



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**

**Arūnas Meščeriakovas**

**AEROZOLIO DALELIŲ FORMAVIMĄSI LEMIANTYS  
VEIKSNIAI IR MATAVIMAS NETERMINĖS PLAZMOS ORO  
VALYMO REAKTORIUJE**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Dainius Martuzevičius

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**

**AEROZOLIO DALELIŲ FORMAVIMĄSI LEMIANTYS  
VEIKSNIAI IR MATAVIMAS NETERMINĖS PLAZMOS ORO  
VALYMO REAKTORIUJE**

Baigiamasis magistro projektas  
Aplinkosaugos inžinerija (kodas 621H17001)

**Vadovas**

Doc. dr. Dainius Martuzevičius

**Recenzentas**

Doc. dr. Violeta Kaunelienė

**Projektą atliko**

Arūnas Meščeriakovas

**KAUNAS, 2016**



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Cheminės technologijos fakultetas

(Fakultetas)

Arūnas Meščeriakovas

(Studento vardas, pavardė)

Aplinkosaugos inžinerija, 621H17001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Aerolio dalelių formavimąsi lemiantys veiksniai ir matavimas neterminės plazmos oro valymo reaktoriuje“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Arūno Meščeriakovo**, baigiamasis projektas tema „Aerolio dalelių formavimąsi lemiantys veiksniai ir matavimas neterminės plazmos oro valymo reaktoriuje“ 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)

Meščeriakovas, Arūnas. Aerosolio dalelių formavimąsi lemiantys veiksniai oro teršalų skaidymo neterminės plazmos reaktoriuose. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Dainius Martuzevičius; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijos mokslai, bendroji inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: vainikinis išlydis, aerosolis, lakieji organiniai junginiai, oro kokybė.

Kaunas, 2016. 56 p.

## SANTRAUKA

Magistro baigiamajame darbe tiriami aerosolio dalelių formavimąsi lemiantys veiksniai ir galimi jų mažinimo metodai oro teršalų skaidymo neterminės plazmos reaktoriuje.

Vidaus patalpų oro užterštumas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių žmonių sveikatą. Pastaruoju metu didelį susidomėjimą kelia neterminės plazmos lakiųjų organinių junginių (LOJ) skaidymo įrenginiai. Tačiau jų eksploatacija yra susijusi su antrinio teršalo (aerosolio) susidarymu.

Tyrimo planas buvo sudarytas „Modde 7“ programa. Suplanuoti eksperimentai buvo atliekami kompleksiniame aukštos įtampos vainikinio išlydžio reaktoriuje. Kompleksinę LOJ (tolueno) skaidymo sistemą sudarė išlydžio zona, TiO<sub>2</sub> katalizatoriai, UV spinduliuotė, aktyvintos anglies sorbentas, HEPA filtras. Susidarančio aerosolio koncentracijos buvo matuojamos ELPI ir SMPS dalelių matuokliais, ėminius renkant reaktoriaus gale.

Reaktoriaus galia buvo svarbiausias veiksnys, nulemiantis aerosolio dalelių formavimąsi. Pakėlus galią nuo 20 iki 90 W dalelių koncentracijos gali išaugti iki 1000 kartų ir siekti  $1.2 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ . Didžiausias susidarančių dalelių kiekis buvo 10 – 50 nm dydžio ir sudarė >99 % viso dalelių kiekio.

Skirtingų skaidymo procesų įtakos eksperimento metu nustatytos labiausiai dalelių koncentraciją mažinančios kombinacijos. Efektyviausiai dalelių susidarymą mažino: dvigubas TiO<sub>2</sub> katalizatorius+UV spinduliuotė (85 – 91 %), dvigubas TiO<sub>2</sub> katalizatorius (82 – 86 %), vienas TiO<sub>2</sub>+UV (78 – 85 %), vienas TiO<sub>2</sub> (73 – 78 %). Mažiausiai įtakos turėjo aktyvintos anglies sorbentas ir UV spinduliuotė. Visi skaidymo etapai turėjo vienodą įtaką dalelių frakciniam pasiskirstymui t.y. visų dydžių dalelių susidarymas buvo mažinamas vienodai.

Suprojektuotas koncepcinis, difuzinio įkrovimo principu paremtas, dalelių skaitiklis, kuris gali būti naudojamas nuolatinei dalelių koncentracijai įrenginyje stebėti. Apskaičiuoti pagrindiniai prietaiso parametrai, elektrometro jautrumas, pateikti pasiūlymai atsižvelgiant į matuojamo srauto frakcinę sudėtį ir matavimo debitą.

