



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Vaidas Mockevičius

BIOKURO KATILINĖS KIETŪJŲ DALELIŲ EMISIJŲ
ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Kęstutis Buinevičius

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Doc. dr. Egidijus Puida

**BIOKURO KATILINĖS KIETŲJŲ DALELIŲ EMISIJŲ
ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (kodas 621E30001)

Vadovas
Doc. dr. Kęstutis Buinevičius

Recenzentas
Prof. habil. dr. Stasys ŠINKŪNAS

Projektą atliko
Vaidas Mockevičius

KAUNAS, 2015

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

Tvirtinu: _____

Šilumos ir atomo energetikos
katedros vedėjas

(parašas, data)

doc. E. Puida

(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa TERMOINŽINERIJA**

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

1. Darbo tema Liet k.: Biokuro katilinės kietųjų dalelių emisijų analizė
Anglų k.: Analysis of hard particles emission from biofuel boiler.....
Patvirtinta 2015 m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. ST17-F-11-2
2. Darbo tikslas: ištirti kietųjų dalelių emisijas iš šiuolaikinių pramoninių biokuro katilų.....
.....
.....
3. Darbo struktūra: Įvadas. Kietųjų dalelių gaudymo metodų apžvalga. Kietųjų dalelių gaudymo įrenginių efektyvumo matavimai. Išcentrinų gaudymo įrenginių parametrų skaičiavimai. Išvados.
.....
.....
.....
.....
4. Reikalavimai ir sąlygos: Darbą atlikti naudojantis gamtosauginių matavimų duomenimis, skaičiavimais ir technine literatūra.....
.....
.....
.....
.....
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2015 . m. 06 mėn. 01 d.
6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.
Išduota studentui Vaidui Mockevičiui
Užduotį gavau 2014.02.02
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)
- Vadovas 2014.02.02
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Vaidas Mockevičius

(Studento vardas, pavardė)

Termoinžinerija (kodas 621E30001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Biokuro katilinės kietųjų dalelių emisijų analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 _____

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vaido Mockevičiaus** baigiamasis projektas tema „Biokuro katilinės kietųjų dalelių emisijų analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

Mockevičius, V. Analysis of hard particles emission from biofuel boiler. Master's final project / supervisor doc. Kęstutis Buinevičius; Kaunas University of technology, Faculty of Mechanical engineering and design. Department of Thermal and Nuclear energy.

Kaunas, 2015. 57 page.

SUMMARY

Master's thesis investigated 3 boiler plant burning biofuel. The aim - to explore biofuel-fired boiler particulate emissions, introduce the world's most widely used means of reducing particulate emissions and investigate dispersion of solid particles on the basis of the composition of the measured 3rd in the target boiler plant, check particulate capture devices (multicyclones) are correctly selected and compare their theoretical clean degree with a measured. It is also expected to review the Directive 2010/75 / EU, which will come into force from January 1, 2016 date, the requirements of particulate emissions.

Research work reveals particulate emissions from biofuels plants. Measure the particle dispersion composition and conducted verification battery cyclones calculations. The dependence of the degree of cleaning the boiler load changes, and the calculations of the change in certain groups capture the degree of decline in the speed of battery cyclones.

After the calculations showed that multicyclones are selected correctly on the basis of economic and theoretical calculations. The calculated theoretical particle capture degree does not differ much from multicyclones producers claimed capture degree, but differs in a number of different measured from the boiler plant. On the basis of the new directive does not meet multicyclones cleaning from particulate matter requirements, recommendations are given for existing biomass boiler owners.

Keywords: biofuel boiler plant, particle emissions, particle reducing methods, multi-cyclone.

TURINYS

ĮVADAS	7
1 NAUJAI RUOŠIAMA TERŠALŲ RIBINĖS VERTES REGLAMENTUOJANTI DIREKTYVA 2013/0442.....	9
2 KIETOSIOS DALELĖS IR JŲ SUSIDARYMAS.....	10
3 KIETŲJŲ DALELIŲ GAUDYMO BŪDAI, ĮRENGINIAI IR JŲ KLASIFIKACIJA.....	12
3.1 Inerciniai gaudytuvai (ciklonai).....	14
3.2 Elektrostatiniai filtrai	18
3.3 Rankoviniai filtrai	21
3.4 Šlapi skruberiai	23
3.5 Venturi skruberiai	24
3.6 Verdančio sluoksnio skruberiai	25
3.7 Kondensaciniai dūmų ekonomizeriai	26
4 KIETŲJŲ DALELIŲ EMISIJŲ ANALIZĖ.....	30
5 BATERINIO CIKLONO SKAIČIAVIMAS IR PARINKIMAS.....	42
6 IŠVADOS.....	56
7 LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	57
8 PRIEDAI	58
8.1 PRIEDAS. 1-osios katilinės kietųjų dalelių misijų matavimai.....	59
8.2 PRIEDAS. 2-osios katilinės kietųjų dalelių misijų matavimai.....	62
8.3 PRIEDAS. 3-osios katilinės 1-ojo katilo kietųjų dalelių misijų matavimai	66
8.4 PRIEDAS. 3-osios katilinės 1-ojo katilo kietųjų dalelių misijų matavimai	70
8.5 PRIEDAS. Publikacijų kopijos.....	72

IVADAS

Šiandien Lietuvos energetikos kryptis yra nukreipta į atsinaujinančius energijos šaltinius, tokius kaip: saulės, vėjo ir biokuro energetinius šaltinius. Ne paslaptis, jog šilumos gamybai Lietuvoje šiuo metu daugiausia statoma ir projektuojama biokuro katilinių, kurios po truputį keičia morališkai pasenusias mazuto, ar dujų katilines. Šiuo metu daugiausia atliekama 2 - 10 MW galios biokuro katilinių kapitalinių rekonstrukcijų, rečiau iki 30 MW (pavieniai objektai, didiesiems miestams, tokiems kaip Kaunas, Vilnius ar Klaipėda).

Esant biokuro katilinių bumui, jos projektuojamos ir statomos labai dideliais tempais. Nuo konkurso paskelbimo iki biokuro katilinės perdavimo užsakovui praeina 2 metai, kartais net ir mažiau. Toks biokuro katilinių bumas iššaukė įmonių gaminančių įrangą skirtą biokuro deginimui pokyčius. Įmonės siekdamos kuo greičiau patenkinti didelius įrangos poreikius pradėjo standartizuoti savo gaminius. Šis pokytis pačioms įmonėms išėjo į naudą, kadangi jos tą pačią įrangą galėjo pagaminti žymiai greičiau, taip sutrumpindamos visos katilinės rekonstravimo arba statybos laiką. Tačiau technologiškai tai nėra visiškai teisingai atlikta, kadangi kiekviena katilinė yra skirtinga, juolabiau kai atliekami pagrinde (~90% visų biokuro katilinių) rekonstrukcijos darbai, nėra teisinga taikyti vis tą pačią įrangą. To daryti negalima dėl pačio biokuro savybių. Biokuras – tai nėra vien medienos skiedros, žievė ar šakos, tai žymiai platesnė sąvoka, kuri apima ir durpes, ir šiaudus, ir įvairias grūdinių kultūrų atliekas ir netgi granulės (medienos ar šiaudų). Deginant skirtingą kurą, turėsime skirtingas emisijas. Pirmiausia, nuo kuro rūšies, jo drėgnumo, pelenų lydymosi temperatūros, deginimo būdo, oro pertekliaus koeficiento ir dar daugybės faktorių, turėsime skirtingus dūmų debitus, nors katilo galia bus ta pati. Šie skirtumai iššaukia technologinius sprendimus, kurie turi būti taikomi ir skaičiuojami kiekvienai biokuro katilinei. Būtent dėl to kartais vienodos galios katilinės turi skirtingus kurą deginančius įrenginius ir degimo produktų šalinimo bei valymo sistemas.

Projektuojant biokuro katilinės degimo produktų šalinimo ir valymo sistemą, būtina atsižvelgti į galiojančius normatyvinius dokumentus, ilgametę patirtį šioje srityje turinčių specialistų pastabas, taip pat į esamos (ar naujai statomos) katilinės išdėstymą. Lietuvoje šiuo metu galioja LAND 43-2013 normatyvas, skirtas kurą deginančių įrenginių, kurių šiluminė galia lygi arba viršija 1MW, bet nesiekia 50 MW, išmetamų teršalų ribinės vertės. Kurą deginančių įrenginių, kurių šiluminė galia lygi arba viršija 50MW, nepriklausomai nuo kuro rūšies, galioja 2001/80/EB direktyva, o nuo 2016 metų sausio 1 dienos įsigalios 2010/75/ES direktyva. Tai iššauks didžiųjų katilinių rekonstrukcijas ir milžiniškas išlaidas, o tai atsilieps šiuos vartotojams. Žinoma yra ir kitas būdas, nedarant investicijų – uždaryti morališkai pasenusias ir jau atitarnavusias katilines tokias kaip Kauno TEC'o, užleidžiant rinką nepriklausomiems šilumos tiekėjams. Tačiau ar tai būtų

geras sprendimas, nes greitai bus ruošama analogiška direktyva ir kurą deginančių įrenginių, kurių šiluminė galia lygi arba viršija 1MW, bet nesiekia 50 MW. Tai iššauks masinį dabar pastatytų biokuro katilinių rekonstrukcijos etapą. Būsimos direktyvos ribos kietųjų dalelių, NO_x, SO₂ ir CO kiekį.

Magistro baigiamajame darbe apžvelgsiu būsimos direktyvos taikymą, kai kietų dalelių išmetimai iš kietą kurą deginančių įrenginių turės neviršyti 30 mg/nm³. Taip pat įvertinsiu esamų biokuro katilinių dūmų valymo sistemas nuo kietų dalelių, jų efektyvumą, apžvelgsiu alternatyvius dūmų valymo būdus nuo kietų dalelių ir atliksiu multiciklono skaičiavimą. Palyginsiu apskaičiuotą multiciklono išvalymo laipsnį nuo kietųjų dalelių su realaus multiciklono išvalymo laipsniu ir pateiksiu rekomendacijas kaip efektyviau gaudyti kietąsias daleles, pasirengiant griežtesniems 2010/75/ES direktyvos reikalavimams.

1 NAUJAI RUOŠIAMA TERŠALŲ RIBINĖS VERTES REGLAMENTUOJANTI DIREKTYVA 2013/0442

Šiuo metu Lietuvoje didžiąją šilumos ūkio dalį sudaro katilinėse įrengti vidutinės galios katilai (nuo 1 MW iki 50 MW). Šiems vidutinės galios katilams dabar galioja LAND 43-2013 normatyvas. Šių direktyvų palyginimas kietųjų dalelių emisijų normoms pateikiamas 1-oje lentelėje:

1 lentelė. LAND 43-2013 ir Direktyvos 2013/0442 palyginimas.

Kuro rūšis	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	KD, mg/Nm ³	
		Esamas įrenginys	Naujas įrenginys
Dabartinis LAND 43-2013			
Dujinis kuras	1 ≥ MW < 50	nenormuojama	20 ⁵
Skystasis kuras	1 ≥ MW < 20	250	200
	20 ≥ MW < 50	250	100
Kietasis kuras	1 ≥ MW < 20	700	400
	20 ≥ MW < 50	500	300
⁵ Ribinės vertės laikymosi kontrolė privaloma, kai nustatoma viršyta CO ribinė vertė.			
Direktyva 2013/0442			
Dujinis kuras	1 ≥ MW < 5	—	—
	5 ≥ MW < 20	—	—
	20 ≥ MW	—	—
Dujinis kuras, išskyrus g. dujas	1 ≥ MW < 5	—	—
	5 ≥ MW < 20	—	—
	20 ≥ MW	—	—
Skystasis kuras (išskyrus mazutą)	1 ≥ MW < 5	50	50
	5 ≥ MW < 20	30	20
	20 ≥ MW	30	20
Mazutas	1 ≥ MW < 5	—	—
	5 ≥ MW < 20	Nėra duomenų	Nėra duomenų
	20 ≥ MW	Nėra duomenų	Nėra duomenų
Kieta biomasė	1 ≥ MW < 5	50 ⁽⁶⁾	20
	5 ≥ MW < 20	30 ⁽¹³⁾	20 ⁽¹¹⁾
	20 ≥ MW	30	20
Kitas kietas kuras	1 ≥ MW < 5	50 ⁽⁶⁾	20
	5 ≥ MW < 20	30 ⁽¹³⁾	20 ⁽¹¹⁾
	20 ≥ MW	20	20
⁽⁶⁾ iki 2035 01 01, 100mg/Nm ³ ;			
⁽¹¹⁾ 30 mg/Nm ³ kai katilo galia tarp 5MW ir 20MW;			
⁽¹³⁾ 50 mg/Nm ³ kai katilo galia tarp 5MW ir 20MW.			

Nors ši nauja 2013/0442 direktyva dar tik ruošinama ir kol kas nėra patvirtinta, tačiau apie preliminarinius leidžiamų išmesti teršalų kiekius jau dabar galime sakyti jog jie yra labai griežti. Ši direktyva neapsiriboja vien išmetamųjų kietųjų dalelių normomis, joje taip pat taikomi labai griežti normatyvai SO₂ ir NO_x (kol kas apie CO preliminarines normas tikslių duomenų nėra). Naujos direktyvos patvirtinimas reikštų, jog katilinėse kūrenančiose biokurą tektų statyti ne tik kietųjų

dalelių gaudymo įrenginius, taip pat gali prireikti investuoti į SO₂ bei NO_x išmetamų teršalų mažinimo technologijas.

Lyginandami su dabar Lietuvoje galiojančiu LAND 43-2013 normatyvu, matome jog naujai statomiems įrenginiams naudosiantiems kietąjį kurą arba kietą biomasę, bus taikoma 2-10 kartų griežtesnė išmetamųjų dalelių norma. Magistro baigiamajame darbe tyrinėjamiems biokuro kūrenamiems katilams būtų taikoma 50 mg/nm³ norma.

2 KIETOSIOS DALELĖS IR JŲ SUSIDARYMAS

Kietomis ar skystomis dalelėmis užterštas oras ar technologinės dujos yra dvifazės sistemos, susidedančios iš dujų ir dispersinės fazės. Tokios dvifazės sistemos vadinamos aerodispersinėmis sistemomis arba aerozoliais.

Dūmai yra dujos, užterštos kietosiomis dalelėmis, susidariusiomis susmulkinus kietas medžiagas į miltus. Dūmai – nepatvarios polidispersinės sistemos, jose kietų dalelių skersmuo svyruoja nuo 0,1 iki 50 μm ir daugiau. Taigi į dulkių sąvoką įeina ir pelenais užteršti kietojo kuro degimo produktai ir skystojo kuro degimo produktai, užteršti suodžiais .

Kietosios dalelės susidaro deginant kurą, kai stambūs angliavandeniai skyla į smulkesnes frakcijas, o šios neretai išnešamos su degimo produktais iš pakuros.

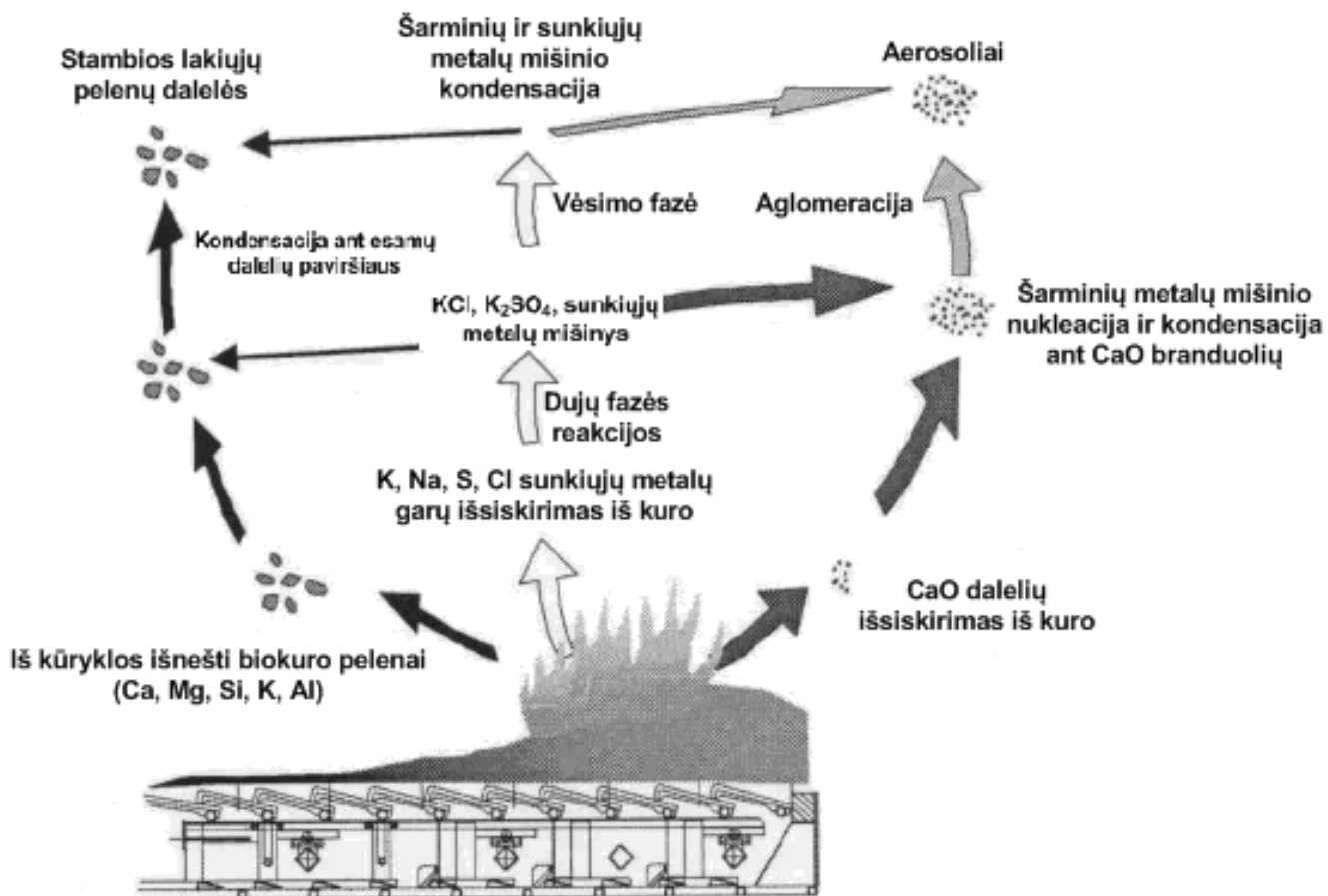
Deginant kurą susidarantių kietųjų dalelių kilmės priežastys yra dvi:

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

Nepilno degimo produktai susidaro iš nesudegusių angliavandenilių, kurie nespėjo sudegti kuro dalelėms būnant liepsnoje, t.y. greito liepsnos atšaldymo pasekmė. Kuro dalelei išlėkus iš liepsnos ribų, staigiai mažėja dalelės temperatūra ir degimo reakcijos sulėtėja arba net visai sustoja. Didžiausia nesudegusių angliavandenilių dalis susidaro, esant oro trūkumui tam tikroje liepsnos zonoje, taip pat esant pernelyg dideliame kuro lašeliui dėl blogo kuro išpurškimo. Suodžių susidarymo procesą lydi eilė įvairių reakcijų:

- kuro pirolizės;
- polimerizacijos;
- dalelių augimo;
- sudegimo.

Kuro lašeliai prie aukštų temperatūrų degdami garuoja, didelės molekulinės struktūros suyra sudarydamos aukštesnės eilės angliavandenilių junginius. Prie aukštų temperatūrų susimaišę su oru, jie pilnai sudega, pvz.: kai paduodamas antrinis oras į degimo kamerą.



1 pav. Kietųjų dalelių ir aerozolių susidarymo deginant biokurą schema

Kokso dalelės susidaro degimo proceso metu iš kure esančių nedegusių priemaišų, nesudegusios kuro anglies, kietųjų sieros junginių. Kokso dalelės yra sferinės ir porėtos, jų dydis nuo 1 iki 100 μm . Optimalių degimo sąlygų sudarymas yra pagrindinė priemonė mažinant kietųjų dalelių ir pelenų išmetimus. Tinkamai organizavus degimą, dūmuose lieka daugiausiai iš nedegusių medžiagų sudaryti pelenai.

Pelenų apnašos ir korozija yra pagrindinės problemos, kurias sukelia skysto ir kieto kuro deginimas. Vanadis ir natris, sudarantys vanadžio pentoksidą (V_2O_5) ir natrio sulfatą (Na_2SO_4), yra pagrindiniai kenksmingi junginiai, sukeltys koroziją ir sudarantys katilo vamzdynų apnašas.

Apnašų sluoksnis blogina šilumos mainus tarp degimo produktų ir šildomo vandens ir taip padidina šilumos nuostolius su dūmais. Nustatyta, kad 3 mm storio apnašos apie 10 % sumažina šilumos perdavimą šildomam vandeniui. Sieros ir natrio junginių turinčios apnašos sukeltys metalo koroziją. Dideliu greičiu tekantys degimo produktai, nešantys kietąsias daleles, taip pat sukeltys ir vamzdynų eroziją, nors tai labiau būdinga kietą kurą deginantiesiems katilams.

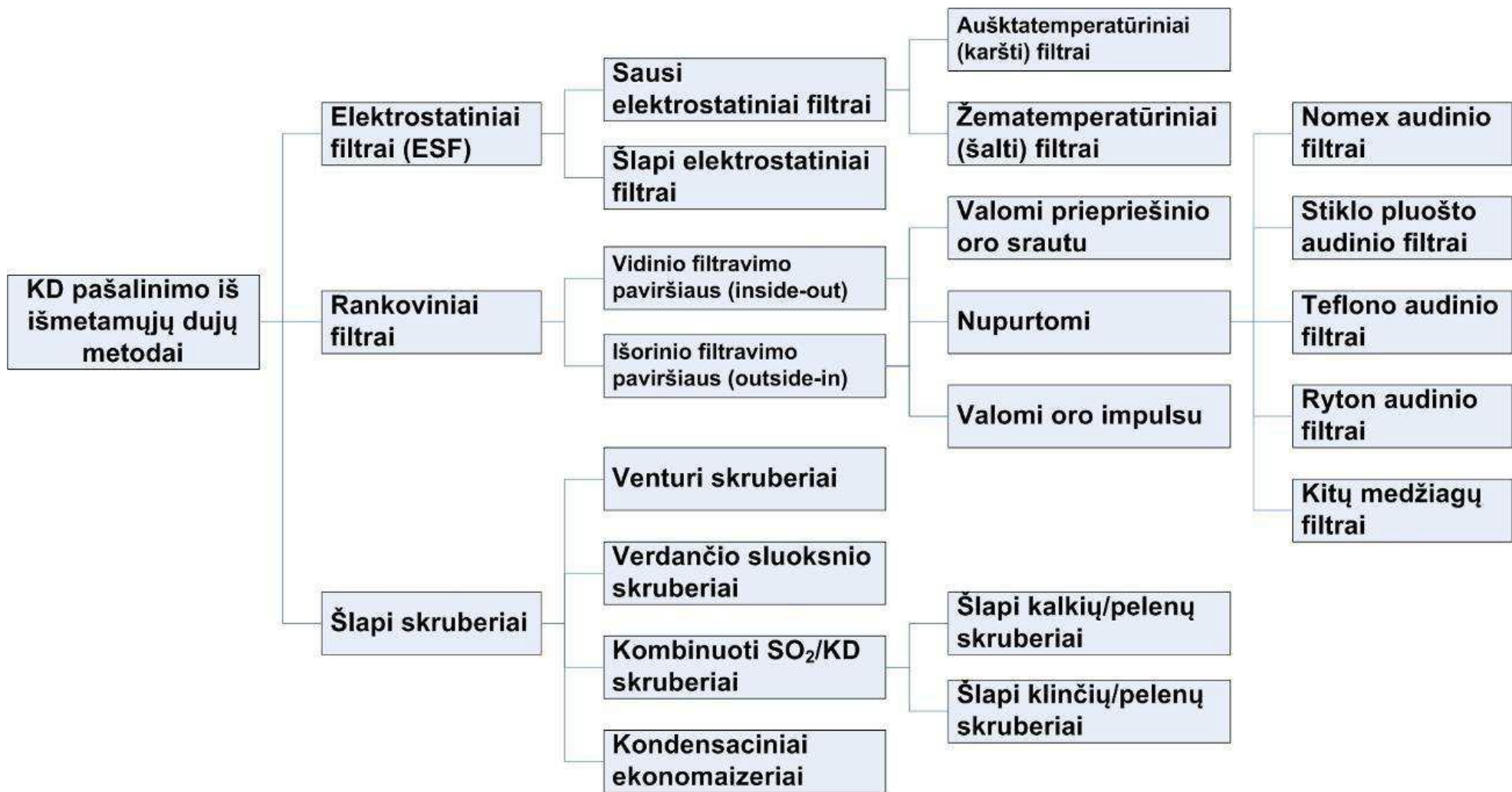
Optimalių degimo sąlygų sudarymas yra pagrindinė priemonė mažinant kietųjų dalelių ir pelenų išmetimus. Tinkamai organizavus degimą, dūmuose lieka daugiausiai iš nedegusių medžiagų sudaryti pelenai.

3 KIETŪJŲ DALELIŲ GAUDYMO BŪDAI, ĮRENGINIAI IR JŲ KLASIFIKACIJA

Praktikoje naudojama labai daug įvairios paskirties dujų valymo aparatų, kurie pagal valymo metodus skirstomi į 6 grupes, tačiau kietųjų dalelių gaudymui naudojamos tik 4 iš 6 grupių:

1. Sausi inerciniai gaudytuvai kietoms dalelėms iš dujų srauto valyti (dulkių nusodinimo kameros, žaliuzi tipo ir inerciniai gaudytuvai, ciklonai, grupiniai ir bateriniai ciklonai, dūmsiurbiai-pelenų gaudytuvai).
2. Šlapi dujų valymo nuo kietų dalelių, kartais nuo skystų bei dujinių priemaišų aparatai (skruberiai, barboteriai ir putų aparatai).
3. Dujų valymo nuo kietų dalelių filtravimo metodu aparatai (audekliniai, grudelių, pluoštiniai).
4. Elektriniai dujų valymo nuo kietų dalelių aparatai (sausieji ir šlapi elektrostatiniai filtrai).

Šios grupės atitinkamai turi atskirus pogrupius pateiktus 2 pav. Kaip matome paveiksle, nėra įtraukti inerciniai gaudytuvai. Taip yra dėl to, jog dabartinėse biokuro katilinėse jie yra kaip pirminio valymo įrenginiai ir praktiškai beveik visada statomi dėl palyginti nedidelės kainos, jie nereikalauja nuolatinės priežiūros ir sugaudo didžiausias kietąsias daleles. Paveiksle pateikiami antriniai kietųjų dalelių gaudytuvai, kurių katilinėje gali ir nebūti, jeigu išmetamų kietųjų dalelių koncentracija neviršija dabar galiojančių LAND 43-2013 normų.



2 pav. Kietųjų dalelių emisijų mažinimo įrenginių ir metodų klasifikacija

3.1 Inerciniai gaudytuvai (ciklonai)

Tai sausi gaudytuvai kietoms dalelėms iš dujų srauto išskirti. Kartais jie vadinami mechaniniais gaudytuvais. Labiausiai paplitęs šių gaudytuvų tipas yra ciklonai, kuriuose dalelės išskiriamos išcentrine jėga, atsiradusia sukantis užterštam dujų srautui.

Ciklono veikimo principas: dujos į aparatą tiekiamos tangentiškai atvamzdžiu 2 ir cilindrinėje dalyje 3 juda spirale ir leidžiasi žemyn. Ciklonuose išcentrinis pagreitis yra šimtus, o kartais ir tūkstančius kartų didesnis už sunkio jėgos pagreitį, todėl net labai mažos dalelės nesugeba judėti kartu su srautu, jos išcentrinių jėgų išmetamos į periferiją ir besisukančio srauto transportuojamos žemyn. Dėl dujų sukamojo judesio dujų slėgis centre yra mažesnis už slėgį periferijoje, todėl išvalytos dujos juda į centrą, centrine spirale kyta aukštyn ir pašalinamos per išmetimo atvamzdį 1. Kūginėje dalyje 4 pradeda veikti slėgių skirtumas, srautą spaudžianti jėga tampa didesnė už išcentrinę jėgą, todėl srautas pradeda tekėti į centrą, su savimi nešdamas daug dalelių. Tačiau srautas dar kelis kartus sukasi spirale, dalelės vėl išmetamos į periferiją, tačiau jau žemiau. Taip dalelės transportuojamos į pelenų bunkerį 5. Pagrindinė dujų masė – kūginės dalies apačioje, o dalis bunkeryje daro 180° posūkį; kietos dalelės dėl išcentrinės jėgos iškrenta, o dujos ciklono centrine dalimi, kur slėgis mažesnis, kyta aukštyn ir išmetamos. Kylantis dujų srautas pagauna ir išneša dalį kietųjų dalelių, todėl dujų išvalymo laipsnis yra 70-85 procentai.

