



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**

**Justas Drukteinis**

**AERODINAMINIO LAŠELIŲ SEPARATORIAUS PANAUDOJIMO  
DEGIMO EMISIJŲ MAŽINIMUI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

dr. Edvinas Krugly

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**

**AERODINAMINIO LAŠELIŲ SEPARATORIAUS PANAUDOJIMO**  
**DEGIMO EMISIJŲ MAŽINIMUI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)**

**Vadovas**

dr. Edvinas Krugly

2018.06.07

**Recenzentas**

dr. Darius Čiužas

2018.06.07

**Projektą atliko**

Justas Drukteinis

2018.06.07

**KAUNAS, 2018**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**

Justas Drukteinis

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

„Aerodinaminio lašelių separatoriaus panaudojimo degimo emisijų mažinimui tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2018 m. birželio 7 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Justo Drukteinio, baigiamasis projektas tema „Aerodinaminio lašelių separatoriaus panaudojimo degimo emisijų mažinimui tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

## TURINYS

1. Įvadas .....	10
2.1 Aerodinaminiai įrenginiai kietosioms dalelėms sugauti .....	11
2.2 Ciklonas .....	11
2.3 Rankovinis filtras .....	14
2.4 Elektrostatinis filtras .....	16
2.6 Kietųjų dalelių aglomeracija ir sugaudymas .....	18
2.7 Sausieji ESF .....	23
2.8 Modifikuoti ESF .....	24
2.9 Elektrostatiniai dalelių aglomeratoriai .....	26
2.10 Elektrinės įtampos ciklonai (elektrociklonai) .....	27
2.11 Lašelių separatoriai .....	29
2.12 Aerodinaminių įrenginių tobulinimas .....	30
3. Metodinė dalis .....	31
3.1 Separatoriaus projektavimas remiantis aerozolio dalelių fizika .....	31
3.2 Matematinis srautų modeliavimas suprojektuotame separatoriuje .....	35
3.3 Kietųjų kūnų sritys .....	37
3.4 Aerodinaminio įrenginio modeliavimas .....	38
3.5 Fizinis modelis .....	39
4. Rezultatai .....	41
4.1 Projektavimo rezultatai remiantis aerozolio fizikos skaičiavimais .....	41
4.2 Matematinio srautų modeliavimo rezultatai .....	47
4.3 Fizinis modeliavimas .....	50
5. Išvados .....	53
Literatūros šaltiniai .....	54

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Oro (dujų) valymo įrenginių klasifikacija.....	11
2 pav. Ciklonas ir jo pagrindinės dalys.....	12
3 pav. Schematiškai pavaizduoti skirtingai modifikuoti ciklonų vidiniai korpusai: a) keturių perskyrimų spiralės formos, b) šešių perskyrimų spiralės formos, c) vidiniu tūtos perimetru einančiais grioveliais, d) vertikaliai tūtos einančiais grioveliais.....	13
4 pav. Dujų srauto įvestys į cikloną: a) tangentinis, b) sukūrinėmis mentelėmis, c) spiralinis.....	13
5 pav. Iš viršaus vaizduojami ciklonai turintys skirtingą įėjimo angų skaičių: a) su 6 įėjimo angomis, b) su trimis įėjimo angomis.....	14
6 pav. Audinys prieš ir po filtravimo, a) pav. priartinta 500 kartų, b) pav. priartinta 2000 kartų.....	15
7 pav. Rankovinio filtro darbinė veikimo schema.....	15
8 pav. Vamzdinio tipo ESF pritaikytas naudoti aukštose temperatūrose bei dideliuose slėgiuose.....	16
9 pav. Plokštelinio tipo elektrostatinis filtras.....	17
10 pav. Šlapiojo dinaminio veikimo skruberis.....	18
11 pav. Kietosioms dalelėms išvalyti naudotos įrangos schema.....	20
12 pav. Žemo dažnio (44 Hz) akustinė aglomeracija bimodaliniui aerozoliui.....	20
13 pav. Principinė schema bipolinės dalelių aglomeracijos išmetamosiose dujose.....	21
14 pav. Dalelių aglomeravimo tyrimo testinė schema.....	22
15 pav. Elektrostatiinių nusodintuvų tipai: a) lygiagrečių plokštelių, b) vamzdinio tipo.....	24
16 pav. Dviejų etapų elektrostatinio nusodintuvo principinė schema .....	26
17 pav. Elektrostatinis nusodintuvas su aglomeratoriaus skyriumi.....	27
18 pav. Elektrinės įtampos ciklonas (elektrociklonas).....	28
19 pav. Schematinis sukūrinių menčių separatorius.....	29
20 pav. Mentės (plokštelės) lašelių separatoriuje.....	30
21 pav. Ašinio tipo ciklonas gebantis su kintamu vidiniu išdėstymu.....	31
22 pav. Lašelių separatoriaus menčių išdėstymo principinė schema.....	35
23 pav. Projektuojamo lašelių separatoriaus modelis.....	40
24 pav. Separatoriaus vidinė sekcija.....	40
25 pav. Plokštelės sudarančios lašelių separatoriaus vidinę sekciją. A – plokštelės kraštinių ilgis, B – tarpas tarp plokštelių. ....	41

26 pav. Separatoriaus modelio schema: 1 – polikarbonatinis skaidrus dangtis, 2 – 200 mm atvamzdis su tarpine, 3 – rėtinė plokštė, 4 – separatoriaus plokštelės, 5 – atvamzdis surinkto kondensato nutekėjimui.....	42
27 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo tarpo tarp plokštelių.....	43
28 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo plokštelių sekcijų skaičiaus įrenginyje, esant 1 cm tarpui tarp plokštelių.....	44
29 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo plokštelių sekcijų skaičiaus įrenginyje, esant: a) 1,5 cm tarpui, b) 2 cm tarpui tarp plokštelių.....	45
30 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo tarpo tarp plokštelių separuojant skirtingo dydžio lašelius: a) lašeliai 2,5 μm dydžio, b) lašeliai 5 μm dydžio, c) lašeliai 10 μm dydžio.....	47
31 pav. Lašelių separatorius efektyvumas su: a) viena plokštelių banga ir b) dvejomis plokštelių bangomis, esant 1000 m <sup>3</sup> /h debitui, prie skirtingo tarpo tarp sekcijų plokštelių.....	48
32 pav. Lašelių separatoriaus su skirtingu bangų skaičiumi efektyvumas, esant 1000 m <sup>3</sup> /h debitui ir esant skirtingam tarpui tarp sekcijų plokštelių.....	49
33 pav. Lašelių separatoriaus pjūviai esant 1000 m <sup>3</sup> /h debitui, vaizduojantys: a) srauto greitį esant 20 mm tarpui tarp plokštelių; b) susidarantį slėgį esant 20 mm tarpui tarp plokštelių; c) srauto greitį esant 60 mm tarpui tarp plokštelių; d) susidarantį slėgį esant 60 mm tarpui tarp plokštelių.....	50
34 pav. Aerodinaminis lašelių separatorius.....	51
35 pav. Fizinio modelio separavimo sekcija iš viršaus. ....	52
36 pav. Lašelių separatoriaus slėgio nuostolių (Pa) priklausomybė nuo prafiltruoto oro debito (m <sup>3</sup> /h).....	52
37 pav. Biokuro katilinėje atliekamas sukonstruoto lašelių separatoriaus stendo bandymas.....	53

## SANTRUPOS

SDK – Studentams skirta projektavimo programa (angl. Student Design Kit);

CFD – Skaičiuojamoji skysčio dinamika (angl. Computational Fluid Dynamics);

JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos;

ESF – Elektrostatinis filtras (angl. Electrostatic filter);

CAD – Kompiuterio pagalba sukurtas dizainas (angl. Computer Aided Design).

Drukteinis, Justas. Aerodinaminio lašelių separatoriaus panaudojimo degimo emisijų mažinimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Edvinas Krugly; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aplinkos inžinerija (E03), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: lašeliai, aerodinaminis separatorius, išlakos, biokuras.

Kaunas, 2018. 56 p.

## SANTRAUKA

Baigiamajame magistro darbe projektuojama ir analizuojama biokuro katilinės išlakų valymui skirta aerodinaminio lašelių separatoriaus technologija. Tokio tipo įrangos paskirtis – sugaudyti ir pašalinti po biokuro degimo proceso išlakose esančius pakibusius garo lašelius, kuriuose yra suspenduota dalis kietųjų dalelių.

Darbo tikslas: pasitelkus teorinius aerozolio fizikos skaičiavimo ir matematinio modeliavimo rezultatus pagaminti ir ištestuoti optimalių parametrų aerodinaminį lašelių sulaikymo įrenginį.

Teorinėje baigiamojo darbo dalyje apžvelgiama literatūra apie kietųjų dalelių aglomeravimo ir sugavimo būdus, plačiai apžvelgiamos sukauptos žinios apie aerodinaminis įrenginius, jų tipus, naudojimo sąlygas ir galimybes bei jų modifikacijas. Pateikiama žinių apie lašelių separatorius.

Metodologinėje darbo dalyje pateikiamos pasirinktos metodikos formulės, kurios apskaičiuoja projektuojamo aerodinaminio įrenginio parametrus bei kartu įvertina įeinančio srauto kriterijus. Taip pat aprašoma simuliacijoms naudojama programa SolidWorks SDK (angl. Student Design Kit) (2017-2018 m., Dassault Systemes) ir CFD modelis. Apibūdinamos fizinio modelio sudedamosios dalys, pateikiama principinė lašelių separatoriaus schema.

Projektinėje baigiamojo darbo dalyje grafiškai pateikiami aerozolio dalelių fizikos skaičiavimų rezultatai, kurie atlikti pagal pasirinktą metodiką. Taip pat pateikiami ir aprašomi matematinio srautų modeliavimo gauti rezultatai. Pateikiama realaus fizinio modelio bandymo eiga.

Rezultatuose aptariami gauti aerodinaminio lašelių separatoriaus rodikliai. Naudotos skirtingos metodikos, aptartos projektinėje dalyje, parodė galimas skirtingas įrenginio efektyvumo galimybes. Įrenginio efektyvumas esant 1  $\mu\text{m}$  lašeliui gali svyruoti nuo 4 % iki 52 %, priklausomai nuo tarpo tarp atskyrimo sekcijos, plokštelių bangų skaičiaus, įeinančio dujų srauto debito bei pačių lašelių dydžio. Didėjant lašeliams aerodinaminio lašelių separatoriaus efektyvumas proporcingai didėja, o esant lašeliams didesniems nei 10  $\mu\text{m}$  visais atvejais įrenginio efektyvumas pasiekia 100 %.



Drukteinis, Justas. Investigation of the Droplet Separator Application for the Reduction of Combustions Emissions. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Edvinas Krugly; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03), Engineering Sciences (E).

Keywords: droplets, aerodynamic separator, emissions, biofuels.

Kaunas, 2018. 56 pages.

## **SUMMARY**

The final report for Master's degree focuses on the design and analysis of an aerodynamic droplet separator technology for cleaning of biomass boiler emissions. The purpose of the equipment is to collect and remove solid particle containing steam droplets that are suspended in the emissions from the biomass combustion process.

The aim of this project is to manufacture and test the optimal design of an aerodynamic droplet eliminator device based on the results of mathematical modelling and theoretical calculations of aerosol physics.

The theoretical background section reviews literature on the methods of solid particle agglomeration and collection, a wide range of knowledge on aerodynamic devices and their types, operational conditions as well as their capabilities and modifications. The review also reports on the recent knowledge of droplet separators.

The methodology section presents the equations used to calculate the required parameters of the aerodynamic device and to evaluate the criteria for the inlet flow. CFD model, provided by SolidWorks SDK (2017 – 18, Dassault Systemes) and used in this project, is described. The process of testing of the physical model of the device is presented.

The results section discusses the performance of the aerodynamic droplet separator. Different methodologies described in the project part were used and have shown the possible outcomes in terms of the effectiveness of the device. Generally, it has been observed that the effectiveness for droplets of 1  $\mu\text{m}$  can range between 4 % to 52% depending on the gap between the plates in separation section, number of plates, volumetric flow rate of the incoming gas flow and the droplet size. Effectiveness of the aerodynamic droplet separator increases proportionally with increasing droplet size and reaches 100% in all cases where the size is larger than 10 $\mu\text{m}$ .

## 1. Įvadas

Greitas ekonomikos augimas, dideli eismo srautai, sparčiai besivystančios pramonės bei energetikos sritys yra atsakingos už sparčiai didėjančius išsiskiriančių emisijų kiekius. Atmosferinė tarša kartu su kietosiomis dalelėmis yra vieni iš pagrindinių faktorių, kurie ne tik keičia planetos klimata globaliai, bet kartu blogina žmonių gyvenimo kokybę.

Didėjant aplinkos apsaugos reikalavimams ir siekiant išvengti problemų dėl ore ir atmosferoje tvyrančių kietųjų dalelių yra nustatyti galimi būdai, kaip pašalinti ar bent sumažinti srautus susidaranciu kietuju daleliu pramoniniuose procesuose. [1]

Deginant biokurą, susidaro pirminiai degimo produktai, pavyzdžiui suodžiai (kietosios dalelės). Šių susidaranciu teršalu fizinis ir cheminis tyrinėjimas bei jų išvalymo technologiju tobulinimo siekimas darosi vis aktualesne šių dienu tyrimu kryptimi. [2]

Remiantis pasauline statistika, 2015 metais aplinkos taršos sukeltos ligos nusinešė apie 9 milijonus žmonių gyvybių, o tai sudaro apie 16 % mirčių visame pasaulyje ir šie skaičiai nuolat auga. Pastebima, kad šalyse, kuriose mažas pajamų lygis, susidarantis taršos lygis pareikalauja daugiau žmonių gyvybių, nei šalyse su dideliu pajamų lygiu. Apskaičiuota, kad susidaranciai taršai sumažinti kasmet yra išleidžiama apie 4,6 trilijono JAV dolerių, o tai sudaro 6,2 % bendros pasaulio ekonomikos produkcijos.[3]

Anksčiau minėtos taršos sukeltos problemos kasmet globaliai juntamos vis labiau, itin reikalinga skirti daugiau dėmesio susidarancioms problemoms spręsti, ieškant naujų galimybių technologiju modernizavimui ir kūrimui.

**Darbo tikslas:** Pasitelkus teorinius aerolio fizikos skaičiavimo ir matematinio modeliavimo rezultatus pagaminti ir ištestuoti optimaliu parametru aerodinaminį lašeliu sulaikymo įrenginį.

### **Baigiamojo darbo uždaviniai:**

1. atlikus mokslinės literatūros analizę atlikti aerodinaminio lašeliu sugaudymo įrenginio optimaliu parametru skaičiavimus, remiantis aerolio fizikos dėsniais;
2. atlikti matematinį srautu modeliavimą suskaičiuotu parametru aerodinaminiam lašeliu sulaikymo įrenginyje bei įvertinti lašeliu sulaikymo efektyvumą;
3. remiantis teoriniais skaičiavimais ir matematinio modeliavimo rezultatais pagaminti ir ištestuoti optimaliu parametru aerodinaminį lašeliu sulaikymo įrenginį.

## 2. Teorinė dalis

### 2.1 Aerodinaminiai įrenginiai kietosioms dalelėms sugauti

Dujų srautui valyti bei kietąsias daleles sugauti naudojamus technologinius instrumentus galima suskirstyti pagal skirtingą veikimo principą – gravitaciją, inerciją ar panaudojant elektros srovę arba garso bangas. Toliau pateikiama dujų srauto valymo įrenginių klasifikacija. [4]

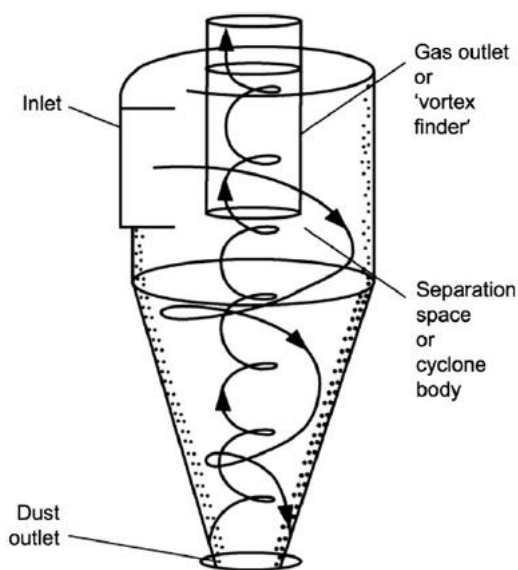


1 pav. Oro (dujų) valymo įrenginių klasifikacija. [4]

### 2.2 Ciklonas

Vieni iš labiausiai paplitusių naudojamų įrenginių pramonėje kietosioms dalelėms išvalyti iš užteršto oro srauto yra ciklonai arba multiciklonai. Šių įrenginių didelis populiarumas pramonėje oro teršalams pašalinti yra dėl paprastos konstrukcijos, pigių eksploatacinių sąlygų ir dėl mažos kainos. Ciklonai pasižymi paprasta ir patikima konstrukcija, kurioje nėra judančių dalių, kas skatintų įrenginio dilimą bei įvairių filtruojančių paviršių, kuriuos darbo metu reikėtų keisti naujais. Jų veikimo principas pagrįstas inercijos jėga, dar kitaip vadinama išcentrine jėga, kuri sukuriama sudarant besisukančių dujų verpetą viduje ciklono. Tokiu dujų valymo principu, kietosios dalelės, esančios dujų išlakų sraute yra veikiamos ir nusodinamos išcentrinės, gravitacinės ir trinties jėgų. Tačiau pagrindinis šio tipo įrenginių veikimo trūkumas yra nevienodas išvalymo efektyvumas atsižvelgiant į dujų sraute esančių kietųjų