Meščeriakovas, Arūnas. Factors Affecting Formation and Measurement of Aerosol Particles in Non-thermal Plasma Reactors for Air Pollutant Decomposition: *Master's thesis* in Environmental Engineering / supervisor assoc. prof. Dainius Martuzevičius. Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Research area and field: technological sciences, general engineering.

Key words: corona discharge, aerosol, volatile organic compounds, air quality.

Kaunas, 2016. 56 p.

## SUMMARY

This Master's thesis investigates factors affecting formation of aerosol particles and methods of abatement in a non-thermal plasma reactor for air pollutant decomposition.

Indoor air quality is one of the most important factors influencing human health. Recently, non-thermal plasma application for volatile organic compound abatement has received a lot of attention. But the application of this technology has its drawbacks – formation of secondary pollutants, namely aerosols.

The experimental plan was compiled using „Modde 7“ software. Experiments were carried out in a complex high voltage corona discharge reactor. The system was composed of discharge zone, TiO<sub>2</sub> catalysts, UV irradiation source, activated carbon sorbent, and a HEPA filter. Toluene was selected as the volatile organic compound. Concentration of the formed aerosol was measured by ELPI and SMPS particle counters by drawing air sample at the end of the reactor.

Reactor power was the most important parameter affecting particle concentrations. Increasing the power from 20 to 90 W yielded a particle increase of up to 1000 times, maximum measured value -  $1.2 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ . 99 % of the formed particles were in the range of 10 – 50 nm in diameter.

The results from the various combinations of abatement for formed aerosol are presented in decreasing order of efficiency: double TiO<sub>2</sub> catalyst+UV (85 – 91 %), double TiO<sub>2</sub> catalyst (82 – 86 %), single TiO<sub>2</sub> catalyst+UV (78 – 85 %), single TiO<sub>2</sub> catalyst (73 – 78 %). Combinations of UV irradiation and activated carbon sorbent yielded little to no effect on particle concentrations. All abatement methods effected the size distribution evenly.

A conceptual particle counter based on diffusion charging was designed. This device can be used for continuous particle monitoring in the reactor. Main operational parameters were calculated and suggestions for operation under different stream flows and composition of aerosol were made.

# TURINYS

ĮVADAS.....	12
1. LITERATŪROS ANALIZĖ .....	13
1.1. Lakieji organiniai junginiai .....	13
1.2. Lakiųjų organinių junginių šalinimo technologijos .....	14
1.2.1. Adsorbcija .....	14
1.2.2. Fotokatalitinė oksidacija .....	15
1.2.3. Biofiltracija.....	15
1.2.4. Augalinė oro valymo sistema .....	16
1.2.5. Membraninė separacija .....	16
1.2.6. Neterminės plazmos metodai .....	16
1.3. Neterminės plazmos reaktoriai.....	17
1.3.1. Dielektrinio barjero išlydžio reaktorius.....	17
1.3.2. Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio reaktorius .....	18
1.3.3. Nuolatinės pulsuojančios srovės vainikinio išlydžio reaktorius .....	20
1.3.4. Feroelektrinės įkrovos reaktorius .....	20
1.4. Reakcijų mechanizmai: pirminiai ir antriniai procesai .....	21
1.5. Radikalinių reakcijų reakingumas ir selektyvumas.....	23
1.6. Veiksniai lemiantys teršalų skaidymo procesą.....	23
1.6.1. Temperatūra .....	23
1.6.2. Drėgmės kiekis .....	24
1.6.3. Deguonies kiekis .....	25
1.6.4. Oro debitas .....	25
1.6.5. Pradinė LOJ koncentracija .....	25
1.7. Antrinis organinis aerosolis, kilmė, pavojus žmogui.....	26
1.8. Aerosolio sudėtis ir susidarymą lemiantys veiksniai .....	26

1.9. Literatūros apžvalgos apibendrinimas .....	30
2. METODINĖ DALIS .....	31
2.1. Pilotinė kompleksinė vainikinio išlydžio oro valymo sistema.....	31
2.2. Aerosolio susidarymą lemiančių veiksnių nustatymo eksperimentas.....	32
2.3. Skirtingų skaidymo procesų įtakos nustatymo eksperimentas.....	32
2.4. Analitiniai instrumentai.....	32
2.4.1. Elektrinis žemo slėgio daugiapakopis dalelių impaktorius.....	32
2.4.2. Nano dalelių skaitiklis.....	33
2.4.3. Aeroqual oro kokybės matuoklis .....	35
2.5. Konceptinio elektrinio dalelių matuoklio skaičiavimo formulės .....	35
3. TYRIMŲ REZULTATAI.....	39
3.1. Aerosolio susidarymą lemiančių veiksnių nustatymas .....	39
3.2. Dalelių koncentracijos vidurkių palyginimo analizė .....	42
3.3. Dalelių koncentracijų regresiniai modeliai .....	43
3.4. Skirtingų skaidymo procesų įtaka aerosolio susidarymui.....	45
3.5. Konceptinio elektrinio dalelių skaitiklio projektavimas .....	48
IŠVADOS .....	52
LITERATŪRA.....	53
PRIEDAI.....	57