Išvalymo laipsnį teoriškai galime apskaičiuoti naudodamiesi gaudymo parametro formule:

$$\varepsilon = \exp \left[-0,7 \cdot \frac{\rho_d \cdot d^2 \cdot u}{\mu \cdot (D - D_0)} \right] \quad (2.1)$$

Čia:

ε – per gaudytuvą išėjusių pelenų laipsnis;

ρ_d – dalelės tankis, kg/m^3 ;

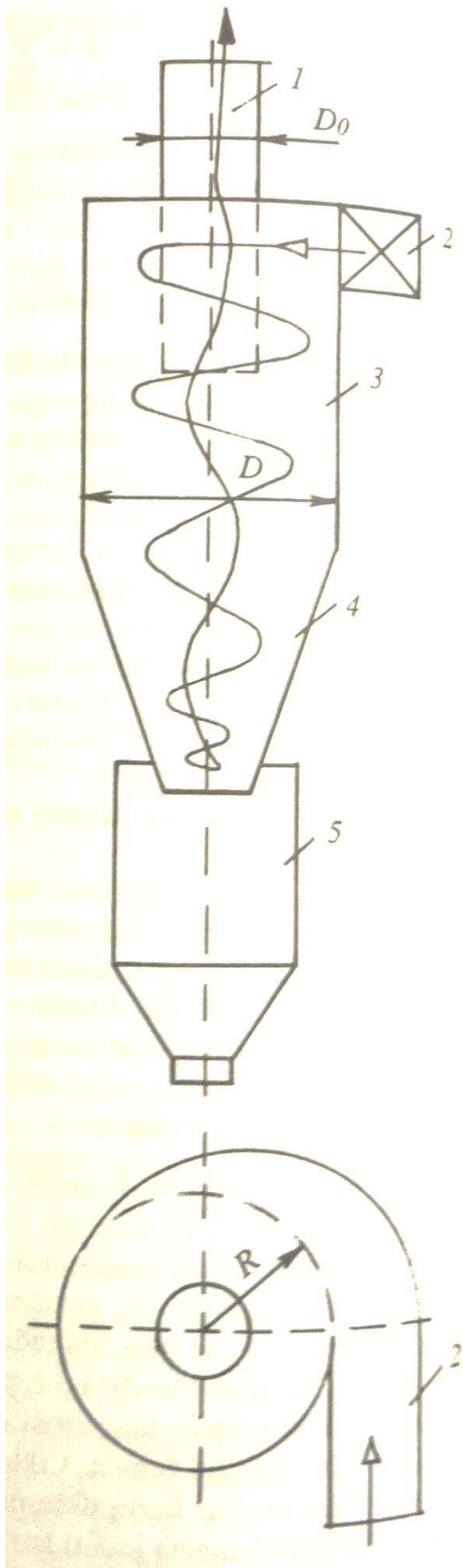
d – dalelės skersmuo, m;

u – dalelės judėjimo greitis ciklone, m/s;

μ – dinaminio klampumo koeficientas;

D – ciklono cilindrinės dalies skersmuo, m;

D_0 – ciklono vidinio vamzdžio skersmuo, m.



3 pav. Ciklono schema

Ciklonų efektyvumas didėja, kai:

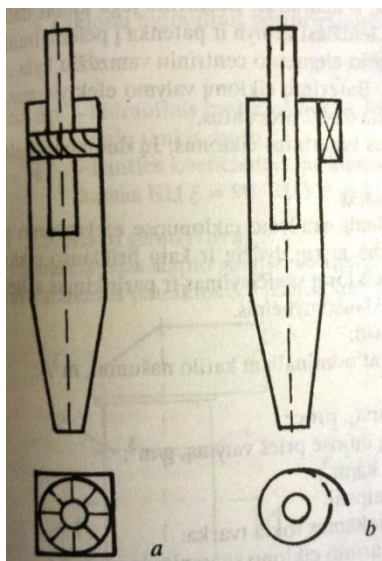
- didėja dujų greitis ciklone (u),
- esant mažesniai ciklono skersmeniui (D),
- esant stambesnėms dalelėms (d).

Todėl ciklonai yra efektyvūs gaudytuvai stambių frakcijų pelenams gaudyti. Kai frakcijos smulkesnės, gaudytuvų efektyvumas greitai mažėja (gaudymo parametro formulėje dalelių dydis yra kvadratu d^2).

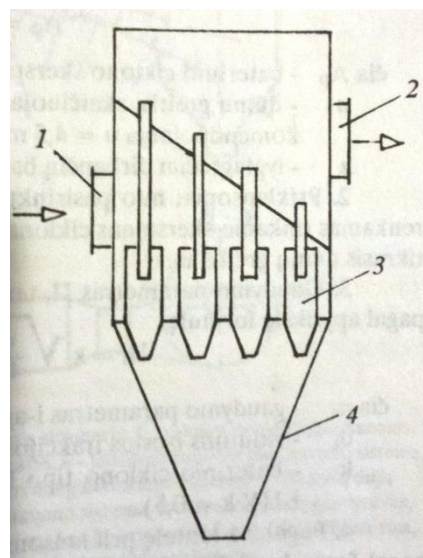
Norint pagerinti ciklonų gaudymo efektyvumą, gali būti didinamas dujų srauto greitis, tačiau tai didina ciklonų hidraulinį pasipriešinimą.

Antras būdas pagerinti ciklonų gaudymo efektyvumą – mažinti ciklono skersmenį D . Tuo tikslu buvo sukurti bateriniai ciklonai, sudaryti iš mažo skersmens elementų. Jei būtina valyti didelius dujų tūrius, baterija komponuojama iš daugelio tokių elementų.

Įvairiose pramonės šakose naudojama daug tipų baterinių ciklonų, kuriuose dujų tiekimas į cikloninius elementus organizuojamas įvairiai. Energetikoje daugiausia naudojami dviejų tipų bateriniai ciklonai: БЦ su ašiniu dujų tiekimu ir jų įsukimu 8 mentelių įsukikliu bei БЦУ bateriniai ciklonai su tangentine dujų tiekimu (4 pav.).



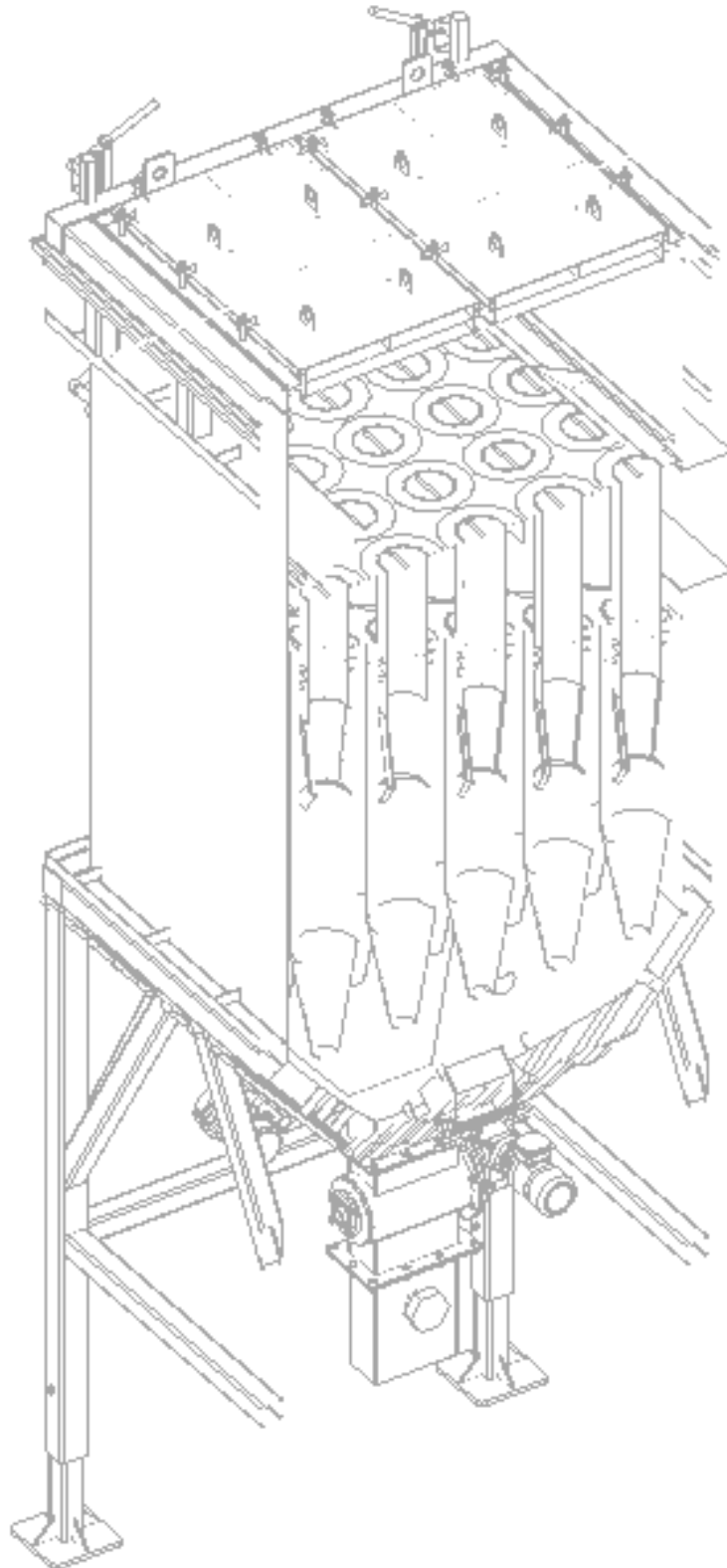
4 pav. Baterinių ciklonų elementų schemas: a – su ašiniu dujų tiekimu, b – su tangentine dujų tiekimu.



5 pav. Baterinio ciklono iš БЦ elementų schema: 1 – valomų dujų tiekimo atvamzdis, 2 – išvalytų dujų išmetimo atvamzdis, 3 – cikloninis elementas, 4 – pelenų bunkeris.

5 paveiksle parodytas baterinis ciklonas iš БЦ tipo cikloninių elementų. Valomos dujos, tiekiamos atvamzdžiu 1, patenka į cikloninius elementus 3, kur įsukiklis įsuka dujų srautą, o atsiradusi išcentrinė jėga kietas daleles išmeta į periferiją; kietos dalelės leidžiasi žemyn ir patenka į pelenų bunkerį 4, o išvalytų dujų srautas cikloninio elemento centriniu vamzdžiu kyla aukštyr ir

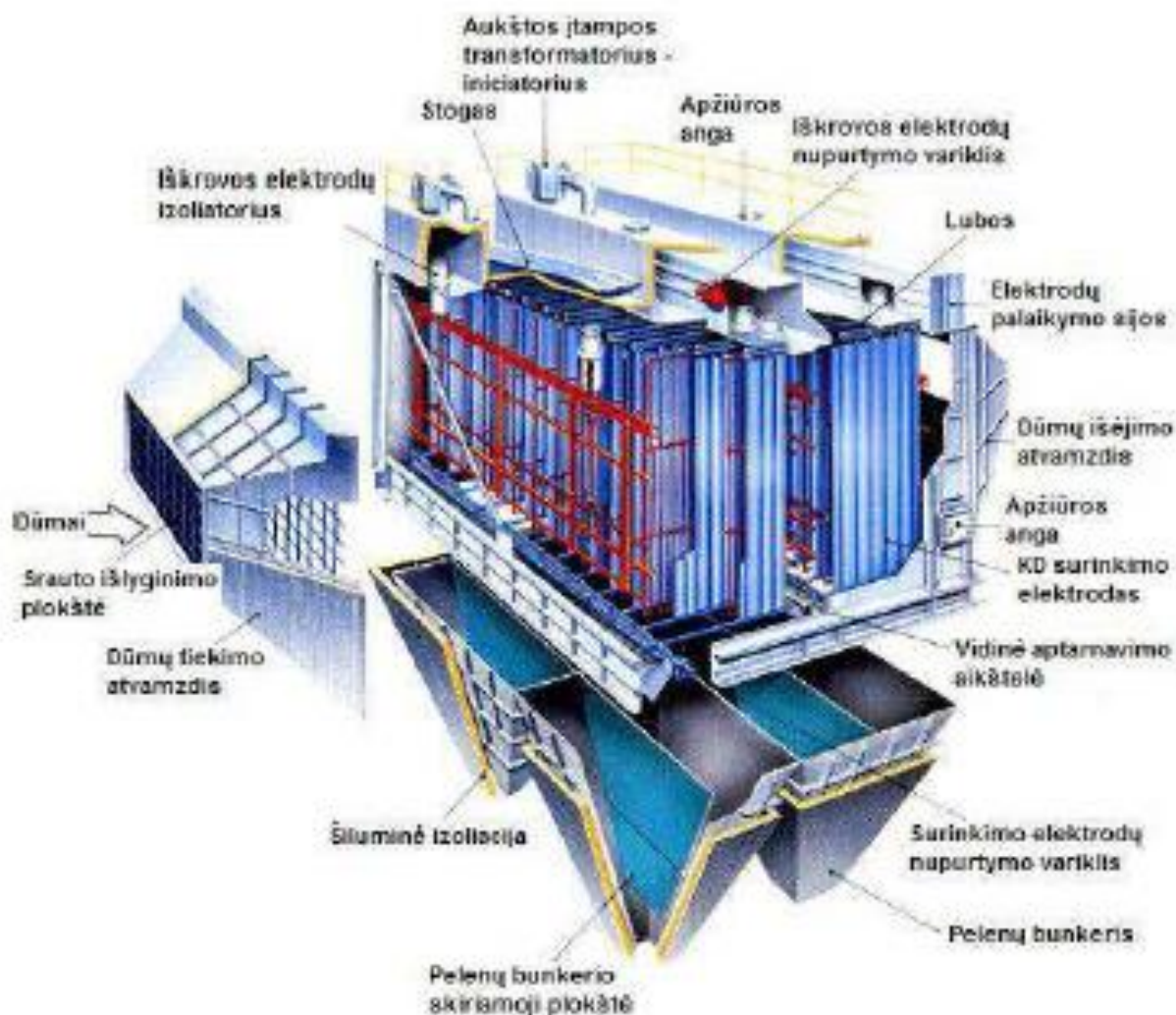
nuvedamas atvamzdžiu 2. Baterinių ciklonų valymo efektyvumas didesnis už pavienių ciklonų ir siekia 82-92 procentus. 6 paveiksle pavaizduotas šiuolaikinis baterinis ciklonas su БЦ tipo cikloniniais elementais, pelenų dozatoriumi (sklende susikaupusioms kietosioms dalelėms šalinti ir neleisti pasiurbti oro į dūmų traktą per pelenų šalinimo sistemą) bei galimybe uždaryti nereikalingas ciklono celes.



6 pav. Šiuolaikinis baterinis ciklonas su БЦ tipo cikloniniais elementais ir galimybe uždaryti nereikalingas baterijų eiles.

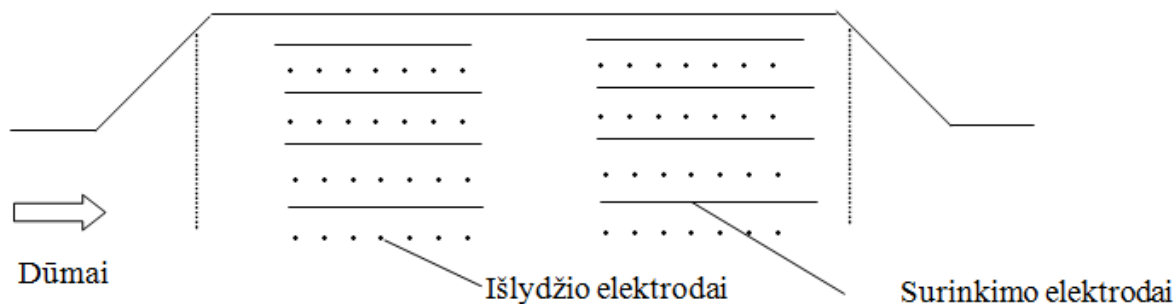
3.2 Elektrostatiniai filtrai

Elektrostatiniai filtrai yra plačiai naudojami kurą deginančiuose įrenginiuose, kadangi turi aukštą išvalymo nuo kietųjų dalelių efektyvumą ir gali dirbti dideliame temperatūros, slėgio ir užterštumo kietosiomis dalelėmis diapazone. Šiuo metu elektrostatiniai filtrai sudaro apie 90 % elektrinėse naudojamų pelenų gaudymo įrenginių.



7 pav. Dviejų laukų elektrostatinio KD filtro schema

Elektrostatiniame filtre su dūmais lekiančios dalelės yra įelektrinamos neigiamu krūviu centre esančiais elektrodais. Įelektrintos dalelės aukštos įtampos elektriniame lauke pritraukiamos prie teigiamo potencialo elektrodų. Elektros lauką tarp elektrodų sudaro aukštos įtampos (100 kV) nuolatinė srovė. Įtampos pakanka prie elektrodų esančioms dalelėms jonizuoti. Susidaręs jonų rautas nuo elektrodų iki surinkimo plokščių sudaro vadinamąją žiedinę srovę. Susikaupusios ant kolektoriaus kietosios dalelės periodiškai nupurtomos į surinkimo bunkerius.



8 pav. Dviejų laukų elektrosstatinio KD filtro elektrodų išdėstymo schema

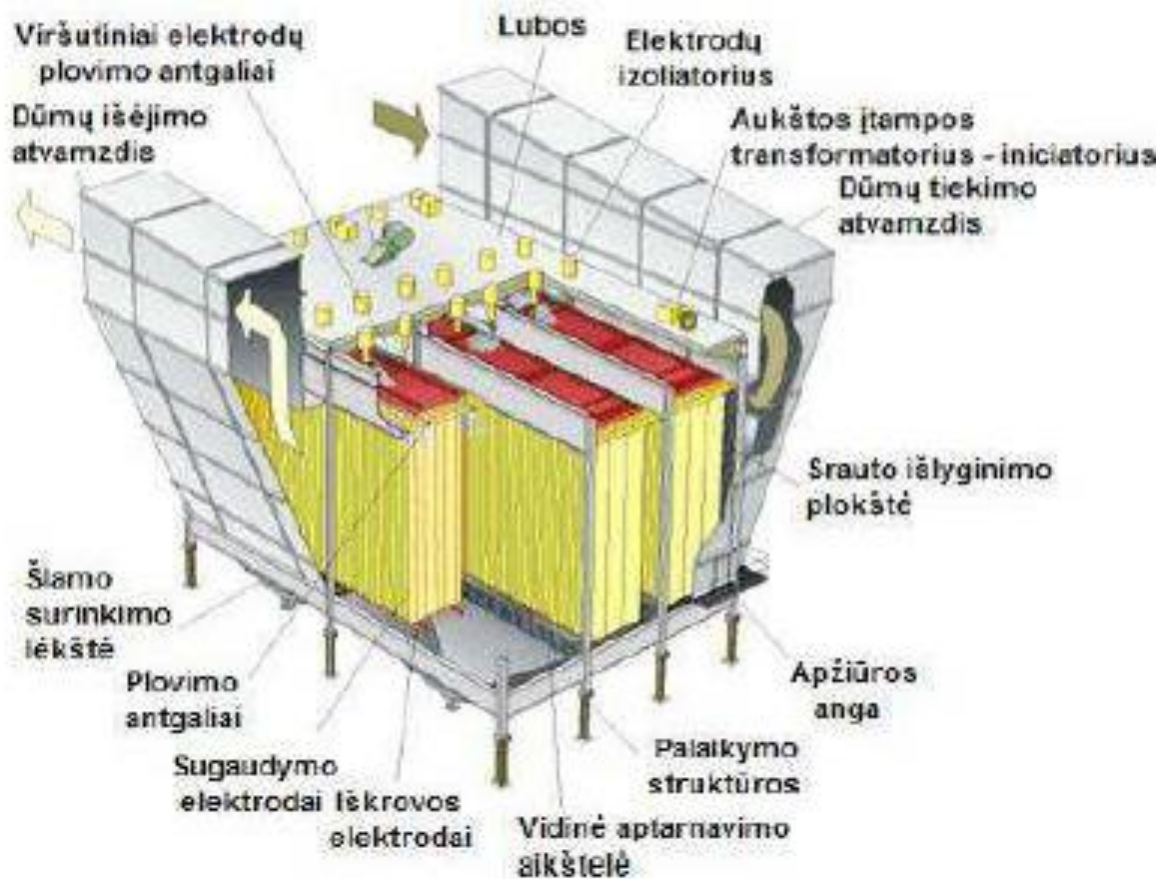
Visas elektrosstatinis filtras yra padalintas į atskiras kietųjų dalelių sugaudymo zonas – laukus, naudojami iki penkių zonų turintys elektrosstatiniai filtrai. Dalelių sugaudymo efektyvumas priklauso nuo surinkimo elektrodų ploto, dūmų debito ir dalelių nusodinimo greičio elektriniame lauke. Todėl labai svarbu tinkamai parinkti elektrodų plotą bei elektrinio lauko stiprumą pagal dūmuose esančių dalelių savybes. Šiuolaikiniuose filtruose tai pasiekama padalinant filtro tūrį į kelias sekcijas - laukus ir kiekvienai iš jų atskirai reguliuojant įtampą tarp elektrodų.

Kietųjų dalelių elektrinė varža taip pat yra svarbus parametras. Kada ji yra per maža, dalelės, pasiekusios surinkimo elektrodus, lengvai atiduoda krūvį ir gali būti vėl dūmų srauto nunešamos. Kai dalelių varža yra pernelyg didelė, ant surinkimo elektrodų susidaro izoliacinis sluoksnis, sutrikdantis žiedinį išlydį ir mažinantis dalelių surinkimo efektyvumą.

Nuo dalelių dydžio priklauso jų nusodinimo greitis elektriniame lauke. Didesnių už 1 μm dalelių nusodinimo greitis yra atvirkščiai proporcingas jų dydžiui, mažesnių už 1 μm dalelių nusodinimo greitis nebeprislauso nuo jų dydžio. Be to, didelis submikroninių dalelių kiekis prie surinkimo elektrodų padidina erdvinį elektrosstatinį krūvį ir gali trumpinti žiedinį išlydį, kuris yra būtinas normaliam filtro darbui.

Įtekančių į filtrą dūmų srautas turi būti tolygiai paskirstytas per visą skerspjūvį, kad nesusidarytų greito pratekėjimo zonos. Taisyklinga dūmų įtekėjimo vamzdžių konstrukcija ir srauto paskirstymo įtaisai padeda išlyginti srautą prieš dalelių nusodinimą. Todėl filtro efektyvumas priklauso ir nuo dūmų srauto išlyginimo įtekėjimo dūmtakyje.

Elektrosstatinio filtro efektyvumui labai svarbu yra tinkamas dulkių nupurtymas nuo elektrodų, kadangi šioje stadijoje daug dalelių gali vėl patekti į dūmų srautą, kas labai sumažintų efektyvumą. Taip pat efektyvumas labai priklauso nuo įrenginio dydžio, tačiau augant įrengimo dydžiui išauga ir jo kaina.



9 pav. Šlapio elektrostatinio KD filtro schema

Šito išvengiama šlapiame elektrostatiniame filtre, kadangi dalelės yra nuolat drėkinamos įpurškiant vandenį ar tirpalus ir nuplaunamos nuo surinkimo elektrodų. Šlapių elektrostatinių filtrų veikimo principas yra toks pat kaip ir sausų filtrų. Tokie filtrai dažniausiai naudojami kietosioms dalelėms, linkusioms lipti prie elektrodų sugaudyti. Tačiau šlapiame filtre susidaro nuotekos, kurias būtina valyti. Šie filtrai dažniausiai naudojami naujuose, dideliuose, skystą sunkųjį kurą deginančiuose įrenginiuose bei aerozolių kontrolės įrenginiuose.

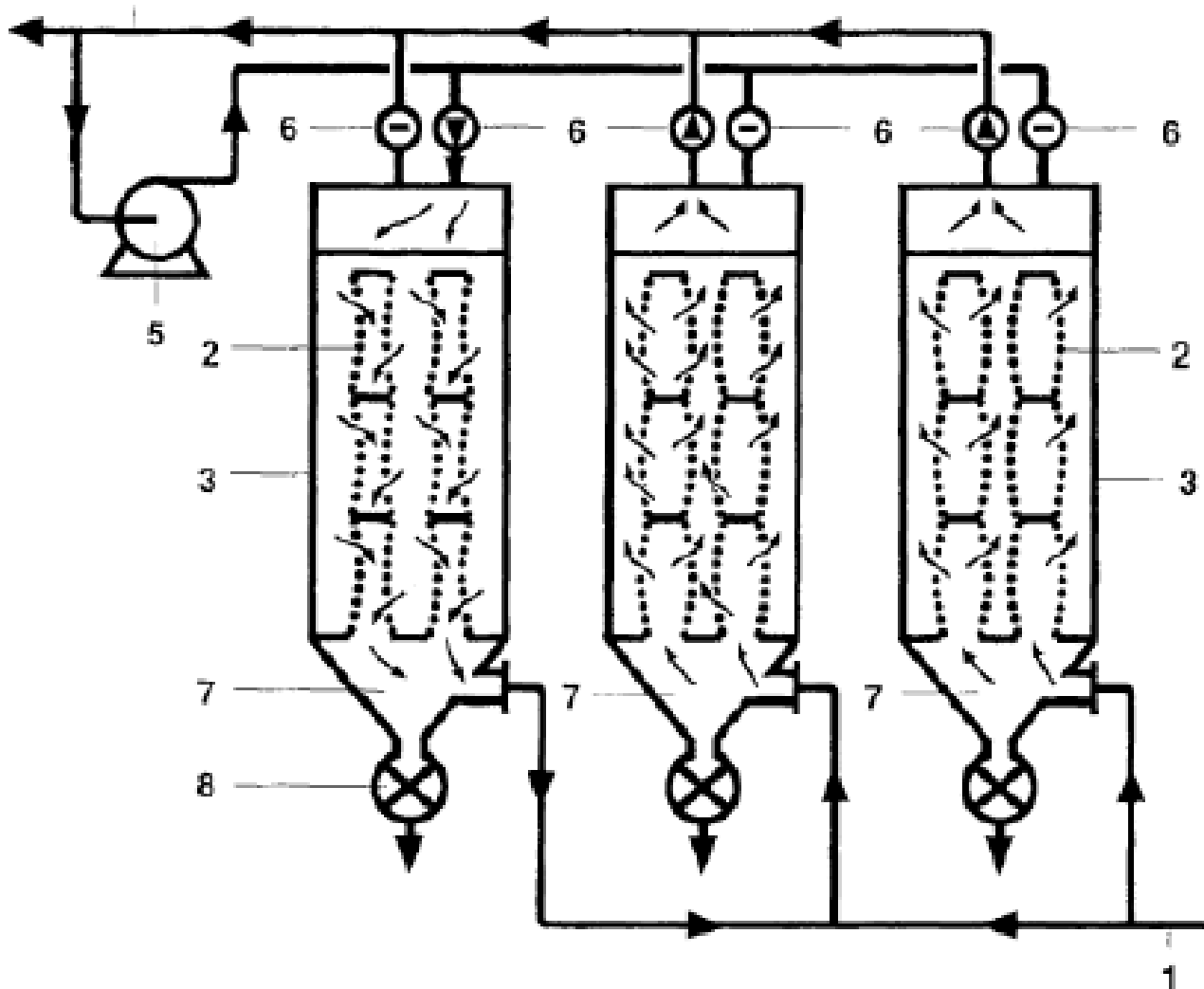
Problemų gali atsirasti, kai, deginant kurą, susidaro lakūs junginiai, padengiantys kietąsias daleles ir sumažinantys jų sugaudymo efektyvumą. Tai dažniausiai atsitinka deginant mažo kaloringumo kurą arba esant nestabiliam degimo procesui.

Elektrostatinio filtro išlaidas sudaro elektros energijos, eksploataavimo ir surinktų dulkių transportavimo bei saugojimo/utilizavimo išlaidos. Nors investicijos į elektrostatinius filtrus didesnės, negu į rankovinius filtrus, tačiau jų eksploatacija yra pigesnė o priežiūra paprastesnė.

Valymo technologija su elektrostatiniais filtrais yra plačiausiai moderniose elektrinėse naudojama technologija, pasižyminti aukštu dūmų valymo efektyvumu, nedideliais slėgio nuostoliais bei mažais eksploataciniais kaštais.

3.3 Rankoviniai filtrai

Rankoviniai filtrai yra paplitusi ir efektyvi kietųjų dalelių valymo technologija. Jie dažniausiai naudojami pramonėje ir mažesniems kurą deginantiems įrenginiams. Pastaruoju metu jų panaudojimas elektrinėse didėja ir šiuo metu sudaro apie 10 % visų instaliuotų įrenginių pelenų sugaudymui.



10 pav. Rankovinio KD filtro schema (1 – įtekėjimo dūmtakis, 2 – filtro rankovės, 3 – gaubtas, 4 – išvalytos išmetamosios dujos, 5 – prapūtimo ventiliatorius, 6 – vožtuvai, 7 – pelenų surinkimo bunkeriai, 8 – sukamieji vožtuvai)

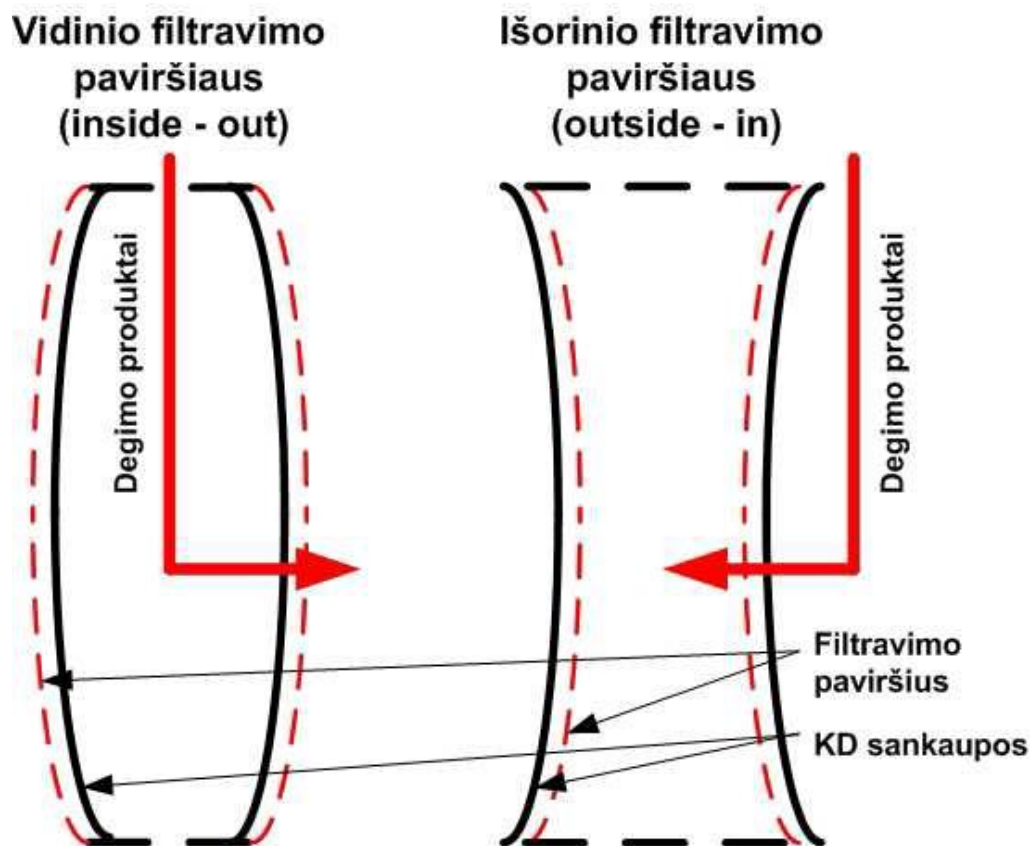
Rankovinis filtras susideda iš vienos ar daugiau sekcijų, kurias sudaro filtruojančių medžiagų rankovės. Rankoviniame filtre dūmai yra prakošiami per specialios pluoštinės medžiagos rankovės, kurios sulaiko kietąsias daleles. Rankovinių filtrų medžiaga turi būti reguliariai valoma. Pagrindinis šių filtrų privalumas - valant susikaupusias dulkes periodiškai patikrinamas filtravimo paviršius.