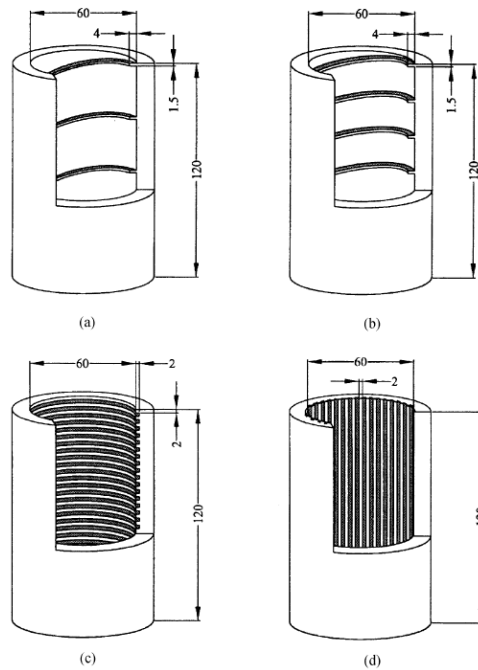
dalelių dydį. Didžiausias ciklono efektyvumas yra pasiekiamas, kai iš užteršto dujų srauto norima pašalinti daleles, didesnes nei  $10\mu\text{m}$ , tuomet įrenginio efektyvumas gali siekti net 80 – 95%. Pagrindinės ciklono sudedamosios dalys: įėjimo anga, pro kurią į cikloną patenka užterštų dujų srautas, įrenginio korpusas susidedantis iš cilindrinės ir kūginės dalių, bunkeris į kurį surenkamos įrenginyje nusėdusios kietosios dalelės, sparneliai arba įvairaus tipo kreipiančiosios, siekiant sudaryti dujų sūkurį ir išėjimo anga, iš kurios pašalinamas apvalytas dujų srautas. [5]



**2 pav. Ciklonas ir jo pagrindinės dalys. [6]**

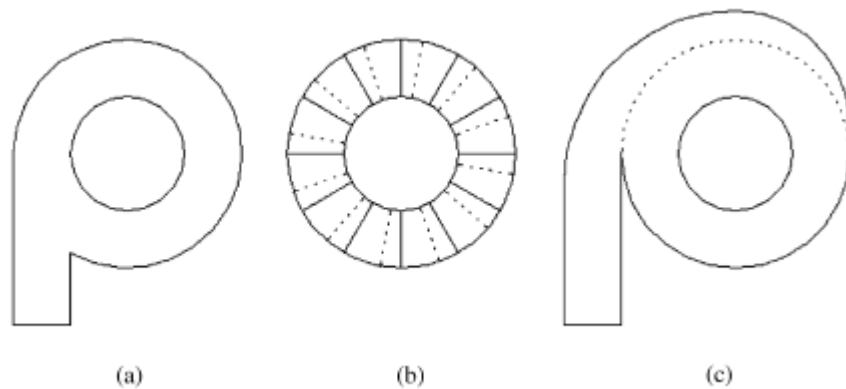
Ciklonai gali būti skirtingų konstrukcijų bei yra skirstomi į ašinius ir tangentinius, priklausomai nuo užterštų dujų įvedimo krypties į įrenginį. Ašiniai ciklonai savo sandara yra paprastesni ir tinkamesni esant poreikiui išvalyti didelius užterštų dujų debitus, tačiau jų efektyvumas yra mažesnis, nei tangentinių ciklonų. Siekiant padidinti šių įrenginių efektyvumą, dažnai yra naudojami multiciklonai, kurių veikimo principas yra analogiškas įprastiems ciklonams, tačiau didesnis įrenginio efektyvumas yra išgaunamas į vieną įrenginį sujungiant keletą arba keliolika tūtų, į kurias yra paskirstomas įėjęs dujų srautas su kietosiomis dalelėmis. [5]

Ciklonai gali skirtis savo vidine sandara ir tokiu būdu įrenginį galima geriau pritaikyti esamoms įeinančio srauto sąlygoms, kad padidintų dalelių nusodinimo ir surinkimo efektyvumą. Pavyzdžiui, vidinėje ciklono (ar multiciklono tūtos) dalyje suprojektuoti spiralės formos kreipiančiąsias arba vidiniu tūtos perimetru einančius griovelius, arba vertikaliai tūtos einančius griovelius. [7]

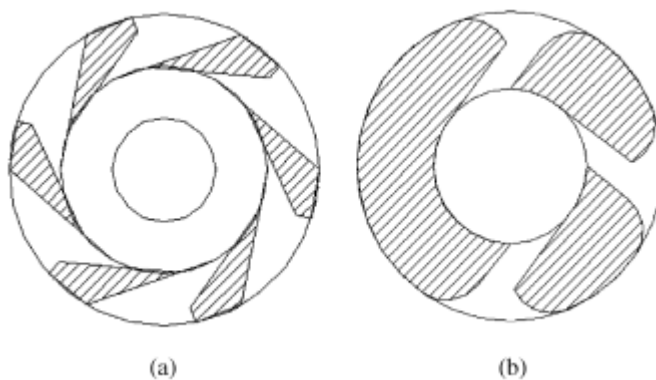


**3 pav. Schematiškai pavaizduoti skirtingai modifikuoti ciklonų vidiniai korpusai: a) keturių perskyrimų spiralės formos, b) šešių perskyrimų spiralės formos, c) vidiniu tūtos perimetru einančiais grioveliais, d) vertikaliai tūtos einančiais grioveliais. [7]**

Taip pat gali skirtis dujų srauto įvedimo angų skaičiumi bei tipu:



**4 pav. Dujų srauto įvestys į cikloną: a) tangentinis, b) sukurnėmis mentelėmis, c) spiralinis. [8]**



**5 pav. Iš viršaus vaizduojami ciklonai turintys skirtingą įėjimo angų skaičių: a) su 6 įėjimo angomis, b) su trimis įėjimo angomis. [8]**

### **2.3 Rankovinis filtras**

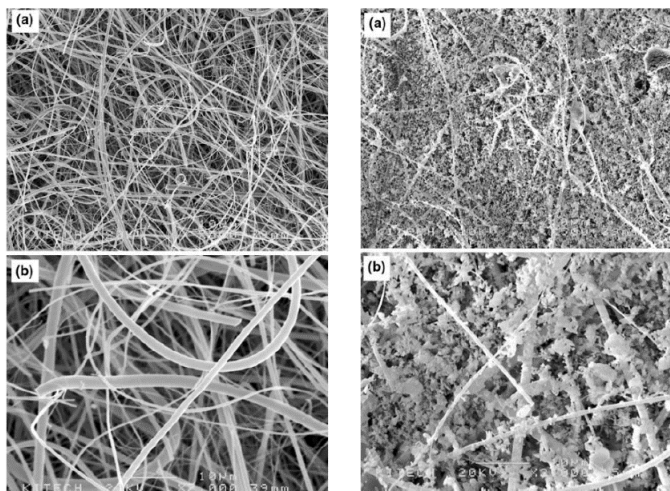
Rankoviniai filtrai skirti iš užteršto dujų srauto išfiltruoti esančias kietąsias daleles. Šio tipo technologiniai įrenginiai pramonėje dažnai naudojami ten, kur kietosios dalelės susidaro po kietojo kuro ar atliekų deginimo procesų, taip pat kieto kuro katilinėse, cemento gamyklose, geležies apdirbimo pramonėje, termoelektrinėse, jėgainėse ir t. t. Ši aerodinaminių įrenginių grupė yra populiari dėl savo didelio išvalymo efektyvumo ir dalelių sugavimo koeficiento. [9]

Šiuos filtrus paprastai sudaro viena arba keletas sekcijų su filtruojančiomis rankovėmis viduje, pro kurias dujų srautas yra filtruojamas per specialiai parinktą pluoštinę medžiagą. Dėl šios priežasties filtruojančiosios rankovės turi būti reguliariai supurtomos, kad pasišalintų susikaupusias kietosios dalelės.

Pagal filtruojančiųjų rankovių valymo būdą filtrai yra skirstomi į:

- išsivalančius grįžtančių dujų srautu;
- išsivalančius mechaniškai nupurtant rankoves;
- išsivalančius suspausto oro impulsu.

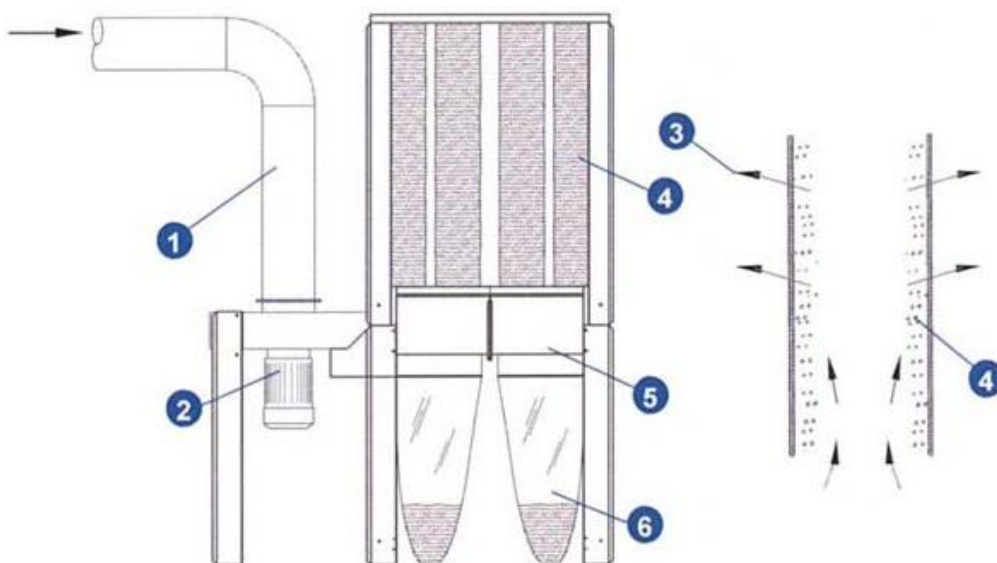
Rankovinio filtro filtruojančiosios rankovės gali būti pagamintos iš skirtingų audinių, pasirenkant pagal įrenginio darbinės sąlygas. Dažnai filtro rankovės gaminamos iš polipropileno, poliesterio ar poliamido. [9]



6 pav. Audinys prieš ir po filtravimo, a) pav. priartinta 500 kartų, b) pav. priartinta 2000 kartų. [9]

Rankovinio filtro veikimo principą galima suskirstyti į keletą etapų (žr. 7 pav.):

1. jeigu valymo procesas vyksta nusistovėjusioje būsenoje, užterštas oras atkeliauja pro įėjimo ortakį;
2. patekęs užterštas oro srautas praeina pro srauto palaikymo ventiliatorių;
3. kietosios dalelės, esančios užterštame dujų sraute patenka į surinkimo rankovę filtrę;
4. dujų srautas praėjęs surinkimo rankovę sulėtėja, sunkesnės dulkių dalelės krenta vidun į surinkimo maišą;
5. išvalytas prafiltruotas oras patenka į filtro korpuso vidų;
6. oras, kuris pateko po proceso užterštas, švarus išeina iš rankovinio filtro į aplinką.



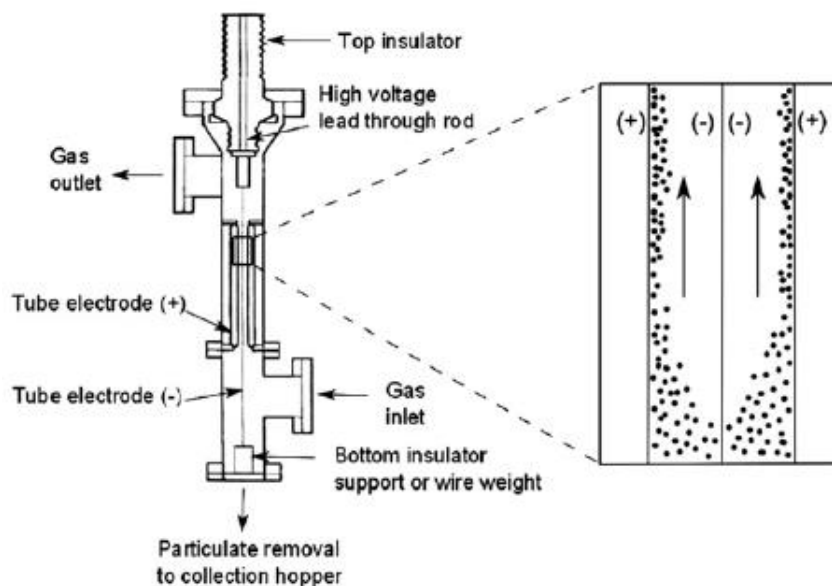
7 pav. Rankovinio filtro darbinė veikimo schema. [10]

## 2.4 Elektrostatinis filtras

Elektrostatinės savybės taip pat gali būti pritaikytos kietosioms dalelėms pašalinti iš dujų srauto. Iš tiesų, elektrostatinio dalelių filtro (nusodintuvo) veikimo principas pagrįstas, kad dalelės įgauna krūvį nuo stipraus elektrinio lauko ir yra pašalinamos remiantis jų skirtingomis dielektrinėmis savybėmis. Elektrostatinės jėgos veikdamos tik kietąsias daleles, mažesnes nei 30  $\mu\text{m}$ , gali būti iki 100 kartų stipresnės nei gravitacijos jėga, taigi šie technologiniai įrenginiai yra labai efektyvūs siekiant pašalinti daleles iš dujų srauto. [6]

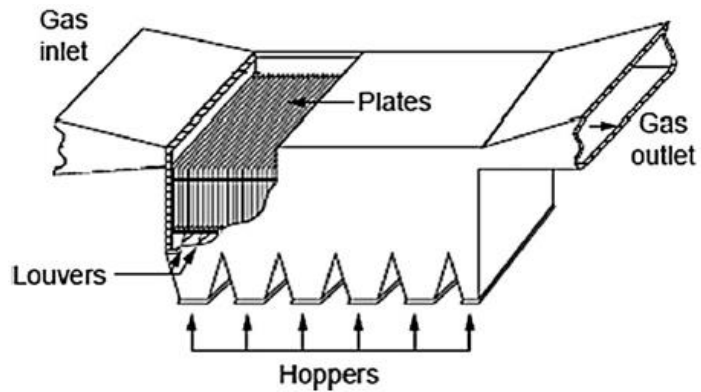
Elektrostatiniai filtrai yra plačiai naudojami norint pašalinti lakiuosius pelenus iš kietą kurą deginančių įrenginių, kur užterštų dujų srauto temperatūra būna aukštesnė nei 200  $^{\circ}\text{C}$ . Užterštam dujų srautui pasiekus didesnę nei 450  $^{\circ}\text{C}$  temperatūrą, šie įrenginiai praranda turimą aukštą efektyvumo koeficientą. Taip yra dėl to, kad temperatūra daro didelę įtaką tankiui, klampumui ir varžai. Didėjant temperatūrai, mažėja dujų tankis, taigi mažėja ir esama dujų molekulių koncentracija. Šitai susidaro didesni tarpai tarp dujų molekulių. Padidėjus temperatūrai, padidėja dujų klampumas, taigi kartu padidėja ir traukos jėga dalelei, o elektrostatinės įrenginio jėgos lieka nepakitusios, todėl tampa sunkiau nusodinti sraute esančias daleles ir jos kartu su išeinančiu srautu yra pašalinamos iš įrenginio.

Yra dvi dažniausiai naudojamos šių įrenginių konfigūracijos, tai vamzdžio tipo nusodintuvai arba lygiagrečių plokštelių tipo nusodintuvai. Įrenginio tipo pasirinkimą paprastai lemia keletas faktorių: įrenginio geometriniai parametrai, galimas įtampos dydis, galima dujų ir jose esančių dalelių varža bei dalelių dydis ir forma. [6]



8 pav. Vamzdinio tipo ESF pritaikytas naudoti aukštose temperatūrose bei dideliuose slėgiuose. [6]





9 pav. Plokštelinio tipo elektrostatinis filtras. [6]

## 2.5 Skruberis

Pramonėje kietosios dalelės iš dujų srauto dažnai yra pašalinamos naudojant vandenį kaip agentą šlapiuosiuose skruberiuose. Šio tipo įrenginiai paplitę dėl savo paprasto veikimo ir efektyvumo. Skruberiai gali būti įvairaus tipo: skruberiai su įrengtais purkštukais, šlapieji dinaminiai skruberiai, cikloninio veikimo skruberiai su purkštukais, susidūrimo veikimo principo skruberiai, venturi tipo skruberiai bei elektrostatiniai skruberiai. Bendrinis šių įrenginių veikimo principas pagrįstas inertinių jėgų veikimu siekiant atskirti daleles, o geriausias efektyvumas pasiekiamas, kai kietosios dalelės yra didesnės kaip  $3 \mu\text{m}$  dydžio. Norint, kad šių įrenginių veikimo efektyvumas būtų didesnis ir išvalomų dalelių diapazonas taptų platesnis, stengiamasi prijungti daugiau dedamųjų, tokių kaip veikimas elektrostatinėmis jėgomis, temperatūrų gradientų koregavimas ar įvertinimas skysčių garavimo slėgio. [6]



10 pav. Šlapiojo dinaminio veikimo skruberis. [6]