## LENTELĖS

<b>1 lentelė.</b> LOJ emisijos iš buityje aptinkamų objektų.....	14
<b>2 lentelė.</b> ANOVA dispersinės statistinės analizės rezultatai .....	42
<b>3 lentelė.</b> Pagrindiniai suprojektuoto elektrinio dalelių skaitiklio parametrai .....	49



## PAVEIKSLAI

<b>1.1. pav.</b> DBI reaktoriaus elektrodų ir dielektriko išdėstymai [14] .....	18
<b>1.2. pav.</b> Teigiamo ir neigiamo vainikinio išlydžio stadijos [18] .....	19
<b>1.3. pav.</b> VI reaktoriaus elektrodų išdėstymas [19] .....	20
<b>1.4. pav.</b> Įkrautinio reaktoriaus išdėstymai [16] .....	21
<b>1.5. pav.</b> Išlydžio metu vykstantys procesai ir reakcijos [15].....	22
<b>1.6. pav.</b> Galimi radikalinių reakcijų būdai [15].....	23
<b>1.7. pav.</b> Galimi tolueno skylimo produktai [27] .....	27
<b>1.8. pav.</b> Aerosolio pasiskirstymas VI reaktoriuje, skaidant skirtingus teršalus [15] .....	28
<b>1.9. pav.</b> Drėgmės įtaka aerosolio susidarymui [15] .....	29
<b>1.10. pav.</b> Įtampos įtaka aerosolio susidarymui [28].....	29
<b>2.1. pav.</b> Pilotinė kompleksinė vainikinio išlydžio sistema.....	31
<b>2.2. pav.</b> Elektrinis žemo slėgio daugiapakopis dalelių impaktorius [30].....	33
<b>2.3. pav.</b> Nano dalelių skaitiklio schema [18] .....	34
<b>3.1. pav.</b> ELPI prietaisu išmatuotos dalelių koncentracijos.....	39
<b>3.2. pav.</b> Energijos tankio įtaka susidarančio aerosolio kiekiui .....	40
<b>3.3. pav.</b> SMPS prietaisu išmatuotos dalelių koncentracijos .....	41
<b>3.4. pav.</b> Išmatuotų dalelių frakcinė sudėtis .....	41
<b>3.5. pav.</b> Pritaikyti regresiniai modeliai ELPI išmatuotoms dalelių koncentracijoms .....	44
<b>3.6. pav.</b> Skirtingų skaidymo sistemos kombinacijų įtaka susidarančio aerosolio koncentracijai .....	45
<b>3.7. pav.</b> Skirtingų skaidymo sistemos kombinacijų įtaka susidarančio aerosolio koncentracijai .....	46
<b>3.8. pav.</b> SMPS išmatuotas aerosolio pasiskirstymas.....	47
<b>3.9. pav.</b> Konceptinio elektrinio dalelių skaitiklio schema.....	48
<b>3.10. pav.</b> Difuzijos būdu įgaunamas krūvio kiekis ant vienos dalelės .....	49
<b>3.11. pav.</b> Apskaičiuotos elektrometro srovės.....	50
<b>3.12. pav.</b> Įkrovimo efektyvumo koeficiento priklausomybė nuo dalelės diametro ir oro debito.....	51

## **PRIEDAI**

1. PRIEDAS .....	57
2. PRIEDAS .....	58
3. PRIEDAS .....	59
4. PRIEDAS .....	62

## SANTRUMPOS

DBI – dielektrinio barjero išlydis

ELPI – elektrinis žemo slėgio daugiapakopis impaktorius (*angl. Electrical Low Pressure Impactor*)

LOJ – lakieji organiniai jungiai

SMPS – nanodalelių skaitiklis (*angl. Scanning Mobility Particle Sizer*)

