\text{SO}_2$  emisijų mažinimo. Pasirinktas mažinimo variantas yra kuro rūšies pakeitimas, skalūnų alyva pakeičiama į dyzelinį kurą. Deginant dyzelinį kurą  $\text{SO}_2$  yra nenormuojama, vienintelis normuojamas teršalas yra  $\text{NO}_x$ , jo ribinė vertė  $200 \text{ mg/Nm}^3$ . Siekiant neviršyti naujos  $\text{NO}_x$  ribinės vertės, senus skysto kuro degiklius galima pakeisti į naujus mažų  $\text{NO}_x$  degiklius. Investicijos degiklių pakeitimui priklausys nuo degiklio galios ir vienam degikliui gali būti nuo 40 iki 118 tūkstančių eurų.
2. Kitas sprendimas, dėl skysto kuro katilų yra pasinaudoti vidutinių KDI normose esančiu 19 punktu, kuriame rašoma, kad aplinkos apsaugos agentūra gali atleisti veiklos vykdytoją nuo pareigos laikytis nustatytų ribinių verčių, jei įrenginys veikia ne daugiau kaip 500 valandų per metus (taikant slenkantį penkerių metų vidurkį). Tokiu atveju, išmetamiems teršalams toliau būtų taikomos LAND 43-2013 ribinės vertės, išskyrus išmetamoms dulkėms taikoma  $200 \text{ mg/Nm}^3$  ribinė vertė visais atvejais, todėl papildomos investicijos teršalų mažinimui būtų nereikalingos.
3. Atlikus biokuro katilų emisijų analizę nustatyta, kad reikalingas sprendimas dėl KD išmetimų vasaros laikotarpiu, nedirbant DKE. Galimas sprendimas leisti DKE dirbti vasaros metu, DKE darbo nuostolis vasarą būtų apie 2 tūkstančiai eurų. Kitas sprendimas statyti elektrostatinį arba audeklinį filtrą, kas sudarytų nemažas investicijas. Statant mažus filtrus, kurie dirbtu tik vasaros laikotarpiu operacinės išlaidos gaunamos nuo 388 iki 549 eurų per metus, atsipirkimo laikotarpis būtų nuo 30 iki 40 metų, kas prilygsta įrenginių tarnavimo laikui. Didelių filtrų atveju, kurie dirbtu visus metus, operacinės išlaidos būtų nuo 4796 iki 7195 eurų, išlaidoms esant didesnėms nei DKE atveju atsipirkimo laiko nėra, todėl šis variantas svarstomas tik iš ekologinės pusės. Reikia dar įvertinti didelių filtrų pastatymo galimybę, nes yra vietos trūkumas katilinės teritorijoje.
4. Apskaičiavus metinius išmetamų teršalų kiekius, jei būtų įdiegtos mažinimo priemonės, nustatyta, kad skysto kuro katilais išmetamas  $\text{NO}_x$  kiekis sumažėtų apie 1,8 karto,  $\text{SO}_2$  kiekis sumažėtų apie 4,8 karto, o CO ir KD sumažėjimas būtų nežymus.
5. Apskaičiavus matinius išmetamų teršalų kiekius, jei būtų dirbama vasaros metu su DKE, nustatyta, kad biokuro katilais išmetamas KD kiekis sumažėtų apie 1,2 karto, priimama, kad kitų teršalų išmetami kiekiai liktų nepakitę.