Pagal filtrinės medžiagos valymo būdą filtrai skirstomi į tipus:

- valomus priešpriešinio oro srautu;
- mechaniškai nupurtomus;
- valymus suspausto oro impulsu.

Pagal dūmų judėjimo filtre krypti rankoviniai filtrai skirstomi į:

- vidinio filtravimo paviršiaus (inside – out) tipo;
- išorinio filtravimo paviršiaus (outside – in) tipo.



11 pav. Degimo produktų judėjimas rankoviniuose filtruose

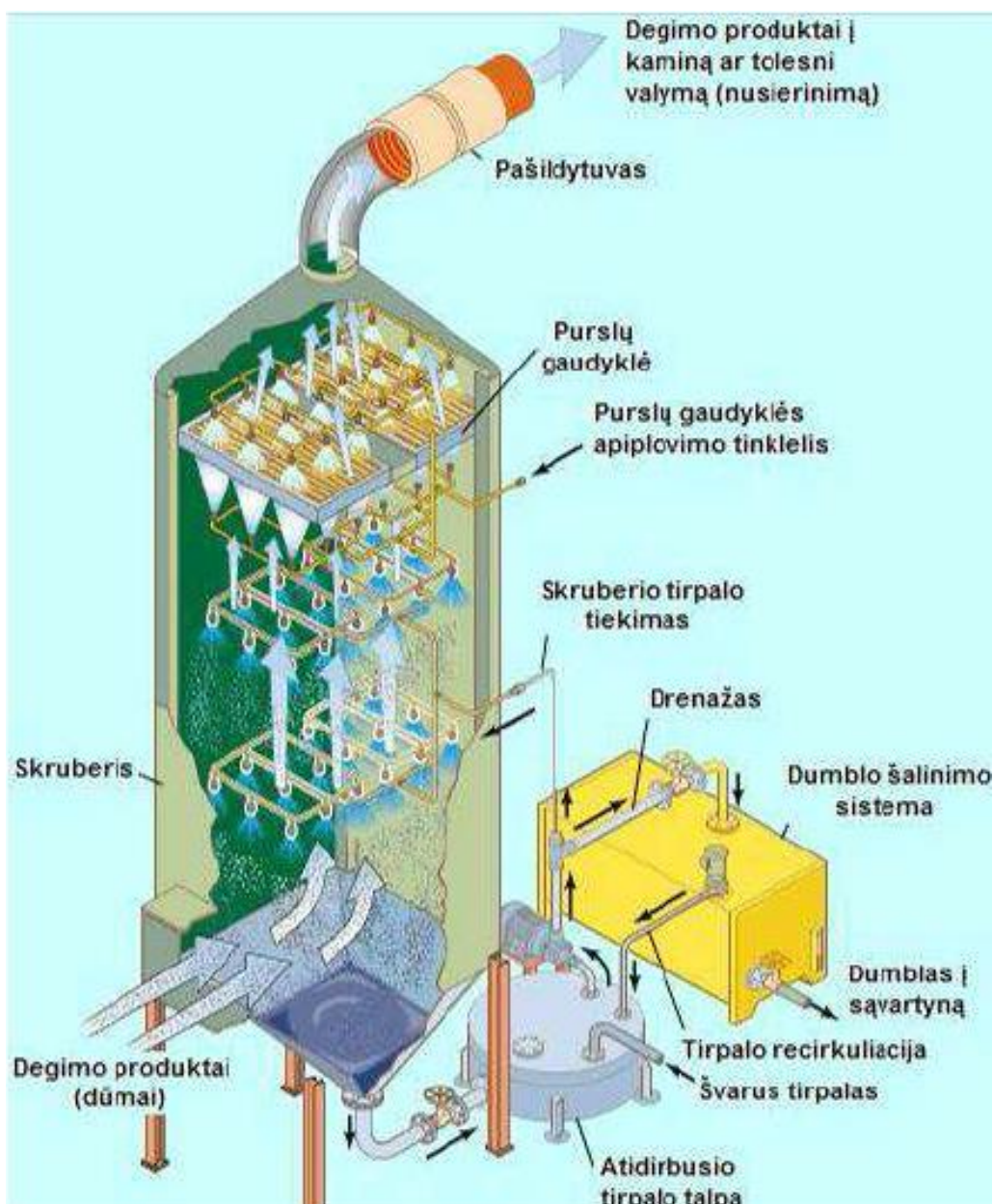
Filtruojanti medžiaga parenkama pagal gaudomų dalelių dydį, sudėtį, dūmų temperatūrą, filtrų valymo metodą, efektyvumą bei kaštus. Svarbu atsižvelgti į galimas korozijos, susidėvėjimo ir gaisro rizikas. Dėl filtruojančios medžiagos susidėvėjimo valymo efektyvumas mažėja. Dar labiau pablogėja dalelių sugaudymas prakiurus vienai ar kelioms rankovėms. Todėl rankoviniams filtrams ypač svarbi yra patikima dalelių kiekio kontrolė išeinančiuose dūmuose. Optiniai prietaisai nustato galimą dulkių emisiją bei gali nustatyti šios emisijos pikus valymo metu. Šių matavimo prietaisų integravimas į daug zonų turinčią dulkių valymo sistemą, leidžia operatyviai nustatyti pažeistą rankovinį filtrą. Gamintojai gali pasiūlyti daugybę kiekvienam atvejui tinkamų su specifinėmis atsparumo savybėmis filtravimo medžiagų. Skystą kurą deginančio įrenginio paleidimo metu gali atsirasti filtro užsikimšimo pavojus. Taip pat karšti pelenai ir karštų dujų srautas sykiu su nesudegusia anglimi gali užkimšti ir pažeisti filtrą.

Rankovinių filtrų investiciniai kaštai yra mažesni už elektrostatinų filtrų kaštus, tačiau eksploatacinės išlaidos yra nemažos, kadangi jas įtakoja filtruojančios medžiagos rūšis, filtro tipas, eksploatacija ir filtro valymas. Filtruojanti medžiaga turi būti keičiama kas 2-5 metus, o filtruojančios medžiagos pakeitimo išlaidos siekia iki 10 % investicinių kaštų.

Elektrinėse plačiausiai naudojami rankoviniai filtrai su medžiagos valymu suspausto oro impulsais.

3.4 Šlapi skruberiai

Šlapi skruberiai nėra populiarūs kaip elektrostatiniai ar rankoviniai filtrai, dažniausiai naudojami JAV, anglis kūrenančiose įrenginiuose. Jie yra pigesni už elektrostatinis ir rankovinius filtrus, tačiau jiems reikalingos didesnės eksploatacinės išlaidos (energijos sąnaudos). Dūmai šlapiame skruberyje valomi purškiant į juos vandenį ar kitą skystį. Todėl dūmai yra atšaldomi ir juos reikia vėl pašildyti prieš išleidžiant į kaminą. Dėl šios priežasties šlapius skruberius dažniausiai įjungia į kombinuoto dūmų valymo sistemas, kur toks dūmų ataušinimas yra technologiškai reikalingas arba į dūmus purškiamas tirpalas gali sugerti ir dujinius teršalus. Drėkinant dūmus smulkios kietosios dalelės susigeria į didesnius lašelius, nesunkiai nusodinamus iš dūmų. Šlapių skruberių valymo efektyvumas bendru atveju yra mažesnis už rankovinių ir elektrostatinų filtrų. Smulkių dalelių sugaudymui gaunami dideli dūmų slėgio nuostoliai. Susidariusias nuotekas reikalinga valyti.



12 pav. Šlapio kietų dalelių gaudymui skirto skruberio schema

Tačiau, šlapi skruberiai naudojami kartu su didelio slėgio ir didelės temperatūros degimo sistemomis:

- integruoto kombinuoto gazifikacijos ciklo (angl. IGCC);
- suslėgto psiaudoverdančio sluoksnio degimo (angl. PFBC).

Šiose technologijose slėgio perkritis neturi tokios didelės įtakos kaip tradicinėse degimo technologijose o degimo produktai (dūmai) po valymo pašildomi perteklinės energijos pagalba.

Dauguma šlapių skruberių naudojami lakiųjų pelenų sugaudymui anglį deginančiose elektrinėse JAV. Didžiausia šių įrengimų koncentracija yra vakarų JAV, kur deginama mažai siera akmens anglis, kurios pelenai pasižymi labai didele varža ir dėl ko elektrostatiinių filtrų naudojimas nėra ekonomiškai naudingas. Daugelis iš šlapių skruberių skirti kartu kietųjų dalelių šalinimui ir nusierinimui kaip sorbentą naudojant šarmingus lakiuosius pelenus. Kalkės ar klintys naudojamos nusierinimo efektyvumui padidinti.

Į aušinimo bokštą dozuojant amoniakinį vandenį:

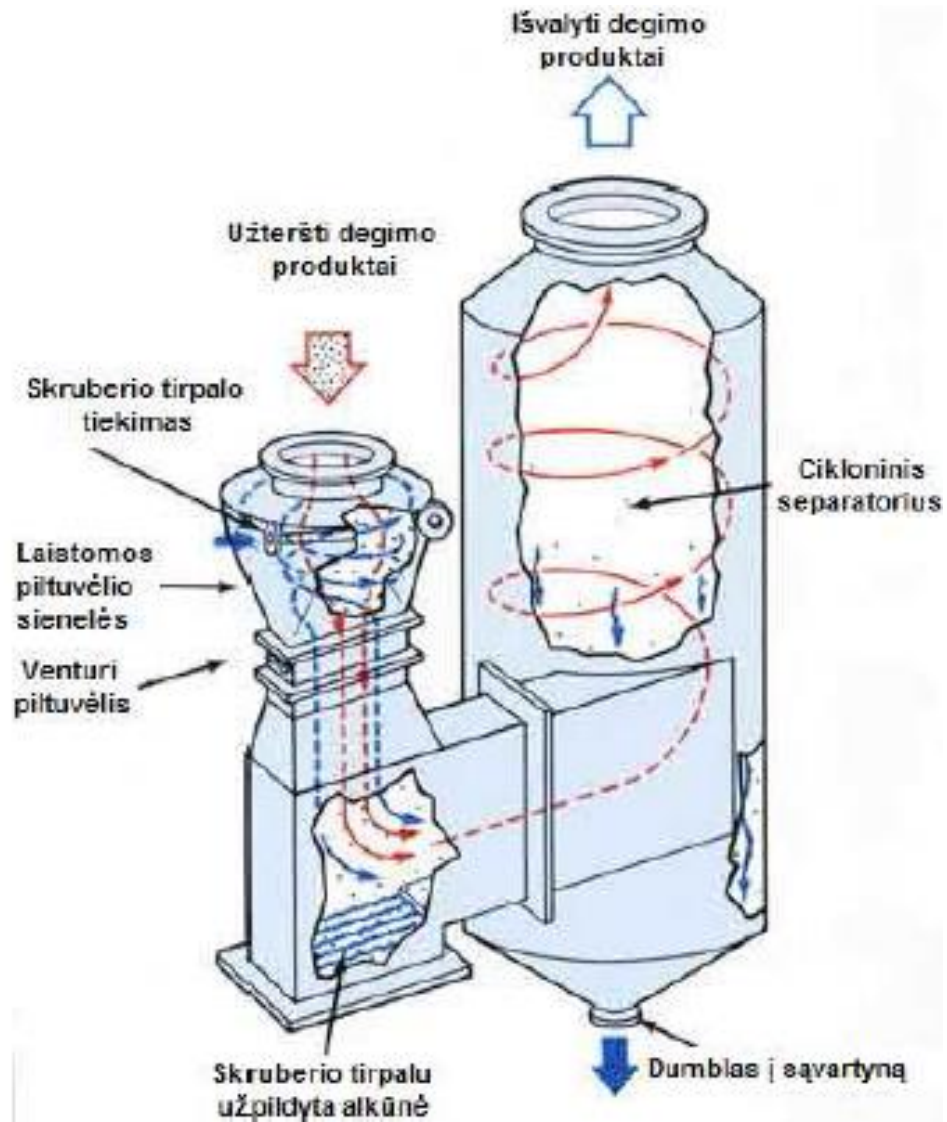
- iki 25 % visų NO_x virsta $4_3 \text{NH} \text{NO}$;
- iki 65 % visų SO_2 virsta $4_24 (\text{NH}) \text{SO}$;

Todėl skruberiai gali būti naudojami vienalaikiam NO_x , SO_2 ir KD iš dūmų šalinimui. Dažniausiai naudojami Venturi ir judančio sluoksnio (įkrovos) skruberiai.

3.5 Venturi skruberiai

Venturi skruberiai yra labiausiai paplitęs šlapių skruberių tipas pasaulyje. Venturi skruberiuose, skruberio tirpalas tolygiai įpurškiamas ties Venturi piltuvėlio žiotimis, kaip parodyta paveiksle žemiau. Kietosiomis dalelėmis užteršti dūmai ir skruberio tirpalo lašeliai patenka į Venturi piltuvėlį, kuriame atomizuojami degimo produktų greičio pagalba.

Toks degimo produktų drėkinimas leidžia skruberio tirpalo lašelių pagalba mažesnes kietąsias daleles sukoncentruoti į lašelius, kurie daug lengviau sugaudomi separatoriuje. Taip išvengiama problemų kylančių kietąsias daleles šalinant inerciniais metodais. Didelis pradinis santykinis greitis tarp skruberio tirpalo lašelių ir kietųjų dalelių yra reikalingas užtikrinti, kad surinktos dalelės liktų ant lašelių net esant didžiausiems lašelių judėjimo greičiams. Nuo kietųjų dalelių išvalyti degimo produktai ir skruberio lašeliai su sugaudytomis kietosiomis dalelėmis toliau patenka į cikloninio separatoriaus sekciją, kurioje vyksta tolesnė jų aglomeracija į didesnius lašus.

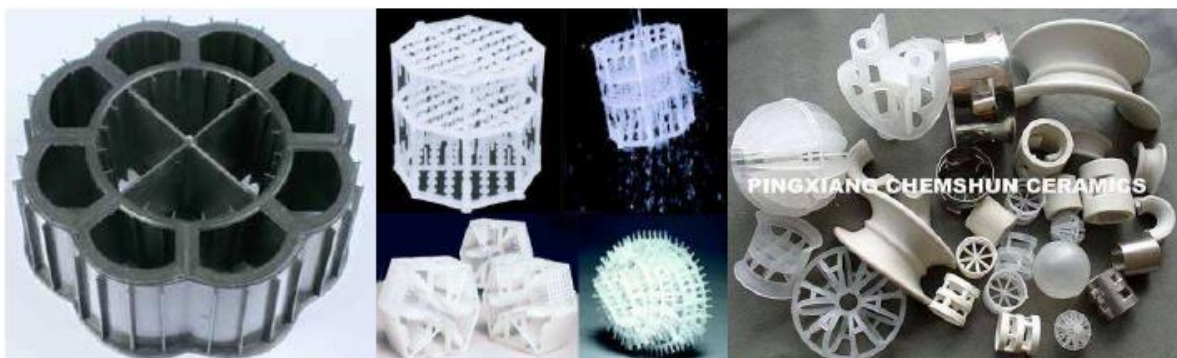


13 pav. Venturi skruberio schema

Nuo dūmų srauto greičio priklauso slėgio kritimas ir skruberio eksploatacinės savybės. Kai kuriuose skruberiuose yra galimybė keisti skruberio žiočių plotį tam, kad skruberis dirbtų pastovaus slėgio kritimo sąlygomis, nepriklausomai nuo dūmų srauto greičio.

3.6 Verdančio sluoksnio skruberiai

Judančio sluoksnio skruberiuose daleles sulaiko mažo tankio plastikiniai rutuliukai ar kitokio tipo plastiko įkrova.



14 pav. Skruberio įkrovos pavyzdžiai

Geresniam dalelių gaudymui gali būti įmontuotos kelios judančio-sluoksnio įkrovos. Dūmų srauto kryptis yra priešpriešinė skruberio tirpalo srautui. Dūmų srautas kartu su išpurškiamu skysčiu palaiko nuolat judantį sluoksnį, kas leidžia išvengti sluoksnio užsikimšimo nes dalelės besitrindamos vienos į kitą nusivalo.

Ši valymo technologija gerai dirba esant vidutinėms kietųjų dalelių koncentracijoms dūmuose, tačiau netinka didelės koncentracijos dūmų srautui valyti.

Jei pusrūgų gaudyklė neveikia tinkamai, yra galimybė, kad maži vandens lašeliai ir lakieji pelenai, gali likti dūmuose net po jų valymo. Didelis dulkių kiekis gali užkimšti skruberį taip neigiamai atsiliepti jo patikimumui ir efektyvumui.

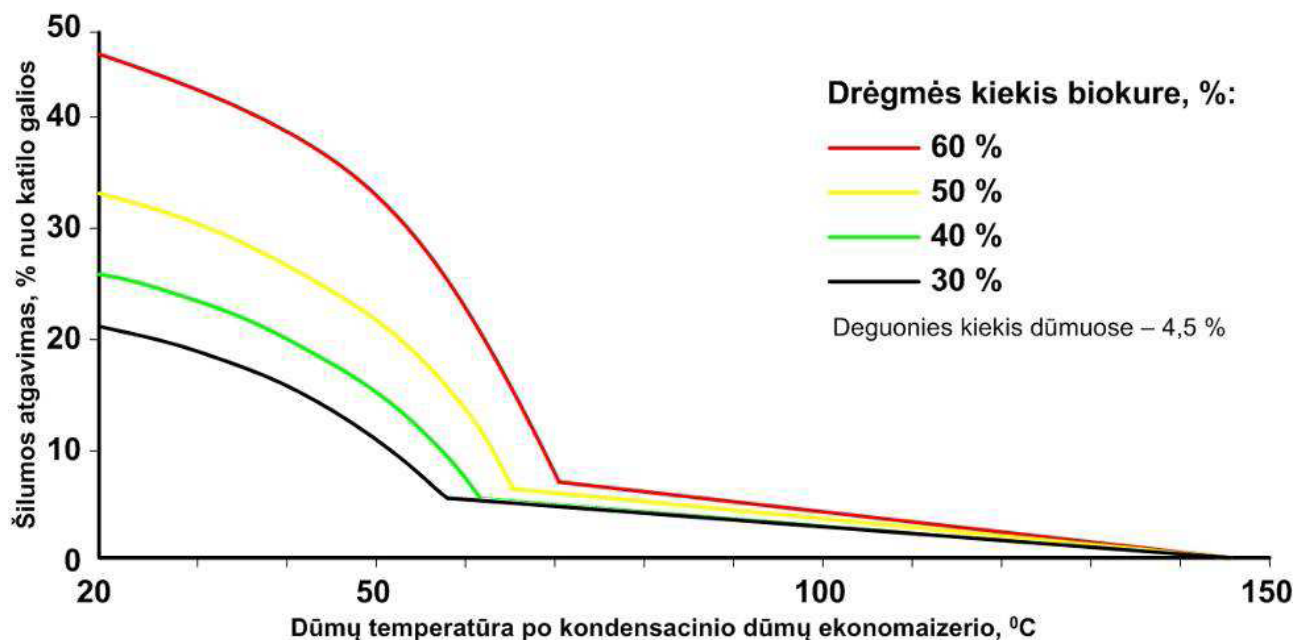
Technologija pasižymi dideliais investiciniais (reaktorius, sorbento įpurškimo sistema, nuotekų valymo įrenginiai) bei eksploataavimo kaštais (vandens suvartojimas, energijos sąnaudos).

3.7 Kondensaciniai dūmų ekonomizeriai

Kietųjų dalelių koncentracijų mažinimas gali būti derinimas su antriniu šilumos panaudojimu. Kuro degimo produktuose visada yra vandens garai. Šių vandens garų šaltiniai yra du:

- kuro degimo reakcijos, kurių metu kuro sudėtyje esantys vandenilio atomai jungiasi su deguonimi, sudarydami vandens molekules; šiuo būdu susidaranti vandens garų kiekis priklauso tik nuo vandenilio kiekio kure, t.y. deginant anglį ar mazutą – susidaro mažai vandens garų, o deginant gamtines dujas vandens garai gali siekti iki 12-14 % nuo bendro dūmų tūrio;
- kure ir degimui tiekiamame ore esanti drėgmė; deginant dujinį, skystąjį kurą, šis vandens kiekis nėra didelis, bet deginant drėgną medieną – susidaranti vandens garų kiekis yra pagrindinis.

Ataušinant dūmus iki vandens garų kondensacijos temperatūros, kondensacijos metu išsiskiria didelis energijos kiekis, kuris proporcingas vandens garų parcialiniam slėgiui ir priklauso nuo dūmų peršaldymo žemiau kondensacijos temperatūros laipsnio. Didžiausias antrinės šilumos išnaudojimo efektas gaunamas deginant daug drėgmės turinčią medieną.



15 pav. Antrinės šilumos panaudojimo efektyvumas, priklausomai nuo kuro drėgnumo ir dūmų atvėsavimo temperatūros

Aukščiau pateikiamas paveikslas parodo utilizuojamos šilumos dūmuose potencialą biomasės deginimo katiluose. Iki 48% nuo katilo šiluminio našumo reikšmės gali būti išgauta utilizuojant degimo produktų fizinę ir vandens garų kondensacijos šilumą. Svarbus faktorius yra grįžtančio iš šilumos tinklų vandens temperatūra. Kuo ši temperatūra žemesnė, tuo daugiau gali būti atvėsinti dūmai ir tuo daugiau šilumos išgaunama dėl vandens garų kondensacijos.

Plačiausiai naudojamus kondensacinius aparatus – ekonomizerius galima skirstyti į 2 pagrindines grupes:

- paviršiniai šilumokaičiai, su „sausu“ (paviršius šlampa tik dėl besikondensuojančių vandens garų) arba „šlapiu“ paviršiumi (kuriuose paviršius laistomas vandeniu siekiant pagerinti šilumos mainus tarp dūmų ir aušinančio vandens);
- skruberio tipo aparatai, kuriuose šilumos mainai vyksta tarp įpurškiamo į skruberį vandens ir dūmų, po to vanduo nukreipiamas į šilumokaitį, kur perduoda šilumą šildomam vandeniui;



16 pav. Kondensacinis dūmų ekonomizeris su kondensato valymo sistema

Skruberio tipo kondensaciniame ekonomizeryje dūmai iš pradžių tiekiami į aušintuvą (impulse scrubber), kuriame dūmai aušinami stipriomis išpurkšto vandens srovėmis. Aušintuve dūmų temperatūra sumažėja beveik iki rasos taško temperatūros. Aušintuve taip pat pašalinama dalis dūmuose esančių dulkių ir agresyvių komponentų. Vanduo į aušintuvą yra tiekiamas iš skruberio vandens talpos. Po aušintuvo, beveik rasos taško temperatūros dūmai yra tiekiami į skruberio apačią, o vanduo tiekiamas viršutinę dalį ir išpurškiamas. Naudojama priešsrovinė dūmų ir pagrindinio skruberio vandens tekėjimo schema. Kontakto tarp dūmų ir vandens pagerinimui, skruberyje yra didelio paviršiaus įkrova. Įkrova tuo pat metu veikia ir kaip šilumokaitis ir kaip dulkių separatorius. Cirkuliuojantis skruberyje vanduo yra aušinamas iš centralizuoto šilumos tiekimo tinklo grįžtančiu vandeniu, atskirame šilumokaityje. Dulkės iš cirkuliuojančio vandens išvalomos valytuve, nusodinamos apatiniame skruberio kūgyje ir pašalinamos atskiru nuosėdų siurbliu į nuosėdų surinktuvą.

Jei dūmuose yra rūgštinių medžiagų, jos gali būti neutralizuotos skruberyje. Dažniausiai neutralizavimą atlieka dūmų nešami šarminiai medienos pelenai. Deginant šiaudus ar durpes, degimo produktuose atsiranda chloro junginių, kurie sukelia aktyvią metalų koroziją (net ir nerūdijančio plieno). Tokiais atvejais skruberis gaminamas iš plastiko, atsparaus chloro korozijai.

Tiek paviršiniai „šlapio“ tipo, tiek skruberio tipo ekonomaizeriai, be antrinės šilumos panaudojimo, taip pat atlieka dūmų valymo funkciją. Kai kurie skruberio tipo kondensacinių ekonomaizerių gamintojai nurodo, kad galima šio tipo aparatuose pasiekti:

- kietųjų dalelių pašalinimo efektyvumą 60-90 %;
- SO_x pašalinimo efektyvumą apie 90 % (tik dozuojant papildomus priedus);
- HCl ir NH₃ pašalinimo efektyvumą apie 90 %.

Lietuvoje sukaupta pakankama patirtis įdiegiant paviršinio tipo kondensacinius ekonomaizerius ir yra kietųjų dalelių koncentracijų matavimų duomenų. Medienos atliekas deginančių katilų dūmuose kietųjų dalelių koncentracija už katilo būna nuo 600 iki 3500 mg/m³. Degimo produktai daugumoje atvejų po katilo nukreipiami į ciklonus arba multiciklonus, kuriuose sulaikoma nuo 80 iki 90 % kietųjų dalelių. Dažniausiai išmatuota kietųjų dalelių koncentracija po cikloninio įrenginio, t.y. prieš „šlapių“ vamzdžių tipo kondensacinį ekonomaizerį – nuo 100 iki 400 mg/m³, priklausomai nuo katilo ir ciklono tipo. Kietųjų dalelių koncentracija po kondensacinio ekonomaizerio sumažėja dar labiau ir kontaktinio ekonomaizerio – kaip kietųjų dalelių sulaikymo įrenginio- efektyvumas daugeliu atveju siekė 83 - 92%, t.y. daugeliu atveju kietųjų dalelių koncentracija buvo nuo 20 iki 70 mg/m³.

Firmos „Condens“ atlikti tyrimai rodo, kad skruberio tipo ekonomaizeryje kietųjų dalelių sugaudymo efektyvumas priklauso nuo dalelių dydžio. Dalelės, kurių dydis viršija 25 μm, sugaudoamos 100%, o mažesnių kaip 5 μm sugaudymo efektyvumas mažesnis ir neviršija 70%. Kondensaciniame ekonomaizeryje, plaunamame vandens srautu (tiek skruberio tipo, tiek „šlapių“ vamzdžių tipo), kietųjų dalelių sulaikoma didesnė dūmų nešamų kietųjų dalelių dalis, negu rodo matavimai. Tačiau, pačiuose kondensaciniuose ekonomaizeriuose pradeda generuotis kietosios dalelės. Ekonomizerio paviršių drėkinančiame ir uždaru kontūru cirkuliuojančiame vandenyje yra ištirpusių mineralinių medžiagų. Išpurškus šį vandenį ekonomizerio viduje, smulkiausi lašeliai išgaruoja ir lašelio mineralinės medžiagos yra išnešamos kartu su dūmais, taip padidindamos kietųjų dalelių koncentraciją.

Sieringo skysto kuro deginimo atveju, kondensacinis ekonomizeris taip pat galėtų būti efektyvi dūmų valymo nuo kietųjų dalelių priemonė, tačiau mažiau efektyvi, negu medienos kuro deginimo atveju. Taip yra todėl, kad skysto kuro dūmuose kietosios dalelės yra mažesnės bei taisyklingos apvalios formos, nei deginant medieną ir jų sugaudymo laipsnis bus mažesnis. Be to, atsiranda papildoma problema - cirkuliuojančiame vandenyje tirpsta sieros junginiai, sudarydami koroziją sukeliančias rūgštis. Šias rūgštis galima neutralizuoti šarminio tirpalo įvedimu, tačiau

rezultate susidaro druskos, kurias reikia pašalinti iš sistemos. Dėl to kondensacinis ekonomizeris tampa žymiai sudėtingesnis ir brangesnis. Iš esmės, sieringo kuro atveju, kondensacinis ekonomizeris tampa dūmų nusierinimo įrenginiu, su visu pagalbinių įrenginių ūkiu, todėl kondensaciniai ekonomizeriai tik antrinės šilumos utilizavimui ir kietų dalelių gaudymui nenaudojami.