## 2.6 Kietųjų dalelių aglomeracija ir sugaudymas

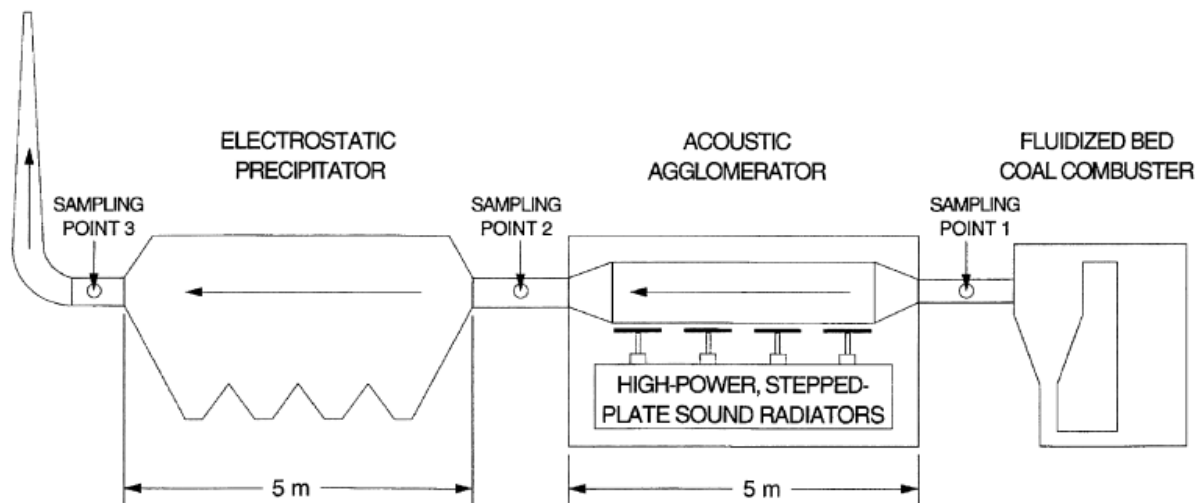
Yra nustatyta, kad kietosios dalelės iš pramoninių procesų yra potencialiai žalingos žmonėms bei aplinkai. Šios dalelės dažnai būna kartu su toksiškais kietaisiais metalais, rūgščių oksidais ar organiniais teršalais ir gali sukelti kvėpavimo takų bei širdies ligas. Didėjantis kietųjų dalelių kiekis atmosferoje gali suformuoti smogus, kurie ilginiui dideliuose miestuose sumažina atmosferos matomumą, pavyzdžiui Kinijos sostinėje Pekine. Laikui bėgant, kietųjų dalelių emisijos tampa vis griežčiau ribojamos ir yra kontroliuojamos remiantis oro kokybės standartais, kadangi milžiniški kiekiai kietųjų dalelių yra nuolat išmetami į orą dėl prasto išvalymo efektyvumo esamuose dalelių sugaudymo įrenginiuose, tokiuose kaip elektrostatiniai filtrai (ESF), rankoviniai filtrai, ciklonai ar šlapieji skruberiai. Šie įrenginiai nesugeba pasiekti naujai reikalaujamų kietųjų dalelių išvalymo standartų, kadangi negeba pašalinti itin mažų dalelių, kurių dydis yra intervale nuo 0,1–1  $\mu\text{m}$ . Vienas iš inovatyviausių būdų siekiant kuo efektyviau išvalyti kietąsias daleles, susidariusias po pramoninių procesų yra, naudojant dvigubo efekto taikymą, kurį sudaro nusodinimas ant krūvį turinčios plokštelės, kartu paveikiant kietąsias daleles akustinėmis bangomis, skatinant kietųjų dalelių aglomeracijos procesą. Šis patobulinimas, kuris apjungė šias dvi technologijas, leido padidinti kietųjų dalelių

aglomeracijos efektyvumą iki 74,7 %. Ypač akivaizdus technologinis potencialas pasireiškė veikiant užterštą dujų srautą žemo dažnio akustinėmis bangomis. [11]

Vienas iš daugiausiai žadančių galimų būdų pašalinti net smulčiausias kietąsias daleles naudojant aerodinaminius išvalymo įrenginius yra dalelių sutelkimas ir skatinimas sulipti į didesnius darinius. Tai vadinama dalelių aglomeracija. Šis procesas gali būti atliekamas skirtingais metodais, tokiais kaip:

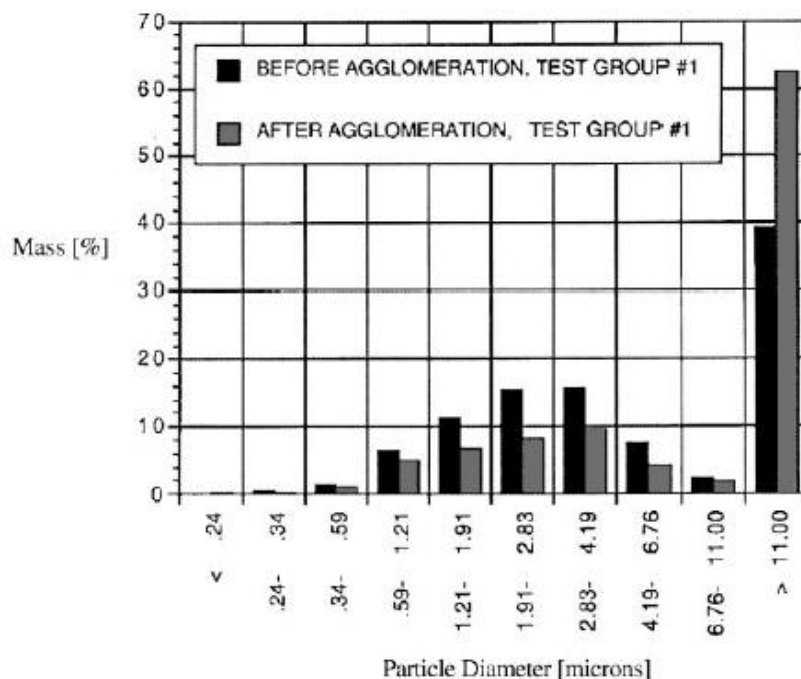
- akustinė aglomeracija;
- elektrinė aglomeracija;
- cheminė aglomeracija;
- turbulentinė aglomeracija;
- magnetinė aglomeracija.

Akustinė aglomeracija pagrįsta naudojant aukšto dažnio garso bangas, kurios priverčia kietąsias daleles, esančias dujų sraute, susidurti tarpusavyje, tokiu būdu sukeldamos ir paspartindamos aglomeracijos procesą dalelėms, esančioms užterštų dujų sraute. Vos kartą dalelėms susidūrus, jos tampa labiau linkusios sulipti viena su kita ir formuoti didesnės struktūros darinius, vadinamus aglomeratais. Šis metodas reikalingas tam, kad dujų srauto aerodinaminio išvalymo įrenginiai įgautų didesnę efektyvumą ne tik stambioms, bet ir itin mažoms aerozolinėms dalelėms dujų sraute. Akustinė dalelių aglomeracija gali būti skirstoma į ortokinetinę arba hidrodinaminę. Ortokinetinis mechanizmas atspindi tikslius susidūrimus tarp dalelių, kurios yra pernešamos skirtingais greičiais. Hidrodinaminis mechanizmas atkreipia dėmesį į dalelių prigimtines savybes, tokias kaip klampumas bei daleles supanti aplinka. Plačiausiai naudojami įrenginiai kietosioms dalelėms sugauti yra elektrostatiniai filtrai. Net 94 % anglies deginimo stočių yra įdiegti šios rūšies filtrai. Taip pat yra naudojamos ir kitos technologinės alternatyvos, pagrįstos aerodinaminėmis savybėmis, pavyzdžiui rankoviniai filtrai, keramikiniai filtrai, ciklonai ar elektrociklonai. Ištyrus praktiškai šį aglomeracijos metodą, paaiškėjo, kad dalelių pašalinimas panaudojant akustinės aglomeracijos principą prieš rankovinį filtrą, dalelių išvalymas po rankovinio filtro padidėjo nuo 91,29 % iki 99,19 %. Taip pat analogiškai buvo ištirta šio metodo panauda prieš elektrostatinį dalelių filtrą ir gauti duomenys pakartotinai patvirtino, kad akustinę aglomeraciją panaudoti yra efektyvu, kadangi dalelių išvalymas po filtro išaugo nuo 89,05 % iki 99,28 %. [11], [12]



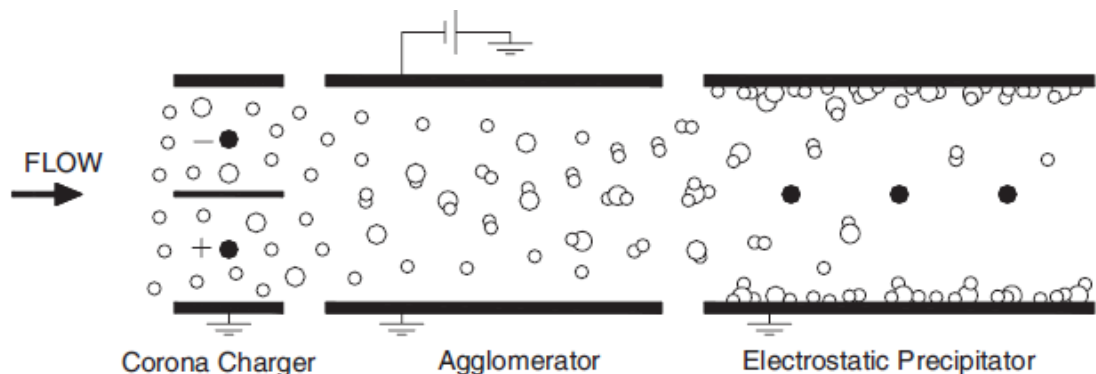
11 pav. Kietosioms dalelėms išvalyti naudotos įrangos schema. [13]

Paveiksle (žr. 12 pav.) pateikiama kaip pasikeitė išmatuotų dalelių dydžių pasiskirstymas bei pokytis panaudojus akustinės aglomeracijos metodą. Buvo išsiaiškinta, kad apie 23% dalelių masės, kurių dydis mažesnis už  $11\mu\text{m}$  buvo perkelta į dydžių intervalą virš  $11\mu\text{m}$ . Taip pat pastebėta, kad dalelės, kurių dydis siekė apie  $2\mu\text{m}$ , buvo sugauta net apie 50% jų masės. [13]



12 pav. Žemo dažnio (44 Hz) akustinė aglomeracija bimodaliniui aerozoliui. [12]

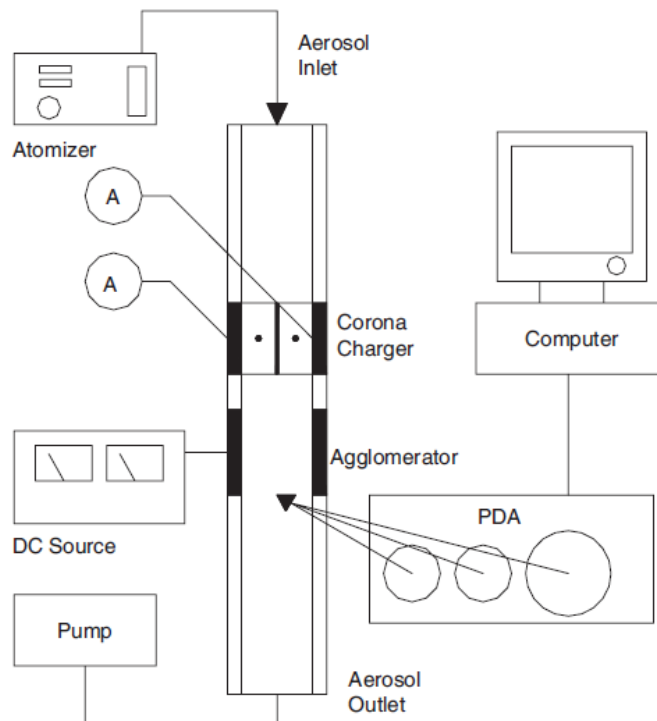
Elektrinės aglomeracijos būdas dar kitaip gali būti vadinamas bipoline aglomeracija, kuomet užterštame sraute esančios kietosios dalelės yra veikiamos elektriniu lauku. Tokia technika leidžia padidinti itin mažų dalelių sugaudymo koeficientą taip padidinant esamų aerodinaminių įrenginių efektyvumą. Veikimo principas pagrįstas, kad pirmiausia dalelėms yra suteikiamas bipolinis krūvis (dalelės yra įkraunamos teigiamu arba neigiamu krūviu). Kuomet krūvį įgavusios dalelės pasiekia aglomeracijos kamerą, jos pradeda judėti link priešingą krūvį turinčių dalelių, taip sudarydamos didesnio dydžio aglomeratus, kuriuos kituose etapuose lengva efektyviai sugauti aerodinaminiais



įrenginiais. [14]

**13 pav. Principinė schema bipolinės dalelių aglomeracijos išmetamosiose dujose. [14]**

Tiriant bipolinės aglomeracijos principą, reikia įvertinti pašalinius veiksnius, tokius kaip dalelių prikibimas prie sienelių, dalelių įkrovos ar koaguliacija, kurie gali daryti įtaką gaunamiems rezultatams. Toliau pateikta schema (žr. 14 pav.), kurią sudaro dalelių generatorius, įelektrinimo segmentas, aglomeratorius bei fazės Doplerio anemometras. Tai vienas iš galimų sistemos pavyzdžių, siekiant ištirti bipolinės aglomeracijos efektyvumą. [14]



**14 pav. Dalelių aglomeravimo tyrimo testinė schema. [14]**

Pagrindiniai į atmosferą išmestų lakiųjų pelenų komponentai deginant anglį yra  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  ir  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , kurie sudaro apie 80–90 % bendrosios masės. Taip pat lakiuosiuose pelenuose nustatomos liekanos iki 1 mg/g nelakiųjų organinių junginių, tokių kaip Ca, Na, Mg, K, Ti, S ir sunkiųjų metalų: Se, As, Cd, Hg, Ni, Pb, Cr, Sr, Be ir kt. Šių sunkiųjų metalų frakcija yra gerokai didesnė tiriant submikronines daleles ir tai nėra priklausoma nuo dalelės dydžio. Lakieji elementai, tokie kaip gyvsidabris (Hg), paprastai būna nustatomi itin mažais kiekiais, todėl analizės metu gauti duomenys yra ignoruojami. Kietosios dalelės paprastai varijuoja dydžiuose nuo 20 nm iki 200 nm. Mažesnių dalelių frakcija nei 1 μm sudaro apie 1 % bendrosios lakiųjų pelenų masės, bet tokio dydžio dalelės sudaro net 99 % koncentracijos, išreikštos dalelių skaičiumi. [15], [16]

Elektrostatinio nusodintuvo išeinamajame atvamzdyje dalelių pasiskirstymas paprastai yra bimodalinis, priklausomai nuo katilo apkrovos. Smulkesnes daleles (pirmas modalinių diametras yra 0,07 μm) sudaro garų pavidalu arba kondensato pavidalo medžiagos, dažniausiai toksiniai elementai. Didesnes daleles sudaro (antras modalinis diametras yra 0,4 μm) nesudegusios mineralinės medžiagos, pagrinde  $\text{SiO}_2$  ir  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Didelės lakiųjų pelenų dalelės yra paprastai sferinės, o dalelės mažesnės už 0,1 μm paprastai būna netaisyklingų formų ir dažnai prikimba prie didesniųjų. Submikroninės dalelės susiformuoja skylant didelėms dalelėms, kuomet išsiskiria dujos nuo staigaus kaitinimo proceso metu. Vėsimu metu

dalelės kondensuojasi ir absorbuoja organinius elementus, su kuriais suformuoja daleles nuo 0,1 iki 1 mm.

Dalelių kontrolės technologijų tyrimuose buvo bandyta atrasti naujų, patobulintų ir mažiau kainuojančių metodų, kurie sutaupytų energijos ir reikalingų medžiagų, mažų dalelių sugavimui. Šitaip susidarė dvi pagrindinės valymo technologijų grupės: sauso ir šlapio valymo. Sauso valymo kategorijai priskiriami įrenginiai tokie kaip ciklonai, pluoštiniai filtrai, keramikiniai filtrai, elektriniai ir ESF filtrai. Šlapio valymo kategorijai priskiriami inertiniai, centrifuginiai, Venturi ar elektrostatiniai skruberiai, putų nusodintuvai ir drėkinami ESF filtrai.

Valymo įrenginių veikimas paprastai pagrįstas mechaninių (dažniausiai inertinių ir gravitacijos) jėgų, kad nusodinti daleles iš dujų srauto arba molekulių jėgų veikimu. Žvelgiant paskutinius kelis dešimtmečius atgal, įvyko didelė pažanga kuriant naujas elektriniu lauku pagrįstas technologijas, skirtas dujų išvalymui, siekiant padidinti itin mažų dalelių išvalymo efektyvumą. Tokios dalelės kelia potencialų pavojų žmonių kvėpavimo takams ir yra kebliai pašalinamos tradiciniais įrenginiais. [17]

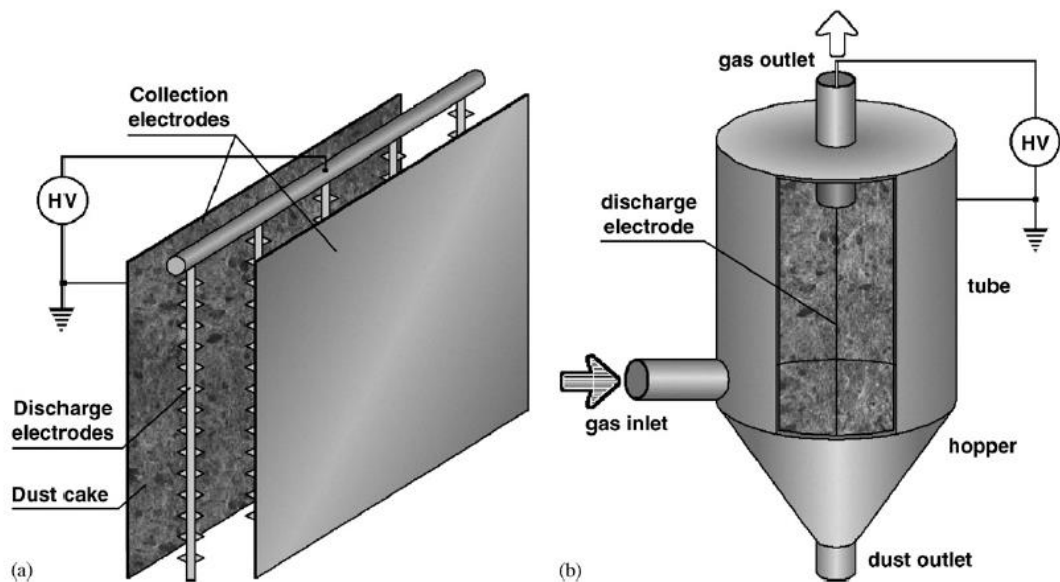
## 2.7 Sausieji ESF

Elektrostatiniai įrenginiai dujų išvalymui naudoja elektrinį lauką tam, kad palengvinti kietųjų dalelių išvalymą. Elektros energija yra reikalinga dujų jonizavimui, dalelių krūvio suteikimui, dalelių koaguliacijai, aglomeracijai arba garų kondensacijai paspartinti. Išvalymo efektyvumui nusakyti, bet kokiam valymo įrenginiui, nepriklausomai nuo jo tipo, gali būti naudojama tokia formulė:

$$\eta = 1 - \frac{m_{\text{out}}}{m_{\text{in}}},$$

Formulę sudaro šios dedamosios:  $m_{\text{out}}$  ir  $m_{\text{in}}$  yra dalelių masės koncentracijos, įrenginio įėjimo ir išėjimo angose.

Elektrostatinį nusodintuvą paprastai sudaro iškrovimo elektrodų rinkinys, patalpintas tarp dviejų lygiagrečių nusodinimo plokštelių (žr. 15 pav. a pvz.) arba plonas laidas, ištemptas ir apvyniotas apie cilindro ašį (žr. 15 pav. b pvz. vamzdinio tipo ESF).