## Literatūros sąrašas

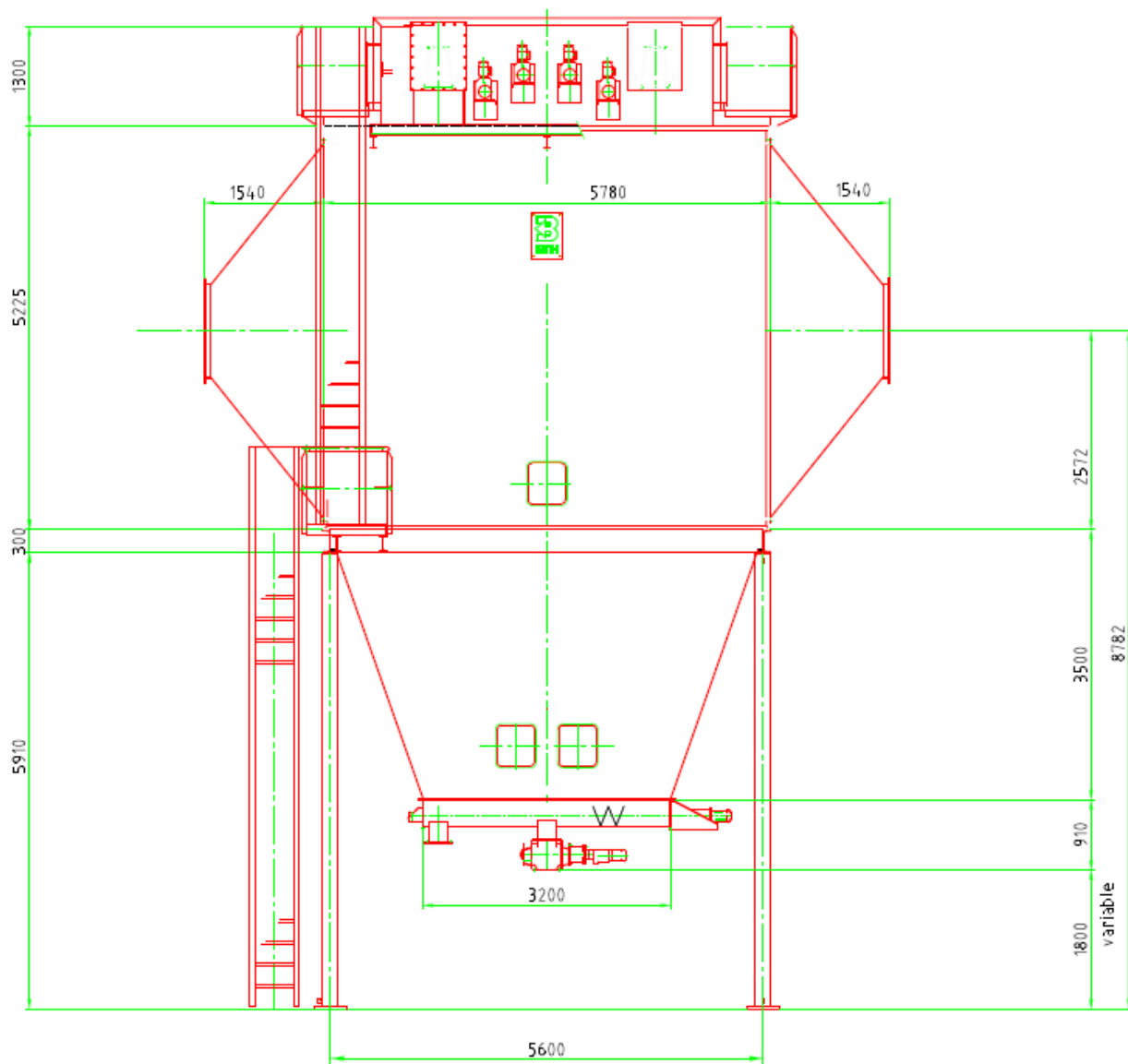
1. MOCKEVIČIUS, Vaidas, Kęstutis BUINEVIČIUS. Biokuro katilinės kietųjų dalelių emisijų analizė. *Jaunųjų mokslininkų konferencijos „PRAMONĖS INŽINERIJA 2015“ pranešimų medžiaga*. 2015 m. gegužės 14 d.
2. OZAROVSKIS, Darius. *Akustinio ciklono tyrimas: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: VGTU Technika, 2012.
3. DENAFAS, Gintaras. *Atmosferos apsauga, II dalis*. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2000.
4. ŠVENČIANAS, Petras. *Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje*. Kaunas: Technologija, 1994.
5. *CJ Dustraction Systems* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-03-18]. Prieiga per: <https://cjdustraction.co.za/cyclone-and-separators/>
6. POŠKAS, Robertas, Arūnas SIRVYDAS, Jurgis JANKAUSKAS. Elektrostatinio filtro efektyvumo tyrimas deginant biokurą mažos galios katilė. *ENERGETIKA*. 2015.
7. BALTRĖNAS, P., A. BAKAS, J. KAULAKYS. *Elektrostatiniai oro valymo filtrai*. Vilnius: Technika, 1998.
8. TEIKARI, Juha. *Erection concept for bag house filter: master of science thesis*. Tampere university of technology, 2015.
9. FENGER, J., Chrítian TJELL, J. *Air pollution – from a local to a global perspective*. Polyteknisk Forlag, 2009.
10. ESKELINEN, Petri Roberto. *Retrofitting an electrostatic precipitator into a hybrid electrostatic precipitator by installing a pulse-jet fabric filter. Review of available technologies for retrofitting Electrostatic precipitator with fabric filter*. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2015.
11. BOWDEN, P., M. NEATE, B. CURRELL, M. GERAKIOS. *Fabric filters for coal fired power stations*, 2006.
12. ZEVENBOVEN, Ron, Pia KILPINEN. *Control of pollutants in flue gases and fuel gases*. Sponsored by The Nordic Energy Research Programme Solid Fuel Committee and Helsinki University of Technology, 2001.
13. KLINGSPOR, J.S., J.L. VERNON. *Particulate control for coal combustion. IEA Coal Research, report*. London, 1988