VI – vainikinis išlydis

## IVADAS

Oro užterštumas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių žmonių sveikatą. Dauguma gyventojų didžiausią laiko dalį praleidžia patalpose. Dėl didelio paplitimo patalpose ir žalingo poveikio žmogaus sveikatai, ir įtakos klimato šiltėjimui, lakieji organiniai junginiai kelia didelį susirūpinimą aplinkosauginiu požiūriu. Žmogaus sąlytis su LOJ gali sukelti dirglumą, mieguistumą, nesugebėjimą sutelkti dėmesio, gali turėti kancerogenišką poveikį. LOJ atsiradimas patalpose yra siejamas su įvairiomis statybų, apdirbimo priemonėmis, kasdieniais vartojamais produktais. Didžiausi LOJ šaltiniai naujuose pastatuose yra naujos, šviežios statybos medžiagos, todėl didžiausios LOJ koncentracijos yra naujos statybos patalpose.

LOJ šalinimui yra taikoma daug tradicinių technologijų, tokių kaip: adsorbicija anglimi, terminė ir katalinė oksidacijos, membraninė separacija, biofiltrai [1]. Tačiau šių technologijų eksploatavimas prie žemų koncentracijų tampa neefektyvus, sudėtingas ir brangus, todėl atsiranda būtinybė alternatyvių technologijų vystimuisi. Viena iš jų – neterminės plazmos panaudojimas šių teršalų skaidymui. Plazminiai teršalų skaidymo įrenginiai pasižymi palyginti dideliu efektyvumu, nedidele kaina ir aptarnavimo nereikalaujančiu veikimu. Tačiau jų eksploatacija gali būti susijusi su technologiniais iššūkiais – didesnių teršalų koncentracijų sąlygomis, kai organinių monomerų molekules plazmos aplinkoje polimerizuojasi, susidaro dalelės, kurios yra tiek antrinis teršalas, tiek daro neigiamą poveikį reaktoriui.

**Darbo tikslas:** Ištirti aerolio dalelių formavimąsi lemiančius veiksnius, matavimo ypatumus ir galimus mažinimo būdus neterminės plazmos oro teršalų skaidymo reaktoriuje.

### **Uždaviniai:**

1. Atlikti literatūros analizę ir pasirinkti kompleksinę neterminės plazmos sistemą oro valymui.
2. Sudaryti ir atlikti aerolio susidarymą įtakojančių veiksnių eksperimentą.
3. Įvertinti skirtingų skaidymo procesų derinių įtaką susidarancio aerolio kiekiui.
4. Suprojektuoti koncepcinį elektrinį dalelių skaitiklį.

# 1. LITERATŪROS ANALIZĖ

## 1.1. Lokieji organiniai junginiai

Šiais laikais žmonės 80 – 90% savo gyvenimo laiko praleidžia patalpose, o tai gali turėti didelės įtakos sveikatai ir darbo našumui. Vidaus patalpų oro kokybė tapo labai aktuali tema nuo tada, kai atsirado terminas nesveikų patalpų sindromas. Tai situacija, kurioje, dėl ilgai praleisto laiko patalpose, žmonės patiria sveikatos sutrikimus, tačiau jokia specifinė liga ar sukelėjas nėra nustatomas. Atsirandantys sveikatos sutrikimai gali skirtis priklausomai nuo vyraujančių junginių toksiškumo, kontakto pobūdžio ir kontakto laiko. Poveikis sveikatai gali būti trumpalaikis arba ilgalaikis. Prie trumpalaikio poveikio priskiriamas galvos skausmas, akių, nosies, gerklės dirglumas, sausas kosulys, sausa ir niežtinti oda, svaigulys, nesugebėjimas susikaupti, nuovargis, jautrumas kvapams. Ilgalaikis kontaktas gali pažeisti kepenis, inkstus, centrinę nervų sistemą. Pastebima, kad palengvėjimas jaučiamas palikus patalpas ir išėjus į lauką, kas leidžia manyti, kad tai yra blogos vidaus patalpų oro kokybės padarinys [2]. Šiuo metu dar ne daug žinoma apie galimus sutrikimus, kuriuos gali sukelti LOJ koncentracijos namų patalpose. Įtariama, kad dalis junginių gali būti ir kancerogeninio poveikio žmogui [3].