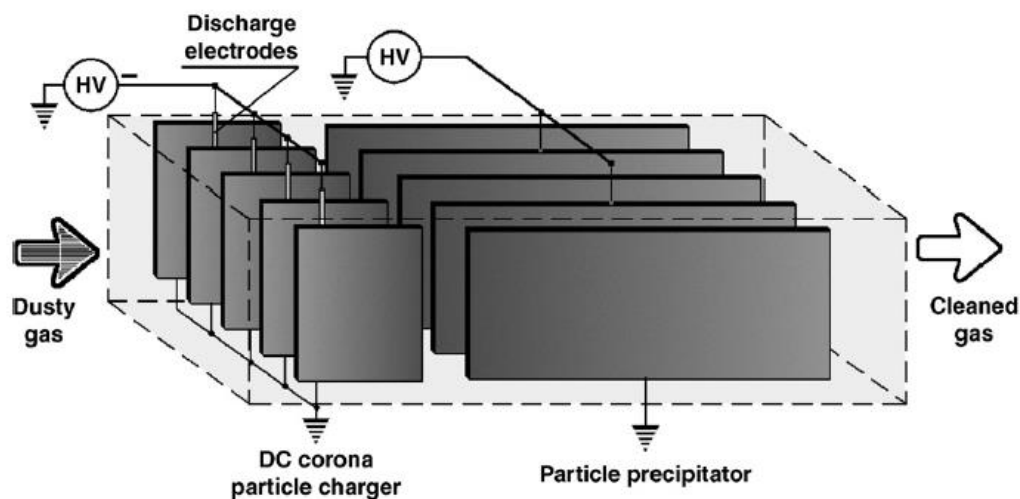
15 pav. Elektrostatiinių nusodintuvų tipai: a) lygiagrečių plokštelių, b) vamzdinio tipo. [18]

Elektrinis iškrovimas šio tipo elektroduose paprastai susidaro palaikant aukštą neigiamą potencialą, kuomet susidaro dujiniai jonai, prisijungdami laisvuosius elektronus prie dujų molekulių. Šitaip dujų molekulės susiduria su dalelėmis, kurias jos įkrauna. [18]

## 2.8 Modifikuoti ESF

Viena iš galimų elektrostatiinių nusodintuvų modifikacijų yra suprojektuoti daugiapakopį elektrostatiinį nusodintuvą. Tam, kad išvengti sunkumų su lakiisiais pelenais ir didele varža, įkrovimo ir nusodinimo procesai gali būti atskirti ir atliekami dviem skirtingais etapais. Tokie įrenginiai geriau yra žinomi kaip dviejų pakopų/etapų ESF (žr. 16 pav.).





16 pav. Dviejų etapų elektrostatinio nusodintuvo principinė schema.

Įkrovimo etapas yra panašus kaip ir įprastiniuose elektrostatiniuose nusodintuvuose, tačiau įtampa yra sumažinta iki tokio dydžio, kad neįvyktų vainikinis išlydis. Nusodinimo etapas vyksta tarp paralelių plokštelių rinkinio kas sekundę. Galimos dalelių įkrovimo modulio modifikacijos:

1. „Boxer” tipo įkrovimo modulis, kuriame dalelės yra įkraunamos neigiamų jonų, generuojamų aukšto dažnio iškrovos paviršiaus iš juostelinių elektrodų, įterptų į keramikes sienes. Papildoma pora elektrodų gamina žemo dažnio elektrinį lauką, kuris verčia daleles virpėti kol jos eina pro įkrovimo modulį, taip neleidžiant dalelėms prikibti prie elektrodų;

2. apipintos plokštelės išlydžio (angl. wire-plate corona) įkrovimo modulis su maksimaliai trumpomis plokštelėmis siekiant išvengti dalelių nusėdimo įkrovimo skyriuje;

3. dielektrinių barjerų išlydžio (angl. dielectric barrier discharge) įkroviklis su aukšto dažnio sužadiniu;

4. vainikinio išlydžio – purkštuvo (angl. Corona-nozzle) įkroviklis, kuriame dalelių srautas praeina pro purkštukus, aprūpintus išlydžio elektrodais. Dalelių greičiai yra dideli, todėl nenusėda ant įkroviklio sienelių, o keliauja į nusodinimo skyrių;

5. vainikinio išlydžio – triodo (angl. Corona-triode) įkroviklis su vienodu tinklelio poliškumu kaip ir iškrovos elektrodo, bet sumažinta įtampa. Tinklelis apsaugo nuo atgalinio išlydžio;

6. kvadrupolio (angl. Quadrupole) įkroviklis susideda iš keturių lygiagrečių strypų, išdėstytų kvadrato forma kartu su iškrovimo elektrodu, įtaisytu kvadrato centre. Dalelės yra įkraunamos kuomet prateka pro šią elektrodo sistemą;

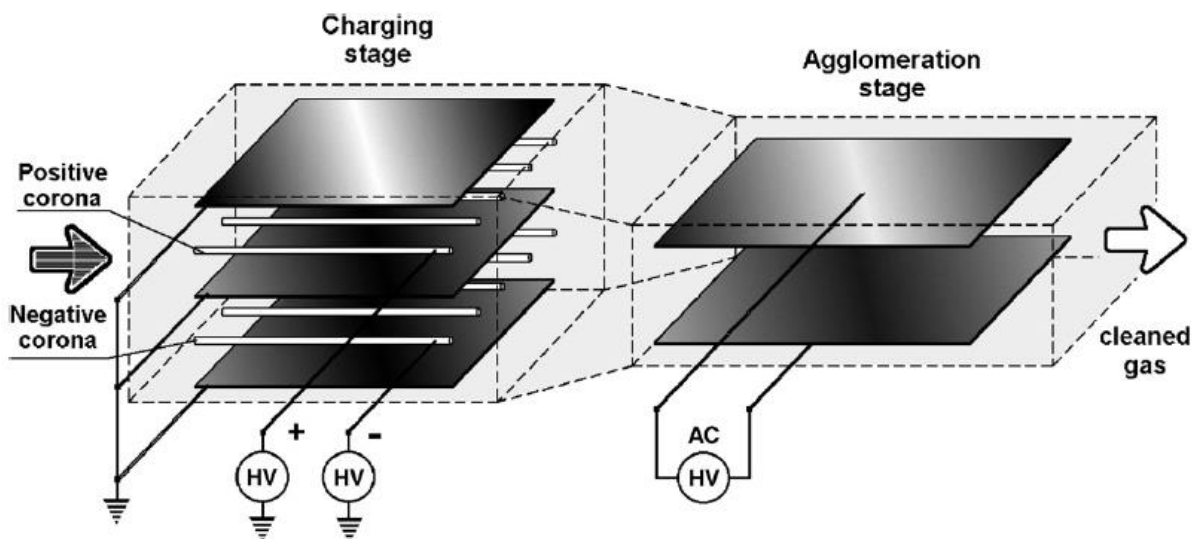
7. kintamo elektrinio lauko įkroviklis. Dalelės yra įkraunamos jonine kintama elektros srove kintamame elektriniame lauke, kurį sudaro du papildomi tinkleliai. Šiuo metodu krūvis suteiktas dulkių dalelėms gali būti didesnis negu įprastinio tipo įkrovikliuose.

Trūkumas dviejų skyrių ESF įrenginio, kad kohezija tarp dalelių esančių ant elektrodų yra sumažinta ir dulkių pašalinimas nuo šių elektrodų yra keblus dėl trūkstamos iškrovos srovės. Kaip papildoma priemonė yra pasiūlyta paviršiaus aktyviosios medžiagos, dalelėms pašalinti nuo surinkimo elektrodų. Paviršiaus aktyviosios medžiagos yra sumaišomos su vandeniu ir gaunamas 0,1 % vandeninis tirpalas. Gautas tirpalas išpurškiamas pasroviui, taip pagerinant adheziją tarp dalelių ir elektrodo, ypač didesnėms dalelėms. [19]

## **2.9 Elektrostatiniai dalelių aglomeratoriai**

Vykdam mokslinius tyrimus ir ieškant naujų galimybių emisijų mažinimo srityje, siekiant kuo efektyviau pašalinti kietąsias daleles iš srauto, buvo pastebėtas principas ir atrasta metodika – dalelių aglomeracija, leidžianti padidinti itin mažas daleles, kad būtų galima lengviau ir efektyviau jas sugauti. Aglomeracija yra procesas, kurio metu itin mažos dalelės sulimpa tarpusavyje (koaguliuojasi) ir suformuoja didesnę molekulę. Dažniausiai minimi aglomeracijos metodai yra akustinė koaguliacija arba vandens garų kondensacija. Abu procesai suvartoja didelius kiekius energijos. Ne visi koaguluoti aglomeratai yra stabilūs ir ne visais atvejais jie pasiekia nusodinimo etapą. Garų kondensavimasis yra efektyvesnis būdas, tačiau reikalaujantis didelių energijos išteklių.

Elektrostatiniai aglomeratoriai yra būdas paskatinti koaguluotis submikroninio dydžio daleles, kartu efektyviai išnaudojant energiją. Dalelės mažesnės už 1 mm sunkiai aglomeruojasi suteikiant joms skirtingus krūvius, tačiau lengviau yra atliekama koaguliacija. Toliau pateikiama elektrostatinio aglomeratoriaus schema (žr. 17 pav.). [20]



17 pav. Elektrostatinis nusodintuvas su aglomeratoriaus skyriumi. [20]

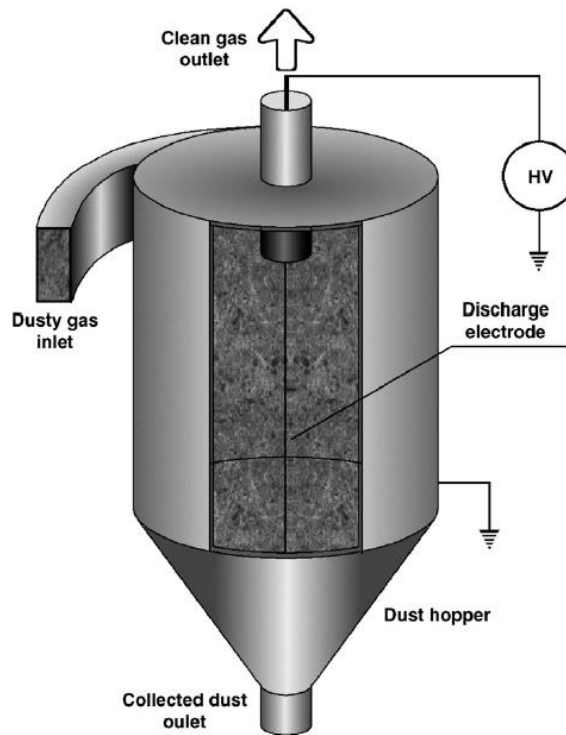
Pirmajame etape dalelės įkraunamos skirtingais poliais. Antrajame etape dalelės patenka į kintamą elektrinį lauką, kuris verčia daleles susidurti tarpusavyje.

Skirtingų aglomeratorių tipai:

1. bipolinis lygiagrečių plokštelių aglomeratorius;
2. vienpolis kintamo elektrinio lauko aglomeratorius;
3. bipolinis ac/dc aglomeratorius;
4. kvadrupolinis aglomeratorius (angl. quadrupole agglomerator). [20]

## 2.10 Elektrinės įtampos ciklonai (elektrociklonai)

Ciklonų veikimo principas yra pagrįstas išcentrinėmis jėgomis, pagreitinus dalelių greitį jas nusodinti ant darbinės kameros sienelių. Dalelių greitis gali siekti nuo 5 G dideliuose įrenginiuose iki 2500 G mažuose ciklonuose. Paprastieji ciklonai yra pritaikyti pašalinti didesnes daleles už kelis mikronus. Todėl siekiant padidinti ciklonų efektyvumą buvo imta kartu taikyti elektros lauko sudaromas jėgas, pavyzdžiui, įdiegiant ciklono viduje elektrodą (žr. 18 pav.).



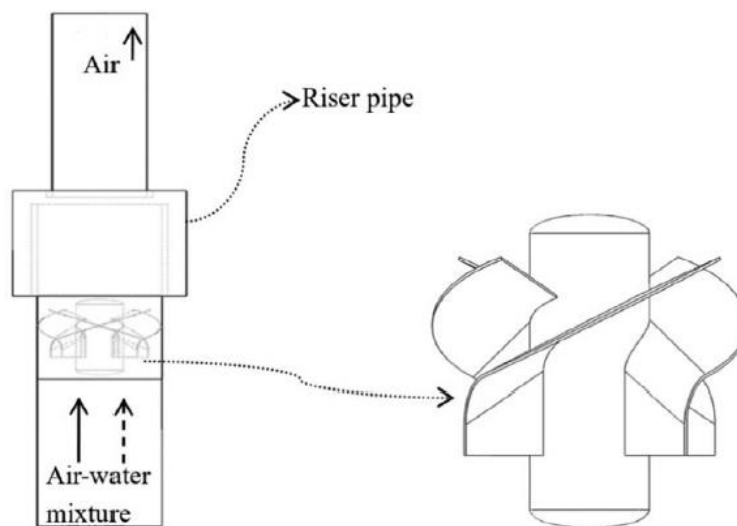
**18 pav. Elektrinės įtampos ciklonas (elektrociklonas).**

Tokio tipo įrenginiai yra geriau žinomi kaip elektrociklonai. Aukštos įtampos elektrodo išskiriami jonai įkrauna daleles, todėl elektrostatinis laukas kartu su išcentrinėmis jėgomis neša daleles link ciklono sienelių. Tokiu metodu dalelės, kurių dydis intervale nuo 10 iki 30 nm, gali suformuoti agregatus iki kelių mikrometrų diametro ir nusėsti ant sienelės. Tokių elektrociklonų diametras siekia iki 1,8 metro ir maksimalus įeinančio srauto dulkėtumas gali būti ne didesnis nei  $4,5 \text{ g/m}^3$ .

Kita vertus, daleles galima įkrauti vainikiniu išlydžiu prieš patenkant į cikloną. Išlydžio metu susidaręs elektrostatinis laukas verčia daleles nusėsti ant įrenginio sienelių. Tačiau, tokiuose įrenginiuose dalelės taip pat gali nusėsti ant centrinio elektrodo. Bendrai vertinant, šio tipo įrenginiai pritaikyti kokybiškai nusodinti mažesnes daleles esant labai aukštam elektriniam laukui ir mažiems debitams. Kuomet įeinančio srauto debitas yra per didelis, elektrociklonai pasiekia tik labai mažą išvalymo efektyvumą. Tokie įrenginiai yra neefektyvūs didelę varžą sraute turinčioms dalelėms. Dėl šių priežasčių elektrociklonai turi siaurą panaudą pramonėje. [21], [22]

## 2.11 Lašelių separatoriai

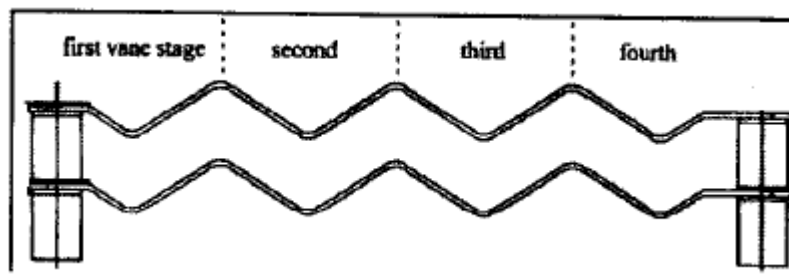
Lašelių separatoriai arba kitaip vadinami drėgmės separatoriai yra plačiai naudojami siekiant pašalinti lašelius iš dujų-vandens arba dujų-garų mišinio oro sraute. Kadangi, sraute esančių pakibusių lašelių dydžio ir skaičiaus pasiskirstymas yra plačiame intervale, ir turi didelę įtaką šių separatorių atskyrimo gebėjimams, efektyvumą galima padidinti, keičiant srauto greitį ir kryptį. Tokio tipo įrenginiai gali būti įvairių tipų ir formų. Plačiai paplitę lašelių separatoriai yra aerodinaminio ciklono tipo, tačiau pasiekiantys mažą efektyvumą. Esant poreikiui pasiekti didesnę lašelių pašalinimo laipsnį, naudojami kitokių geometrinių formų įrenginiai, pavyzdžiui, lašelių separatorius su sukurinių srautą sudarančiomis mentėmis. [23]



19 pav. Schematinis sukurinių menčių separatorius. [23]

Šio tipo aerodinaminiai įrenginiai pašalina kietąsias daleles iš dujų srauto sukuriama inercinių jėgų pagalba. Šiuose įrenginiuose įtaisytos mentės verčia įėjusį srautą judėti kintama kryptimi tarp lygiagrečiai esamų menčių, kaip pavaizduota toliau esančiame paveiksle (žr. 20 pav.). Kintant srauto judėjimo kryptims, lašeliai esantys dujų sraute neišsilaiko dėl nuolatinės inercijos veikimo bei padidėjusio srauto greičio susiaurėjimuose tarp menčių (plokštelių), todėl atsitrenkia į plokštelių šonus ir tokiu būdu nusėda. Tokių įrenginių efektyvumą galima keisti priklausomai nuo: [24]

- įeinančio srauto parametrų;
- tarpo tarp menčių (plokštelių) separatoriuje;
- menčių (plokštelių) bangų skaičiaus.