14. OHLSTROM, M., J. JOKINIEMI, J. HOKKINEN, P. MAKKONEN, J. TISSARI. *Combating particulate emissions in energy generation and industry*. Helsinki: Tekes, 2006.
15. FLAGAN, R.C., J.H. SEINFELD. *Fundamentals of air pollution control engineering*. Prentice Hill, New Jersey, 1988.
16. WOOLCOCK, Patrick J. and Robert C. BROWN. *A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas*. Biomass and Bioenergy, 2013.
17. 1,5 MW galios kondensacinio ekonomizerio su vandens valymo sistema eksploatavimo instrukcija.
18. BUINEVIČIUS, Kęstutis. *Aplinkosauga energijos gamyboje*. Modulo medžiaga
19. PABARČIUS, Dominykas. *NO<sub>x</sub> emisijos mažinimas sudarant redukcinę aplinką: baigiamasis magistro projektas*. Kauno technologijos universitetas. Kaunas, 2017.
20. GLARBORG, P., A.D. JENSEN, J.E. JOHANSSON. *Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003.
21. PLEČKAITIENĖ, R., K. BUINEVIČIUS. *The factors which have influence on nitrogen conversion formation*. *Environmental Engineering: selected papers of the 8th international conference*, 2011.
22. BAUKAL, Charles E., Jr. *Industrial burners handbook*, 2003.
23. „Išmetamų teršalų iš kūrų deginančių įrenginių normos LAND 43-2013“ patvirtinta Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2013 m. balandžio 10 d. įsakymu Nr. D1-244.
24. „Išmetamų teršalų iš vidutinių kūrų deginančių įrenginių normos“ patvirtinta Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2017 m. rugsėjo 18 d. Nr. D1-778
25. MIHKEL, Koel. *"Estonian oil shale"*. Oil Shale. A Scientific-Technical, 1999.
26. UAB „Litesko“. Techninės sąlygos skalūnų alyvos pirkimui.
27. *Medienos skiedros produktų techninė specifikacija* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-18]. Prieiga per: <https://www.baltpool.eu/lt/birzoje-prekiaujami-produktai/>
28. *Šildymui skirtas dyzelinis* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-22]. Prieiga per: [http://www.didmenastatoil.lt/index.php/sildymui\\_skirtas\\_dyzelinas/4975](http://www.didmenastatoil.lt/index.php/sildymui_skirtas_dyzelinas/4975)
29. *ESP Design Review. Lesson 4* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-02]. Prieiga per: [https://www.neundorfer.com/wp-content/uploads/2016/05/ESP-KnowledgeBase-04-Design\\_Review.pdf](https://www.neundorfer.com/wp-content/uploads/2016/05/ESP-KnowledgeBase-04-Design_Review.pdf)