Lokieji organiniai junginiai (LOJ) yra svarbūs vidaus patalpų oro teršalai, jie gali išsiskirti iš kietų ir skystų medžiagų. LOJ priskiriama daug įvairių junginių, o plačiausiai paplitę patalpose yra formaldehidai, benzenas, etilbenzenas, toluentas, heksanas, ksilenas. Didžioji jų dalis kambario temperatūroje garuoja iš dažų, medžio dirbinių, valymo agentų, oro gaiviklių, kosmetikos, apdailos priemonių, grindų ir sienų dangalų. Dėl šių priemonių vartojimo, gero patalpų sandarumo ir nepakankamo vėdinimo, vidaus patalpų LOJ koncentracijos gali būti iki 2 – 5 kartų didesnės nei lauke. Jeigu patalpose yra rūkoma arba patalpos sujungtos su garažu skirtumas gali padidėti iki kelių šimtų kartų, o atliekant patalpų renovaciją, pvz.: sienos dažų nuėmimas, LOJ koncentracija gali padidėti net iki 1000 kartų [4]. LOJ problemą sudetinga išspręsti kadangi yra įvairių vidaus mikroklimato tipų: namai, biurai, restoranai, barai, parduotuvės, kino teatrai, bibliotekos, transporto stotys, kuriuose vyraujančių junginių sudėtis ir koncentracijos ženkliai skiriasi priklausomai nuo atliekamų veiklų.

## 1 lentelė. LOJ emisijos iš buityje aptinkamų objektų

Šaltinis	Teršalas	Šaltinis	Teršalas
Kilimai	4-fenilcikloheksanas, vinil acetatas, stirenas, acetaldehidai	Printeriai/Skaneriai	Stirenas, etil benzenas, ksilenas, benzenas, 2-etil-1heksanolis.
Klijai, hermetikai	Formaldehidai, butil eteris, vinil cikloheksanas, propilen glikolis	Dažai	Toluenas, propilen glikolis, etilen glikolis, butil priopionatas, metil propanolis.
Linoleumas	Acetato rūštis, heksanalis, heksano rūgštis, penteno rūgštis, dekanas	Tekstilė	Formaldehidai, akrilonitrilas, acetaldehidai, dekanas, tetradekanas.
Medžio gaminiai	Formaldehidai, 2-pentilfuranai, benzaldehidai, heksanalis, pentanalis	Sienų uždangos	Naftalenai, stirenai, fenolis, etil heksano rūgštis
Ofiso baldai	Formaldehidai, acetaldehidai, butilacetatas, heksanalis, cikloheksanonai	Langinės	Naftalenai, etil heksanolis, dekanolis, etil heksano rūgštis.
Valymo priemonės	Limonenas, izopentanas, izopropanolis, butoksietanolis, 1,4 dichlorbenzenas	Guminės grindų dan	Stirenai, benzotiazolis, vinil acetatas, cikloheksanas.

## 1.2. Lakiųjų organinių junginių šalinimo technologijos

### 1.2.1. Adsorbicija

Adsorbicijos procesuose teršalo molekulės yra pritraukiamos ir kaupiamos adsorbento paviršiuje. Fizinė adsorbicija priklauso nuo adsorbuojamo teršalo charakteristikų, dujų srauto temperatūros ir teršalo koncentracijos jame. Adsorbentais dažniausiai naudojami: aktyvinta anglis (AA), ceolitai, silikagelis, aktyvuotas aliuminis, mineralinis molis ir kai kurie polimerai. Aktyvinta anglis yra plačiausiai naudojamas adsorbentas dėl labai didelio paviršiaus ploto ir adsorbicijos gebos. Ši medžiaga gali būti gaminama iš anglies, medžio, kokoso kevalų arba aktyvuota aukštos temperatūros oksidaciniuose procesuose. Pusė kilogramo aktyvintos anglies turi apie 0.5 km<sup>2</sup> paviršiaus plotą. Prie mažų LOJ koncentracijų (30 ppbv – 0.1 ppmv) aktyvuotos anglies efektyvumas gali svyruoti nuo 70 iki 90 %. Šios technologijos trūkumai: esant dideliame dregmės kiekiui ore, ant adsorbento kondensuojasi vanduo, kuris gali užkimšti paviršiaus poras ir sumažinti adsorbicijos gebą. Skirtingų teršalų adsorbicijos gali ženkliai skirtis, reikalinga pastovi sorbento regeneracija, kad išvengtų junginių išsinešimo į atgal oro srautą. Regeneracijos procesai reikalauja aukštų temperatūrų (iki 300 C), kad pasiekti 70 – 95 % junginių išėigą. Adsorbicijos metodai nėra destruktivūs, todėl surinkti teršalai turi būti papildomai valomi arba sandėliuojami [5].