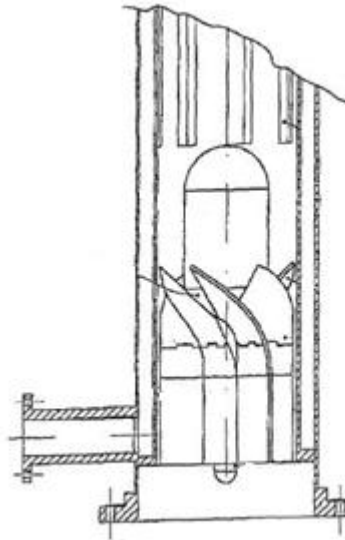


20 pav. Mentės (plokštelės) lašelių separatoriuje. [24]

## 2.12 Aerodinaminių įrenginių tobulinimas

Plečiantis pramonės raidai ir griežtėjant aplinkosauginiams reikalavimams, nuolatos atrandama naujų priemonių taršai sumažinti arba sugalvojama kaip patobulinti jau įdiegtą valymo įrangą. Esamos įrangos patobulinimai suteikia galimybę sutaupyti kaštų ir kartu sumažinti generuojamą taršą iki siekiamų normų. Pavyzdžiui, daugelyje įmonių, kuriose susidaro tarša kietosiomis dalelėmis, būna įdiegti aerodinaminiai ciklonai ar multiciklonai, kurie geba sugaudyti tik pačias didžiausias daleles, tačiau didžioji dalelių dalis lieka sraute ir kelia dar pavojingesnę taršą. Tokiais atvejais tobulinami ciklonai, kartu prie juose veikiančių inercinių jėgų prijungiant akustinius generatorius, kurių veikimas paremtas akustinio lauko sudarymu, kuris skatina itin mažų dalelių aglomeraciją, šitaip padidindamas įrenginio efektyvumą. Žinoma, galima pasitelkti ir panašius modernizavimo būdus, pavyzdžiui, į cikloną įeinantį užterštą srautą paveikti elektros lauku, suteikiant dalelėms skirtingus krūvius, taip skatinant jas sukibti tarpusavyje į aglomeratus. Tačiau, akustinė aglomeracija yra pranašesnė už paveikimą elektriniu lauku, nes geba pašalinti smulkiadispersius aerozolius, gali būti valomi agresyvūs dujų mišiniai. Aukšta temperatūra ar slėgis turi mažą įtaką nusodinimo efektyvumui bei tai yra greitai trunkantis procesas laiko atžvilgiu. Būtina paminėti ir kitus žinomus metodus: į cikloną galima integruoti pjezoelektrinį ultragarsinį šaltinį arba pastatyti antrinį cikloną, kuris būtų priešpriešinio srauto. [4]

Atliekant tyrimus ir ieškant naujų galimybių aerodinaminių ciklonų panaudoje buvo sugalvotas ašinis ciklonas, gebantis keisti savo vidinį išdėstymą. Tokio tipo įrenginys susideda iš cilindrinės dalies – separatoriaus, pro kurį pratekėjęs dujų srautas nukreipiamas į sukuri generuojantį elementą. [25]



21 pav. Ašinio tipo ciklonas gebantis keisti vidinį išdėstymą. [25]

### 3. Metodinė dalis

#### 3.1 Separatoriaus projektavimas remiantis aerozolio dalelių fizika

Įrenginiai su mentėmis ar kreipiančiosiomis gali veikti esant didesniai dujų greičiui nei austiniai metalo gijų lašelių filtrai. Norint apskaičiuoti tinkamą srauto greitį duotai sistemai yra naudojama Souders-Browno lygtis, kuriai reikalingos dedamosios, tokios kaip dujų ir skysčio tankis. Bendrai projektuojant, reikiamas tinkamo plotas gali būti apskaičiuojamas pagal Souders-Browno formulę (1.1):

$$v_g = K \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}}; \quad (1.1)$$

kur:  $v_g$  – dujų greitis, m/s;

$\rho_g$  – dujų tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_l$  – dalelių tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$K$  – K-faktorius, m/s.

Atliekant skaičiavimus reikalinga apskaičiuoti sunkio jėgą  $F_s$  pagal formulę (1.2):

$$F_s = v_g \sqrt{\rho_g}; \quad (1.2)$$

kur:  $v_g$  – dujų greitis, m/s;

$\rho_g$  – dujų tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$F_s$  – sunkio jėga.

Norint apskaičiuoti lašelių separatoriaus skerspjūvio plotą, dalijame žinomą dujų debitą iš dujų greičio, pagal formulę (1.3):

$$A_{sk} = \frac{q_s}{v_g}; \quad (1.3)$$

kur:  $A_{sk}$  – lašelių separatoriaus skerspjūvio plotas,  $m^2$ ;

$q_s$  – dujų debitas,  $m^3/h$ ;

$v_g$  – dujų greitis,  $m/s$ .

Apskaičiuojamas lašelių separatoriaus skerspjūvio plotis pagal formulę (1.4)

:

$$b_{sep.} = \frac{A_{sk}}{L_{kr}}; \quad (1.4)$$

kur:  $b_{sep.}$  – lašelių separatoriaus skerspjūvio plotis,  $m$ ;

$A_{sk}$  – lašelių separatoriaus skerspjūvio plotas,  $m^2$ ;

$L_{kr}$  – lašelių separatoriaus aukštis,  $m$ .

Įrenginio susidarantys slėgio nuostoliai apskaičiuojami pagal formulę (1.5):

$$\Delta P = C \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot K^2; \quad (1.5)$$

kur:  $\Delta P$  – slėgio nuostoliai,  $Pa$ ;

$C$  – mentės projektavimo koeficientas (angl. vane design factor);

$\rho_g$  – dujų tankis,  $kg/m^3$ ;

$\rho_l$  – dalelių tankis,  $kg/m^3$ ;

$K$  – K-faktorius,  $m/s$ .

Apskaičiuojame išcentrinės jėgos akceleraciją pagal formulę (1.6):

$$a_c = \frac{(2 \cdot v_g^2 \sin \theta)}{(w(\cos \theta^3))}; \quad (1.6)$$



kur:  $a_c$  – išcentrinės jėgos akceleracija,  $\text{cm/s}^2$ ;

$v_g$  – dujų greitis,  $\text{m/s}$ ;

$\theta$  – mentės lenkimo kampas;

$w$  – mentės sienelės ilgis,  $\text{cm}$ .

Apskaičiuojamas lašelių nusėdimo greitis pagal formulę (1.7):

$$v_t = \frac{(d_d^2 \cdot \rho_l \cdot a_c)}{(18 \mu_g)}; \quad (1.7)$$

kur:  $v_t$  – lašelių nusėdimo greitis,  $\text{m/s}$ ;

$d_d$  – lašelio skersmuo,  $\mu\text{m}$ ;

$\rho_l$  – dalelių tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$a_c$  – išcentrinės jėgos akceleracija,  $\text{cm/s}^2$ ;

$\mu_g$  – dujų klampa,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ .

Apskaičiuojamas Reinoldso skaičius pagal formulę (1.8):

$$Re = \frac{d_d \cdot v_t \cdot \rho_g}{\mu_g}; \quad (1.8)$$

kur:  $Re$  – Reinoldso skaičius;

$d_d$  – lašelio skersmuo,  $\mu\text{m}$ ;

$v_t$  – lašelių nusėdimo greitis,  $\text{m/s}$ ;

$\rho_g$  – dujų tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\mu_g$  – dujų klampa,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ .

Apskaičiuojamas traukos koeficientas  $C_d$  pagal formulę (1.9):

$$C_d = \frac{24}{Re}; \quad (1.9)$$

kur:  $Re$  – Reinoldso skaičius.

Lašelių separatoriaus sulaikymo efektyvumas apskaičiuojamas pagal formulę (1.10):

$$\eta = 100 \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{(-v_t \cdot w \cdot \theta)}{(57,3 \cdot v_g \cdot b \cdot \tan \theta)}\right)\right); \quad (1.10)$$

kur:  $\eta$  – įrenginio efektyvumas, %;

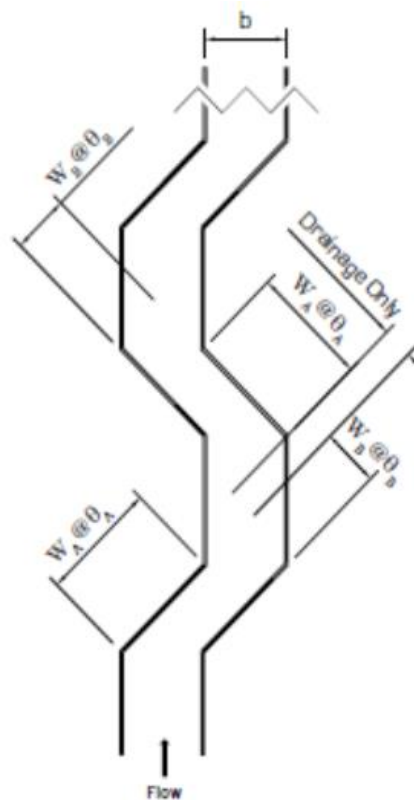
$v_t$  – lašelių nusėdimo greitis, m/s;

$w$  – mentės sienelės ilgis, cm;

$\theta$  – mentės lenkimo kampas;

$v_g$  – dujų greitis, m/s;

$b$  – tarpas tarp separatoriaus plokštelių, cm.



22 pav. Lašelių separatoriaus menčių išdėstymo principinė schema.

### 3.2 Matematinis srautų modeliavimas suprojektuotame separatoriuje

Kartesian (angl. Cartesian) tinklelio metodas, naudojamas programinės įrangos SolidWorks (2017-2018 m., Dassault Systemes) srautų simuliacijoje leidžia atlikti konjuguotus multifizikinius skaičiavimus, naudojant vieną šio tipo tinklelį, kuriame gali būti skaičiuojami lašeliai, kietosios dalelės bei kitokie srauto komponentai. Tokio tipo skaičiavimo metodas taikomas analizuojant: [26]

- skysčio srautų tyrimuose analizuojant skystas terpes;
- šilumos pernašos ir tiesioginio elektros išlydžio skaičiavimams kietuosiuose kūnuose.

Skysčių srauto analizė ir šilumos laidumas gali būti nagrinėjami atskirai. Be to, visi šie skaičiavimai gali būti susieti su skirtingais radiacijos modeliais. Visiems šiems fizikiniams reiškiniams naudojama CAD geometrija atitinka pirminės geometrinės informacijos šaltinius.

Skystose terpėse programinė įranga SolidWorks (2017-2018 m., Dassault Systemes) srautų simuliacijoms apskaičiuoti naudoja Navjė-Stokso lygtį, kuri įvertina masės pernašą, judesio momentą ir energijos tvermės dėsnius: [26]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\partial u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H; \quad (2.3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}. \quad (2.4)$$

Skaičiuojant suspaustus didelio greičio srautus bei srautus su smūginėmis bangomis, energijai apskaičiuoti naudojama formulė: [26]

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i (E + \frac{p}{\rho})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H; \quad (2.5)$$

$$E = e + \frac{u^2}{2}. \quad (2.6)$$

Šios formulės yra papildytos formulėmis skystai fazei apskaičiuoti, įvertinant skysčio prigimtį bei empirines priklausomybes tankiui, klampai ir šiluminiam laidumui pagal temperatūrą. Neelastiniai skysčiai yra apskaičiuojami įvertinant priklausomybę tarp jų dinaminės klampos, srauto šlyties koeficiento ir temperatūros.

Ypatingi modeliai naudojami tikrų dujų aprašymui, tūrio kondensavimui ir garinimui, kavitacijai, taip pat aktytajai terpei.

Srautų simuliacijos su programine įranga SolidWorks (2017-2018 m., Dassault Systemes) geba apdoroti ir pateikti duomenis, analizuojant laminarinius ir turbulencinius srautus. Laminariniai srautai susidaro esant žemam Reinoldso (angl. Reynolds) kriterijui, kuris susideda iš greičio ir ilgio, padalijant iš kinematinės klamos. Kuomet Reinoldso kriterijus viršija kritinę reikšmę, srautas po truputį kinta į turbulencinį režimą. Siekiant numatyti turbulencinius srautus, naudojamos Navjè-Stokso lygtys ir Favre suvidurkinimas. Tokiu būdu atsižvelgiama į vidutinį srauto turbulencijos poveikį srauto parametrų. Siekiant išplėsti skaičiavimus ir juos gauti tikslesnius į lygtis yra įvedama daugiau sąlygų, kurioms reikalinga įvesti daugiau duomenų, pavyzdžiui Reinoldso įtempimus. Norint užbaigti šią lygčių sistemą, programinė įranga SolidWorks srauto modeliavimams naudoja pernašos lygtis, apibūdinančias turbulencijos kinetinę energiją bei jos sklaidos greitį, panaudojant k-ε modelį.

Modifikuotas k-ε turbulencijos modelis su slopinimo funkcijomis paaiškina laminarinį, turbulencinį ir homogeniškų skysčių pernašos dėsnius: [26]

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B; \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left( f_l \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k}; \quad (2.8)$$

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij}, \tau_{ij}^R = \mu_t s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}; \quad (2.9)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}. \quad (2.10)$$

Simbolių reikšmės:  $C_\mu=0.09$ ,  $C_{\varepsilon 1}=1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2}=1.92$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $\sigma_B = 0.9$ ,  $C_B = 1$  jeigu  $P_B > 0$ , tai  $C_B = 0$ , jeigu  $P_B < 0$ , tuomet turbulencinė klampa yra nustatoma šia lygtimi:

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}; \quad (2.11)$$

Lamo ir Bremhorsto (eng. Lam and Bremhorst) slopinimo funkcija  $f_\mu$  yra aprašoma lygtimi:

$$f_\mu = (1 - e^{-0.025 R_y})^2 \cdot \left( 1 + \frac{20.5}{R_t} \right); \quad (2.12)$$

Tuomet:

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k y}}{\mu}; \quad (2.13)$$

$$R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}; \quad (2.14)$$

y yra atstumas nuo taško iki sienos, o Lam ir Bremhorsto slopinimo funkcijos  $f_1$  ir  $f_2$  yra aprašomos:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu}\right), f_2 = 1 - e^{R_t^2}; \quad (2.15)$$

Lam ir Bremhorsto slopinimo funkcijos  $f_\mu$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  sumažina turbulentinę klampą bei turbulentinę energiją ir padidina turbulencijos sklaidos koeficientą, kuomet Reinoldso kriterijus  $R_y$  pagrįstas vidutinio greičio svyravimu ir atstumu nuo sienelės, tampa per mažas. Tokiu atveju  $f_\mu=1$ ,  $f_1=1$ ,  $f_2=1$  žiūrima į pradinį originalų k-ε modelį.

Šilumos srautas apibrėžiamas pagal:

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1,2,3; \quad (2.16)$$

Čia konstanta  $\sigma_c=0.9$ ,  $Pr$  – Prandtlio skaičiaus (angl. Prandtl Number) bei  $h$  – šiluminė entalpija.

Dalelių skaičiavimo užduotis yra galutinai apibrėžiama nurodant modelio geometriją, jo ribas kartu su pradinėmis sąlygomis. Visi duomenys tokioms sąlygoms yra apibrėžiami tiesiogiai pradiniame CAD modelyje. [26]

### 3.3 Kietųjų kūnų sritys

Programinė įranga SolidWorks (2017-2018 m., Dassault Systemes) srautų simuliaciją apskaičiuoja remdamasi dviejų rūšių fizikinius reiškinius kietuosiuose kūnuose: šilumos laidumu ir tiesiogine elektros srove, o gautas šilumos kiekis džauliais (J) yra energijos lygties šilumos šaltinis.

Šilumos pernaša kietuosiuose kūnuose ir skysčiuose kartu su energijos mainais tarp jų (konjuguota šilumos pernaša) yra esminė ir besąlygiška CAD sistemos dalis CFD programinėje įrangoje. Šilumos pernaša skysčiuose aprašoma energijos lygtimis (3–4), kurioje šilumos srautas yra pateikiamas lygtyje (žr. 14). Šilumos laidumo dėsnis kietosiose terpėse aprašomas šia lygtimi: [26]

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H. \quad (2.17)$$

Lygtyje  $e$  yra savitoji vidinė energija,  $e = c \cdot T$ ,  $c$  yra savitoji šiluma,  $Q_H$  yra savitoji išsiskyrusi arba sugerta šiluma tūrio vienetui bei  $\lambda$  yra šilumos laidumo savitoji reikšmė. Yra manoma, kad šilumos laidumas yra įstrižas nagrinėjamai koordinačių sistemai. Izotropinei terpei  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ . Esant elektros srovei,  $Q_H$  gali papildomai atpalaiduoti šilumos energijos  $Q_j$ . Tai apibrėžiama  $Q_j = r \cdot j^2$ , kur  $r$  – elektrinė varža,  $j$  – elektrinės srovės tankis. Elektros srovės tankio vektorius apskaičiuojamas taip: [26]

$$i = - \left( \frac{1}{r_{11}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1}, \frac{1}{r_{22}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}, \frac{1}{r_{33}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right). \quad (2.18)$$

Ir yra nustatomas pagal elektrinį potencialą  $\varphi$  [V] iš pastoviosios Laplaso (angl. Laplace) lygties:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{r_{ii}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) = 0. \quad (2.19)$$

Lygtyje  $r_{ii}$  – temperatūros priklausomybė elektrinei varžai  $i$  koordinačių kryptimi.

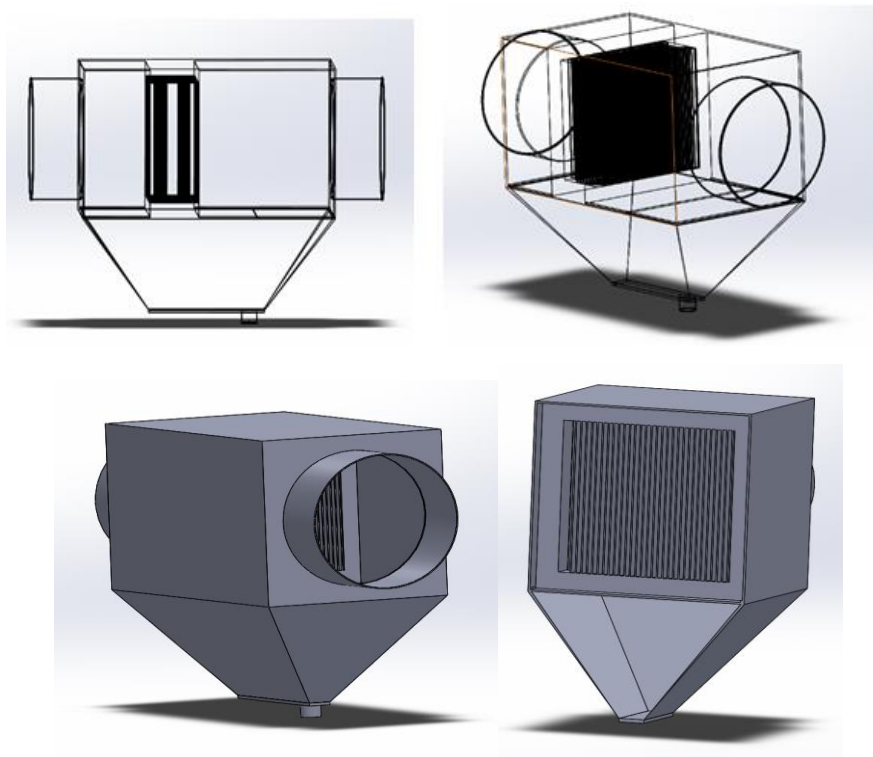
Laplaso (angl. Laplace) lygtis yra išspręsta skaitinėmis reikšmėmis subdomenuose, kuriuos sudaro elektrai laidžios medžiagos. Dielektrinės dalelės ir sritys sudarytos iš skysčių viduje subdomenų yra automatiškai pašalinamos. Bendra elektros srovė virš paviršiaus  $I$ [A] arba elektrinis potencialas  $\varphi$ [V] gali būti nurodyti vartotojo kaip problemos ribinė vertė.