4 KIETŪJŲ DALELIŲ EMISIJŲ ANALIZĖ

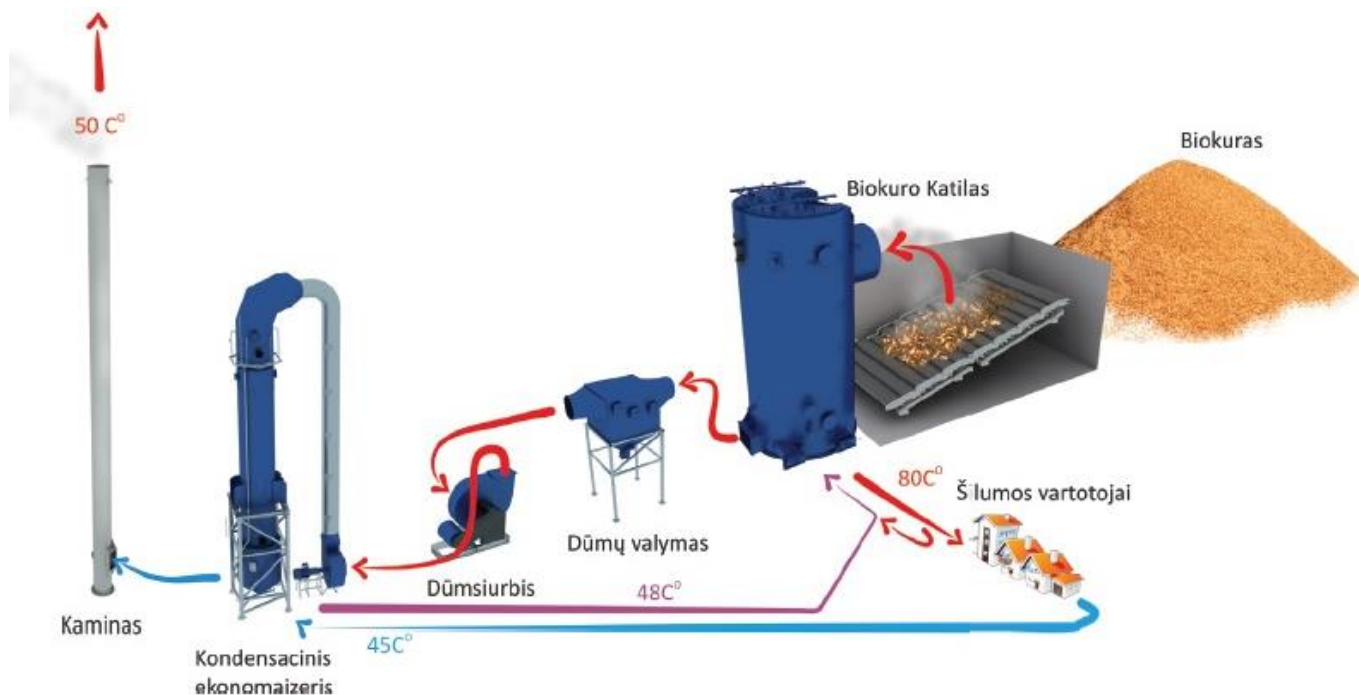
Teoriškai visi ankščiau išvardinti įrenginiai yra puikūs kietųjų dalelių mažinimo sprendimai, tačiau reikia nepamiršti ir ekonominio efekto, kuris mažiau išsivysčiusiose šalyse kurios tik pradeda diegti biokuro deginimo ir degimo produktų valymo technologijas yra be galo svarbus.

Lietuvoje dažniausia būtent įrenginių kaina ir nulemia tai kokie jie bus montuojami katilinėje, jeigu jie tenkina galiojančias kietųjų dalelių, SO₂, CO ir NO_x ribines vertes. Tik nedažnas katilinės vadovas arba katilinę valdanti organizacija nori griežtesnių išmetamų teršalų koncentracijų nei jos yra dabar. Tačiau dar niekas nesiryžta statyti pažangiausių kietų dalelių valymo įrenginių, kurie užtikrintų <30 mg/m³ išmetimus, taip užbėgant už akių planuojamai įvesti naujai direktyvai kuri palies didžiąją dalį Lietuvos energetinių objektų.

Pastaba: AB „Šiaulių Energija“ jau turi pasistačiusi vieną pirmųjų elektrostatių filtrų Lietuvoje, kai filtras normaliai funkcionuoja, jo išvalymo laipsnis atitinka laukiamą normatyvą.

UAB „Vilniaus energija“ vienoje iš savo katilinių taip pat turi pasistačiusi dvigubą elektrostatių filtrą (2 elektrostatiniai filtrai dūmų trakte yra sujungti nuosekliai), kuris normaliomis sąlygomis pasiekia aukštą išvalymo laipsnį ir paprastai yra naudojama tik viena dvigubo filtro pakopa.

Šiuo metu Lietuvoje apstu biokuro katilinių, su „standartine“ dūmų valymo schema nuo kietųjų dalelių, kai degimo produktai iš katilo pereina pirminį dūmų valymą bateriniame ciklone (multiciklone), kuriame sugaunamos didžiausios frakcijos kietosios dalelės. Po to degimo produktai eina į dūmsiurbį, iš kurio į kondensacinį ekonomizerį, kur vyksta antrinis valymas nuo kietųjų dalelių išpurškiant vandenį į degimo produktus, taip juos atvėsinant bei sugaudant didžiąją dalį likusių po pirminio išvalymo kietųjų dalelių.



17 pav. Principinė biokuro katilinės degimo produktų šalinimo schema

Būten pagal tokią arba panašią schema šiu metu Lietuvoje stovė daugelis biokuro katilinių, žinoma, priklausomai nuo poreikio, katilinės shemos gali skirtis, gali įsiterpti sauso tipo ekonomizaizeriai, gali nebūti ondensacinio ekonomizaizerio ir t.t. variacijų tikrai yra daugybė, tačiau technologiškai ir praktiškai viena tinkamiausių ir geriausių shemų yra 3.1 paveiksle parodyta schema.

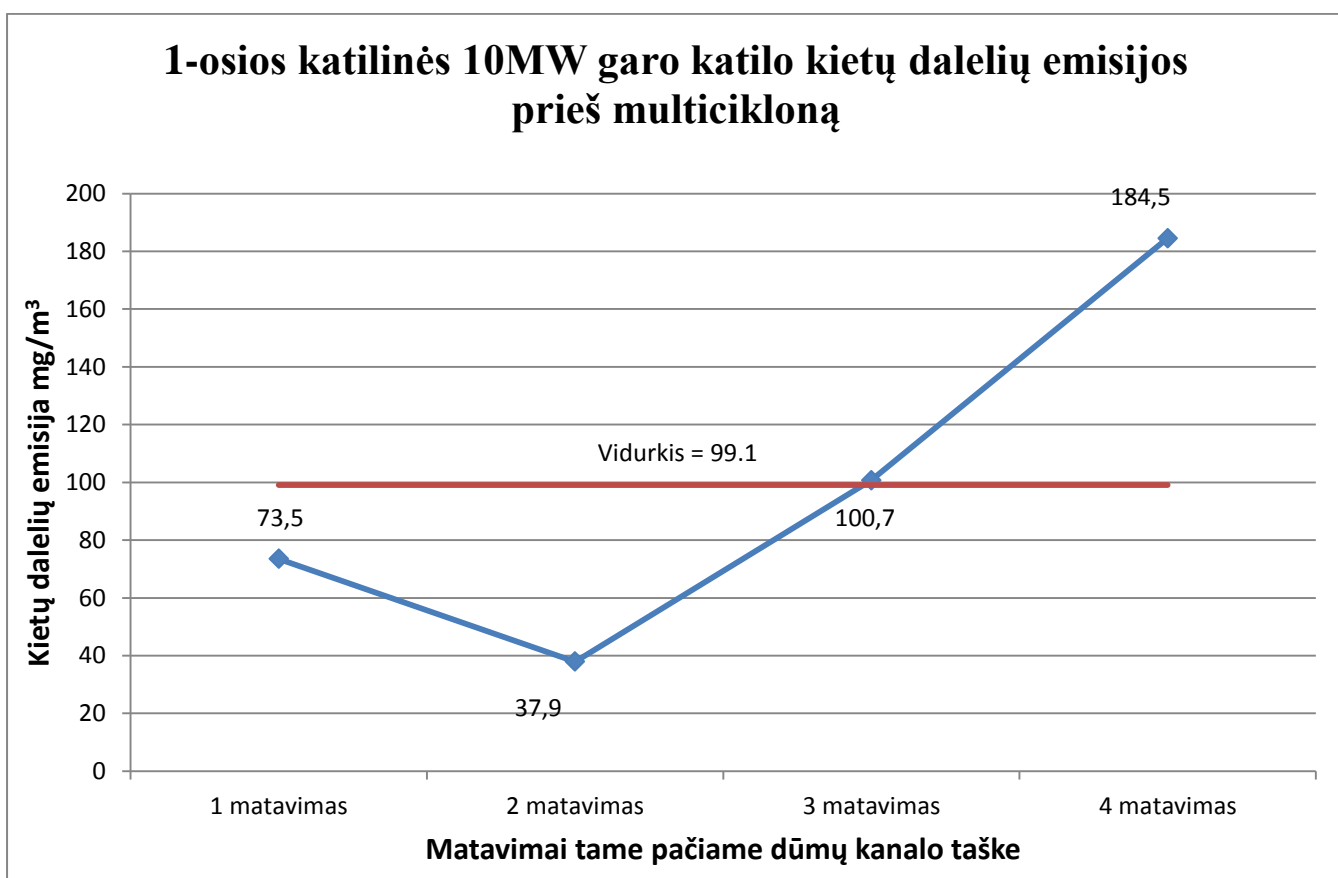
Kietųjų dalelių emisijos tyrimams imsime katilines, kurių principinės shemos atitinka arba beveik atitinka aukščiau pateiktą schema. Emisijos tyrimams naudosime 3 skirtingų katilinių, kuriose įrengti biokurą deginantys įrenginiai kietųjų dalelių emisijų matavimo duomenis [1 priedas]. Trumpai apie katilines, kuriose buvo atliekami matavimai:

- 1-oje katilinėje sumontuotas 10 MW garo katilas su sauso tipo ekonomizaizeriu, multiciklonu ir kondensaciniu ekonomizaizeriu. Naudojamas kuras: įvairus, kuro sandėlys sudarytas iš 3 atskirų zonų, kuriose gali būti skirtingas kuras, hidraulinių grindų pagalba, pritaikius algoritmus gali būti gaunamas norimas mišinys iš 3 skirtingų biokuro rūšių. Matavimo metu buvo deginamos medienos skiedros.
- 2-oje katilinėje sumontuoti 3 katilai, tačiau matavimams naudosime tik vieno katilo duomenis. Katilas Nr. 2, vandens šildymo katilas, jo galia 5MW komplektuotas su multiciklonu ir bendru kondensaciniu ekonomizaizeriu, kuris skirtas visų 3 katilų degimo produktams ataušinti iki kondensacijos temperatūros; bandymo metu naudojamas kuras - medienos skiedros.
 - 3 oje katilinėje sumontuoti 2 vandens šildymo katilai. Abu vandens šildymo katilai vienodi, 8MW nominalios galios, vertikalaus išpildymo, 3 dūmų ėjų. Po kiekvieno katilo

pastatyti naujos kartos multiciklonai (su reguliuojamu baterijų skaičiumi). Po pirmojo katilinė esančio katilo BK1 pastatymas multiciklonas su reguliuojamu baterinių ciklonų skaičiumi (bateriniai ciklonai su kūgiais), o po antrojo katilinėje esančio katilo BK2 pastatytas multiciklonas su reguliuojamu baterinių ciklonų skaičiumi (bateriniai ciklonai su kūgiais ir difuzoriais). Po abiejų katilų multiciklonų, dūmai nukreipiami į kondensacinį ekonomaizerį skirtą abiems katilams. Skaičiavimams naudosime abiejų katilų kietų dalelių emisijų duomenis. Matavimo metu katilinėje naudojamas kuras – medienos skiedros.

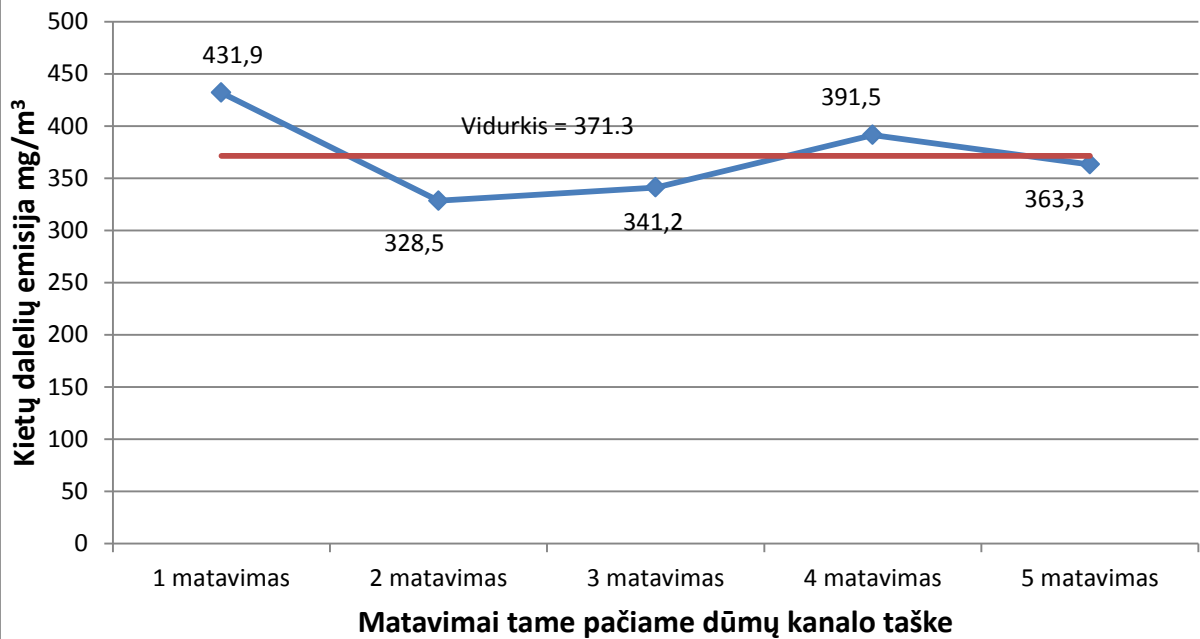
Pagal matavimų duomenis galime palyginti visų 3 katilinių (4 dūmų valymo sistemų) įrenginių gaudančių kietąsias daleles efektyvumus:

Kietųjų dalelių emisijos prieš multiciklonus palyginimas pateiktas 18, 19, 20 ir 21 paveiksluose:



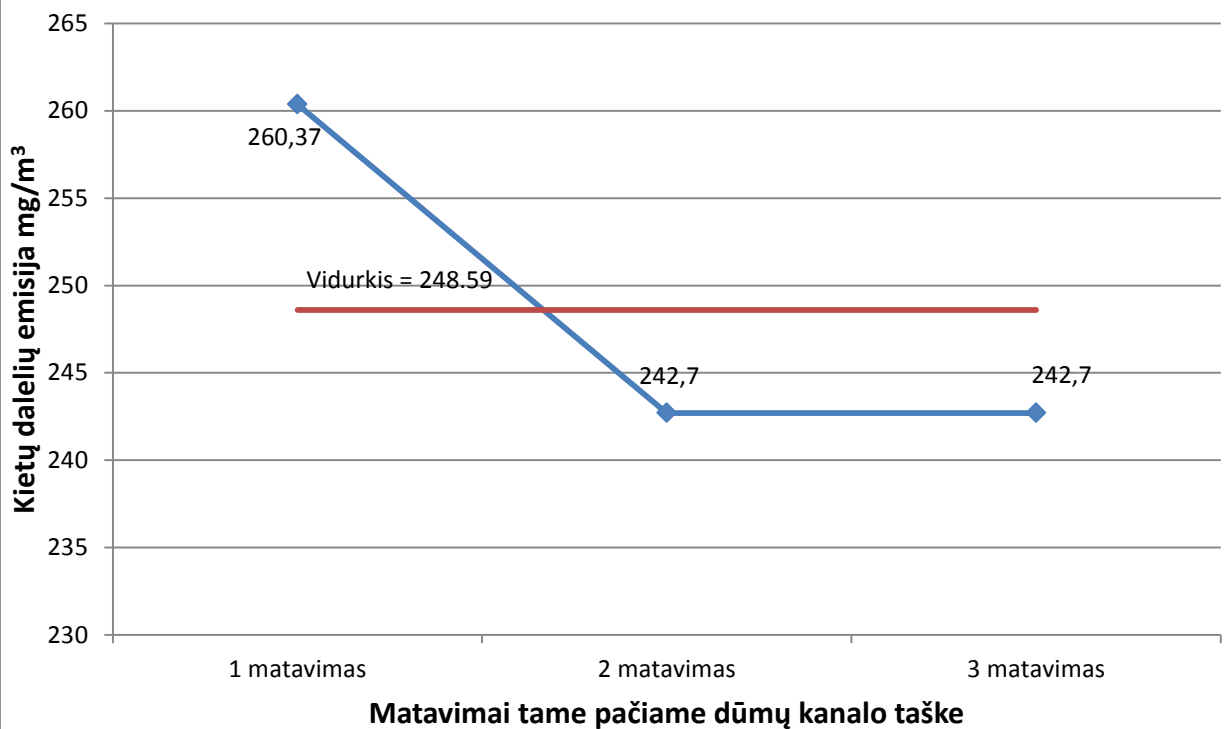
18 pav. 1-osios katilinės 10MW garo katilo kietų dalelių emisijos prieš baterinį cikloną.

2-osios katilinės katilo Nr. 2 kietų dalelių emisijos prieš multicikloną

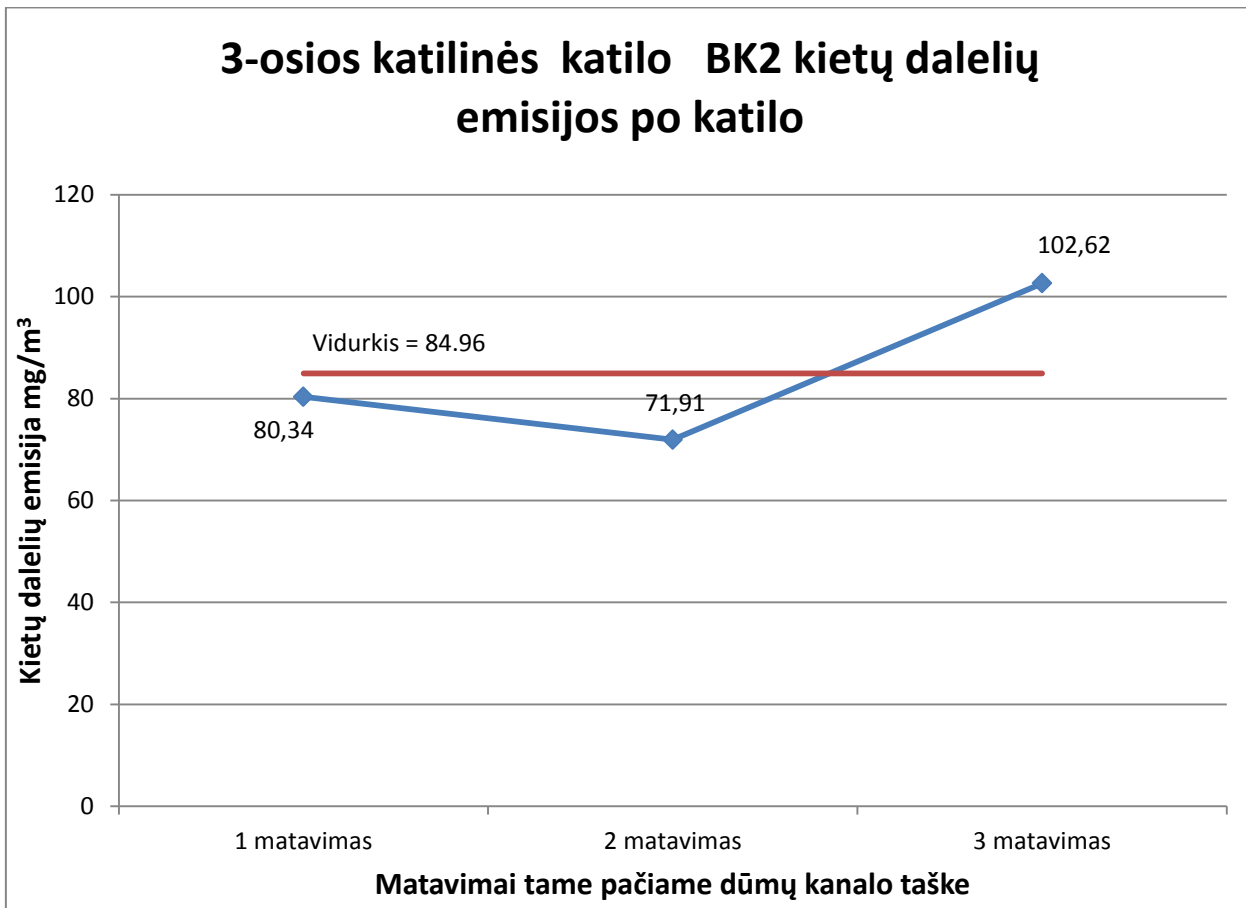


19 pav. 2-osios katilinės katilo Nr. 2 kietų dalelių emisija prieš baterinį cikloną

3-osios katilinės katilo BK1 kietų dalelių emisijos po katilo

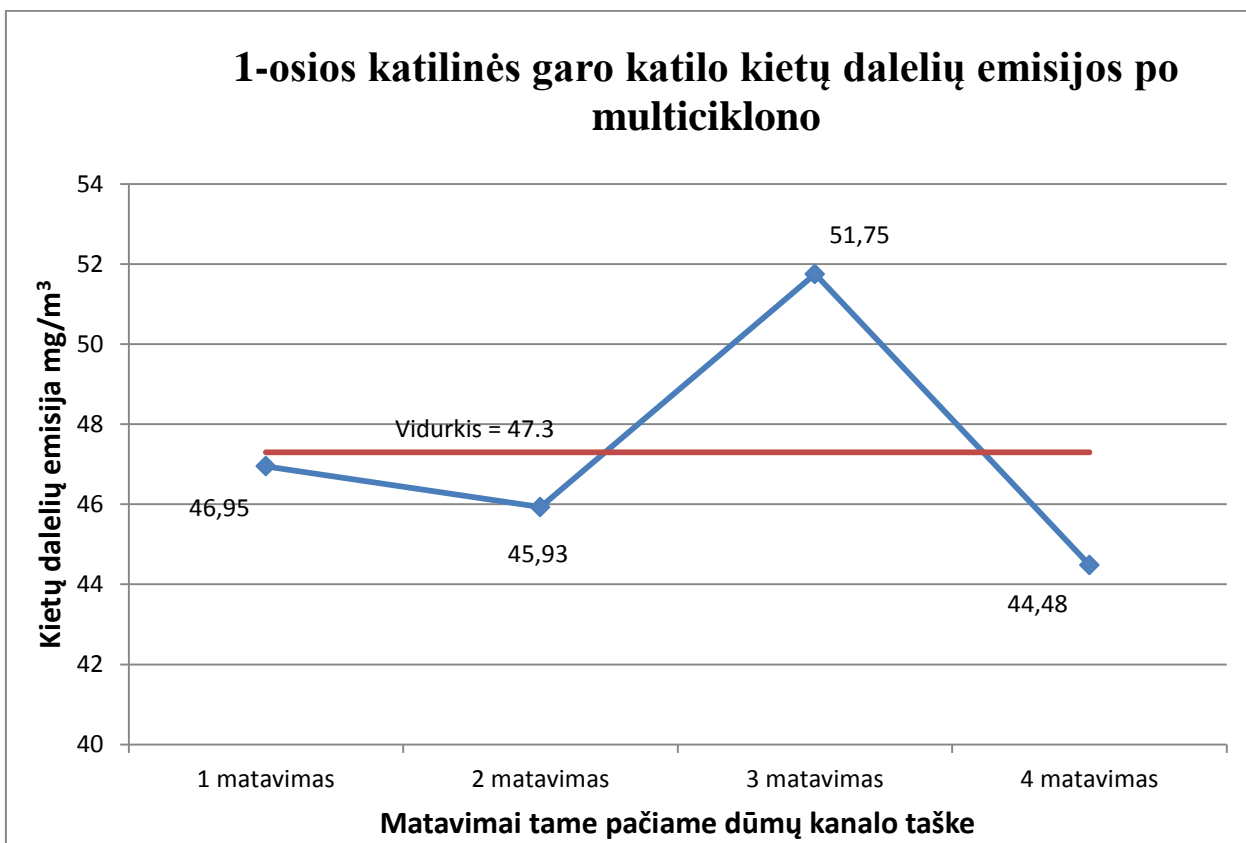


20 pav. 3-osios katilinės BK1 katilo kietųjų dalelių emisijos po katilo.

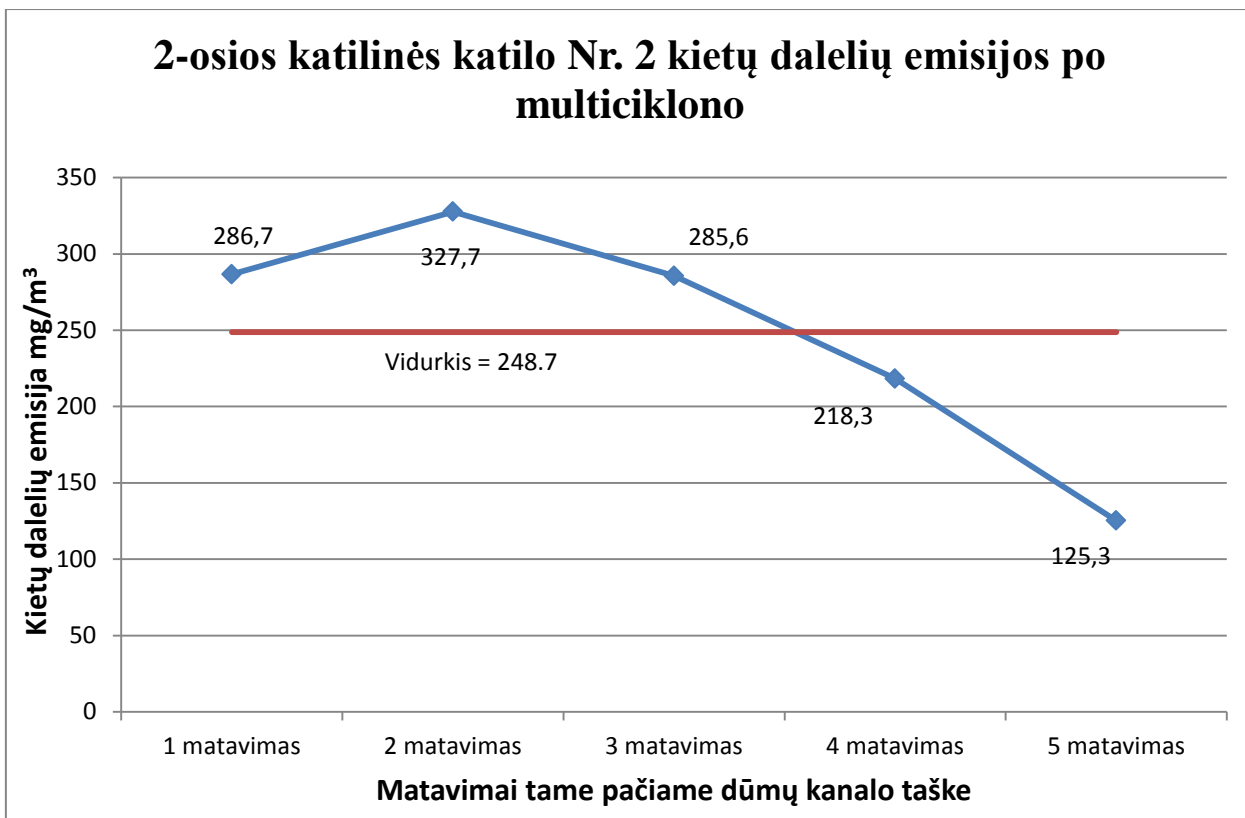


21 pav. 3-osios katilinės BK2 katilo kietųjų dalelių emisijos po katilo.