### 1.2.2. Fotokatalitinė oksidacija

Naudojant puslaidininkį ir šviesos šaltinį, fotokatalizė skatina ore esančių teršalų skilimą ir mineralizaciją. Puslaidininkis atlieka katalizatoriaus vaidmenį, o UV spinduliuotė energijos šaltinio (sužadintojo) vaidmenį. Apšvitinus katalizatorių UV spinduliuote, jos skleidžiamų fotonų energija yra sugerama ir sužadinami valentiniai elektronai, kurie medžiagoje palieka skylės (teigiamus krūvius). Šios skylės yra elektronų akceptorai, kurie reaguodami su ore esančiais OH- radikalais sukuria stiprius oksidantus – OH. radikalus. Fotokatalizė vyksta kambario temperatūroje ir yra puiki alternatyva katalitinei terminei oksidacijai, kuri reikalauja pastovios 200 – 1200 C temperatūros. Lyginant su kitomis technologijomis ji labai pigi, kadangi reikalauja mažai priežiūros ir mažų energijos sąnaudų. Šiuo metu labiausiai naudojamas TiO<sub>2</sub> katalizatorius, kuris yra pigus, netoksiškas ir nekenksmingas gyviems organizmams. Kiti populiarūs katalizatoriai: ZnO, ZnS, CdS, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub>. Fotokatalizės skaidymo efektyvumas ir antrinių produktų susidarymas priklauso nuo teršalo kilmės, jo pradinės koncentracijos, drėgmės kiekio, recirkuliuojančio oro kiekio, užsibuvimo trukmės, UV spinduliuotės intensyvumo ir bangos ilgio, katalizatoriui dengti naudoto proceso, dangos fizinės formos, storio [5]. Vildoza et al., esant trumpam išbuvimo laikui ir vidutiam santykiniam drėgnumui, aprašo tolueno (10 – 500 ppbv) skaidymo efektyvumą 30 – 90%. Skaidant 2–propanolio ir tolueno mišinį (80 – 400 ppbv) esant sausam orui pasiekiamas 100 % efektyvumas, esant 60 % santykiniam drėgnumui – 50% [6]. Šios technologijos trūkumai: trumpas katalizatorių veikimo laikas, šalutinių kenksmingų produktų susikūrimas, pvz.: antrinis organinis aerosolis [7].

### 1.2.3. Biofiltracija

Biofiltrai yra pigi ir ekologiška alternatyva fizikiniams–cheminiams valymo metodams. Šis būdas pritaikomas dideliai lakiųjų organinių junginių ir neorganinių junginių įvairovei, o susidarantys antriniai produktai dažniausiai yra nežalingi. Yra įvairovė šių reaktorių dizainų: bioskruberiai, biofiltrai, membraniniai bioreaktoriai, įkrauto lovio bioreaktoriai. Šios technologijos praktinis pritaikymas vidaus patalpų oro valymui siejamas su daug iššūkių: prastas teršalų perėjimas iš dujų fazės į biomedžiagą, prastai tirpios ir biologiškai neskaidomos medžiagos, galimas dulkių ir mikroorganizmų išsipūtimas iš filtro, didelis mikroorganizmų jautrumas aplinkos sąlygų pokyčiams. Naudojant biofiltrą skaidant formaldehidą, benzeną, tolueną ir ksileną atitinkamai pasiekiamas: 100, 65 – 70, 93 ir 85 – 90 % efektyvumas [8]. Įkrautinio lovio bioreaktoriuje skaidant butanolį, butilacetatą, tolueną, formaldehidą, esant 32 – 140 mikrog/m<sup>3</sup> pasiekiamas >90 % efektyvumas, bet užfiksuojamos mažos nepageidaujamų šalutinių produktų (acetaldehido, propanolio, acetono, propionto rūgšties, etanolio, metanolio, 2-propanolio) koncentracijos [9].

#### 1.2.4. Augalinė oro valymo sistema

Augalinė oro valymo sistema dažniausiai naudojama kaip papildomas biofiltravimo sistemos etapas, kurį sudaro augalas ir įkrovos medžiaga/substratas. Šie augalai panaudoja lapus ir/arba įkrovą tam, kad adsorbuotų arba absorbuotų teršalus iš oro, kuriuos dalinai apskaido ir perleidžia per savo šaknų sistemą į žemę. Toliau, teršalai tampa maisto šaltiniu prie augalo šaknų gyvenančioms bakterijų bendruomenėms. LOJ skaidymo efektyvumas tokiose sistemose priklauso nuo šaknų užimamo tūrio [10] ir paros meto [11]. Priklausomai nuo skaidomo teršalo ar jų mišinio, augalų atsakas gali skirtis, pvz.: benzenas ir toluenas gali slopinti fotosintezę ir lapo žiotelių pralaidumą CO<sub>2</sub> ir vandens garams [12].