Paviršius tarp dviejų elektrai laidžių kietų kūnų subdomenuose, pagal nutylėjimą yra laikomas turintis nulinę varžą arba vartotojas gali pats nurodyti esamą elektrinę varžą. Atsparumo vertė pateikiama arba apskaičiuojama pagal duotą medžiagą ir jos storį. Ant paviršiaus nurodytas kontaktinis atsparumas reiškia, kad srovė praeidama pro paviršių sukuria atitinkamai šilumą, kuri išspinduliuojama pro įkaitintą paviršių.

Jeigu kietasis kūnas susideda iš kelių tarpusavyje sujungtų kietų medžiagų, tada apskaičiuojant šilumos laidumą atsižvelgiama į jų terminį kontaktinį atsparumą. Gali būti atsižvelgiama apskaičiuojant šilumos laidumą kietose medžiagose, jeigu yra labai plonas sluoksnis kitos medžiagos tarp kietųjų kūnų ar sąlyčio vietoje tarp kietojo kūno su skysta terpe, nurodant medžiagos šilumos laidumą ir sluoksnio storį. [26]

### 3.4 Aerodinaminio įrenginio modeliavimas

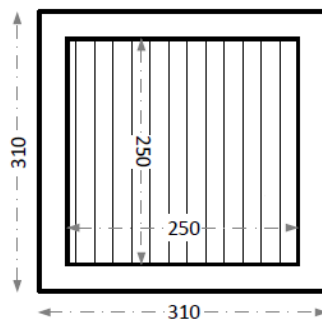
Analizuojamo ir projektuojamo pasirinkto aerodinaminio įrenginio modelis buvo sukurtas pasirinkus studentams skirtą programinę įrangą SolidWorks SDK (2017-2018 m., Dassault Systemes). Matematiniai skaičiavimai ir simuliacijos buvo atliktos remiantis CFD (angl. Computational Fluid Dynamics) kodo pagrindu. Ši programinė įranga buvo pasirinkta dėl funkcijų gausos bei patogaus naudojimo tiriant elementus ar bet kokio tipo konstrukcijas (tūrinius ar kevalinės formos modelius, rėmines konstrukcijas bei jų kombinacijas). Su SolidWorks SDK Flow Simulation (liet. srautų simuliacija) buvo analizuojamas aerodinaminio įrenginio darbas ir jo galimybės leidžiant skystos bei dujinės terpės srautus, kartu įvertinant šilumos pokytį. Su šia programa baigtinių elementų metodu galima skaičiuoti įvairius parametrus bet kokios formos uždaro skerspjūvio kanale. Tokie skaičiavimai gali būti atliekami plačiame Reinoldso skaičiaus diapazone, t.y. gali būti tiriamas tiek laminarinis, tiek turbulentinis srautai, įvertinant terpės spūdumą.



**23 pav. Projektuojamo lašelių separatoriaus modelis.**

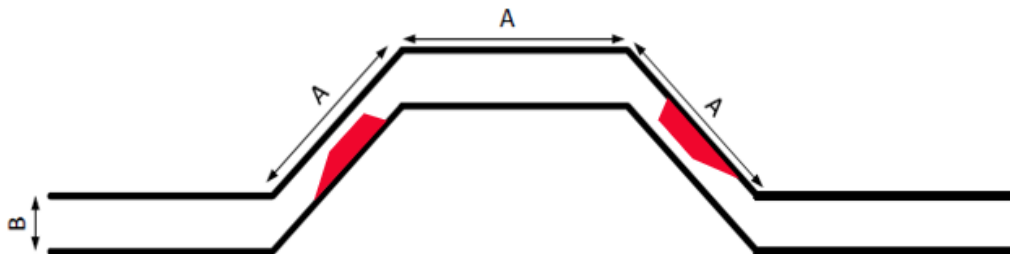
### **3.5 Fizinis modelis**

Planuojant atlikti fizinį bandymą yra reikalinga sukonstruoti fizinį bandymo stendą. Vertinant galimas sąnaudas ir realaus tyrimo sąlygas, buvo pasirinkta konstruoti įrangą, kuri turėtų galimybes praleisti pro vidinę savo konstrukciją ne mažiau kaip  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  dujinių išlakų debito. Dėl šio svarbaus rodiklio buvo nuspręsta konstruoti vidinę separatoriaus sekciją pagal šiuos matmenis: lašelių separavimo sekcijos aukštis 0,25 m bei skerspjūvis 0,25 m. Darbinė separavimo sekcija įtvirtinama į ją fiksuojantį rėmelį, kuris yra 3 centimetrų storio ir juosia separavimo plokšteles aplink visą sekcijos perimetrą. Vidinės sekcijos plokštelių ilgis sudaro apie 15 centimetrų.



**24 pav. Separatoriaus vidinė sekcija.**

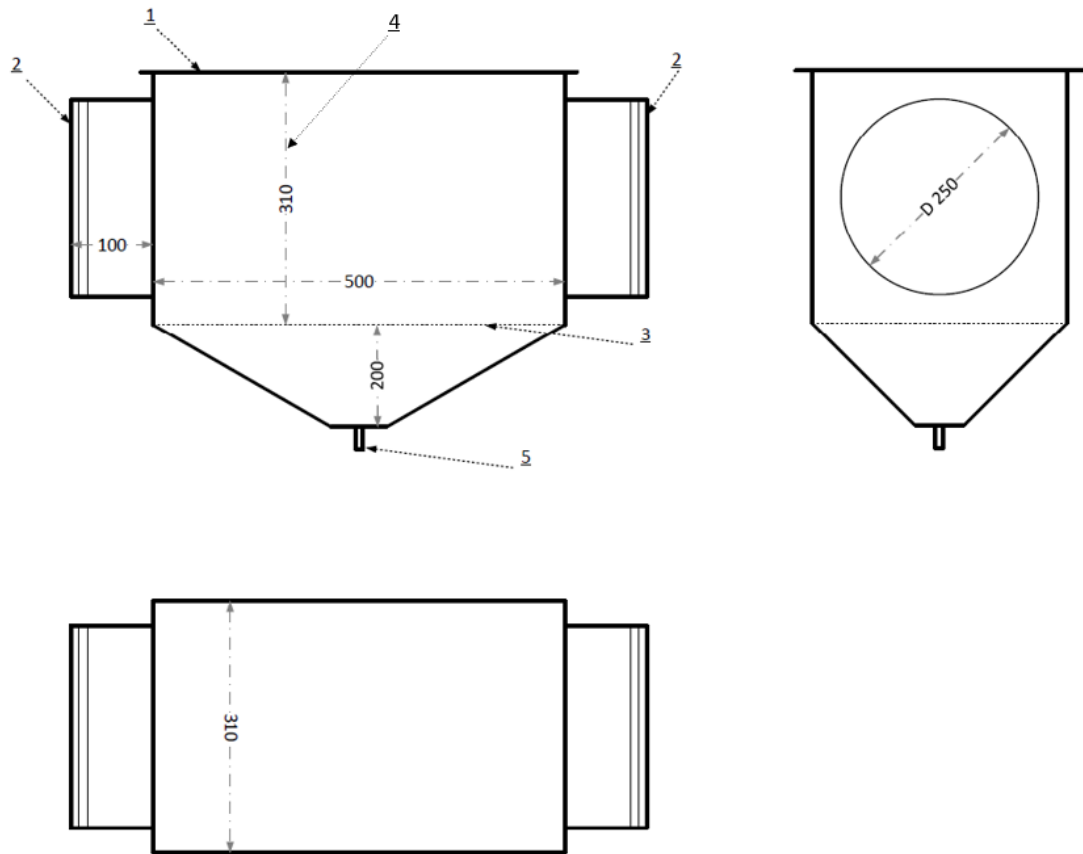
Vidinę separatoriaus sekciją sudaro lygiagrečiai išdėstytos lankstytos plokštelės, tarp kurių esantis tarpas gali būti keičiamas, naudojant pagamintas skirtingas vidines sekcijas su skirtingais tarpais tarp naudojamų plokštelių. Tiriamajame fiziniame modelyje buvo naudojama sekcija, kurioje buvo naudojamas tarpas tarp plokštelių lygus 2 centimetrai, tačiau matematiname srautų modeliavime buvo analizuojami rezultatai keičiant tarpą tarp plokštelių nuo 20 mm iki 60 mm.



**25 pav. Plokštelės sudarančios lašelių separatoriaus vidinę sekciją. A – plokštelės kraštinių ilgis, B – tarpas tarp plokštelių.**

Lašelių separatoriaus fizinį modelį sudaro viena srauto įėjimo anga, kurios pasirinktas diametras yra 25 cm, viena išėjimo anga srautui pašalinti iš įrenginio, kurios diametras pasirinktas atitinkamai įėjimo angai 25 cm, bei sukonstruota papildoma anga įrenginio apačioje susidariusiam kondensatui surinkti, kuris susidaro atskiriant vandens lašelius esančius įeinančiame sraute. Taigi, sukonstruoto fizinio lašelių separatoriaus bendrieji matmenys yra: įrenginio ilgis – 50 cm kartu prie šio ilgio pridėdant du įėjimo ir išėjimo atvamzdžius, kurių ilgis po 10 cm, įrenginio plotis 31 cm, bei įrenginio aukštis 31 cm, prie kurio reikia pridėti apatinės kūginės dalies aukštį – 20 cm.



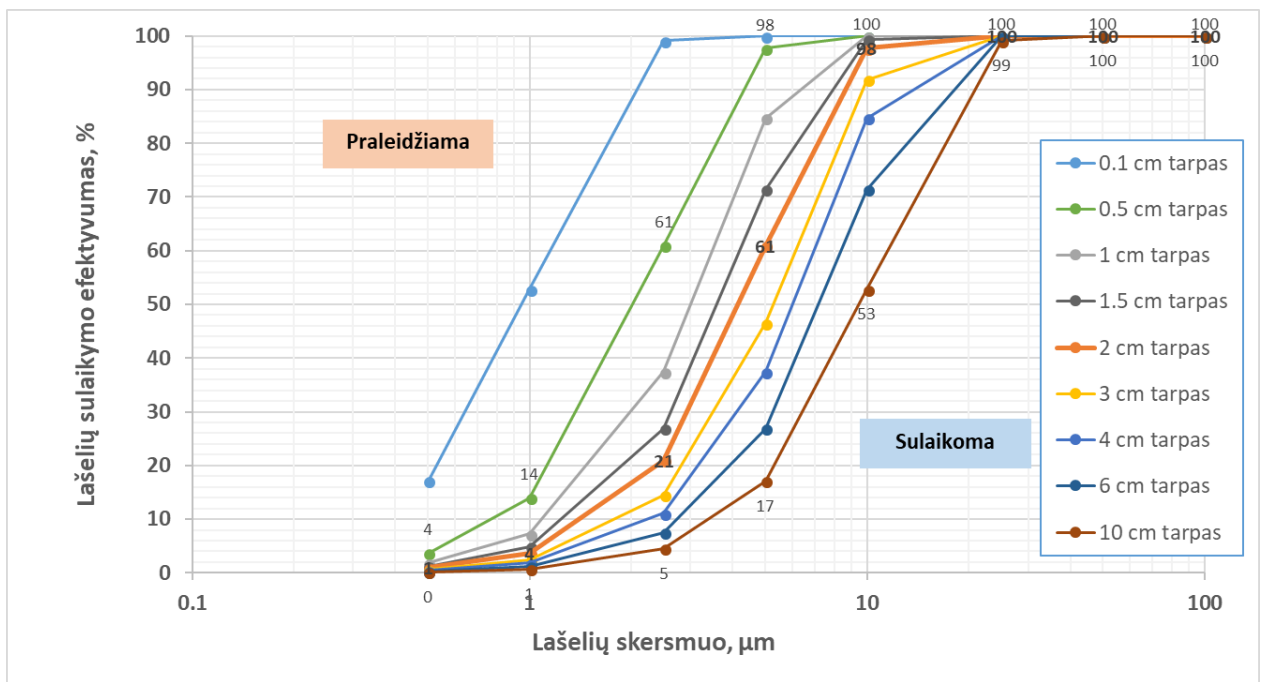


26 pav. Separatoriaus modelio schema: 1 – polikarbonatinis skaidrus dangtis, 2 – 200 mm atvamzdis su tarpine, 3 – rėtinė plokštė, 4 – separatoriaus plokštelės, 5 – atvamzdis surinkto kondensato nutekėjimui.

## 4. Rezultatai

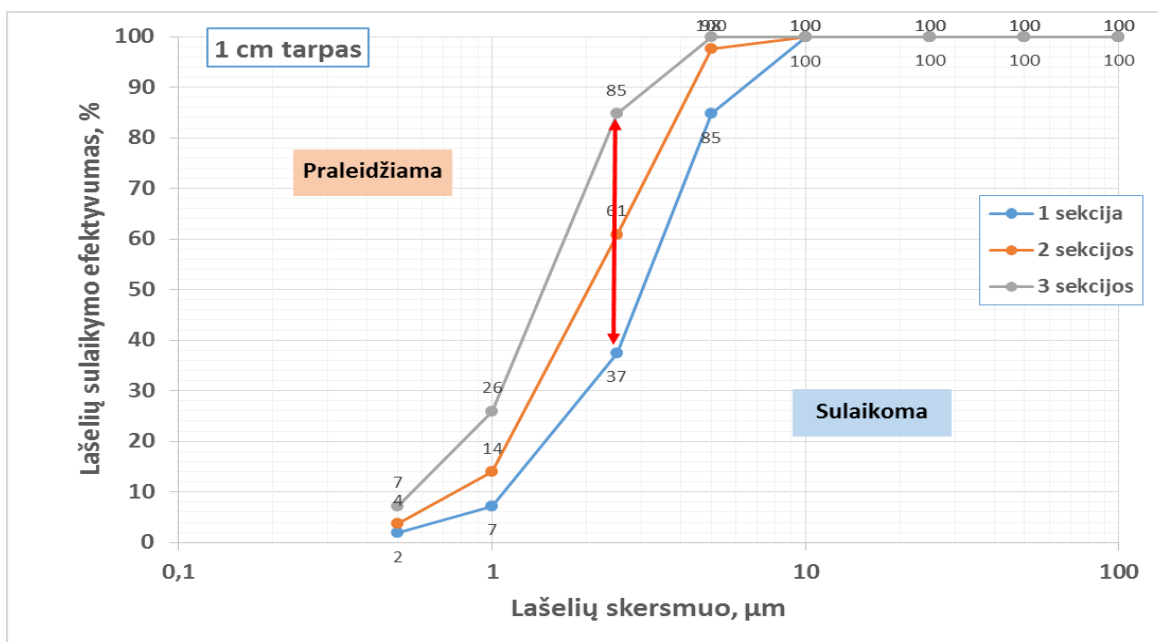
### 4.1 Projektavimo rezultatai remiantis aerolio fizikos skaičiavimais

Grafike pateikiami gauti rezultatai, vaizduojantys lašelių sulaikymo efektyvumo priklausomybę nuo separatoriaus viduje esančių sulaikymo plokštelių vidinio tarpo. Skaičiavimai buvo atlikti įvertinant devynis skirtingus atvejus, kuomet tarpas tarp menčių kito nuo 0,1 iki 10 centimetrų. Išanalizavus gautus rezultatus matome, kad naudojant kuo mažesnę tarpą, tuo efektyviau sulaikomi sraute esantys ypač maži lašeliai. Žiūrint į aukščiau pateiktą grafiką reikia suprasti, kad kairioji kreivė pusė vaizduoja daleles, kurių įrenginys nesulaiko palikdamas jas praeinančiame dujų sraute, o dešinėje kreivė pusėje pateikiami duomenys apie sulaikomų lašelių dydį.



27 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo tarpo tarp plokštelių.