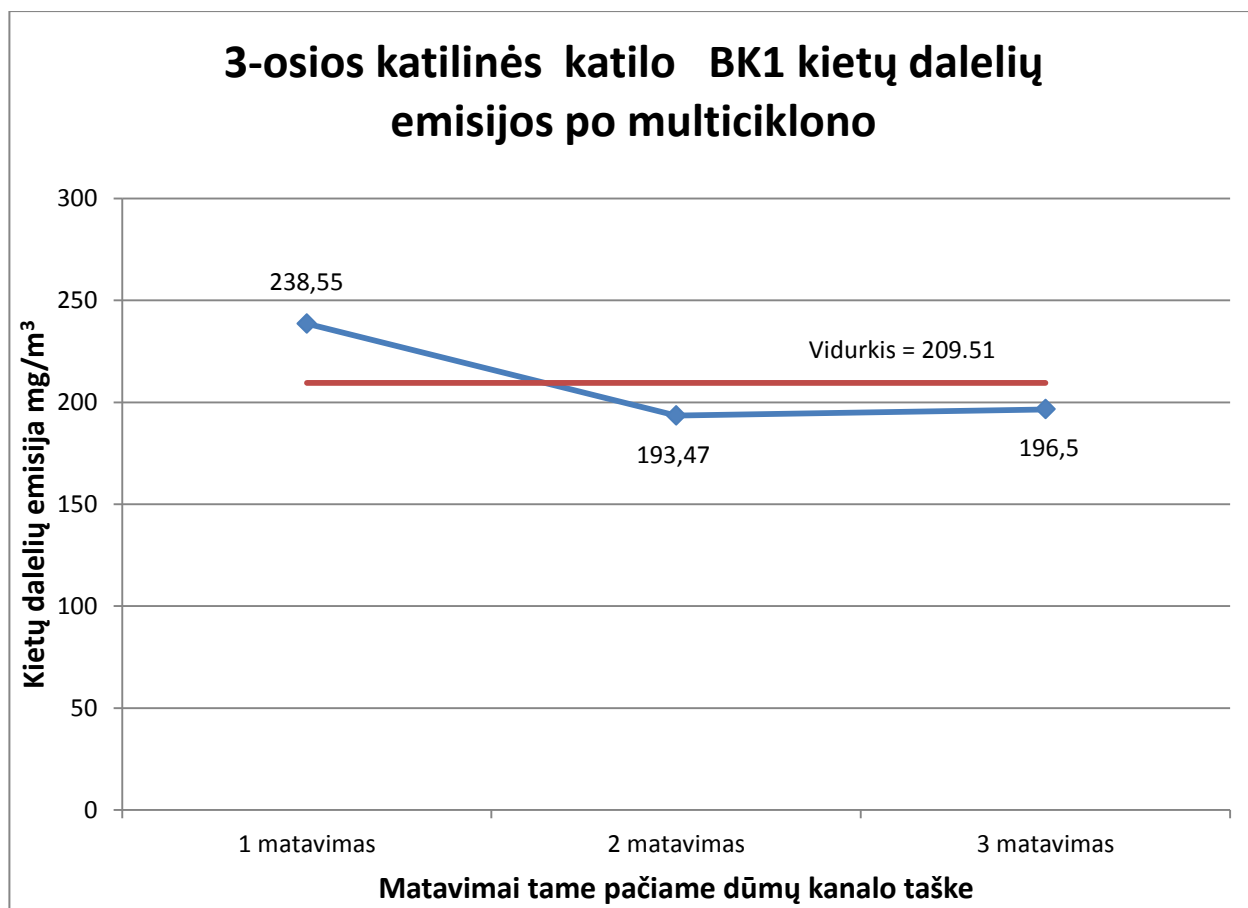
Kietųjų dalelių emisijos po multiciklonų palyginimas pateiktas 22, 23, 24 ir 25 paveiksluose:



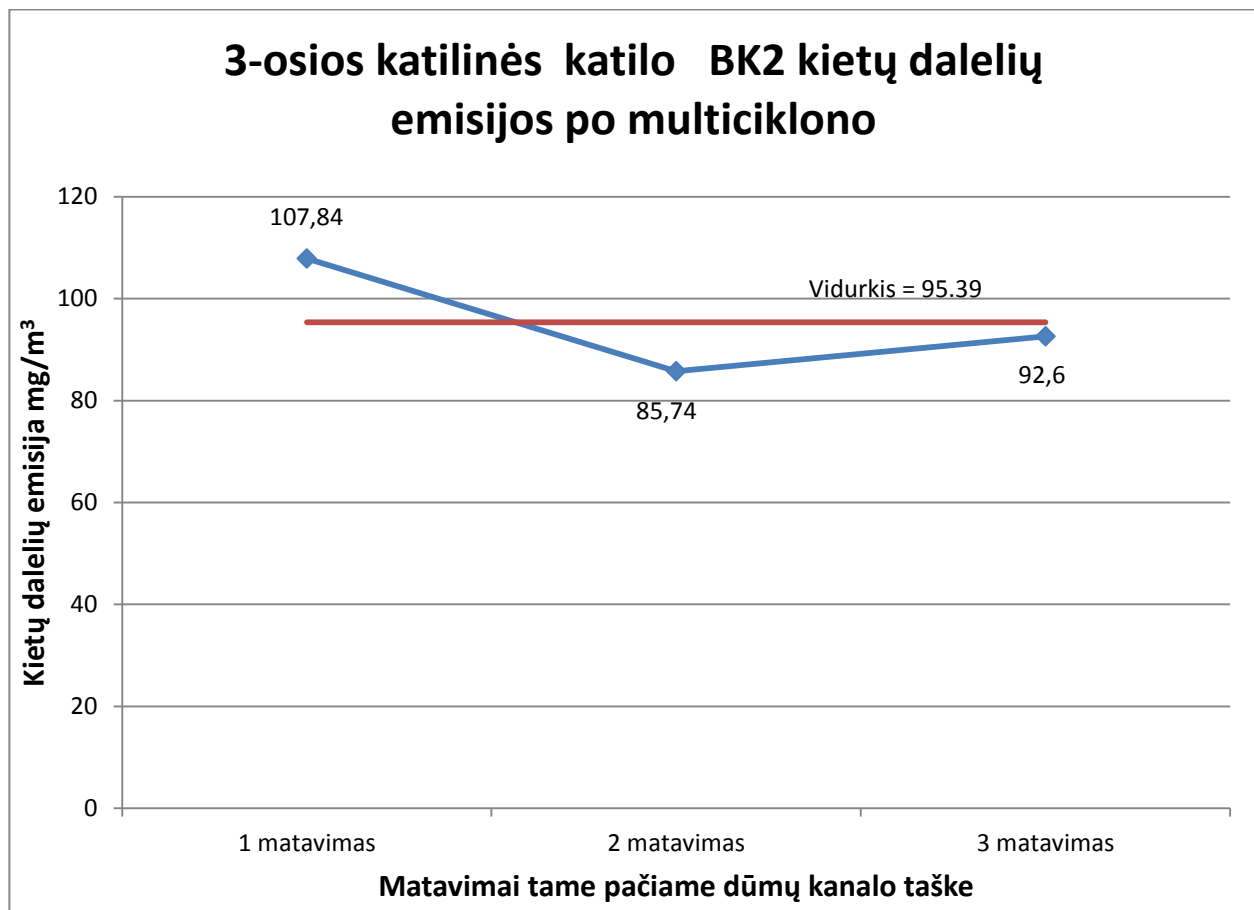
22 pav. 1-osios katilinės 10MW garo katilo kietųjų dalelių emisijos po multiciklono.



23 pav. 2-osios katilinės katilo Nr. 2 kietų dalelių emisija po multicyklono.



24 pav. 3-osios katilinės katilo BK1 kietų dalelių emisija po multicyklono.



25 pav. 3-osios katilinės katilo BK2 kietų dalelių emisija po multiciklono.

Kaip matome iš aukščiau pateiktų paveikslų, matavimų rezultatai labai nepastovūs. Tokiu atveju, kad tiksliau įvertinti kiek kietųjų dalelių buvo sugaudyta įrenginiuose, naudojami matavimų vidurkiai, kurie taip pat pateikti grafikuose. Atlikus skaičiavimus, gauname sekančius dalelių sugaudymo rezultatus:

1-osios katilinės 10 MW garo katilo multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – 52,27%.

2-osios katilinės esančio katilo Nr. 2 multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – 33,01%.

3-osios katilinės esančio katilo BK1 multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – 15,72%.

3-osios katilinės esančio katilo BK2 multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – -12,28%, tai reiškia, jog kietųjų dalelių netgi padaugėjo po multiciklono nei jų buvo prieš katilą. Taip būti negali, nes multiciklonas negeneruoja kietųjų dalelių, todėl šis matavimas nėra tikslus, o gautas neigiamas išvalymo laipsnis skaičiavimuose nenaudojamas.

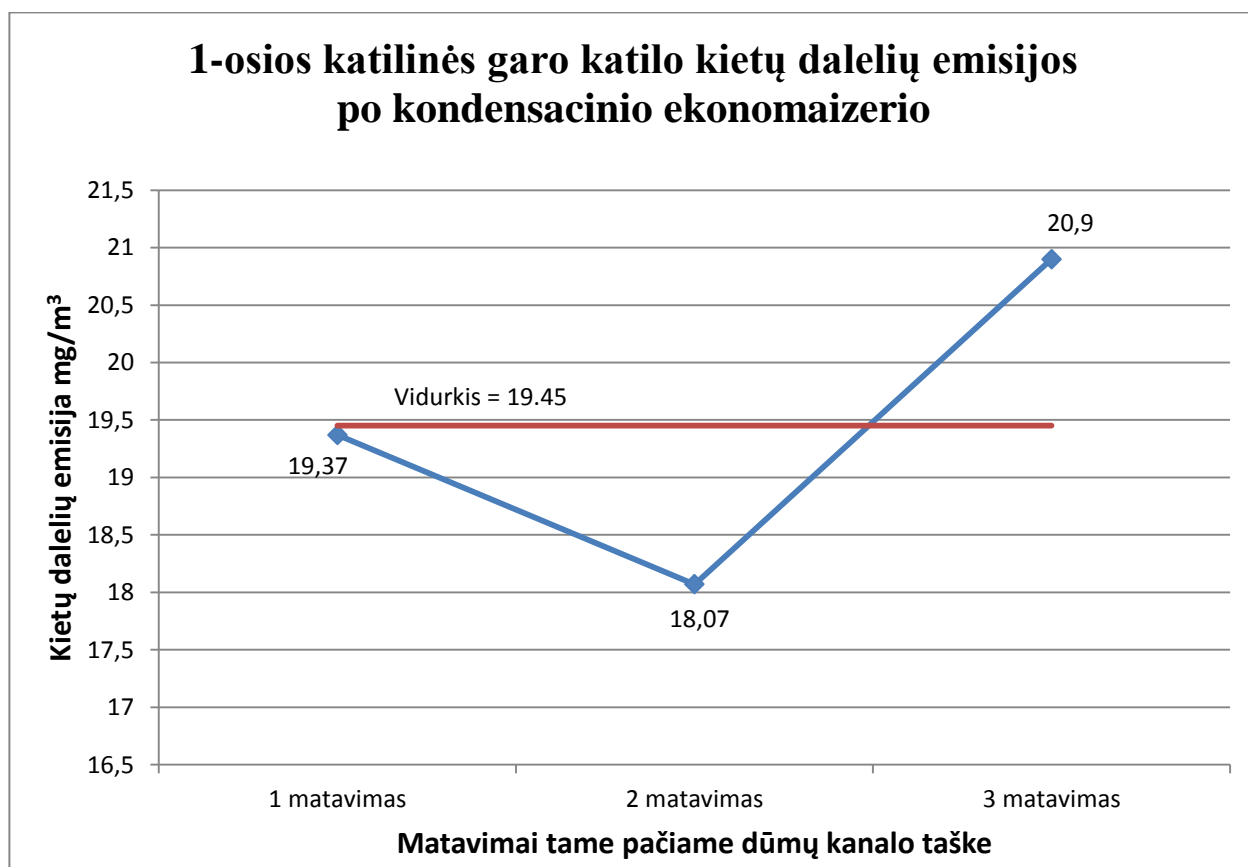
3-oje katilinėje yra sumontuoti naujos kartos multiciklonai su reguliuojamu baterinių ciklonų skaičiumi. Atlikus matavimus paaiškėjo, jog konstrukciniai baterinių ciklonų skirtumai (su kūgiu ir difuzoriumi) esminio skirtumo gaudant kietąsias daleles nedavė. Tačiau uždarius sklendes ir

sumažinus „dirbančių“ baterinių ciklonų skaičių, padidėjo dūmų greitis per juos ir pagerėjo kietųjų dalelių sugaudymo efektyvumas. 3-osios katilinės BK1 katilo multiciklono baterinių ciklonų skaičių sumažinus nuo 66 iki 55, multiciklono efektyvumas nuo 15,72% padidėjo iki 62,59%. Tačiau, kai baterinių ciklonų skaičius buvo sumažintas iki 44, efektyvumas sumažėjo nuo 62,59% (kai naudojami 55 bateriniai ciklonai) iki 55.34 %.

Kietųjų dalelių matavimai buvo daromi tam tikrais laiko intervalais, todėl galimos paklaidos.

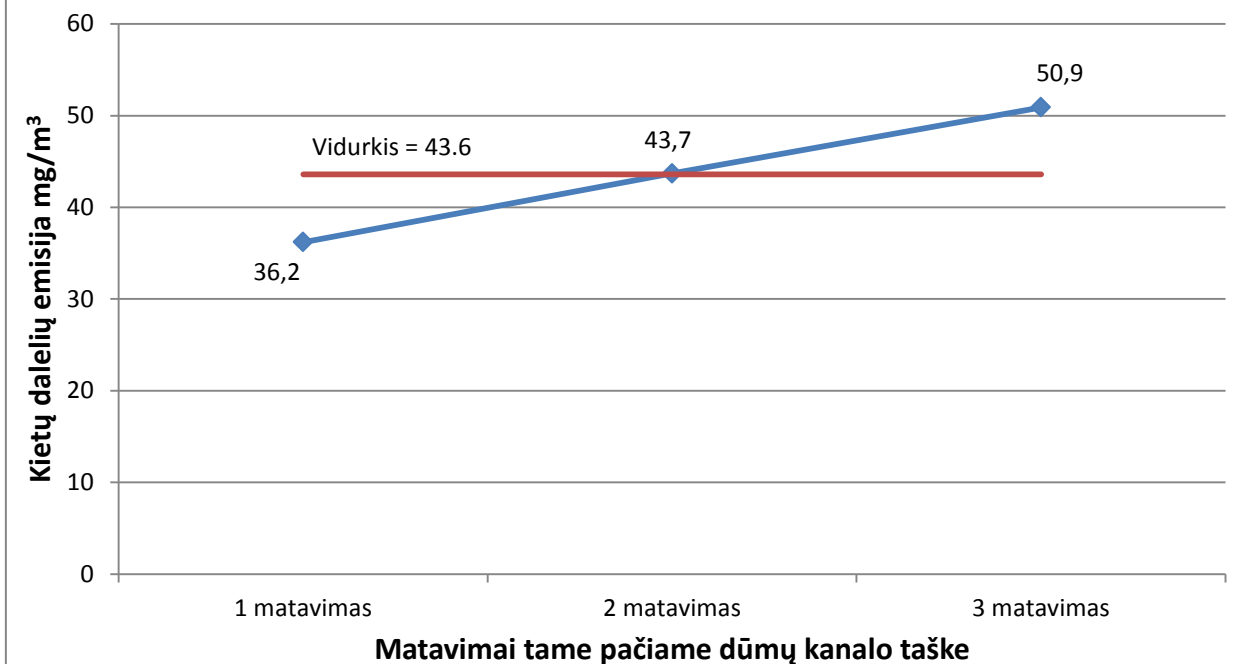
Pagal gautus rezultatus, matome, jog tik vienas multiciklonas tenkina naujai ruošiamos 2013/0442 direktyvos reikalavimus (1-osios katilinės multiciklonas), visi kiti viršytų leidžiamas normas. Tačiau visi multiciklonai tenkina dabar galiojančią LAND 43-2013 normatyvą.

Visose tirtose katilinėse yra sumontuoti antriniai kietųjų dalelių valymo įrenginiai – kondensaciniai ekonomaizeriai. Kietųjų dalelių emisijos po kondensacinių ekonomaizerių palyginimas pateiktas 26, 27 ir 28 paveiksluose:



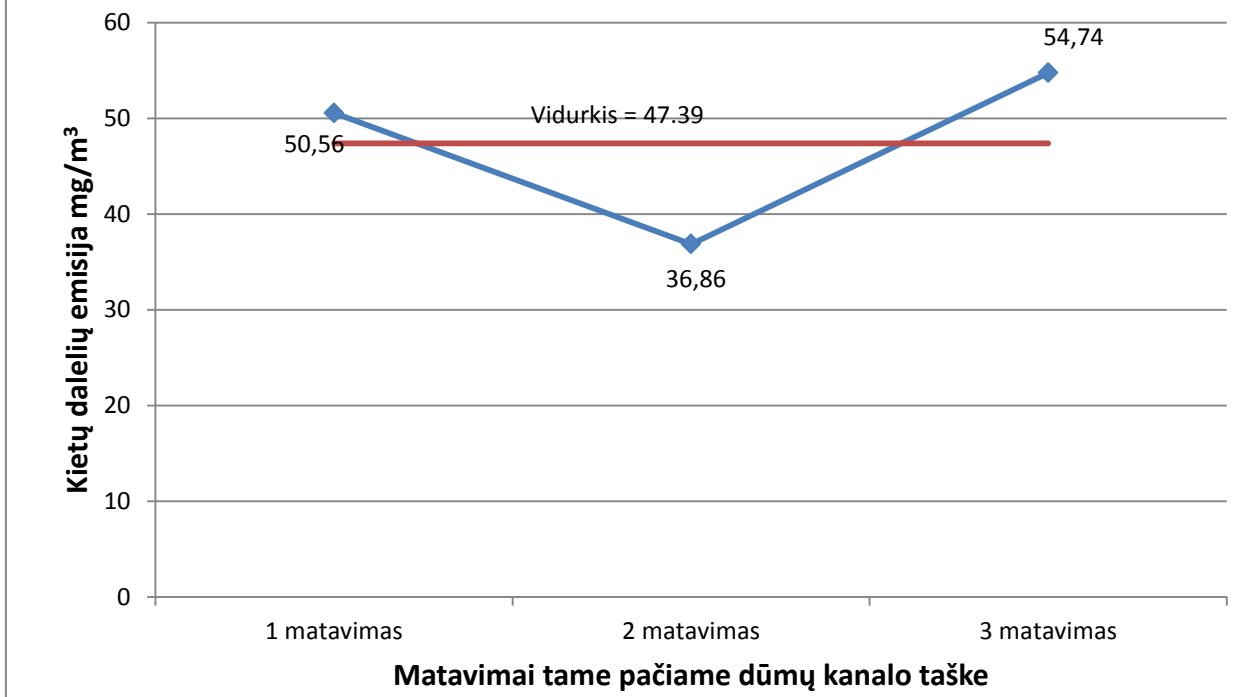
26 pav. 1-osios katilinės garo katilo kietų dalelių emisijos po kondensacinio ekonomaizerio.

2-osios katilinės katilo Nr. 2 kietų dalelių emisijos po kondensacinio ekonomaizerio



27 pav. 2-osios katilinės katilo Nr. 2 kietų dalelių emisija po kondensacinio ekonomaizerio.

3-osios katilinės katilo BK1 kietų dalelių emisijos po kondensacinio ekonomaizerio



28 pav. 3-osios katilinės katilo BK1 kietų dalelių emisija po kondensacinio ekonomaizerio.

Atlikus skaičiavimus, gauname sekančius dalelių sugaudymo rezultatus:

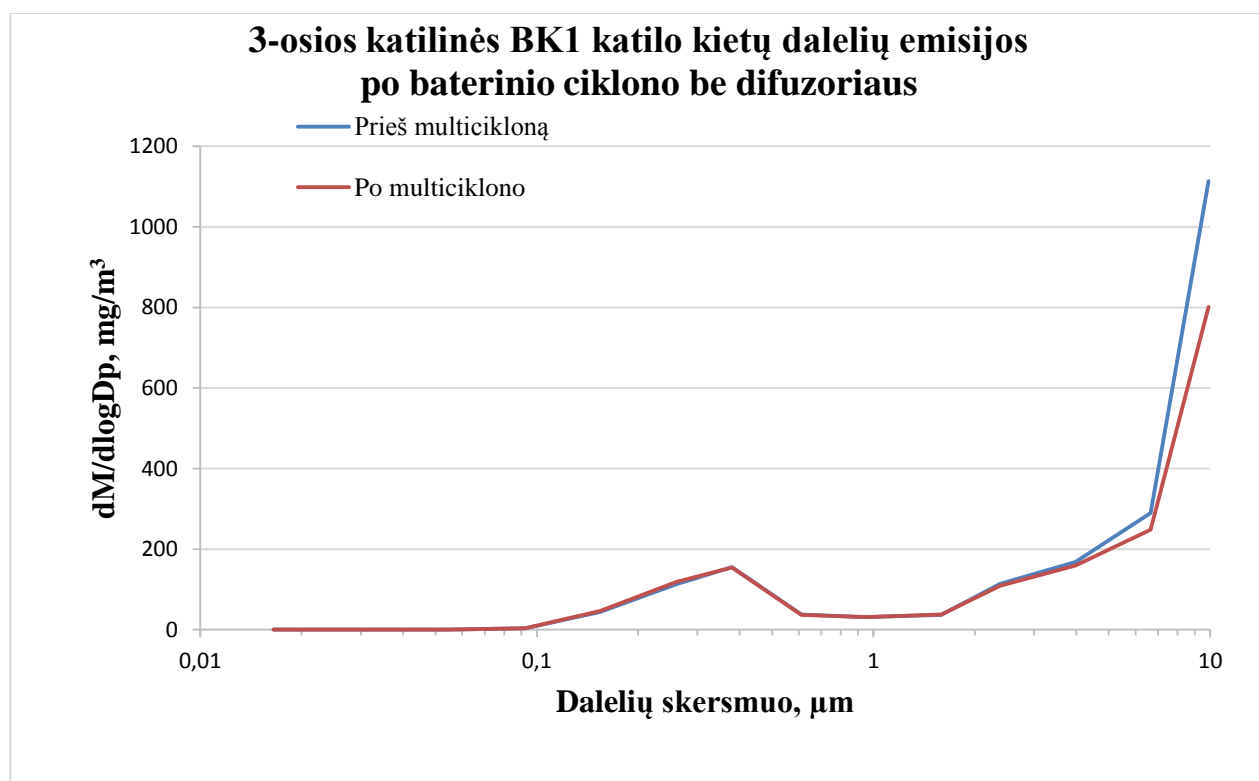
1-osios katilinės 10 MW garo katilo multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – 52,27%, o kondensacinio ekonomizerio efektyvumas sugaudant kietąsias daleles – 58,87%, tuomet bendras sistemos efektyvumas lygus 80.37%.

2-osios katilinės esančio katilo Nr. 2 multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – 33,01%, o kondensacinio ekonomizerio efektyvumas sugaudant kietąsias daleles – 82,46%, tuomet bendras sistemos efektyvumas lygus 88.25%.

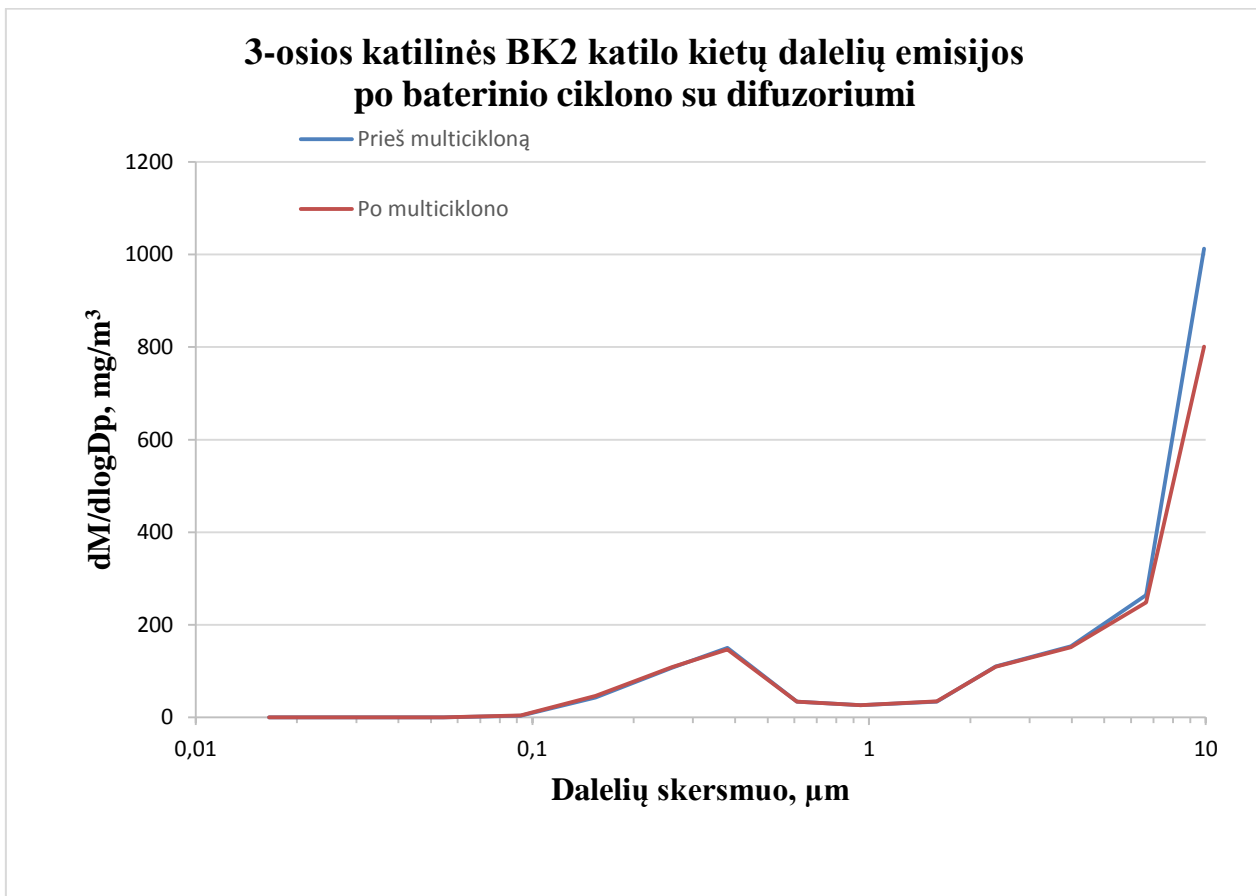
3-osios katilinės esančio katilo BK1 multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – 62,59%, o kondensacinio ekonomizerio efektyvumas sugaudant kietąsias daleles – 49,39%, tuomet bendras sistemos efektyvumas lygus 80.94%.

3-osios katilinės esančio katilo BK2 multiciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles – -12,28%, o kondensacinio ekonomizerio efektyvumas sugaudant kietąsias daleles – 50,32%, tuomet bendras sistemos efektyvumas lygus 44.22%. Pastarasis matavimas skaičiavimams nenaudojamas dėl netikslių matavimų.

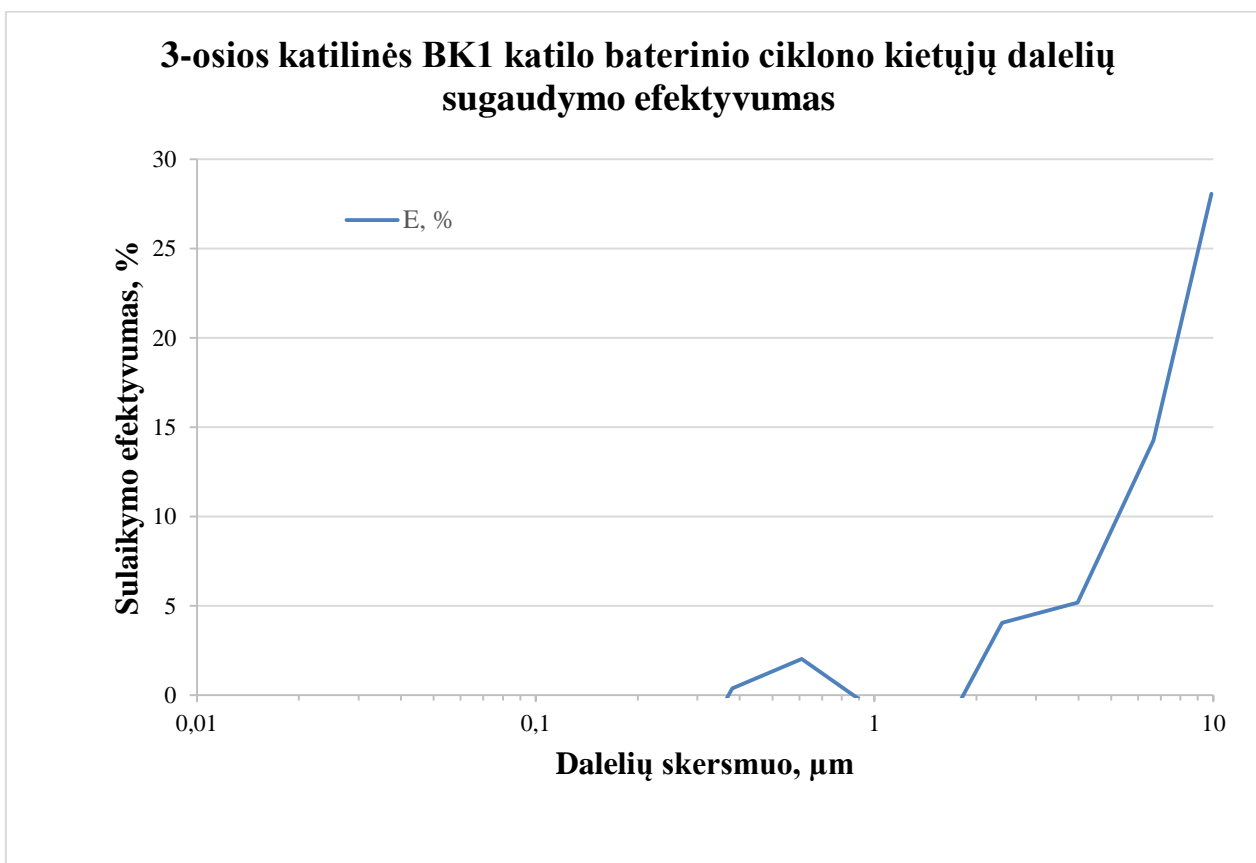
Pagal gautus rezultatus matome, jog kondensaciniai ekonomizeriai atitinka literatūroje pateikiamas kietųjų dalelių sugaudymo normas ir tenkina naujai ruošiamos 2013/0442 dierktyvos reikalavimus. Tuo tarpu bateriniai ciklonai turi 40-20% mažesnius sugaudymo laipsnius nei teigia gamintojai ir pateikiama literatūroje. Todėl atlikome papildomus matavimus 3-oje katilinėje. Šių papildomų matavimų tikslas buvo sužinoti dūmuose esančių dalelių dydį, dispersiškumą ir nustatyti ar tai turi įtakos kietųjų dalelių gaudymo įrenginiams. Atliktų matavimų rezultatai pateikiami 29, 30, 31 ir 32 paveiksluose:



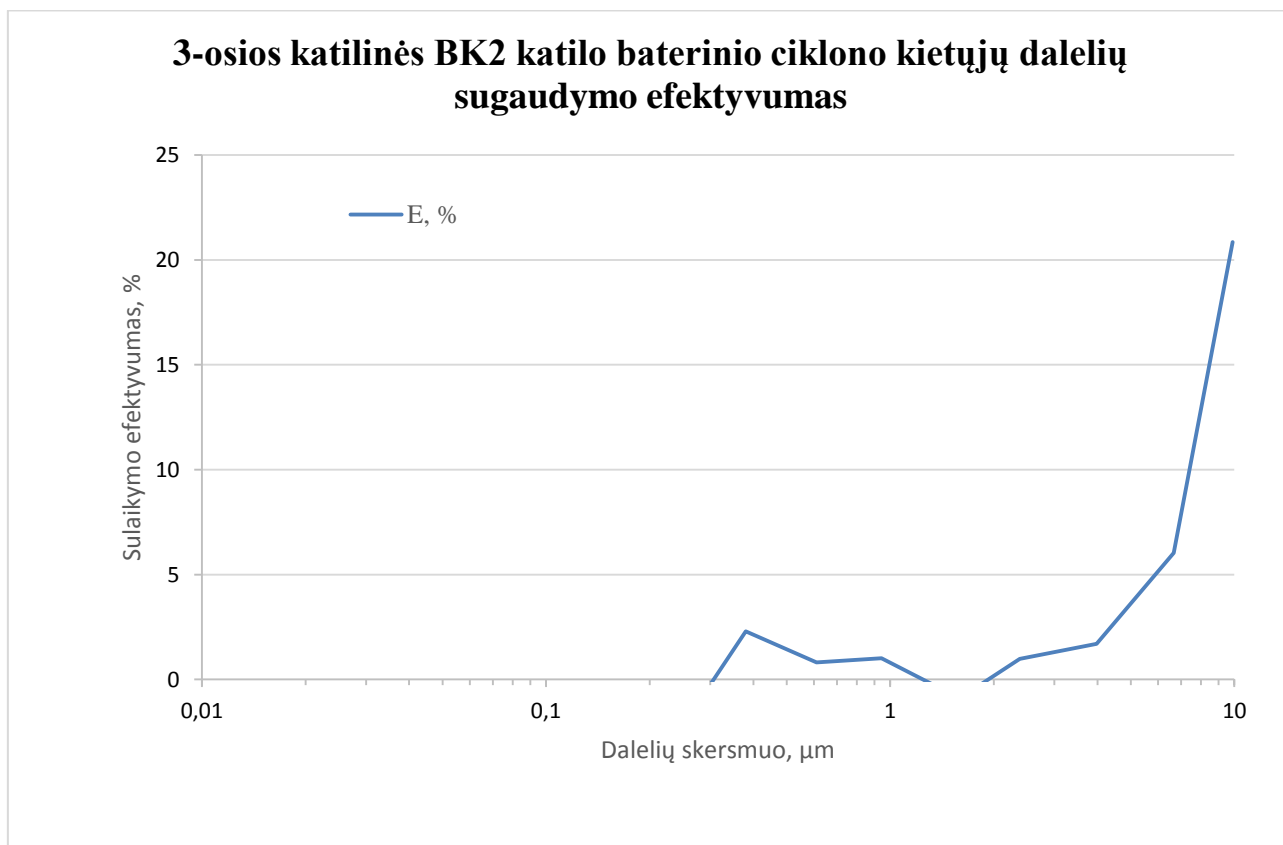
29 pav. 3-osios katilinės BK1 katilo kietųjų dalelių emisijos.