#### 1.2.5. Membraninė separacija

Membraninei separacijai reikalinga pusiau pralaidi membrana, kuri leidžia LOJ difunduoti iš užteršto dujų srauto į švaresnį. Neseniai sukurtos ceolitinės membranos, kurios geba separuoti įvairius alkoholių, angliavandenilių ir nesikondensuojančių dujų mišinio komponentus, turinčius panašią virimo temperatūrą, molekulinę masę. Šios membranos prie 2 – 230 ppmv koncentracijos sėkmingai atskiria formaldehidus, n-heksaną, benzeną. Pagrindiniai šios technologijos trūkumai: didėjantys slėgio nuostoliai veikimo metu, brangus ir komplikotas membranų valymas [13].

#### 1.2.6. Neterminės plazmos metodai

Neterminė plazma yra gaminama sukuriant stiprų elektrinį lauką tam, kad vyktų neutralių dujų jonizacija. Tokiose sąlygose sukuriama aplinka, kurioje esama neutronų, jonų, laisvųjų radikalų, elektronų ir UV fotonų. Dėl lengvos masės elektronai yra selektyviai įgreitinami elektrinio lauko ir įgauna aukštą temperatūrą, o sunkesni jonai ir neutronai lieka santykinai žemos temperatūros.

Gaminant neterminę plazmą didžioji energijos dalis yra sunaudojama aktyvių elektronų gavimui, o ne jonų ir neutronų šildymui. Plazmoje esanti energija geriausiai sunaudojama disociacijos ir jonizacijos reakcijoms tarp elektronų ir fone esančių dujų, kurių metu pasigaminę laisvieji radikalai skaido ore esančius teršalus. Taigi neterminė plazma geba skaidyti ore esančius teršalus kambario temperatūroje nereikalaujama papildomos energijos fone esančių dujų pašildymui.

Dujų molekulės, pvz: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, yra apšaudomos elektronais, kurių temperatūra dažniausiai svyruoja nuo 10000 K iki 250000 K, tai sužadina (N<sub>2</sub><sup>\*</sup>, O<sub>2</sub><sup>\*</sup>), molekules, kurios vėliau įgytą energiją išspinduliuoja fotonų arba šilumos pavidalu. Greta sužadavimo reakcijų išlydžio zonoje taip pat vyksta jonizacija, disociacija, elektronų prilipimas. Šių reakcijų metu taip pat susidaro labai nestabilios dalelės (jonai, laisvieji radikalai). Tokiomis sąlygomis vykstantys procesai yra labai neselektyvus,



todėl susidarantys laisvieji OH<sup>\*</sup> ir O<sup>\*</sup> radikalai yra labai aktyvūs ir puikiai tinka aplinkos teršalų skaidymui iki CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ar kitų galutinių produktų, esant žemai aplinkos temperatūrai [14]. Neterminės plazmos metodo panaudojimas lakiųjų organinių junginių skaidymui yra labai aktuali mokslinių tyrimų tema. Per pastaruosius 2 dešimtmečius šioje srityje padaryta daug atradimų, tačiau didžioji jų dalis kol kas pritaikomi tik pilotiniuose modeliuose [15].

### 1.3. Neterminės plazmos reaktoriai

Neterminės plazmos sukūrimui esant atmosferiniam slėgiui yra naudojamos dvi pagrindinės technologijos: elektrinis išlydis ir elektronų spindulio iradiacija. Abu šie metodai pasauliniu mastu yra intensyviai tobulinami. Pagrindiniai šių technologijų tobulimo tikslai: pasiekti kuo geresnį energijos išnaudojimo efektyvumą ir geriau suprasti procesus, dalyvaujančius teršalų pašalinime [16].

Šiame darbe dėmesys bus kreipiamas į elektrinio išlydžio technologijas. Jų veikimo principas yra pagrįstas aukštos įtampos srovės leidimu per elektrodinę sistemą, taip jonizuojant šalia esančias dujas [17]. Yra įvairių konstrukcijų neterminės plazmos reaktorių, o jų klasifikacija yra pakankamai sudėtinga ir priklauso nuo daugelio charakteristikų:

- Išlydžio tipo: vainikinis išlydis, paviršinis išlydis, dielektrinio barjero išlydis, feroelektrinės įkrovos išlydis.
- Elektros šaltinio tipo: nuolatinės srovės (pastovi arba pulsuojanči), kintamos srovės, mikrobangų.
- Kitų charakteristikų: elektrodų konfiguracija, įtampos potencialas, poliariškumas, dujų sudėtis [14].