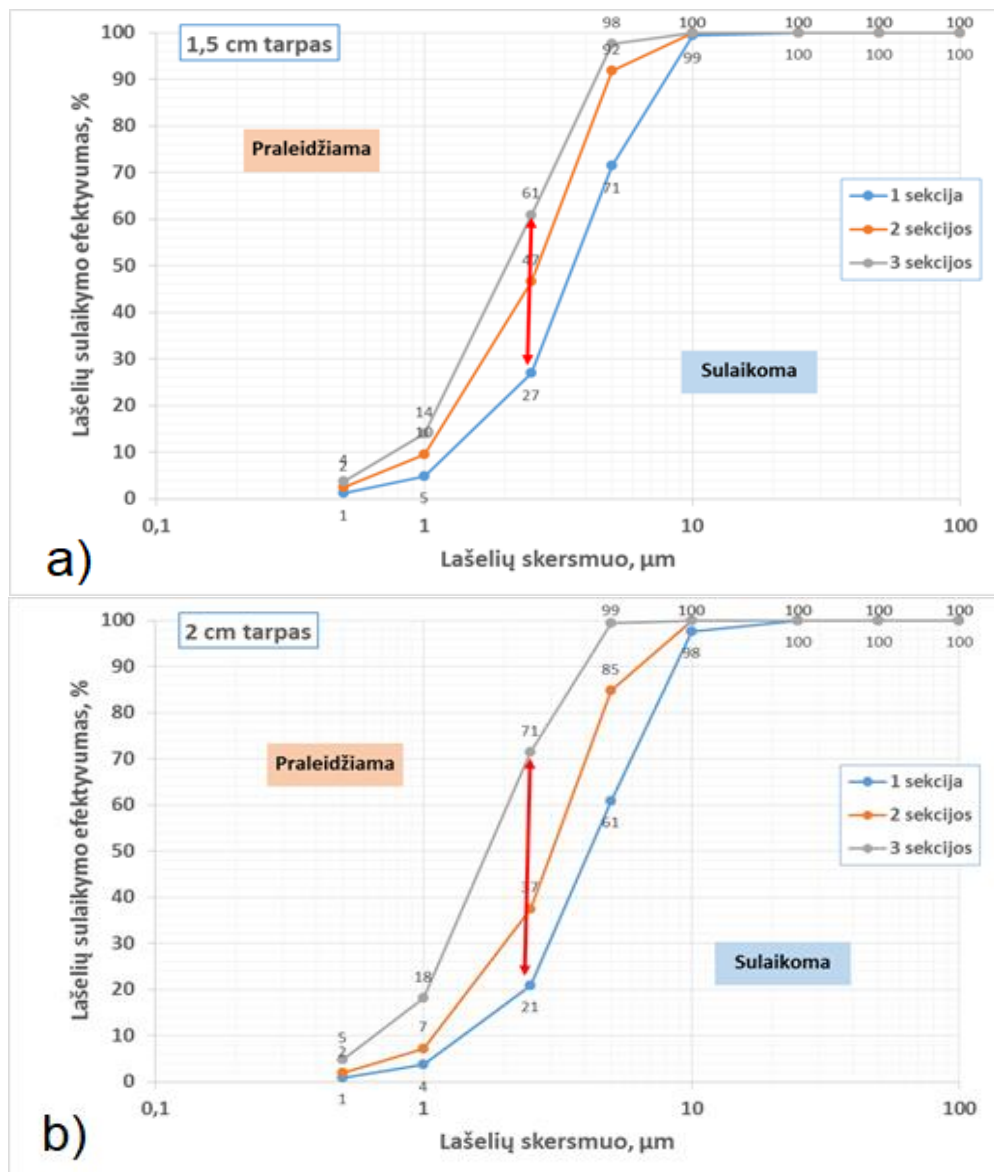
Toliau pateiktame grafike pateikiami atlikti lašelių separatoriaus efektyvumo skaičiavimų rezultatai esant vieno centimetro tarpui tarp plokštelių, tačiau su skirtingu separatoriaus plokštelių sekcijų skaičiumi. Iš kreivių matome lašelių sulaikymo efektyvumo priklausomybę nuo sekcijų skaičiaus. Pastebima, kad efektyviausiai projektuojamas aerodinaminis įrenginys veikia naudojant trijų sekcijų plokšteles. Naudojant vieną sekciją pasiekiamas efektyvumas siekia vos 7 %, naudojant dvi sekcijas, pasiekiamas dvigubai didesnis įrenginio efektyvumas – 14 %, tačiau naudojant tris sekcijas pasiekiamas efektyvumas yra daugiau nei tris kartus didesnis lyginant su vienos sekcijos gautais rezultatais ir siekia 26 % nusodinimo efektyvumo. Apie penkių mikrometrų dydžio lašelius separatorius su viena sekcija geba nusodinti 37 % efektyvumu, su dvejomis sekcijomis pasiekiamas beveik dvigubai didesnis efektyvumas – 61 %, tačiau pridėjus trečią sekciją, įrenginio nusodinimo efektyvumas papildomai padidėja tik trečdaliu lyginant su gautu rezultatu apskaičiavus dvejų sekcijų efektyvumą. Toliau didėjant dalelių dydžiui įrenginio efektyvumas ima sparčiai didėti ir pasiekus dešimties mikrometrų lašelių dydį visais atvejais įrenginys sugeba nusodinti lašelius iš dujų srauto.



**28 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo plokštelių sekcijų skaičiaus įrenginyje, esant 1 cm tarpui tarp plokštelių.**

Didėjant tarpui tarp plokštelių, proporcingai mažėja įrenginio efektyvumas, o tai reiškia, kad praeinančiame dujų sraute lieka daugiau mažesnio diametro suspensijos lašelių. Esant 1,5 cm tarpui 1  $\mu\text{m}$  lašelių nusodinimas pridėdant po vieną papildomą sekciją atitinkamai padidėja trečdaliu. Tačiau, tokia tendencija kinta didėjant lašeliams, pavyzdžiui 5  $\mu\text{m}$  lašelių sugavimo efektyvumo skirtumas tarp vienos ir dviejų sekcijų skiriasi beveik dvigubai (atitinkamai 27 % ir 47 %), o tarp dviejų ir trijų sekcijų skiriasi tik maždaug trečdaliu (atitinkamai 47 % ir 61 %).

Situacija skiriasi padidinus tarpą tarp separatoriaus plokštelių iki 2 cm. Dujų sraute pakibusius lašelius iki 1  $\mu\text{m}$  dydžio, pašalinimo efektyvumas naudojant vieną arba dvi sekcijas yra itin mažas ir siekia tik 4 % ir 7 % atitinkamai, tačiau naudojant tris sekcijas efektyvumas išgaunamas 4,5 karto didesnis ir siekia 18 %. Panaši tendencija išlieka ir sugaunant didesnius apie 5  $\mu\text{m}$  lašelius – su viena sekcija efektyvumas lygus 21 %, su dviem sekcijom jis tampa beveik dvigubai didesniu ir siekia 37 %, o su trimis sekcijomis efektyvumas lygus 71 %. Visais skaičiuotais atvejais daleles didesnes už 10  $\mu\text{m}$  įrenginys geba absoliučiai pašalinti iš dujų srauto.



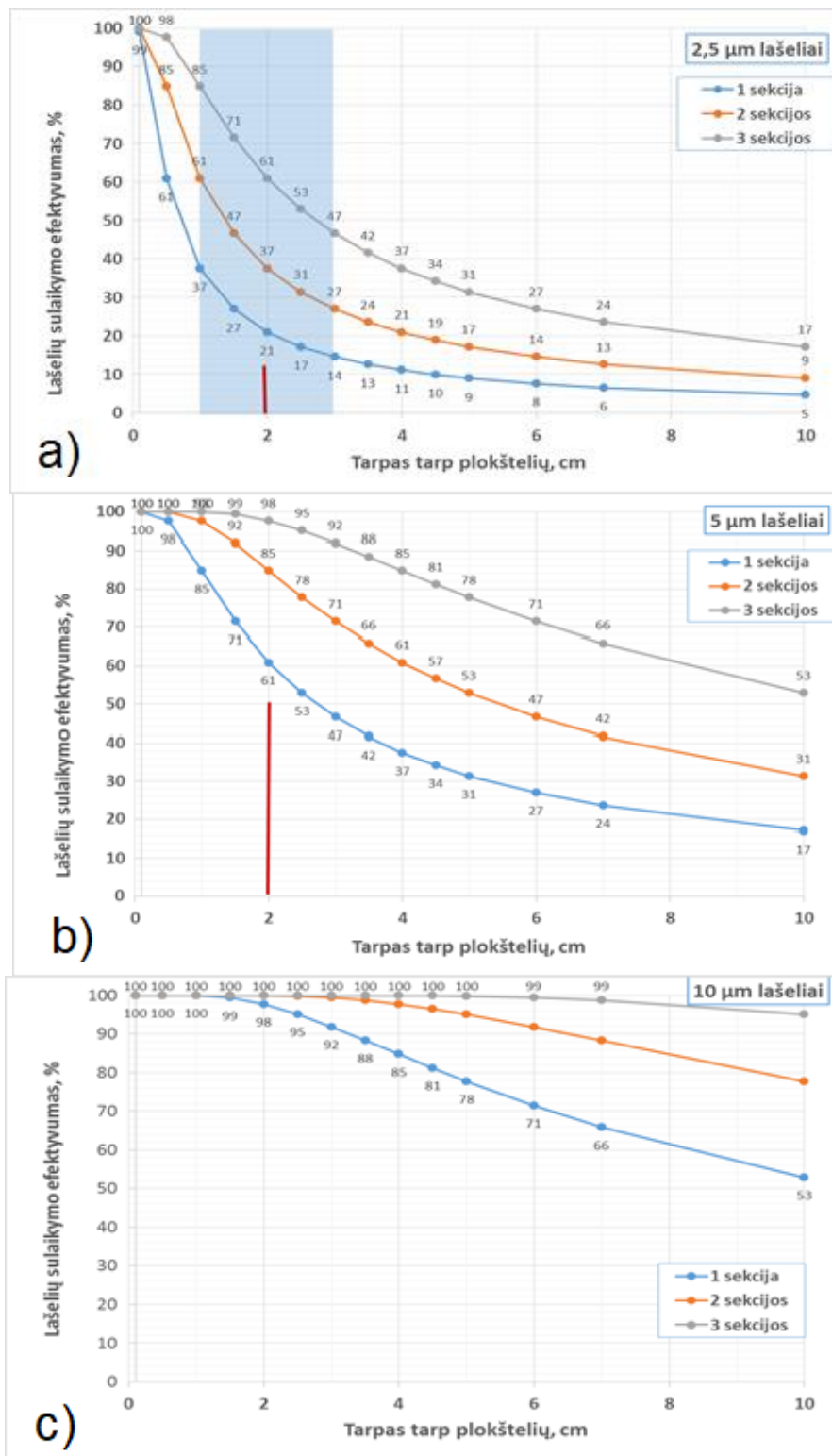
29 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo plokštelių sekcijų skaičiaus įrenginyje, esant: a) 1,5 cm tarpui, b) 2 cm tarpui tarp plokštelių.

Atlikus skaičiavimus ir apdorojus gautus duomenis buvo išskirti projektuojamo aerodinaminio įrenginio rezultatai, parodantys efektyvumo priklausomybę nuo įeinančių dujų sraute prikibusių lašelių dydžio, t.y. kaip įrenginys veikia esant konkrečiam lašelio dydžiui. Bendrai vertinant galima teigti, kad norint sugauti kuo mažesnę dujų sraute esančių lašelių, reikia naudoti separatorių su trimis sekcijomis plokštelių, turinčias kuo mažesnę tarpą tarpusavyje. Tačiau, tokiu atveju iškyla keletas pavojų: naudojamame įrenginyje prie srauto įėjimo atvamzdžio prieš plokštelių sekcijas susidaro viršslėgis, įeinantis srautas nespėtų praeiti separavimo sekcijų, todėl įrenginys tampa sunkiai funkcionuojantis ir

neefektyvus. Taip pat susidaro didelis separatoriaus užsikimšimo pavojus, kadangi įeinančiame sraute nebūna idealių sąlygų, kuriose egzistuotų tik vieno dydžio pakibę lašeliai.

Apskaičiuotu atveju remiantis gautais grafikais pastebime, kad siekiant efektyviai sugaudyti 2,5  $\mu\text{m}$  dydžio lašelius optimalus tarpas tarp sekcijos plokštelių yra 1–3 cm ir didžiausias pasiekiamas įrenginio rezultatas gaunamas naudojant tris plokštelių sekcijas.

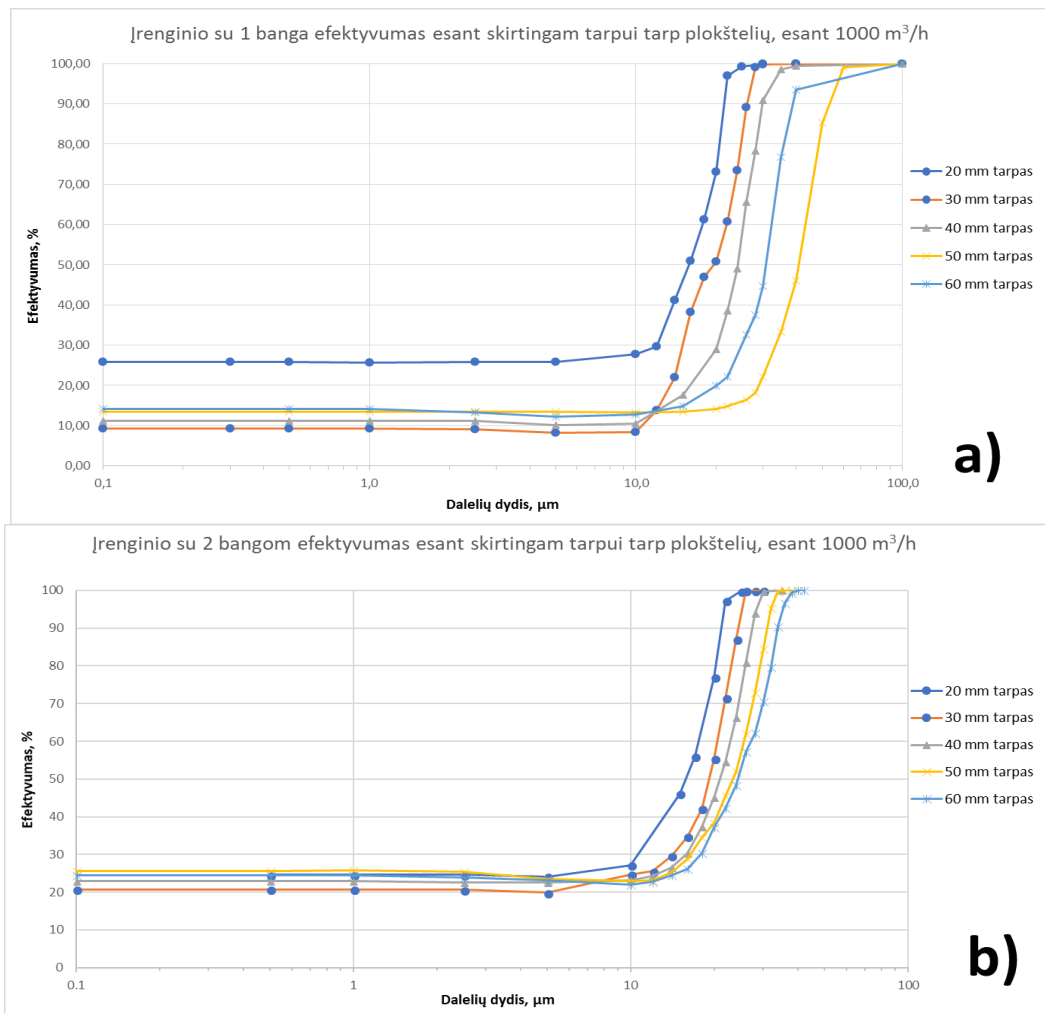
Atvejais, kai siekiama sugauti didesnio diametro lašelius (5  $\mu\text{m}$  ar 10  $\mu\text{m}$  dydžio) ir norima išgauti aukščiausią sugavimo rodiklį, galima naudoti sekcijas su didesniu atskyrimo tarpu tarp plokštelių, o kai kuriais atvejais pakanka ir mažesnio kiekio sekcijų. Toliau pateiktame grafike, kuriame patekiami duomenys apskaičiavus su 5  $\mu\text{m}$  lašelių dydžiu matome, kad projektuojant sekcijas su 2 cm tarpu, esant vienai sekcijai gaunamas 61 % efektyvumas, esant dviem – 85 %, o esant trimis – net 98 % efektyvumas. Jei įeinančiame sraute lašelių dydis yra apie 10  $\mu\text{m}$ , su 2 cm tarpu naudojant vieną sekciją, įrenginys pasiekia 98 % efektyvumą, o su dviem ar trim sekcijom gali būti pasiekiamas 98 – 100 % efektyvumas esant iki 5 cm tarpui tarp atskiriančiųjų plokštelių.



30 pav. Lašelių sulaikymo priklausomybė nuo tarpo tarp plokštelių separuojant skirtingo dydžio lašelius:  
 a) lašeliai 2,5 μm dydžio, b) lašeliai 5 μm dydžio, c) lašeliai 10 μm dydžio.

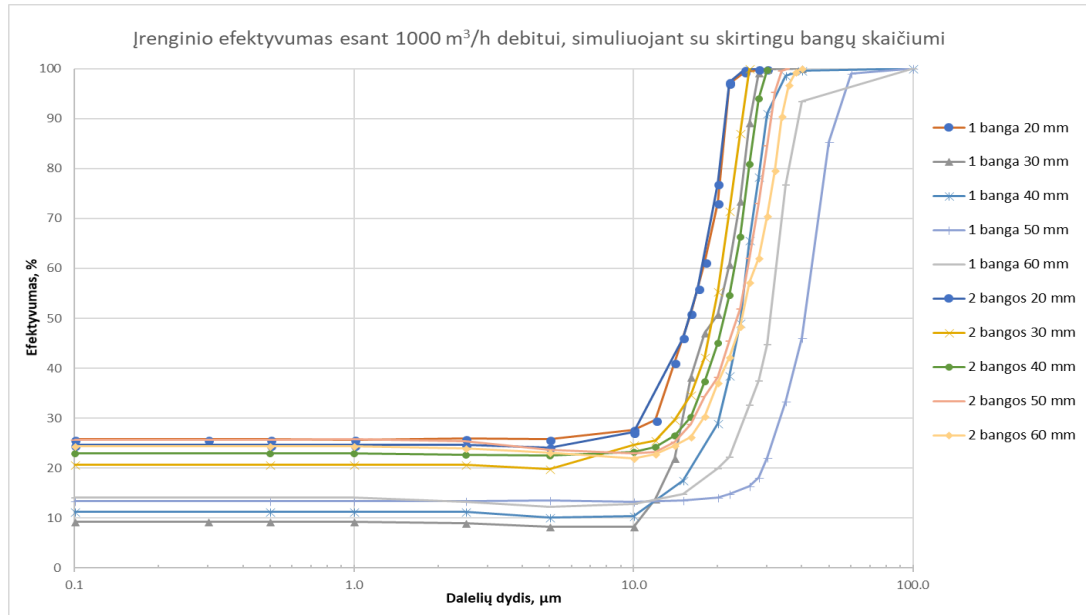
## 4.2 Matematinio srautų modeliavimo rezultatai

Atlikus matematinę srautų simuliaciją (angl. flow simulation) naudojant programinės įrangos SolidWorks (2017-2018 m., Dassault Systemes) SDK Flow Simulation studentams skirtą versiją, gavome simuliuojamo lašelių aerodinaminio separatoriaus įrenginio efektyvumo parametrus, įvertinant įeinančių – išeinančių lašelių sraute skaičių. Toliau pateiktame grafike (žr. 31 pav.) pateikiamas skirtingas įrenginio efektyvumas prie  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  debito keičiant tarpą tarp sekcijos plokštelių, kai separatoriuje įtaisyta viena arba dvi atskyrimo sekcijos. Pastebima, kad naudojant 20 mm tarpą tiek su viena, tiek su dvejomis plokštelių sekcijomis, maksimalus įrenginio efektyvumas yra pasiekiamas greičiausiai, o kartu ir geriau pašalinami mažesnio diametro lašeliai. Lėčiausias ir prasčiausias rezultatas pasiekiamas, kai buvo nustatytas 60 mm tarpas tarp atskiriančiųjų plokštelių.