30 pav. 3-osios katilinės BK2 katilo kietųjų dalelių emisijos.



31 pav. 3-osios katilinės BK1 katilo kietųjų dalelių emisijos sugaudymo efektyvumas pagal dalelių dydį.



32 pav. 3-osios katilinės BK2 katilo kietųjų dalelių emisijos sugaudymo efektyvumas pagal dalelių dydį.

Tirtoje 3-oje katilinėje buvo sumontuoti 2 tipų bateriniai ciklonai. Jų veikimo principas išliko nepakitęs, nors konstrukcijos šiek tiek skyrėsi, tačiau konstrukciniai skirtumai mažai įtakojo kietųjų dalelių sugaudymo efektyvumą. Tai galime matyti 25 ir 26 paveiksluose, šiuose paveiksluose pateiktas sugaudymo efektyvumas procentais pagal kietųjų dalelių koncentraciją dūmuose.

Išanalizavus duomenis, buvo nustatyti baterinių multiciklonų esančių tiriamoje 3-oje katilinėje bendri išvalymo efektyvumai, kai multiciklonai dirba su atidarytomis sklendėmis BK1 katilo baterinio multiciklono išvalymo efektyvumas siekė 15,72%, o BK2 katilo išvalymo efektyvumas siekė -12,28%. Palyginus su duomenimis iš pirmųjų dviejų tirtų katilinių, galime teigti jog šie bateriniai multiciklonai praktiškai neatlieka savo funkcijos.

Siekdami išsiaiškinti tokios disfunkcijos priežastį, atliekame patikrinamąjį baterinio ciklono skaičiavimą. Skaičiavimams naudojame 3-oje katilinėje atliktus kietųjų dalelių dispersiškumo matavimus.

5 BATERINIO CIKLONO SKAIČIAVIMAS IR PARINKIMAS

Praktinis ciklonų skaičiavimas ir parinkimas atliekamas naudojantis empirinėmis formulėmis ir priklausomybėmis.

Parentant ciklonus būtina žinoti:

V – valomųjų dujų tūrį esant normaliam katilo našumui, m^3/s ;

ρ – dūmų tankį, kg/m^3 ;

Φ_i – dispersinę sudėtį, proc;

c_1 – pelenų koncentraciją dujose prieš valymą, g/m^3 ;

ρ_d – pelenų dalelių tankį, kg/m^3 ;

η – reikalingą išvalymo laipsnį.

Skaičiavimams naudosimės AB “Grigiškių” katilinės 10MW garo katilo parametrais ir degimo produktų išmetamomis koncentracijomis.

Skaičiavimas ir parinkimas atliekamas tokia tvarka:

1. Pirmiausia randamas baterinio ciklono skerspjūvio plotas:

$$A_p = \frac{V}{u \cdot z} = \frac{15.75}{4.5 \cdot 81} = 0.0432 \text{ m}^2 \quad (5.1)$$

Čia:

A_p – baterinio ciklono skerspjūvio plotas dujoms pratekėti, m^2 ;

u – dūmų greitis, skaičiuojamas ciklono skerspjūvio plotui A_p . Rekomenduojamas $u = 4.5 \text{ m/s}$.

z – lygiagrečiai dirbančių baterinių ciklonų skaičius vienam katilui (priimame, jog vienas baterinis ciklonas išvalo $700m^3/h$).

$$z = \frac{V \cdot 3600}{700} = \frac{12.44 \cdot 3600}{700} = 64 \text{ vnt.} \quad (5.2)$$

2. Priklausomai nuo pasirinkto ciklono tipo, iš literatūros parenkamas tinkamo skersmens ciklonas ir pagal formulę (4.1) patikslinamas tikrasis dūmų greitis u_t .

$$u_t = \frac{V}{A_p \cdot z} = \frac{12.44}{0.0235 \cdot 64} \approx 8.25 \text{ m/s;} \quad (5.3)$$

Pastaba: skaičiavimams naudojamas tikslus objekte esančio ciklono skerspjūvio plotas.

3. Gaudymo parametras Π_i tam tikrai dalelių frakcijai skaičiuojamas pagal apytikslę formulę:

$$\Pi_i = k \sqrt{\frac{u_t}{4,5}} \cdot \sqrt[3]{d_i^2} \quad (5.4)$$

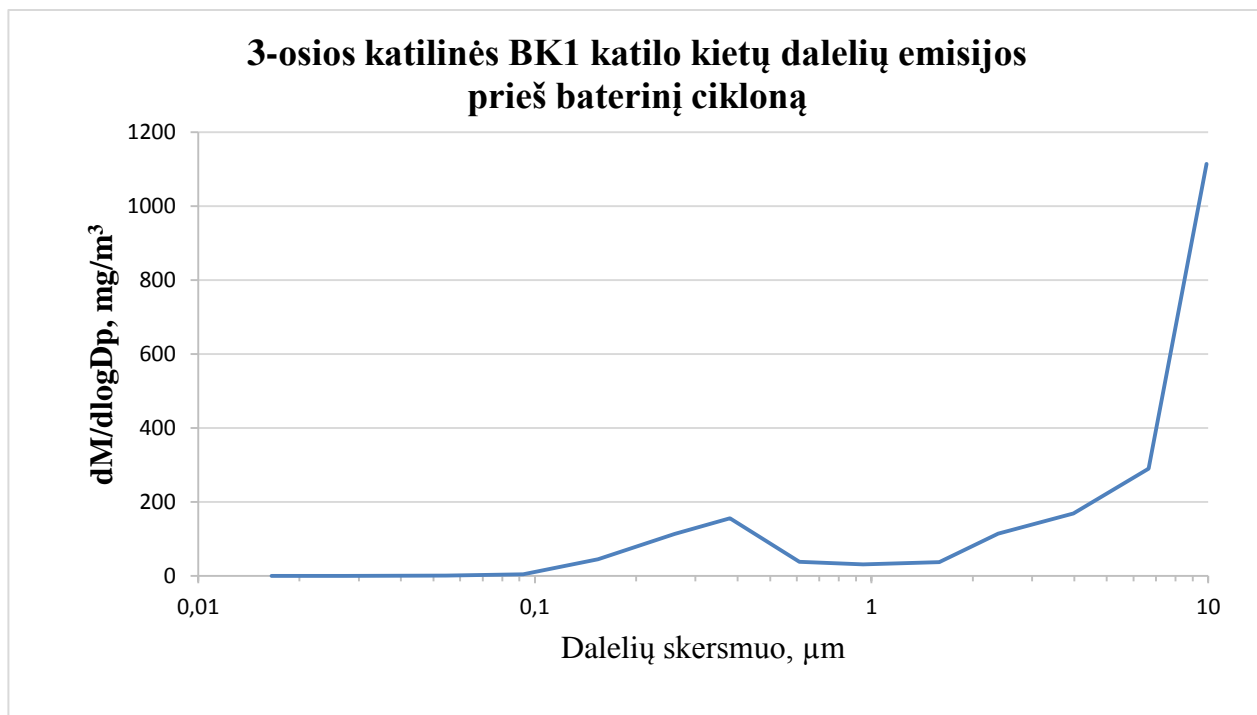
Čia:

Π_i – gaudymo parametras i-ajai pelenų frakcijai;

d_i – vidutinis i-osios frakcijos skersmuo, μm ;

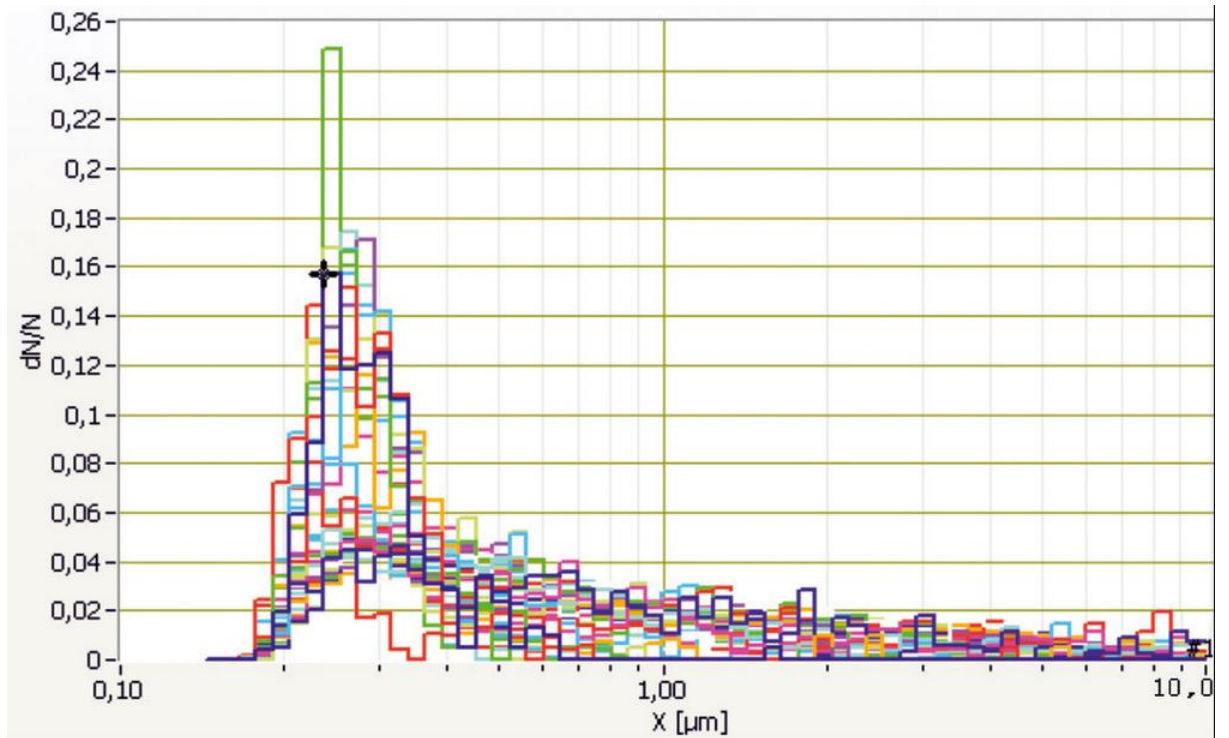
k – baterinio ciklono tipo koeficientas (BIČ ciklonui $k = 0.35$, BIŲ ciklonui $k = 0.5$).

Tačiau apskaičiuoti kiekvienai pelenų frakcijai gaudymo parametras nėra taip paprasta, nes deginant biokurą, priklausomai nuo jo rūšies, frakcijos, deginimo būdo, gausime skirtingas kietų dalelių koncentracijų pagal dalelių dydį emisijas. 27 paveiksle pateikti 3-ioje katilinėje BK1 katilo kietųjų dalelių emisijos matavimai prieš multicikloną. Šie matavimai naudojami tolimesniems skaičiavimams.



33 pav. 3-osios katilinės BK1 katilo kietųjų dalelių emisijos prieš baterinį multicikloną.

Pagal 33 paveiksle pateiktus duomenis matome, jog pagrindinis išmetamų kietųjų dalelių dydis yra diapazone nuo $0,01\mu\text{m}$ iki $10\mu\text{m}$. Pagal dalelių skaičių, daugiausia išmetama $\sim 10\mu\text{m}$ dydžio dalelių. Nors remiantis kitų institucijų atliktais tyrimais, pvz. LEI mokslininkų kietųjų dalelių emisijų analize atlikta laboratorijoje, galime teigti, jog pagrindinis išmetamų kietųjų dalelių dydis yra diapazone nuo $0,05\mu\text{m}$ iki $10\mu\text{m}$. Pagal dalelių skaičių, daugiausia išmetama $\sim 0,25\mu\text{m}$ dydžio dalelių (34 pav.)



34 pav. LEI mokslininkų atlikta kietųjų dalelių emisijų analizė deginant medienos skiedras

Nepaisant to, naudosime naujesnius duomenis iš tiriamos katilinės, ir vertinsime dalelių koncentracijas pagal atliktus matavimus katilinėje, o ne laboratorijoje.

Remdamiesi tuo, atliksime skaičiavimus naudodamiesi (4.4) formule, atliksime 14 skaičiavimų, priimsime jog dalelių dydis keisis nuo $0,01\mu\text{m}$ iki $10\mu\text{m}$:

$$\Pi_{0,016} = 0,35 \sqrt{\frac{8,25}{4,5}} \cdot \sqrt[3]{0,01^2} = 0,031$$

• • •

$$\Pi_{6,66} = 0,35 \sqrt{\frac{8,25}{4,5}} \cdot \sqrt[3]{6,66^2} = 1,678$$

$$\Pi_{9,88} = 0,35 \sqrt{\frac{8,25}{4,5}} \cdot \sqrt[3]{9,88^2} = 2,182$$

Skaičiavimai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 100% apkrovimu kietųjų dalelių parametų skaičiavimas.

8MW biokuro katilas dirbantis 100 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">700</td></tr></table> m ³ /h	700	A_p , baterinio ciklono skerspjuvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
700								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">44800</td></tr></table> m ³ /h	44800	U_t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">14.147</td></tr></table> m/s	14.147
200								
44800								
14.147								
Išvadas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	Bendra KD koncentracija
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ_i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π_i	0.040	0.056	0.089	0.127	0.178	0.253	0.326	0.446	0.597	0.845	1.106	1.559	2.197	2.857	
ϵ_i	0.948	0.934	0.907	0.877	0.836	0.781	0.729	0.649	0.560	0.435	0.330	0.203	0.109	0.065	

Pagal 3 lentelę priklausomai nuo Π_i randami ε_i , o juos sumuojant pagal formulę (4.5) apskaičiuojamas visų frakcijų nesugautų pelenų laipsnis ε . Gauta reikšmė lyginama su reikalingu valymo laipsniu. Jeigu valymo laipsnis neatitinka normų, parenkamas mažesnio skerspjūvio ploto ciklonas; dėl to padidėja dujų greitis ciklone ir pagerėja gaudymo efektyvumas.

3 lentelė. Nesugautų pelenų laipsnio priklausomybė nuo gaudymo parametro Π :

Π	0,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0,	1,0000	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1,	0,3679	0,3329	0,3012	0,2725	0,2466	0,2231	0,2019	0,1827	0,1653	0,1496
2,	0,1353	0,1225	0,1100	0,1003	0,0907	0,0821	0,0743	0,0672	0,0608	0,0550
3,	0,0498	0,0450	0,0407	0,0369	0,0334	0,0302	0,0273	0,0247	0,0224	0,0202
4,	0,0183	0,0166	0,0150	0,0136	0,0123	0,0111	0,0100	0,00910	0,00823	0,00745
5,	0,00674	0,00610	0,00552	0,00500	0,00452	0,00409	0,00370	0,00335	0,00303	0,00274
6,	0,00248	0,00224	0,00203	0,00184	0,00166	0,00150	0,00136	0,00123	0,00111	0,00100
7,	0,00091	0,00082	0,00075	0,00068	0,00061	0,00055	0,00050	0,00045	0,00041	0,00037
8,	0,00033	0,00030	0,00027	0,00025	0,00022	0,00020	0,00020	0,00018	0,00015	0,00014
9,	0,00012	0,00011	0,00010	0,00009	0,00008	0,00007	0,00007	0,00006	0,00005	0,00004

Iš lentelės nustatę ε reikšmes, tam tikrai dalelių frakcijai, bendrą multiciklono išvalymo laipsnį gauname pasinaudoję 4.5 formule.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i \cdot \frac{\Phi_i}{100} \quad (5.5)$$

Pagal apskaičiuotas Π reikšmes parinktiems dalelių dydžiams, iš lentelės matome jog: $\varepsilon \approx 0.225$ tai reiškia jog apie 77,43% visų kietųjų dalelių bus sugauta. Tai gan neblogas rezultatas ir nedaug skiriasi nuo daugelio gamintojų deklaruojamo kietųjų dalelių sugaudymo laipsnio. Tačiau teoriniai skaičiavimai skiriasi nuo matavimų. Taip gali būti dėl keleto priežasčių, viena iš jų per mažas greitis ciklone, kuomet dalelės yra išnešamos kartu su dūmais, nespėjusios nusėsti apatinėje dalyje. Taip pat gali būti nesandari pelenų šalinimo sklendė ir dūmsiurbis gali pasiurbti orą per pelenų šalinimo traktą, taip pakeldamas ir įsiurbdamas jau nusėdusias daleles. Atsižvelgiant į tyrimo duomenis, darome išvadą, jog dūmų greitis per cikloną buvo per mažas, matavimo metu siekė net 13 m/s (dūmtakyje, kurio diametras 0,95m, t.y. dūmų srautas buvo $\sim 33200\text{m}^3/\text{h}$), kai skaičiavimams naudotas dūmų kiekis buvo $44800\text{m}^3/\text{h}$. Atsižvelgdami į tai atliekame baterinio ciklono efektyvumo skaičiavimus, kai keičiasi katilo nominali galia ir dūmų srautas išeinantis iš katilo. Skaičiavimai pateikiami prie 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40% ir 30% nominalios katilo galios atitinkamai 3, 4, 5, 6, 7, 8 ir 9 lentelėse.

4 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 90% apkrovimu kietųjų dalelių parametrų skaičiavimas.

8MW biokuro katilas dirbantis 90 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1"><tr><td>630</td></tr></table> m ³ /h	630	A_p , baterinio ciklono skerspjuvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1"><tr><td>0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
630								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1"><tr><td>200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1"><tr><td>40320</td></tr></table> m ³ /h	40320	U_t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1"><tr><td>12.732</td></tr></table> m/s	12.732
200								
40320								
12.732								
Išvadas, DN	<table border="1"><tr><td>150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1"><tr><td>64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	Bendra KD koncentracija
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ_i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π_i	0.038	0.053	0.085	0.120	0.169	0.240	0.309	0.423	0.567	0.802	1.049	1.479	2.084	2.711	
ϵ_i	0.949	0.937	0.911	0.882	0.843	0.790	0.741	0.664	0.577	0.455	0.351	0.221	0.121	0.073	

Bendras multiciklono išvalymo laipsnis 76,35%.

5 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 80% apkrovimu kietųjų dalelių parametrų skaičiavimas.

8MW biokuro katilas dirbantis 80 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">560</td></tr></table> m ³ /h	560	A_p , baterinio ciklono skerspjuvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
560								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">35840</td></tr></table> m ³ /h	35840	U_t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">11.318</td></tr></table> m/s	11.318
200								
35840								
11.318								
Išvadas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	Bendra KD koncentracija
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ_i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π_i	0.036	0.050	0.080	0.113	0.159	0.226	0.291	0.399	0.534	0.756	0.989	1.394	1.965	2.556	
ϵ_i	0.951	0.939	0.915	0.887	0.851	0.800	0.753	0.680	0.596	0.477	0.374	0.242	0.135	0.082	

Bendras multiciklono išvalymo laipsnis 75,12%.

6 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 70% apkrovimu kietųjų dalelių parametrų skaičiavimas.

8MW biokuro katilas dirbantis 70 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1"><tr><td>490</td></tr></table> m ³ /h	490	A_p , baterinio ciklono skerspjuvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1"><tr><td>0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
490								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1"><tr><td>200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1"><tr><td>31360</td></tr></table> m ³ /h	31360	U_t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1"><tr><td>9.903</td></tr></table> m/s	9.903
200								
31360								
9.903								
Išvadas, DN	<table border="1"><tr><td>150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1"><tr><td>64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	Bendra KD koncentracija
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ_i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π_i	0.034	0.047	0.075	0.106	0.149	0.212	0.272	0.373	0.500	0.707	0.926	1.304	1.838	2.391	
ϵ_i	0.953	0.942	0.919	0.893	0.859	0.811	0.766	0.697	0.616	0.501	0.400	0.267	0.152	0.093	

Bendras multiciklono išvalymo laipsnis 73,68%.

7 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 60% apkrovimu kietųjų dalelių parametrų skaičiavimas.

8MW biokuro katilas dirbantis 60 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">420</td></tr></table> m ³ /h	420	A_p , baterinio ciklono skerspjuvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
420								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">26880</td></tr></table> m ³ /h	26880	U_t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">8.488</td></tr></table> m/s	8.488
200								
26880								
8.488								
Išvadas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	Bendra KD koncentracija
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ_i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π_i	0.031	0.043	0.069	0.098	0.138	0.196	0.252	0.346	0.463	0.655	0.857	1.207	1.702	2.213	
ϵ_i	0.955	0.945	0.923	0.900	0.868	0.823	0.781	0.715	0.639	0.528	0.430	0.296	0.175	0.108	

Bendras multiciklono išvalymo laipsnis 71,91%.

8 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 50% apkrovimu kietųjų dalelių parametrų skaičiavimas.

8MW biokuro katilas dirbantis 50 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1"><tr><td>350</td></tr></table> m ³ /h	350	A_p , baterinio ciklono skerspjūvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1"><tr><td>0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
350								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1"><tr><td>200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1"><tr><td>22400</td></tr></table> m ³ /h	22400	U_t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1"><tr><td>7.074</td></tr></table> m/s	7.074
200								
22400								
7.074								
Išvadas, DN	<table border="1"><tr><td>150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1"><tr><td>64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	Bendra KD koncentracija
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ_i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π_i	0.028	0.040	0.063	0.090	0.126	0.179	0.230	0.316	0.422	0.598	0.782	1.102	1.553	2.020	
ϵ_i	0.958	0.948	0.928	0.907	0.877	0.836	0.797	0.736	0.665	0.559	0.464	0.332	0.204	0.128	

Bendras multiciklono išvalymo laipsnis 69,63%.

9 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 40% apkrovimu kietųjų dalelių parametrų skaičiavimas.

8MW biokuro katilas dirbantis 40 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1"><tr><td>280</td></tr></table> m ³ /h	280	A_p , baterinio ciklono skerspjuvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1"><tr><td>0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
280								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1"><tr><td>200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1"><tr><td>17920</td></tr></table> m ³ /h	17920	U_t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1"><tr><td>5.659</td></tr></table> m/s	5.659
200								
17920								
5.659								
Išvadas, DN	<table border="1"><tr><td>150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1"><tr><td>64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	Bendra KD koncentracija
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ_i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π_i	0.025	0.035	0.056	0.080	0.113	0.160	0.206	0.282	0.378	0.535	0.700	0.986	1.389	1.807	
ϵ_i	0.960	0.952	0.934	0.914	0.888	0.851	0.815	0.759	0.694	0.596	0.505	0.375	0.243	0.157	

Bendras multiciklono išvalymo laipsnis 66,60%.

10 lentelė. 8MW biokuro katilo dirbančio 30% apkrovimu kietųjų dalelių parametrų skaičiavimas.

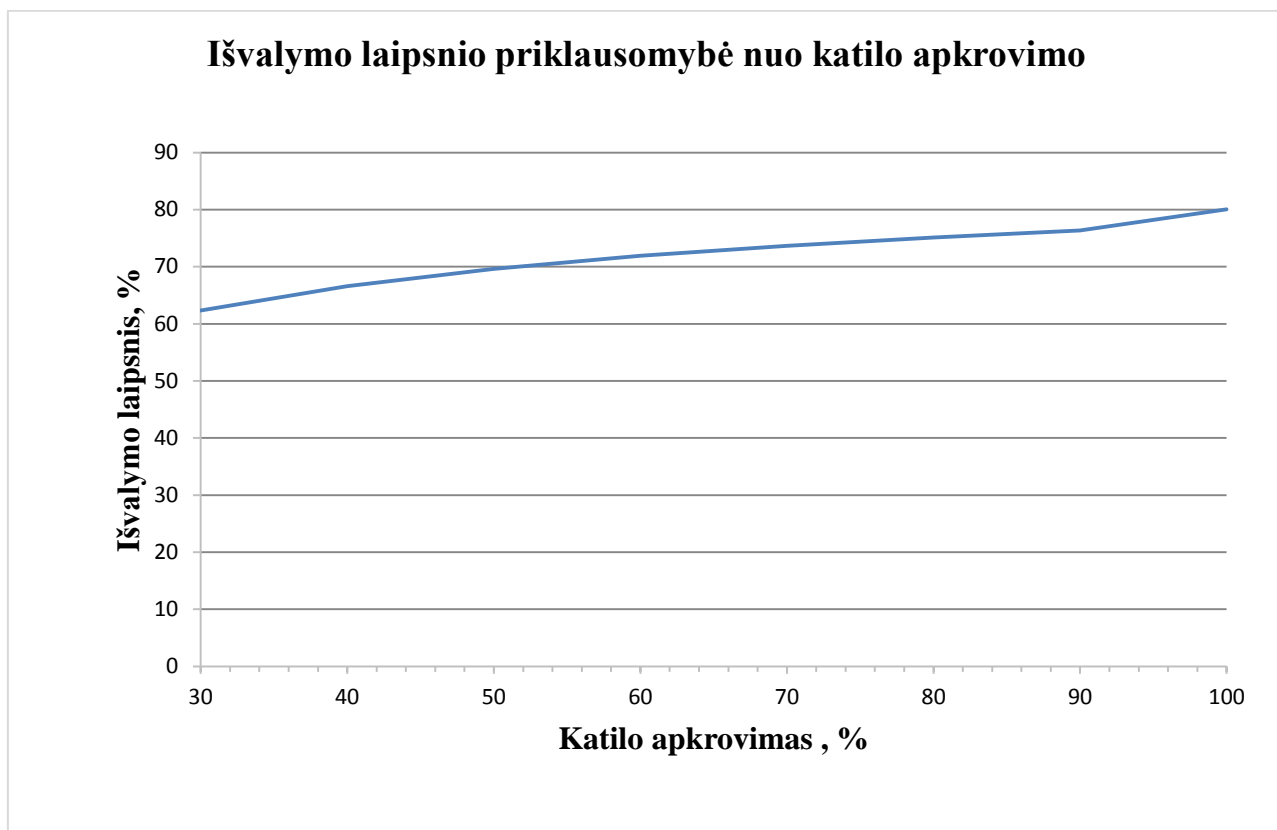
8MW biokuro katilas dirbantis 30 % apkrovimu

Kai baterinio ciklono matmenys:		Dūmų kiekis per ciklono bateriją:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">210</td></tr></table> m ³ /h	210	A _p , baterinio ciklono skerspjūvio plotas dujoms pratekėti:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">0.014</td></tr></table> m ²	0.014	
210								
0.014								
Įėjimas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">200</td></tr></table> mm	200	Bendras dūmų kiekis per baterinį cikloną:	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">134400</td></tr></table> m ³ /h	134400	U _t , patikslintas tikrasis greitis per multicikloną	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">4.244</td></tr></table> m/s	4.244
200								
134400								
4.244								
Išvadas, DN	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">150</td></tr></table> mm	150	Multiciklone baterinių ciklonų skaičius	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="text-align: center;">64</td></tr></table> vnt.	64			
150								
64								

	Dalelių skersmuo, μm														Bendra KD koncentracija
	0.0165	0.0272	0.0545	0.0922	0.154	0.26	0.38	0.61	0.944	1.59	2.38	3.98	6.66	9.88	
dM/dlogDp	0.04	0.02	0.15	3.67	44.28	113.12	155.31	37.87	31.26	37.04	113.89	168.23	289.66	1113.95	397.27
Dalelių koncentracija Φ _i , %	0.00	0.00	0.01	0.17	2.10	5.36	7.37	1.80	1.48	1.76	5.40	7.98	13.74	52.83	100
Π _i	0.022	0.031	0.049	0.069	0.098	0.138	0.178	0.244	0.327	0.463	0.606	0.854	1.203	1.565	
ε _i	0.963	0.956	0.940	0.923	0.900	0.867	0.836	0.787	0.728	0.639	0.555	0.431	0.297	0.202	

Bendras multiciklono išvalymo laipsnis 62,33%.

Lygindami atliktus skaičiavimus su esamu bateriniu ciklonu 3-oje katilinėje pastatytu 8MW vandens šildymo katilo degimo produktų valymui, galime teigti, jog esamas multiciklonas neatitinka skaičiavimų ir gamintojų deklaruojamų kietųjų dalelių valymo laipsnių. Pagal aukščiau pateiktus skaičiavimus galime susidaryti priklausomybes, kaip kintant katilo apkrovimui, dūmų srautui, kinta išvalymo laipsnis (35 pav.).