30. BUINEVIČIUS, Kęstutis. *Teršalų mažinimui reikalingų investicijų dydžio skaičiavimo metodika*.
31. TURNER, James H., John D. McKENNA, John C. MYCOCK, Arthur B. NUNN, William M. VATAVUK. *Particulate Matter Controls. Baghouses and Filters*, 1998.
32. McKENNA, John D., James H. TURNER, James P. McKENNA. *FINE PARTICLE (2.5 MICRONS) EMISSIONS. Regulation, Measurement, and Control*, 2008.
33. Elektrostatinio filtro techninių duomenų lapas.
34. *Fabric Filter Design Review. Lesson 5* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-03]. Prieiga per: <https://www.neundorfer.com/wp-content/uploads/2016/05/Baghouse-KnowledgeBase-05-Fabric-Filter-Design-Review.pdf>
35. BOWDEN, P., M. NEATE, B. CURRELL, M. GERAKIOS. *Fabric filters for coal fired power stations*, 2006.
36. Scientific and Manufacturing Enterprise DNEPROENERGOSTAL LTD. *Catalogue of Equipment and Services*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-03]. Prieiga per: <http://destal.net/obz/214/catalog-en.pdf>
37. *Baltur TBL 160 P 50Hz tipo degiklis* [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-05]. Prieiga per: [http://www.baltur.com/ww/en/products/burners/light\\_oil\\_burners/tbl\\_160\\_p\\_50hz](http://www.baltur.com/ww/en/products/burners/light_oil_burners/tbl_160_p_50hz)
38. *Babcock Wanson gamintojo LNTA 1.3 tipo skysto kuro degiklis*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-05]. Prieiga per: <https://www.babcock-wanson.com/products/industrial-burners/lnta-ta/>
39. *Baltur gamintojo GI 350 DSPG 50 Hz tipo skysto kuro degiklis*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-05]. Prieiga per: [http://www.baltur.com/ww/en/products/burners/light\\_oil\\_burners/gi\\_350\\_dspg\\_50hz](http://www.baltur.com/ww/en/products/burners/light_oil_burners/gi_350_dspg_50hz)
40. BUINEVIČIUS, Kęstutis. *Aplinkos apsauga energijos gamyboje*. Individualus darbo metodiniai nurodymai, 2019.

# Priedai

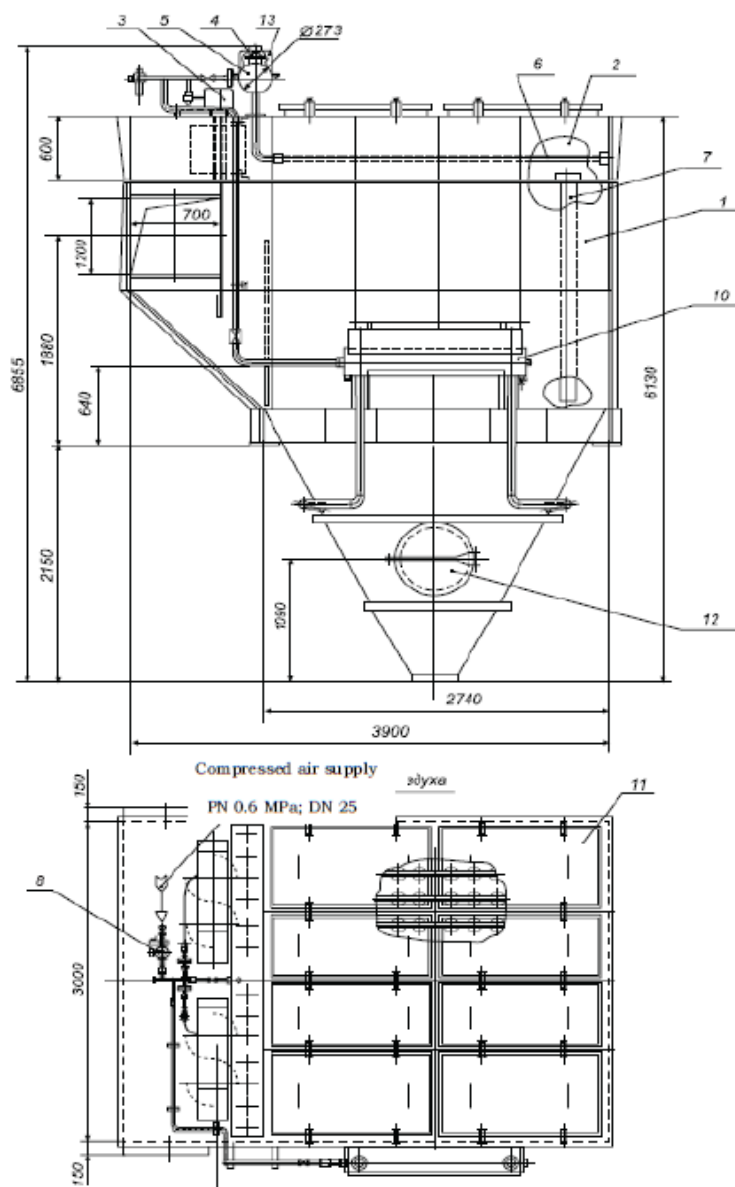
## 1 Priedas. Elektrostatinio filtro brėžinys