31 pav. Lašelių separatoriaus efektyvumas su: a) viena plokštelių banga ir b) dvejomis plokštelių bangomis, esant  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  debitui, prie skirtingo tarpo tarp sekcijų plokštelių.

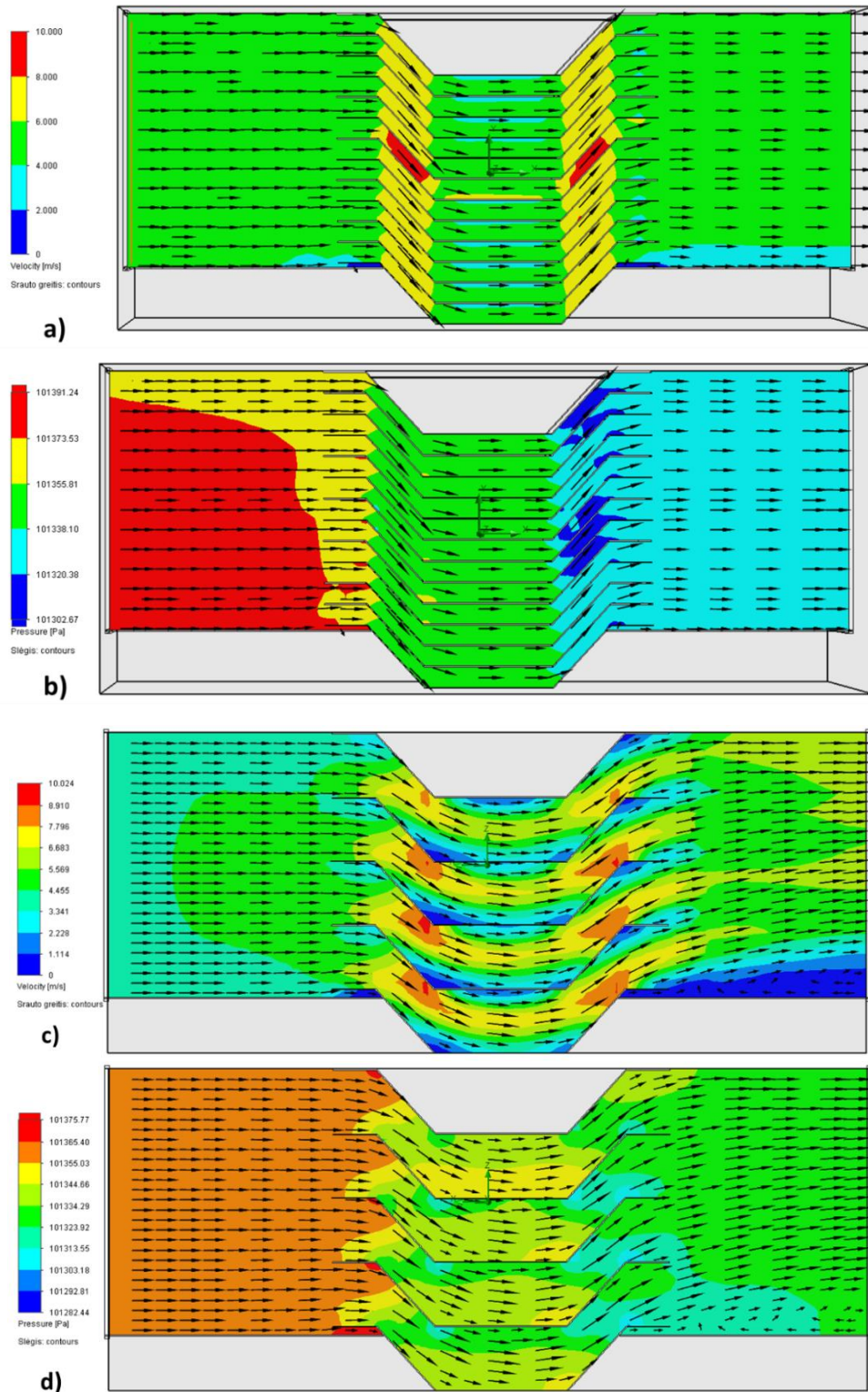
Atlikus įrenginio srautų simuliacijas ir gautus duomenis išanalizavus grafiškai, atsiskleidžia aerodinaminio lašelių separatoriaus savybių priklausomybė nuo sraute pakibusių lašelių dydžio, nuo atskyrimo sekcijų bangų skaičiaus bei tarpo tarp sekcijos plokštelių. Toliau esančiame grafike pateikiamas pokytis, kaip skiriasi įrenginio efektyvumas prie vienos ir prie dviejų bangų sekcijų.



**32 pav. Lašelių separatoriaus su skirtingu bangų skaičiumi efektyvumas, esant 1000 m<sup>3</sup>/h debitui ir skirtingam tarpui tarp sekcijų plokštelių.**

Atlikus suprojektuoto modelio srautų analizę toliau pateikiami įrenginio pjūviai, kuriuose matoma įėjusio srauto krypties pokyčiai, pateikiamas dujų srauto įrenginyje greitis skirtingose separatoriaus vietose bei slėgio pokyčiai. Pavyzdyje pateikiami du atvejai: a ir b paveikslėlio dalyse nagrinėjamas lašelių separatorius su 20 mm tarpu tarp atskyrimo plokštelių, o c ir d dalyse – su 60 mm tarpu tarp atskyrimo plokštelių. Žiūrint į srauto greičio parametrus pastebima, kad ties sekcija su plokštelėmis, su kiekvienu angos susiaurėjimu dujų srautas su pakibusiais vandens lašeliais pagreitėja, o tai skatina lašelių nusėdimą ant sienelių. Pats srauto pagreitėjimas vyksta intensyviau esant 20 mm tarpui nei esant 60 mm tarpui, taigi dėl šios priežasties ir įrenginio efektyvumas pasiekiamas geresnis ir greičiau, esant mažesniai tarpui tarp plokštelių. Tačiau, prie įėjimo atvamzdžio pirmuoju atveju susidaro didesni slėgio nuostoliai nei antruoju atveju, todėl separatoriaus efektyvumas neturi tiesinės priklausomybės nuo tarpo tarp plokštelių.





33 pav. Lašelių separatoriaus pjūviai esant  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  debitui, vaizduojantys: a) srauto greitį esant 20 mm tarpui tarp plokštelių; b) susidarantį slėgį esant 20 mm tarpui tarp plokštelių; c) srauto greitį esant 60 mm tarpui tarp plokštelių; d) susidarantį slėgį esant 60 mm tarpui tarp plokštelių.

### 4.3 Fizinis modeliavimas.

Atliekant fizinį lašelių separatoriaus modeliavimą buvo pagamintas fizinis modelis iš polikarbonatinės nepermatomos plokštės su iš polikarbonato pagamintu permatomu viršutiniu dangčiu. Iš surinktos įrenginio dėžės galų įtaisyti metaliniai srauto įėjimo ir išėjimo 250 mm diametro atvamzdžiai ir dėžės apačioje, už separavimo sekcijos, kondensato išbėgimo atvamzdis.



**34 pav. Aerodinaminis lašelių separatorius**

Surinktos įrangos bandymas buvo atliekamas pirmiausia laboratorinėmis ir vėliau realiomis sąlygomis 8 MW biokuro katilinėje. Atliekant pirminį bandymą laboratorinėmis sąlygomis buvo sukurtas 1000 m<sup>3</sup>/h debito dujų srautas, į kurį purkštuvu buvo įterpiami vandens lašeliai didesni už 2,5 μm. Esant tokioms sąlygoms buvo atliekamas vizualus įrangos testavimas prie dujų srauto išėjimo atvamzdžio pritačius mėlyną indikatoriaus lapą, ant kurio nusėdus lašeliui iš srauto, jis būtų sugeriamas ir vizualiai pastebimas. Kadangi purkštuvus suformavo tik didesnius nei 2,5 μm lašelius, sukonstruotos aparatūros efektyvumas siekė 100 %, todėl ant išėjimo atvamzdžio esantis indikatoriaus lapas po bandymo buvo sausas ir nesugėręs nė vieno lašelio iš srauto.

Atliekant bandymą realiomis sąlygomis biokuro katilinėje buvo įsitikinta, kad suprojektuotas lašelių separatorius veikia. Bandymo standą prijungus prie dūmtraukio, pro kurį praeina 1000 m<sup>3</sup>/h debitas ir atliekant 72 h bandymą, buvo surinkta 60 litrų susidariusio kondensato, kuris yra užterštas degimo proceso metu išlakose esančiomis kietosiomis dalelėmis, kurios dūmų sraute buvo suspenduotos lašelių pavidale. Po bandymo apžiūrėjus lašelių separatoriaus vidų pro skaidrą polikarbonatinę dangtį vizualiai matoma nusėdusios kietosios dalelės ant separavimo plokštelių sienelių (žr. 35 pav.).



35 pav. Fizinio modelio separavimo sekcija iš viršaus.

Laboratorinių bandymų metu buvo matuojami lašelių separatoriuje susidarantys slėgio nuostoliai didėjant įeinančio dujų srauto debitui, o tuo pačiu ir prafiltruoto oro debitui. Toliau pateiktame grafike matome tiesioginę priklausomybę slėgio nuostolių (Pa) nuo oro debito ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).



36 pav. Lašelių separatoriaus slėgio nuostolių (Pa) priklausomybė nuo prafiltruoto oro debito ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

Toliau pateiktame paveiksle (žr. 37 pav.) vaizduojama įranga, naudota atliekant pagal aerozolio fizikos dėsnius teoriškai apskaičiuoto bei matematiškai modeliuoto fizinio modelio testavimą realiomis sąlygomis biokuro katilinėje.



**37 pav. Biokuro katilinėje atliekamas sukonstruoto lašelių separatoriaus stendo bandymas.**

## 5. Išvados

1. Atlikta išsami literatūros analizė apibrėžianti aerodinaminius įrenginius, jų galimybes ir galimas modifikacijas. Pateikiamos galimybės dalelių bei lašelių pašalinimui iš oro srauto, remiantis fizikiniais dėsniais. Pagal literatūros analizę sudaryta metodika, pagal kurią atlikti skaičiavimai, paremti aerolio fizikos dėsniais. Aprašyta naudotos programinės įrangos SolidWorks naudojama skaičiavimų metodika, pagal kurią programa atlieka sukurto modelio analizę.
2. Atlikus matematinį srautų modeliavimą pagal suskaičiuotus aerodinaminio lašelių sulaikymo įrenginio parametrus, kai dujų sraute yra  $2,5 \mu\text{m}$  lašeliai, įrenginio efektyvumas esant 2 cm tarpui yra nuo 21 % esant vienai sekcijai iki 61 % esant trimis sekcijoms. Sraute esant  $5 \mu\text{m}$  lašeliams, įrenginio efektyvumas su viena sekcija – 37 %, naudojant dvi sekcijas – 61 %, esant trimis sekcijoms – 85 %. Optimalus tarpas tarp atskyrimo sekcijos plokštelių nuo 1 cm iki 3 cm. Taip pat atliktas matematinis modeliavimas simuliuojant sekcijos tarpus nuo 20 mm iki 60 mm atskleidė, kad aerodinaminis lašelių separatorius efektyviausiai dirba esant 20 mm tarpui tarp plokštelių. Gauti modeliavimo rezultatai parodė įrenginio darbinis parametrus: susidarantį slėgį skirtingose įrenginio vietose, įėjusio srauto greičio kitimą įrenginyje bei suprojektuoto lašelių separatoriaus efektyvumą. Išanalizuotas aerodinaminio įrenginio efektyvumas priklauso nuo: įeinančio dujų srauto debito, įrenginio sekcijų skaičiaus, tarpo tarp sekcijos plokštelių ir dujų sraute esančių pakibusių lašelių dydžio.
3. Remiantis atliktais aerolio dalelių fizikinių dėsnų teoriniais skaičiavimais ir gautais matematinio modeliavimo rezultatais, iš polikarbonatinės plokštės buvo pagamintas ir ištestuotas fizinis optimalių parametrų lašelių sulaikymo įrenginys. Tiriant laboratorinėmis sąlygomis įrenginys ištestuotas esant  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  oro debitui, į jį įterpant  $2,5 \mu\text{m}$  lašelius. Bandymo metu įrenginio efektyvumas pasiekė 100 %. Taip pat atliktas bandymas realiomis sąlygomis 8 MW Noreikiškių biokuro katilinėje. Bandymas buvo atliekamas 72 valandas ir per šį laiką su įrenginiu buvo surinkta 60 litrų kietosiomis dalelėmis užteršto garo kondensato. Po bandymo apžiūrėjus lašelių separatoriaus vidų vizualiai matoma nusėdusios kietosios dalelės ant separavimo plokštelių. Siekiant detaliau iširti įrenginį realiomis sąlygomis yra reikalinga stabilizuoti tyrimo sąlygas, kad gauti pastovius įrenginio darbo parametrus.



## Literatūros šaltiniai

1. **BALTRĖNAS Pranas, Diana PLATOVA ir VENSLOVAS Albertas.** (2014). Aerodynamic Analysis of the Multichannel Air Cleaning Equipment with curvilinear channels. *The 9th International Conference „Environmental Engineering“*. eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9.
2. **Kai Xiao, Jacob J. Swanson, David Y. H. Pui and David B. Kittelson.** (2012). Bipolar Diffusion Charging of Aggregates. Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA. *Aerosol Science and Technology*. DOI: 10.1080/02786826.2012.667585
3. **The Lancet Commission.** (2017). The Lancet Commission on pollution and health. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)32345-0.
4. **Ozarovskis, Darius.** (2012). Akustinio ciklono tyrimas: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: VGTU Technika.
5. **DENAFAS, Gintaras.** (2000). *Atmosferos apsauga, II dalis*. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas. ISBN 9955-09-101-0.
6. **Patrick J. Woolcock and Robert C. Brown.** (2013). A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy*. 52 (2013) 54 - 84.
7. **H. T. Kim, K. W. Lee and M. R. Kuhlman.** (2001). Exploratory design modifications for enhancing cyclone performance. *Aerosol Science*. 32 (2001) 1135}1146.
8. **K.S. Lim, S.B. Kwon and K.W. Lee.** (2003). Characteristics of the collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air. *Aerosol Science*. 34 (2003) 1085–1095.
9. **Sang Young Yeo, Dae Young Lim, Sung Won Byun , Jong Hoon Kim and Sung Hoon Jeong.** (2007). Design of filter bag media with high collection efficiency. *Springer Science+Business Media*. DOI 10.1007/s10853-007-1565-2.
10. Interaktyvus šaltinis. [Peržiūrėta 2018.04.12]. Prieiga per internetą: [www.wwthayer.com/Dust-Collectors-Dantherm-Filtration-Dust-Collectors-S-Bag-Filter.asp](http://www.wwthayer.com/Dust-Collectors-Dantherm-Filtration-Dust-Collectors-S-Bag-Filter.asp).
11. **Zhongyang Luo, Hao Chen, Tao Wang, Dong Zhou, Mengshi Lu, Mingchun He and Mengxiang Fang, Kefa Cen.** (2017). Agglomeration and capture of fine particles in the coupling effect of pulsed corona discharge and acoustic wave enhanced by spray droplets. *Elsevier B.V.* 312 (2017) 21–28.

12. **Thomas L. Hoffmann.** (2000). Environmental implications of acoustic aerosol agglomeration. *Elsevier Science B.V.* 38 (2000) 353–357.
13. **E. Riera-Franco de Sarabia , J.A. Gallego-Jua´rez, G. Rodri´guez-Corral, L. Elvira-Segura and I. Gonza´lez-Go´mez.** (2000). Application of high-power ultrasound to enhance fluid/solid particle separation processes. *Elsevier Science B.V.* 38 (2000) 642–646.
14. **Baihe Tan, Lianze Wang and Xiangrong Zhang.** (2007). The effect of an external DC electric field on bipolar charged aerosol agglomeration. *Journal of Electrostatics.* 65 (2007) 82–86.
15. **J.C. Hower, J.D. Robertson.** (2004). Chemistry and petrology of fly ash derived from the co-combustion of western United States coal and tire-derived fuel, *Fuel Proc. Technol.* 85 359–377.
16. **M.T. Nielsen, H. Livbjerg.** (2002). Formation and emission of fine particles from two coal-fired power plants. *Combust. Sci. Technol.* 174 79–113.
17. **Anatol Jaworek, Andrzej Krupa and Tadeusz Czech.** (2007). Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review. *Journal of Electrostatics.* 65 133–155.
18. **S.H. Huang, C.C. Chen.** (2001). Filtration characteristics of a miniature electrostatic precipitator. *Aerosol Sci. Technol.* 35 792–804.
19. **A. Jaworek, A. Krupa, K. Adamiak.** (2003). Dust particles removal in novel type two-stage electrostatic precipitator. *Electrostatics 2003, Inst. Phys. Conf. Series No.178*pp. 343–348.
20. **A. Bologna, H.R. Paur, T. Wascher.** (2001). Electrostatic charging of aerosols as a mechanism of gas cleaning from submicron particles. *Filter, Separator.* 38 (10) 26–30.
21. **J. Li, W. Cai, B. Dong.** (2003). Study of solid–gas separation mechanism of cyclone with impulse excitation. *J. Electrostat.* 57 225–232.
22. **J. Li, W. Cai.** (2006). Theory and application of cyclone with impulse electrostatic excitation for cleaning molecular gas. *J. Electrostat.* 64 254–258.
23. **Huang Zhanga, Yuzheng Lic, Jianxin Lic and Qianfeng Liu.** (2017). Study on separation abilities of moisture separators based on droplet collision models. *Nuclear Engineering and Design.* 325 (2017) 135–148.
24. **Elhameh Narimani and Shahrokh Shahhosseini.** (2010). The Effect on Vane Angle on the Mist Eliminator Efficiency. *International Review of Chemical Engineering (I.R.E.C.H.E), Vol. 2, N. 1, Special Section on 1st Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials (CEAM) VIRTUAL FORUM.*
25. **Chlebnikovas, Aleksandras.** (2012). Šešiakanalio ciklono eksperimentiniai tyrimai ir tobulinimas: baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius.

26. **Dr. A. Sobachkin and Dr. G. Dumnov.** (2014). Numerical Basis of CAD-Embedded CFD. *SolidWorks, Dassault Systemes.*