35 pav. Išvalymo laipsnio priklausomybė nuo katilo apkrovimo.

Kaip matome 35 paveiksle, išvalymo laipsnis yra priklausomas nuo dūmų kiekio per multicikloną, kadangi multiciklone baterinių ciklonų skaičius pastovus. Analogiškai, kaip ir išvalymo laipsnis, mažėjant katilo apkrovimui, mažėja ir kiti parametrai, kurie tiesiogiai priklausomi nuo greičio per baterinius ciklonus.

Iki šiol skaičiavimams naudojome esamus duomenis, tačiau multiciklonų efektyvumas priklauso nuo pagrindinių 2 faktorių, kaip jau buvo minėta anksčiau greičio ir ciklono skersmens, mažinant ciklono skersmenį, didėja greitis pačiame ciklone. Atlikti skaičiavimai, kaip ciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles priklauso nuo ciklono diametro pateikti 10 lentelėje.

11 lentelė. Multiciklonų efektyvumo priklausomybė nuo naudojamų baterinių ciklonų diametrų.

		Pasiurbimas									
		DN400	DN350	DN300	DN250	DN200	DN150	DN125	DN100	DN80	DN65
Išmetimas	DN400										
	DN350	68.72									
	DN300	59.48	70.58								
	DN250		61.89	72.6							
	DN200				74.83						
	DN150					77.43					
	DN125						80.07*				
	DN100							82.89**			
	DN80								79.53**		
	DN65									77.49***	

Galimi realūs baterinių ciklonų variantai

Kombinuojant tokius variantus, kyla pavojus jog dūmų išmetimo vamzdyje bus didesnis greitis nei pasiurbimo vamzdyje, tai gali iššaukti kietųjų dalelių pasiurbimą į dūmų traktą iš bunkerio.

Geriausias variantas, tačiau reikalaujantis papildomų baterinių ciklonų.

Ekonomiškai neapsimokantys variantai.

*-Reikėtų multiciklono su 128 bateriniais ciklonais.

** -Reikėtų multiciklono su 256 bateriniais ciklonais.

***-Reikėtų multiciklono su 512 bateriniais ciklonais.

Pastaba: ciklonų efektyvumas skaičiuotas 8MW vandens šildymo katilui.

Atlikę patikrinamuosius multiciklono efektyvumo skaičiavimus, matome, jog bateriniai ciklonai yra paskaičiuoti teisingai, atsižvelgiant į darbo ir medžiagų kiekius reikalingus pagaminti tokio tipo cikloną. Ciklono efektyvumą galima būtų padidinti mažinant baterinių ciklonų diametrą, tačiau toks ciklonas greičiausiai užimtų daugiau vietos, o jo gamyba užtruktų žymiai ilgiau, nors išvalymo nuo kietųjų dalelių efektyvumas būtų 2,64% geresnis (prie tokių pačių sąlygų).

4. Ciklonų hidraulinis pasipriešinimas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta p = \xi \rho \frac{u_t^2}{2} = 90 \cdot 0.243 \cdot \frac{8.25^2}{2} = 744.26 \text{ Pa} \quad (5.6)$$

Čia:

Δp – hidraulinis pasipriešinimas, Pa;

ρ - dujų tankis, kg/m³;

ξ – trinties koeficientas, priklausantis nuo ciklono tipo ir pasirenkamas БЦ $\xi = 90$, БЦУ $\xi = 115$.

Baterinių ciklonų hidraulinis pasipriešinimas skaičiuojamas dūmsiurbio parinkimui, skaičiavimams naudojamas maksimalus dūmų srautas, taip gaunamas multiciklono pasipriešinimas katilui dirbant nominaliu apkrovimu (100%).

6 IŠVADOS

1. Kietųjų dalelių emisijų iš biokuro katilų matavimai rodo, jog dūmų valymo išcentriniai įrenginiai (multiciklonai) neleidžia pasiekti 100 mg/nm^3 išvalymo laipsnio reikalaujamo katilams (2-oje tirtose katilinėje) iki 5 MW reikalaujamų pagal paskutinę 2013/0442 direktyvos redakciją. Katilams (1-oje ir 3-oje tirtose katilinėse) nuo 5 MW iki 20MW dar griežtesni reikalavimai 50 mg/nm^3 taip pat nepasiekiami naudojant išcentrinius dūmų valymo įrenginius.
2. Atlikus patikrinamąjį baterinio ciklono skaičiavimą, nustatėme, jog ciklonai geriausiai sugaudo didžiąsias daleles $\sim 10\mu\text{m}$ ir didesnes. Būtent $10\mu\text{m}$ dydžio dalelės sudaro didžiąją dalį kietųjų dalelių esančių dūmuose. Blogiausiai ciklonai sugaudo mažąsias $\sim 0,01\text{-}0,1\mu\text{m}$ dydžio daleles, šios dalelės savo savybėmis labiau panašios į dujas, todėl lengvai praeina cikloninius gaudytuvus.
3. Baterinio ciklono efektyvumas yra priklausomas nuo dujų srauto greičio per ciklonus, tad kai katilo galia sumažinama iki 30%, degimo produktų taip pat sumažėja, tai iššaukia greičio kritimą ciklonuose ir jų efektyvumo sumažėjimą. Moderniuose šiuolaikiniuose bateriniuose ciklonuose ši problema jau sprendžiama uždarant vieną ar dvi ciklonų eiles, taip padidinant dujų greitį kituose ciklono elementuose ir pagerinant išvalymo efektyvumą esant mažam katilo apkrovimui. Skaičiavimai parodo, jog skaičiuojant multicikloną yra būtinas optimizavimas siekiant geriausio rezultato.
4. Matavimai atlikti 3-oje katilinėje su naujos kartos multiciklonais, kuriuose yra galimybė uždaryti dalį baterinių ciklonų, parodo, jog ciklono išvalymo laipsnis priklauso nuo dūmų greičio bateriniame ciklone. Per mažas greitis ciklone nesukuria pakankamos išcentrinės jėgos ir dalelės yra išnešamos. Uždarius dalį ciklonų, greitis išauga ir valymo efektyvumas ženkliai pagerėja.
5. Baterinių ciklonų nesugaudytas daleles puikiai sugaudo kondensaciniai ekonomaizeriai, tačiau net ir jie ne visada atitinka preliminarus 50 mg/nm^3 keliamo reikalavimo keliamo katilams virš 5MW. Kondensaciniai ekonomaizeriai puikiai sugaudo kietas daleles, tačiau kondensacinis ekonomaizeris turi būti komplektuojamas su kondensato valymo sistema, nes su kietosiomis dalelėmis iš dūmų šalinamas ir susikondensavęs vanduo, kuris vėliau išleidžiamas į lietaus (arba buitinių nuotekų) kanalizaciją. Ši sistema reikalauja nuolatinės priežiūros ir didelių investicijų, tačiau kondensaciniai ekonomaizeriai duoda didelį šiluminį efektą papildomai pagamindami 20-30% šilumos, skaičiuojant nuo katilo galios. Todėl dūmų valymas nuo kietųjų dalelių tinkamos konstrukcijos kondensaciniais ekonomaizeriais yra ekonomiškai naudingas.
6. Ateityje, įsigaliojus naujai vidutinės galios katilų direktyvai 2013/0442 (1 lentelė), praktiškai visos biokurą deginančios katilinės, kurių galia virš 5MW, turės rekonstruoti savo kietųjų dalelių gaudymo sistemas, tai iššauks didžiules investicijas. Kai kuriose katilinėse atnaujinti esamos sistemos labai problematiška, nes katilinės įrenginiai sukomponuoti labai kompaktiškai ir įrengti naujas kietąsias daleles gaudančius įrenginius bus sudėtinga. Tokioms katilinėms reikėtų apsvarstyti baterinio ciklono esančio po katilo keitimą į elektrostatinį filtrą.

7 LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. G.Gimbutis, K.Kajutis, V.Krukonis, A.Pranckūnas, P.Švenčianas. Šiluminė technika. – Vilnius: „Mokslas“, 1993. – 176 p. ISBN 5-420-00751-7.
2. P.Švenčianas. Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje. – Kaunas: Technologija, 1994. – 54 p.
3. K.Buinevičius. Aplinkosauga energetikoje // modulio medžiaga, 74 p.
4. LEI - Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorija (12). Prieiga per internetą: <<http://www.lei.lt/main.php?m=152&k=1>> [žiūrėta 2015 04 10].
5. Axis Industries | AXIOMA | Dūmų valymo įrenginiai XILO DUST. Prieiga per internetą: <<http://www.axis.lt/lt/siluma/dumu-valymo-irenginiai>> [žiūrėta 2015-04-09].
6. Dūmų valymo įranga | ENERSTENA. Prieiga per internetą: <<http://www.enerstena.lt/lt/d%C5%ABm%C5%B3-valymo-%C4%AFranga>> [žiūrėta 2015-04-09].
7. Cyclone dust collector / high-efficiency – Processfilter –Sweden AB. Prieiga per internetą: <http://www.directindustry.com/prod/processfilter-sweden-ab/cyclone-dust-collectors-high-efficiency-62574-862799.html#product-item_862793> [žiūrėta 2015-04-09].
8. Pirhonen L., Salamaki J., Particle Emission Reduction Cost Analysis for Existing 1-20 MWfuel Solid Biofuel Plants in Finland, Finland. VAT no. FI1800189-6. Registered office Helsinki.

8 PRIEDAI

8.1 PRIEDAS. 1-osios katilinės kietųjų dalelių misijų matavimai



UAB "Ekopaslauga" įm. kodas 300137906
 Taikos pr. 4, 50187 Kaunas
 Tel. (8 -37) 311558, 8 618 24959, 8 623 44455
 El. paštas: uabekopaslauga@gmail.com

STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 85

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2014-06-06

Tyrimo atlikimo data: 2014-06-09

1 lapas iš 3

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Katilas, pakura	Matavimo vieta	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	Dujų tūrio debitas kamino sąlygomis, m ³ /s	Sausų dujų tūrio debitas n.s., Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s			
1424	10 ⁵⁰ -10 ⁵⁵	TPV-W 15-23, 10 MW (apkrova matavimo metu 4-5 MW)	Po sauso tipo ekonomizaierio	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	73,5	99,1	5,294	2,809	0,20632	0,27844			
1425	11 ⁰⁰ -11 ⁰⁵					37,9				0,10646				
1426	11 ¹⁰ -11 ²⁰					100,7				0,28281				
1427	11 ²⁵ -11 ³⁰					184,5				0,51815				
1428	11 ⁵⁵ -12 ⁰⁰		Po multiciklono						46,95	47,3	5,534	2,961	0,13902	0,13999
1429	12 ⁰⁵ -12 ¹⁵								45,93				0,13600	
1430	12 ²⁰ -12 ³⁰								51,75				0,15323	
1431	12 ³¹ -12 ⁴¹								44,48				0,13171	

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	t _{ortakys} , °C	Δp _{statinis} , hPa	Valymo įrenginio efektyvumas, %	Ortakio matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %
Po sauso tipo ekonomizaierio	6,943	149	-9,50	49,72	1,25 x 0,61	17,64
Po multiciklono	4,896	145	-10,39		Ø1,20	

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 85**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2014-06-06

Tyrimo atlikimo data: 2014-06-09

2 lapas iš 3

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Katilas	Matavimo vieta	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	Dujų tūrio debitas kamino sąlygomis, m ³ /s	Sausų dujų tūrio debitas n.s., Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s
1432	14 ⁰⁰ -14 ¹⁵	TPV-W 15-23, 10 MW (apkrova matavimo metu 4-5 MW)	Išmetime (kamine) po šlapio tipo konomaizerio	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	19,37	19,45	4,157	2,652	0,05137	0,05157
1433	15 ⁰⁰ -15 ¹⁵					18,07				0,04792	
1434	15 ²⁰ -15 ³⁵					20,90				0,05543	

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Katilas	Matavimo vieta	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	Išmatuota O ₂ koncentracija tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Vidutinė perskaičiuota prie 6% O ₂ , koncentracija, mg/Nm ³
1432	14 ⁰⁰ -14 ¹⁵	TPV-W 15-23, 10 MW (apkrova matavimo metu 4-5 MW)	Išmetime (kamine) po šlapio tipo konomaizerio	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	19,37	19,45	6,6	20,18	20,1
1433	15 ⁰⁰ -15 ¹⁵					18,07		6,2	18,31	
1434	15 ²⁰ -15 ³⁵					20,90		6,6	21,77	

Matavimo vieta	Vid. srauto greitis, m/s	t _{ortaktyje} , °C	Δp _{statinis} , hPa	Suminis valymo įr. efektyvumas, %	Ortakio matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %
Išmetime (kamine) po šlapio tipo konomaizerio	3,678	68	-0,60	81,48	Ø1,20	20,69

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 85**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2014-06-06

Tyrimo atlikimo data: 2014-06-06

3 lapas iš 3

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Matavimo laikas (pradžia, pabaiga)	Matavimo vieta	Katilo tipas, galingumas, MW	Kuro rūšis	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija, tūrio %	Standartinė O ₂ koncentracija, tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie standartinių sąlygų, mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie st.sąlygų, mg/Nm ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1436	13 ²⁵	Išmetime (kamine) po šlapio tipo konomaizerio	TPV-W 15-23, 10 MW (apkrova matavimo metu 4-5 MW)	Medienos pjuvenos	Anglies monoksidas (A)	Elektrocheminis. Dūmų analizatoriaus	0,00	6,3	6,0	0	0
1437	13 ³⁰						0,00	6,7		0	
1438	13 ³⁵						0,00	6,6		0	
1439	14 ¹⁰						0,00	6,6		0	
1440	15 ¹⁰						0,00	6,2		0	
1441	12 ²⁵						0,00	6,6		0	
1436	13 ²⁵				Azoto oksidai (A)	Multilyzer darbo instrukcija	192,70	6,3	196,63	194,41	
1437	13 ³⁰						188,60	6,7	197,83		
1438	13 ³⁵						190,65	6,6	198,59		
1439	14 ¹⁰						182,45	6,6	190,05		
1440	15 ¹⁰						188,60	6,2	191,15		
1441	12 ²⁵						184,50	6,6	192,19		

Laboratorijos leidimo, išduoto Aplinkos Apsaugos Agentūroje 2011 m. kovo 22d. Nr. 1AT-278

Matavimus ir skaičiavimus atliko : lab.vedėja V. Juknienė

apl. inžinierė R.Sabaliauskienė *R.S.* direktorė A.Čekauskienė *A.Č.*



8.2 PRIEDAS. 2-osios katilinės kietųjų dalelių misijų matavimai



UAB "Ekopaslauga" įm. kodas 300137906
 Taikos pr. 4, 50187 Kaunas
 Tel. (8-37) 311558, 8 618 24959, 8 623 44455

STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 21

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2014-02-14

Tyrimo atlikimo data: 2014-02-17

1 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Katilas, apkrova	Matavimo vieta	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	Sausų dujų tūrio debitas normalionis sąlygomis, Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s	
374	11 ⁵⁰ -11 ⁵⁴	Katilas Nr.2, VHB 5000, medienos pjuvenos, apkrova ~5 MW	Po katilo	Kietosios dalelės (A)	LAND 28-98/M-08	431,9	371,3	2,292	0,98996	0,85094	
375	11 ⁵⁶ -12 ⁰⁰					328,5			0,75281		
376	12 ⁰² -12 ⁰⁶					341,2			0,78199		
377	12 ⁰⁸ -12 ¹²					391,5			0,89728		
378	12 ¹⁴ -12 ¹⁸		363,3			0,83264					
379	10 ⁴⁵ -10 ⁵⁰		Po multiciklono				286,7	248,7	1,401	0,40161	0,34845
380	10 ⁵⁴ -10 ⁵⁷						327,7			0,45906	
381	10 ⁵⁹ -11 ⁰⁴						285,6			0,40014	
382	11 ⁰⁶ -11 ¹¹	218,3		0,30584							
383	11 ¹³ -11 ¹⁸	125,3		0,17558							

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	t _{centryjes} °C	Δp _{statisis} hPa	Valymo įrenginio efektyvumas, pagal koncentracijas %	Ortakio matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %	Dujų tūrio debitas kamino sąlygomis, m ³ /s
po katilo Nr.2	10,21	138	-7,04	33,01	0,82 x 0,55	23,92	4,604
po multiciklono (2P4 920 elementų)	7,17	129	-9,62		∅ 0,7		2,76

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 21**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2014-02-14

Tyrimo atlikimo data: 2014-02-17

2 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Matavimo laikas (pradžia, pabaiga)	Taršos šaltinio Nr.	Katilo tipas, galingumas, MW	Kuro rūšis	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija, tūrio %	Standartinė O ₂ koncentracija, tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie standartinių sąlygų, mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie st. sąlygų, mg/Nm ³			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
388	10 ¹⁵	-	Katilas Nr.2, VHB 5000, 5 MW, apkrova matavimo metu ~5 MW	Medienos pjuvenos	Anglies monoksidas (A)	Elektrocheminis	0	6,2	6,0	0	0			
389	10 ²⁰						0	5,9		0				
390	10 ²⁵						0	6,7		0				
391	10 ⁴⁷						0	6,5		0				
392	10 ⁵⁴						0	5,5		0				
393	11 ⁰²						0	5,6		0				
394	11 ⁰⁸						0	5,3		0				
395	11 ¹⁵						0	6,1		0				
388	10 ¹⁵				-	Katilas Nr.2, VHB 5000, 5 MW, apkrova matavimo metu ~5 MW	Medienos pjuvenos	Azoto oksidai (A)	Elektrocheminis	250,10	6,2	253,48	295,30	
389	10 ²⁰									254,20	5,9			252,52
390	10 ²⁵									241,90	6,7			253,74
391	10 ⁴⁷									336,20	6,5			347,79
392	10 ⁵⁴									338,25	5,5			327,34
393	11 ⁰²									336,20	5,6			327,47
394	11 ⁰⁸									332,10	5,3			317,29
395	11 ¹⁵	280,85	6,1	282,73										

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 21**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2014-02-14

Tyrimo atlikimo data: 2014-02-17

3 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Katilas, apkrova matavimo metu	Matavimo vieta	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	Išmatuota O ₂ koncentracija tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Vidutinė perskaičiuota prie 6% O ₂ , koncentracija, mg/Nm ³
379	10 ⁴⁵ -10 ⁵⁰	Katilas Nr.2, VHB 5000, 5 MW, apkrova matavimo metu ~5 MW	po katilo Nr.2 multicikono	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	286,7	248,7	6,5	296,54	245,31
380	10 ⁵² -10 ⁵⁷					327,7		5,5	317,10	
381	10 ⁵⁹ -11 ⁰⁴					285,6		5,6	278,19	
382	11 ⁰⁶ -11 ¹¹					218,3		5,3	208,57	
383	11 ¹³ -11 ¹⁸					125,3		6,1	126,16	
384	13 ⁰⁵ -13 ²⁵	Katilai Nr.1, Nr.2, Nr.3	po ekonomizaizerio	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	36,2	43,6	7,5	40,17	48,76
385	13 ³⁰ -13 ⁵⁰					43,7		8,0	50,40	
386	13 ⁵⁵ -14 ¹⁵					50,9		7,3	55,70	

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 21**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: **2014-02-14**

Tyrimo atlikimo data: 2014-02-17

4 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Matavimo laikas (pradžia, pabaiga)	Taršos šaltinio Nr.	Katilo tipas, galingumas, MW	Kuro rūšis	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija, tūrio %	Standartinė O ₂ koncentracija, tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie standartinių sąlygų, mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie st. sąlygų, mg/Nm ³			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
396	12 ²⁵	-	Katilai Nr.1, Nr.2, Nr.3 20 MW	Medienos pjuvenos	Anglies monoksidas (A)	Elektrocheminis	0	7,4	6,0	0	1,15			
397	12 ³⁰						0	8,0		0				
398	12 ³⁵						0	8,0		0				
399	13 ¹⁰						5,00	7,5		5,56				
400	13 ³⁵						0	8,0		0				
401	14 ⁰²						1,25	7,3		1,37				
396	12 ²⁵				-	Katilai Nr.1, Nr.2, Nr.3 20 MW	Medienos pjuvenos	Azoto oksidai (A)	Elektrocheminis	227,55	7,4	-	250,97	267,83
397	12 ³⁰									225,50	8,0		260,19	
398	12 ³⁵									231,65	8,0		267,29	
399	13 ¹⁰									239,85	7,5		266,50	
400	13 ³⁵									243,95	8,0		281,48	
401	14 ⁰²									256,25	7,3		280,57	

Laboratorijos leidimo, išduoto Aplinkos Apsaugos Agentūroje 2011 m. kovo 22d. Nr. 1AT-278

Matavimus ir skaičiavimus atliko : laboratorijos vedėja Violeta Juknienė aplinkos inžinierius Linas Čekauskas




8.3 PRIEDAS. 3-osios katilinės 1-ojo katilo kietųjų dalelių misijų matavimai



UAB "Ekopaslauga" įm. kodas 300137906
 Taikos pr. 4, 50187 Kaunas
 Tel. (8 -37) 311558, 8 618 24959, 8 623 44455
 El. paštas: uabekopaslauga@gmail.com

STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 31

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2015-03-05

Tyrimo atlikimo data: 2015-03-06

1 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Kaltilas	Matavimo vieta, taršos šaltinio Nr.	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Sausų dujų tūrio debitas n.s., Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s
507	9 ³⁰ -9 ³⁶	VŠK VHB 8000 Nr.1,	po katilo	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	260.37	248.59	-	-	-	4,503	1172.44611	1119.4067
508	9 ⁴⁰ -9 ⁴⁵					242.70		-	-	1092.88711			
509	9 ⁵⁵ -10 ⁰⁰					242.70		-	-	1092.88711			
510	9 ³⁰ -9 ³⁴	katilo nominali galia 8 MW	po multiciklono T290 (pilnai atidarytas)	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	238.55	209.51	-	-	-	2,752	656.48410	576.5660
511	9 ⁴⁰ -9 ⁴⁶					193.47		-	-	532.43494			
512	9 ⁵⁵ -10 ⁰⁰					196.50		-	-	540.77901			

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	t _{ortakys} , °C	Δp _{statinis} , hPa	Matavimo angos matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %	Valymo įrenginio efektyvumas, %*
po katilo Nr.1	13.66	169	-6.62	Ø 0,95	24.75	15.7
po katilo Nr.1multicikl.	10.61	172	-11.88	Ø 0,85	25.19	

*- valymo įrenginio efektyvumas skaičiuojamas iš g/s, tačiau dėl to, kad dalis srauto matavimo vietoje nukreipta recirkuliacijai, efektyvumas vertintas pagal koncentracijas.

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 31**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2015-03-05

Tyrimo atlikimo data: 2015-03-06

2 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Kaltilas	Matavimo vieta, taršos šaltinio Nr.	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Sausų dujų tūrio debitas n.s., Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s
513	10 ⁴⁰ -10 ⁴⁵	VŠK VHB 8000 Nr.2, katilo nominali galia 8 MW	po katilo	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	80.34	84.96	-	-	-	5,072	407.49970	430.9019 ¹
514	10 ⁵⁰ -10 ⁵⁵					71.91		-	-	364.73766			
515	11 ⁰⁵ -11 ¹⁰					102.62		-	-	520.46835			
516	10 ⁴⁰ -10 ⁴⁸		po multicyklono T291 (pilnai atidarytas)			107.84	-	-	253.09813				
517	10 ⁵⁰ -10 ⁵⁸					85.74	-	-	2,347	201.22709	223.8834 ¹		
518	11 ⁰⁰ -11 ⁰⁸					92.60	-	-	217.32516				

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	t _{ortakėje} , °C	Δp _{statinis} , hPa	Matavimo angos matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %	Valymo įrenginio efektyvumas, %*
po katilo Nr.2	16.24	187	-8.09	∅ 0,95	25.69	-12.3
po katilo Nr.2multicykl.	9.47	184	-14.33	∅ 0,85	26.40	

*- valymo įrenginio efektyvumas skaičiuojamas iš g/s, tačiau dėl to, kad dalis srauto matavimo vietoje nukreipta recirkuliacijai, efektyvumas vertintas pagal koncentracijas.

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 31**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2015-03-05

Tyrimo atlikimo data: 2015-03-06

3 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžią, pabaigą)	Kaltilas, apkrova	Matavimo vieta, taršos šaltinio Nr.	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Sausų dujų tūrio debitas n.s., Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s
522	12 ⁰⁰	VŠK VHB 8000 Nr 1 ir Nr.2, katilo nominali galia po 8 MW	po ekonomai- zerio	Anglies monoksidas (A)	Elektrochemini s. Dūmų analizatoriaus Multilyzer darbo instrukcija	31.25	303.13	4.6	28.6	277.0	5,496	-	-
523	12 ⁰⁵					107.50		4.2	96.0			-	
524	12 ¹⁰					133.75		4.5	121.6			-	
525	12 ¹⁵					717.50		4.7	660.3			-	
526	12 ²⁰					591.25		4.6	540.8			-	
527	12 ²⁵					237.50		4.4	214.6			-	
522	12 ⁰⁰			Azoto oksidai (A)	Elektrochemini s. Dūmų analizatoriaus Multilyzer darbo instrukcija	170.15	166.05	4.6	155.6	150.9		-	
523	12 ⁰⁵					174.25		4.2	155.6			-	
524	12 ¹⁰					186.55		4.5	169.6			-	
525	12 ¹⁵					155.80		4.7	143.4			-	
526	12 ²⁰					157.85		4.6	144.4			-	
527	12 ²⁵					151.70		4.4	137.1			-	
519	11 ⁵⁵ -12 ¹⁰			Kietosios dalelės	LAND 28- 98/M-08	50.56	47.39	4.4	45.7	43.0		277.85028	
520	11 ⁵⁵ -12 ¹⁰					36.86		4.4	33.3			202.59905	
521	12 ¹⁵ -12 ³⁰	54.74	4.6			50.1		300.83455					

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 31**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2015-03-05

Tyrimo atlikimo data: 2015-03-06

4 lapas iš 4

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	$t_{ortakye}, ^\circ C$	$\Delta p_{statinis}, hPa$	Matavimo angos matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %	Ekonomaize-rio valymo efektyvumas, %	Bendras valymo efektyvumas, %
po ekonomai-ze-rio. Matavimo metu veikė 1 ir 2 katilai	8.99	45	-0.588	Ø 1,00	9.95	67.5	83.2

Laboratorijos leidimo, išduoto Aplinkos Apsaugos Agentūroje 2011 m. kovo 22d. Nr. 1AT-278

Matavimus ir skaičiavimus atliko : lab. vedėja V.Juknienė

apl. inžinierius L.Čekauskas

direktorė A.Čekauskienė

apl.inžinierė R.Sabaliauskienė

8.4 PRIEDAS. 3-osios katilinės 1-ojo katilo kietųjų dalelių misijų matavimai



UAB "Ekopaslauga" įm. kodas 300137906
 Taikos pr. 4, 50187 Kaunas
 Tel. (8 -37) 311558, 8 618 24959, 8 623 44455
 El. paštas: uabekopaslauga@gmail.com

STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 32

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2015-03-05

Tyrimo atlikimo data: 2015-03-06

1 lapas iš 2

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžia, pabaiga)	Katilas	Matavimo vieta, taršos šaltinio Nr.	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Sausų dujų tūrio debitas n.s., Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s
528	13 ⁰⁰ -13 ⁰⁵	VŠK VHB 8000 Nr.1, katilo nominali galia 8 MW	po multicyklono T290. 1 sklendė uždaryta	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	91.26	-	-	-	-	-	324.06071	328.5799
529	13 ¹⁵ -13 ²²					105.49	92.53	-	-	3,551	374.59499		
530	13 ²⁵ -13 ³²					80.85	-	-	-	287.08415			
531	13 ⁵⁵ -14 ⁰²		po multicyklono T290. 2 sklendės uždarytos			88.27	-	-	-	265.86623	332.7858		
532	14 ⁰⁶ -14 ¹³					103.46	110.49	-	-	3,012		311.62453	
533	14 ¹⁵ -14 ²⁰					139.73	-	-	-	420.86676			

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	t _{ortakysje} , °C	Δp _{statinis} , hPa	Matavimo angos matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %	Dujų tūrio debitas kamino sąlygomis m ³ /s
po multicyklono T290. 1 sklendė uždaryta	14.04	182	-15.50	Ø 0,85	25.10	7.960
po multicyklono T290. 2 sklendės uždarytos	12.02	186	-15.89	Ø 0,85	25.15	6.820

**STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ
 TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 32**

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2015-03-05

Tyrimo atlikimo data: 2015-03-06

1 lapas iš 2

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Mėginių paėmimo laikas (pradžią, pabaigą)	Kaltilas	Matavimo vieta, taršos šaltinio Nr.	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm ³	Vidutinė koncentracija, mg/Nm ³	O ₂ koncentracija tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Vidutinė konc., perskaičiuota prie 6% O ₂ , mg/Nm ³	Sausų dujų tūrio debitas n.s., Nm ³ /s	Tarša, g/s	Vidutinė tarša, g/s
534	13 ⁰⁰ -13 ⁰⁸	VŠK VHB 8000 Nr.2, katilo nominali galia 8 MW	po multiciklono T291. 1 sklendė uždaryta	Kietosios dalelės	LAND 28-98/M-08	70.22	81.50	-	-	-	2,501	175.60772	203.84067
535	13 ¹⁰ -13 ¹⁸					96.45		-	-	241.22645			
536	13 ²⁰ -13 ²⁸					77.84		-	-	194.68784			
537	14 ⁰⁰ -14 ⁰⁸		po multiciklono T291. 2 sklendės uždarytos			138.87	-	-	290.93265				
538	14 ¹⁰ -14 ¹⁵					195.97	-	-	2,095	410.55087	423.20257		
539	14 ²³ -14 ³⁰					271.18	-	-	568.12420				

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	t _{ortakyje} , °C	Δp _{statimis} , hPa	Matavimo angos matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %	Dujų tūrio debitas kamino sąlygomis m ³ /s
po multiciklono T291. 1 sklendė uždaryta	10.21	189	-14.75	Ø 0,85	26.40	5.788
po multiciklono T291. 2 sklendės uždarytos	8.24	174	-10.84	Ø 0,85	26.40	4.673

Laboratorijos leidimo, išduoto Aplinkos Apsaugos Agentūroje 2011 m. kovo 22d. Nr. 1AT-278

Matavimus ir skaičiavimus atliko : lab. vedėja V.Juknienė
 direktorė A.Čekauskienė

apl. inžinierius L.Čekauskas
 apl.inžinierė R.Sabaliauskienė

8.5 PRIEDAS. Publikacijų kopijos

V. Mockevičius. Biokuro katilinės kietųjų dalelių emisijų analizė

KTU Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

2015 gegužės 14 d., Kaunas

*Jaunųjų mokslininkų konferencija
„PRAMONĖS INŽINERIJA 2015“*

1. BOKURO KATILINĖS KIETŪJŲ DALELIŲ EMISIJŲ ANALIZĖ

Kęstutis Buinevičius¹, Vaidas Mockevičius²

¹ *Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Šilumos ir atomo energetikos katedra, Studentų g. 56, Kaunas, el. paštas: kbuinevicius@gmail.com*

² *Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Šilumos ir atomo energetikos katedra, Studentų g. 56, Kaunas, el. paštas: vaidmockevicius@gmail.com*

Raktiniai žodžiai: Biokuro deginimas, kietosios dalelės, kietųjų dalelių emisijų mažinimas.