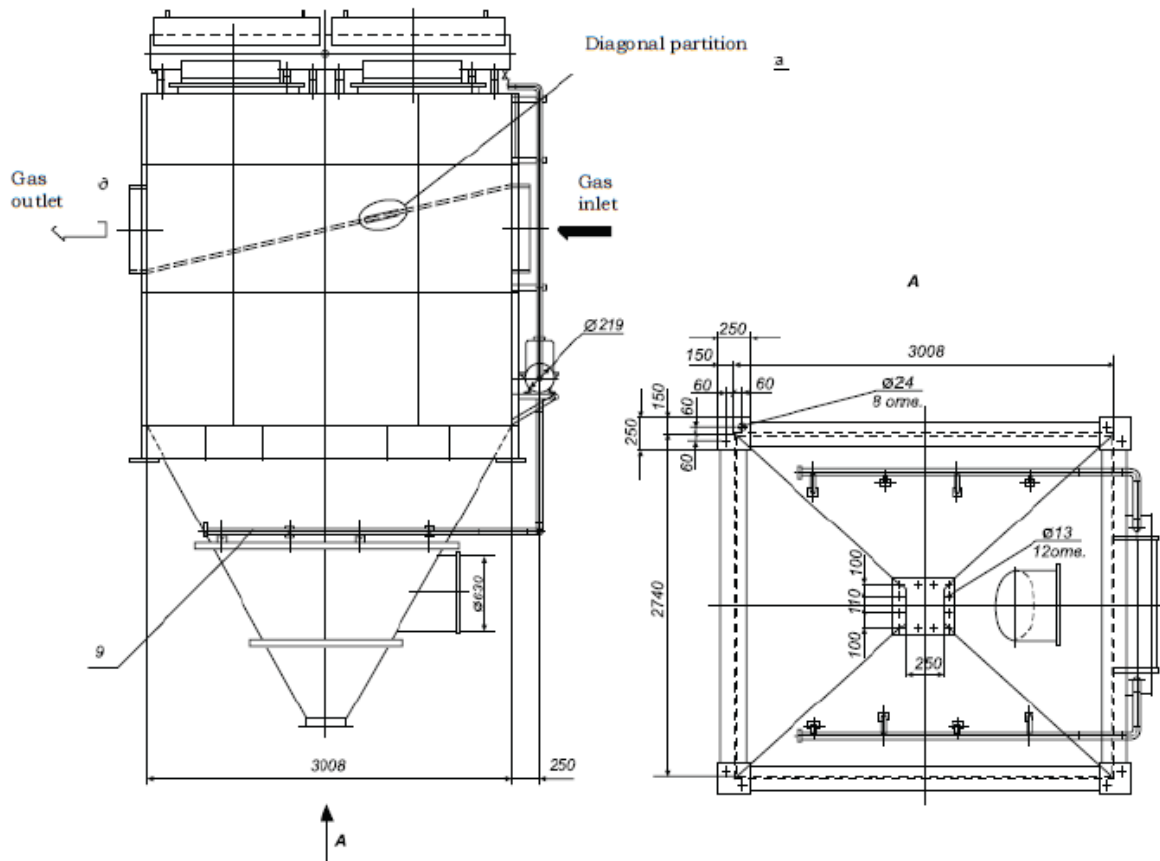
## 2 Priedas. Audeklinio filtro FRIR - 250 brėžinys

### FRIR - 250



#### Baghouse Components

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1. Housing                           | 8. Compressed air reduction system                     |
| 2. Clean gas compartment             | 9. Dust shattering system                              |
| 3. Cut-off valve                     | 10. Dust pneumatic shattering compressed air collector |
| 4. Blow-down valve                   | 11. Lid  |
| 5. Cleaning compressed air collector | 12. Hatch  |
| 6. Distributing header               | 13. Heat-insulating shell                              |
| 7. Bag filter                        |  |



### Technical Characteristics

1. Gas feed rate, m <sup>3</sup> /h	up to 23400
2. Filtering area, m <sup>2</sup>	<b>260</b>
3. Number of bag filters, pcs	<b>196</b>
4. Bag filter length, m	<b>3.14</b>
5. Baghouse mass, t	<b>10.2</b>
6. Compressed air flow rate, nm <sup>3</sup> /min, max	<b>2.7</b>

#### Note

Gas inlet-outlet depends on position of diagonal partition and to be determined by process engineer in gas treatment facility design.