1. Įvadas

Šiandien Lietuvos energetikos kryptis yra nukreipta į atsinaujinančius energijos šaltinius, tokius kaip: saulės, vėjo ir biokuro energetinius šaltinius. Ne paslaptis, jog šilumos gamybai Lietuvoje šiuo metu daugiausia statoma ir projektuojama biokuro katilinių, kurios po truputį keičia morališkai pasenusias mazuto, ar dujų katilines. Šiuo metu daugiausia atliekama 2 - 10 MW galios biokuro katilinių kapitalinių rekonstrukcijų, rečiau iki 30 MW (pavieniai objektai, didiesiems miestams, tokiems kaip Kaunas, Vilnius ar Klaipėda).

Esant biokuro katilinių bumui, jos projektuojamos ir statomos labai dideliais tempais. Nuo konkurso paskelbimo iki biokuro katilinės perdavimo užsakovui praeina 2 metai, kartais net ir mažiau. Toks biokuro katilinių bumai iššaukė įmonių gaminančių įrangą skirtą biokuro deginimui pokyčius. Įmonės siekdamos kuo greičiau patenkinti didelių įrangos poreikius pradėjo standartizuoti savo gaminius. Šis pokytis pačioms įmonėms išėjo į naudą, kadangi jos tą pačią įrangą galėjo pagaminti žymiai greičiau, taip sutrumpindamos visos katilinės rekonstravimo arba statybos laiką. Tačiau technologiškai tai nėra visiškai teisingai atlikta, kadangi kiekviena katilinė yra skirtinga, juolabiau kai atliekami pagrinde (~90% visų biokuro katilinių) rekonstrukcijos darbai, nėra teisinga taikyti vis tą pačią įrangą. To daryti negalima dėl pačio biokuro savybių. Biokuras – tai nėra vien medienos skiedros, žievė ar šakos, tai žymiai platesnė sąvoka, kuri apima ir durpes, ir šiaudus, ir įvairias grūdinių kultūrų atliekas ir netgi granulės (medienos ar šiaudų). Deginant skirtingą kurą, turėsime skirtingas emisijas. Pirmiausia, nuo kuro rūšies, jo drėgnumo, pelenų lydymosi temperatūros, deginimo būdo, oro pertekliaus koeficiento ir dar daugybės faktorių, turėsime skirtingus dūmų debitus, nors katilo galia bus ta pati. Šie skirtumai iššaukia technologinius sprendimus, kurie turi būti taikomi ir skaičiuojami kiekvienai biokuro katilinei. Būtent dėl to kartais vienodos galios katilinės turi skirtingus kurą deginančius įrenginius ir degimo produktų šalinimo bei valymo sistemas.

Projektuojant biokuro katilinės degimo produktų šalinimo ir valymo sistemą, būtina atsižvelgti į galiojančius normatyvinius dokumentus, ilgametę patirtį šioje srityje turinčių specialistų pastabas, taip pat į esamos (ar naujai statomos) katilinės išdėstymą. Lietuvoje šiuo metu galioja LAND 43-2013 normatyvas, skirtas kurą deginančių įrenginių, kurių šiluminė galia lygi arba viršija 1MW, bet nesiekia 50 MW, išmetamų teršalų ribinės vertės. Kurą deginančių įrenginių, kurių šiluminė galia lygi arba viršija 50MW, nepriklausomai nuo kuro rūšies, galioja 2001/80/EB direktyva, o nuo 2016 metų sausio 1 dienos įsigalios 2010/75/ES direktyva. Tai iššauks didžiųjų katilinių rekonstrukcijas ir milžiniškas išlaidas, o tai atsilieps šiuos vartotojams. Žinoma yra ir kitas būdas, nedarant investicijų – uždaryti morališkai pasenusias ir jau atitarnavusias katilines tokias kaip Kauno TEC'o, užleidžiant rinką nepriklausomiems šilumos tiekėjams. Tačiau ar tai būtų geras sprendimas, nes greitu metu bus ruošiami analogiška direktyva ir kurą deginančių įrenginių, kurių šiluminė galia lygi arba viršija 1MW, bet nesiekia 50 MW. Tai iššauks masinį dabar pastatytų biokuro katilinių rekonstrukcijos etapą. Būsimos direktyvos ribos kietųjų dalelių, NO_x, SO₂ ir CO kiekį. Šiame straipsnyje apžvelgsime tik kietųjų dalelių emisijos analizę.

2. Kietosios dalelės, jų susidarymas ir jų gaudymo būdai

Kietomis ar skystomis dalelėmis užterštas oras ar technologinės dujos yra dvifazės sistemos, susidedančios iš dujų ir dispersinės fazės. Tokios dvifazės sistemos vadinamos aerodispersinėmis sistemomis arba aerozoliais.

Dūmai yra dujos, užterštos kietosiomis dalelėmis, susidariusiomis susmulkinus kietas medžiagas į miltus. Dūmai – nepatvarios polidispersinės sistemos, jose kietų dalelių skersmuo svyruoja nuo 0,1 iki 50 μm ir daugiau. Taigi į dulkių sąvoką įeina ir pelenais užteršti kietojo kuro degimo produktai ir skystojo kuro degimo produktai, užterti suodžiais.

Kietosios dalelės susidaro deginant kurą, kai stambūs angliavandeniai skyla į smulkesnes frakcijas, o šios neretai išnešamos su degimo produktais iš pakuros.

Deginant kurą susidarantių kietųjų dalelių kilmės priežastys yra dvi:

nepilnai sudegusi kuro dalis, susidariusi iš organinės kuro dalies – nesudegę angliavandeniai, kokso dalelės, anglies dariniai – suodžiai;

neorganinės kuro dalies pelenai.

Nepilno degimo produktai susidaro iš nesudegusių angliavandenių, kurie nespėjo sudegti kuro dalelėms būnant liepsnoje, t.y. 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. Suodžių susidarymo procesą lydi eilė įvairių reakcijų:

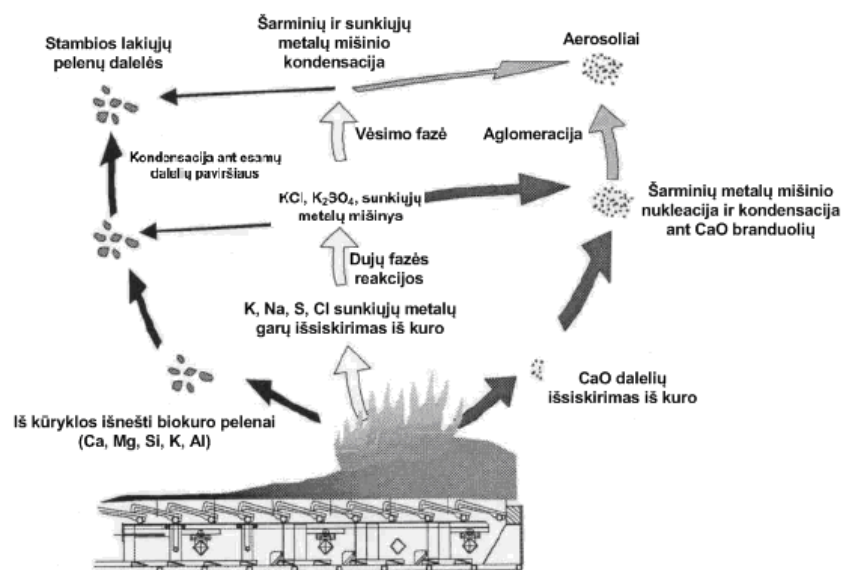
kuro pirolizės;

polimerizacijos;

dalelių augimo;

sudegimo.

Kuro lašeliai prie aukštų temperatūrų degdami garuoja, didelės molekulinės struktūros suyra sudarydamos aukštesnės eilės angliavandenių junginius. Prie aukštų temperatūrų susimaišę su oru, jie pilnai sudega, pvz.: kai paduodamas antrinis oras į degimo kamerą.



1 pav. Kietųjų dalelių ir aerosolių susidarymo deginant biokurą schema

Kokso dalelės susidaro degimo proceso metu iš kure esančių nedegusių priemaišų, nesudegusios kuro anglies, kietųjų sieros junginių. Kokso dalelės yra sferinės ir porėtos, jų dydis nuo 1 iki 100 μm .

Optimalių degimo sąlygų sudarymas yra pagrindinė priemonė mažinant kietųjų dalelių ir pelenų išmetimus. Tinkamai organizavus degimą, dūmuose lieka daugiausiai iš nedegusių medžiagų sudaryti pelenai.

Kietųjų dalelių gaudymui praktikoje naudojama labai daug įvairios paskirties dūmų valymo aparatų, kurie pagal valymo metodus skirstomi į 6 grupes, tačiau kietųjų dalelių gaudymui naudojamos tik 4 iš 6 grupių:

Sausi inerciniai gaudytuvai kietoms dalelėms iš dūmų srauto valyti (dulkių nusodinimo kameros, žaliuzi tipo ir inerciniai gaudytuvai, ciklonai, grupiniai ir bateriniai ciklonai, dūmsiurbiai-pelenų gaudytuvai).

Šlapi dūmų valymo nuo kietųjų dalelių, kartais nuo skystų bei dujinių priemaišų aparatai (skruberiai, barboteriai ir putų aparatai).

Dūmų valymo nuo kietųjų dalelių filtravimo metodu aparatai (aukliniai, grudelių, pluoštiniai).

Elektriniai dūmų valymo nuo kietųjų dalelių aparatai (sausai ir šlapi elektrostatiniai filtrai).

Šios grupės atitinkamai turi atskirus pogrupius pateiktus 2 pav. Kaip matome paveiksle, nėra įtraukti inerciniai gaudytuvai. Taip yra dėl to, jog dabartinėse biokuro katilinėse jie yra kaip pirminio valymo įrenginiai ir praktiškai beveik visada statomi dėl palyginti nedidelės kainos, jie nereikalauja nuolatinės priežiūros ir sugaudo didžiausias kietąsias daleles. Paveiksle pateikiami antriniai kietųjų dalelių gaudytuvai, kurų katilinėje gali ir nebūti, jeigu išmetamų kietųjų dalelių koncentracija neviršija LAND 43-2013 normų.



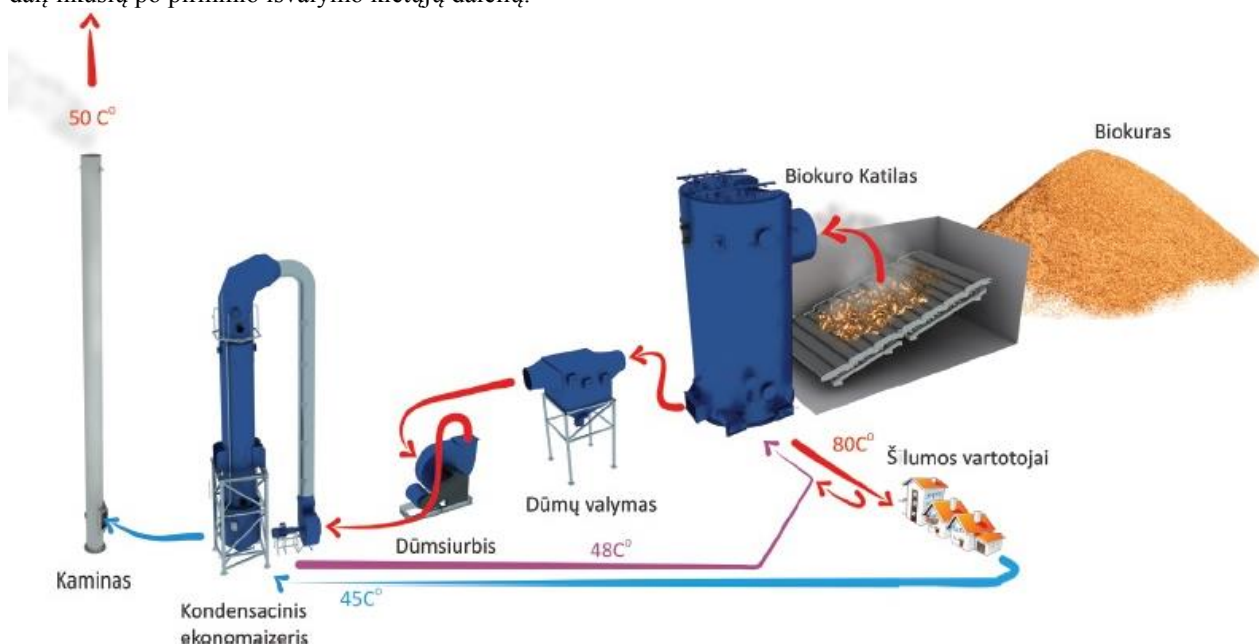
2 pav. Kietųjų dalelių emisijų mažinimo įrenginių ir metodų klasifikacija

3. Kietųjų dalelių emisijų analizė

Teoriškai visi ankščiau išvardinti įrenginiai yra tinkami kietųjų dalelių mažinimo sprendimai, tačiau reikia nepamiršti ir ekonominio įvertinimo, kuris mažiau išsivysčiusiose šalyse kurios tik pradeda diegti biokuro deginimo ir degimo produktų valymo technologijas yra be galo svarbus.

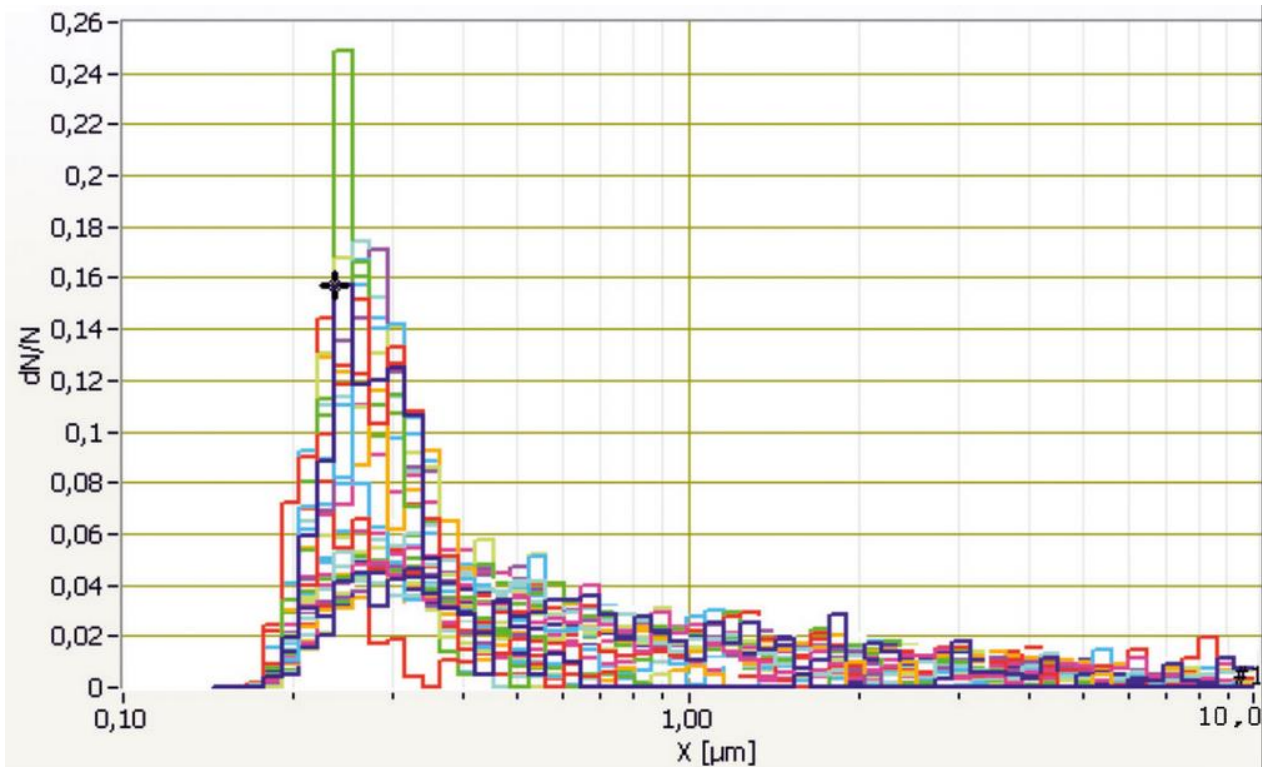
Lietuvoje dažniausia būtent įrenginių kaina ir nulemia tai kokie jie bus montuojami katilinėje, jeigu jie tenkina galiojančias kietųjų dalelių, SO₂, CO ir NO_x ribines vertes. Tik nedažnas katilinės vadovas arba katilinę valdanti organizacija nori griežtesnių išmetamųjų teršalų koncentracijų nei jos yra dabar. Tačiau dar niekas nesiryžta statyti pažangiausių kietųjų dalelių valymo įrenginių, kurie užtikrintų <math> < 30 \text{ mg/m}^3 </math> išmetimus, taip užbėgant už akių planuojamai įvesti naujai direktyvai kuri palies didžiąją dalį Lietuvos energetinių objektų.

Šiuo metu Lietuvoje apstu biokuro katilinių, su „standartine“ dūmų valymo schema nuo kietųjų dalelių, kai degimo produktai iš katilo pereina pirminį dūmų valymą bateriniame ciklone (multiciklone), kuriame sugaunamos didžiausios frakcijos kietosios dalelės. Vėliau degimo produktai eina į dūmsiubę, iš kurios į kondensacinį ekonomizerį, kur vyksta antrinis valymas nuo kietųjų dalelių išpurškiant vandenį į degimo produktus, taip juos atvėsinant bei sugaunant didžiąją dalį likusių po pirminio išvalymo kietųjų dalelių.

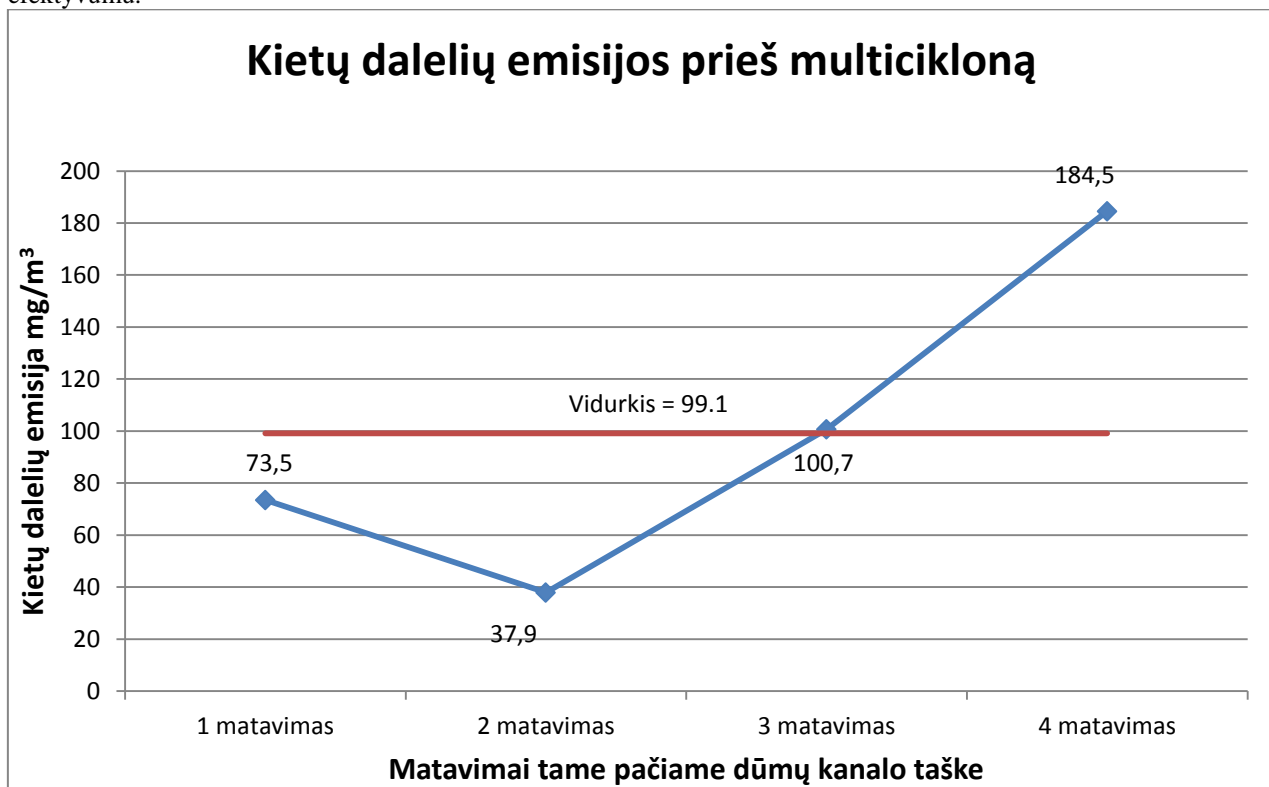


3 pav. Principinė biokuro katilinės degimo produktų šalinimo schema

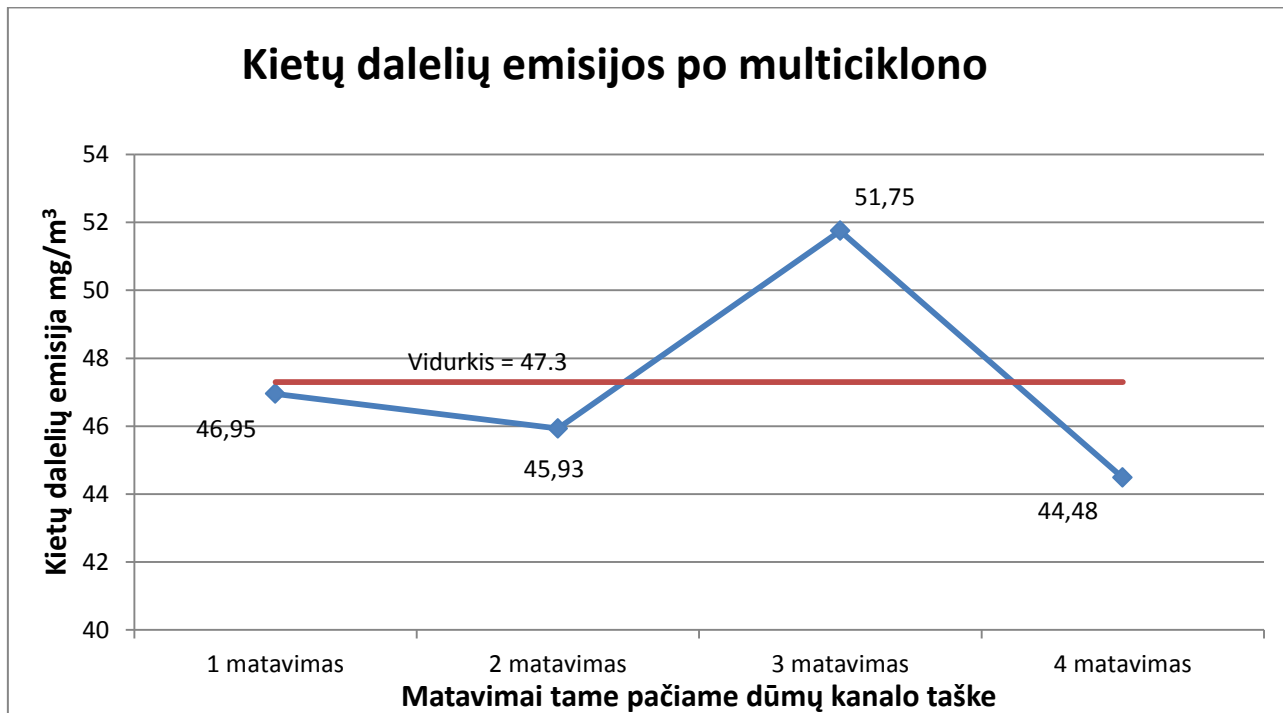
Kadangi cikloninių gaudytuvų efektyvumas priklauso nuo kietųjų dalelių dydžio ir masės, skaičiavimams naudojome LEI mokslininkų atlikta kietųjų dalelių emisijų analizę 4 pav.



4 pav. LEI mokslininkų atlikta kietųjų dalelių emisijų analizė deginant medienos skiedras
 Skaičiavimus atlikome teoriškai ir palyginome su realiais matavimais atliktais Lietuvos veikiančiose biokuro katilinėse (5 pav. ir 6 pav.). Atliktus skaičiavimus lyginsime su tokio tipo katilinių kietų dalelių gaudymo įrenginių (multiciklonų) efektyvumu.



5 pav. Kietųjų dalelių emisija prieš baterinį cikloną



6 pav. Kietųjų dalelių emisija po baterinio ciklono

Kaip matome 5 ir 6 paveiksluose, kietųjų dalelių emisija nėra pastovi, todėl palyginimams naudosime vidutines vertes. Pagal tai, realus baterinis ciklonas, kai katilas nedirbo nominaliu režimu (10 MW katilas matavimo metu dirbo 4-5 MW galia), sugaudo 52,27% kietųjų dalelių. Tai yra gan neblogas rezultatas, žinant tai jog dūmams tekant per baterinio ciklono celes kietosios dalelės prispaudžiamos prie ciklono sienelės nuo tekėjimo greičio faktorių: dalelių judėjimo greičio ciklone ir tuo pačiu atsirandančios išcentrinės jėgos.

Tuo tarpu, atlikus skaičiavimus, ciklono efektyvumas gaudant kietąsias daleles kinta nuo kietųjų dalelių dūmuose sudėties, pagrinde jų dydžio. Priimant jog dūmuose didžioji dalelių dalis bus 0,25 μm dydžio, šių dalelių ciklono sugaudymo laipsnis bus tik ~14,686%, kai priimame, jog didžioji dalelių dalis bus 10 μm dydžio, ciklono sugaudymo laipsnis gaunasi ~85,04%. Remiantis LEI mokslininkų kietųjų dalelių emisijų analize, baterinio ciklono efektyvumas turėtų būti artimas 55%. Šis baterinio ciklono efektyvumas yra artimas realiai išmatuotam.

4. Išvados

1. Atlikus patikrinamąjį baterinio ciklono skaičiavimą, nustatėme, jog ciklonų efektyvumas priklauso ne tik nuo kuro rūšies, bet ir nuo kitų dalelių priklausomybių: frakcijos bei matavimo taškų parinkimo, matavimo prietaisų ir t.t. Dėl šių priežasčių praktiškai neįmanoma tiksliai nustati realios kietųjų dalelių emisijos. Palyginimui naudoti realios katilinės matavimų duomenys taip pat nebuvo pastovūs, nuolat kito, tačiau imant vidurkį, nedaug tesiskyrė nuo skaičiavimo rezultatų.
2. Ateityje, žvelgiant su perspektyva, jeigu bus patvirtinta nauja direktyva, kuri ribos išmetamų kietųjų dalelių kiekį iki 30 mg/nm³, praktiškai visos biokurą deginančios katilinės turės rekonstruoti savo kietųjų dalelių gaudymo sistemas ir tai iššauks nemažas investicijas, kurios atsilieps šilumos kainoms vartotojams. Kai kuriose katilinėse atnaujinti esamos sistemas labai problematiška, nes katilinės įrengimai sukomponuoti labai kompaktiškai ir įrengti naujus kietąsias daleles gaudančius įrenginius bus praktiškai neįmanoma. Tokioms katilinėms reikėtų apsvarstyti baterinio ciklono esančio už katilo keitimą į elektrostatinį filtrą, o naujoms katilinėms arba šiuo metu planuojančioms rekonstrukcijas, vertėtų apsvarstyti brangesnius kietųjų dalelių gaudymo metodus, kurie užtikrintų reikalaujamas normas.

Literatūra

1. G.Gimbutis, K.Kajutis, V.Krukoniš, A.Pranckūnas, P.Švenčianas. Šiluminė technika. – Vilnius: „Mokslas“, 1993. – 176 p. ISBN 5-420-00751-7.
2. P.Švenčianas. Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje. – Kaunas: Technologija, 1994. – 54 p.
3. K.Buinevičius. Aplinkosauga energetikoje // modulio medžaga, 74 p.
4. LEI - Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorija (12). Prieiga per internetą: <<http://www.lei.lt/main.php?m=152&k=1>> [žiūrėta 2015 04 10].
5. Axis Industries | AXIOMA | Dūmų valymo įrenginiai XILO DUST. Prieiga per internetą: <<http://www.axis.lt/lt/siluma/dumu-valymo-irenginiai>> [žiūrėta 2015-04-09].
6. Dūmų valymo įranga | ENERSTENA. Prieiga per internetą: <<http://www.enerstena.lt/lt/d%C5%ABm%C5%B3-valymo-%C4%AFranga>> [žiūrėta 2015-04-09].
7. Cyclone dust collector / high-efficiency – Processfilter –Sweden AB. Prieiga per internetą: <http://www.directindustry.com/prod/processfilter-sweden-ab/cyclone-dust-collectors-high-efficiency-62574-862799.html#product-item_862793> [žiūrėta 2015-04-09].