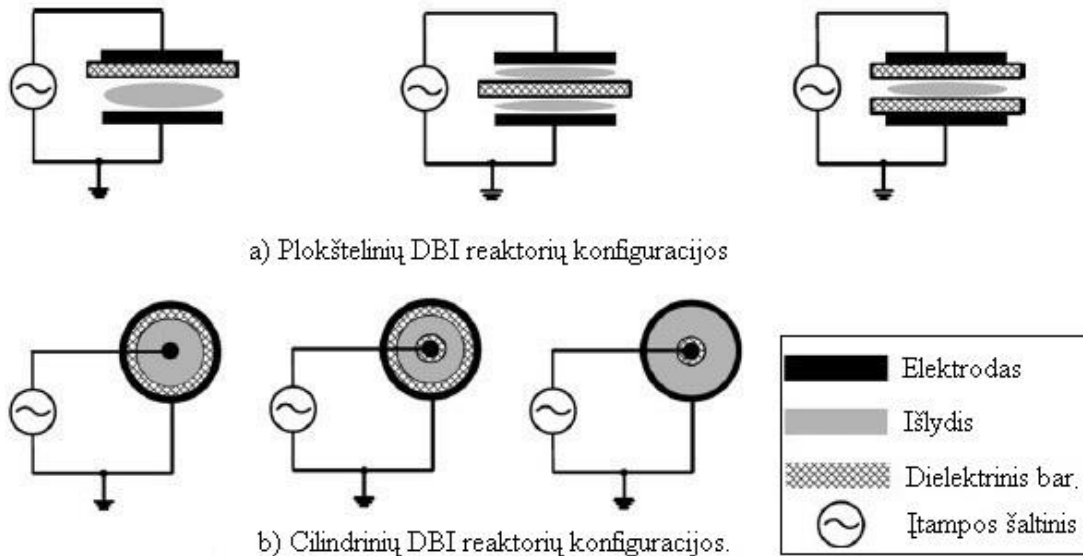
Dėl didelės galimų kombinacijų įvairovės šiame darbe bus aprašomi tik plačiausiai šiuo metu laboratoriniams eksperimentams naudojami reaktorių tipai ir galimos jų alteracijos, tai: dielektrinio barjero išlydis, nuolatinės srovės vainikinis išlydis, nuolatinės pulsuojančios srovės vainikinis išlydis, feroelektrinės įkrovos išlydis [15].

#### 1.3.1. Dielektrinio barjero išlydžio reaktorius

Dielektrinio barjero išlydžio (DBI) reaktorius dažniausiai sudaro du elektrodai, tarp kurių yra bent vienas dielektrikas. Kaip dielektrikas naudojamas stiklas, kvarcas, aliuminio oksidas, silikatinės medžiagos. Šis išlydis dar vadinamas tyliuoju išlydžiu. Dažniausiai naudojami šie elektrodų ir dielektriko išdėstymai:

- Plokštelinis išdėstymas (žr. 1.1 pav.): elektrodai ir dielektrikas yra plokščios plokštelės. Galimi išdėstymai: vienas elektrodas uždengtas dielektriku, abu elektrodai uždengti dielektriku, dielektrikas yra tarp dviejų elektrodų.
- Cilindrinis išdėstymas (žr. 1.1 pav.): vienas elektrodas yra tuščiaaviduris cilindras, o kitas strypo formos. Galimi išdėstymai analogiški kaip ir plokšteliniam: dielektriku dengtas vienas arba abu elektrodai.

Elektrodais dažniausiai teka 50 Hz – 2 kHz dažnio ir 10 – 20 kV įtampos kintamoji srovė, tarpas tarp elektrodų gali svyruoti nuo kelių mm iki šimtųjų  $\mu\text{m}$ . Vykstant išlydžiui, oro tarpe tarp elektrodų nuolat kuriasi milijonai smulkių mikro išlydžių, jų diametras siekia iki 0.1 mm, o trunka apie 3 ns. Dėl atsirandančių aktyvių elektronų susidūrimo su oro molekulėmis vyksta dujų jonizacija, kuriasi įvairūs radikalai, vyksta ozono susidarymas, LOJ skaidymas. Šiandien dielektrinio barjero metodas pakankamai plačiai naudojamas kaip ozono generatorius. Pagrindiniai šios technologijos trūkumai: elektrodams reikalinga papildoma aušinimo sistema, dėl mažo tarpo tarp elektrodų ši sistema labai jautri dulkėms ir vibracijai [17].



1.1. pav. DBI reaktoriaus elektrodų ir dielektriko išdėstymai [14]

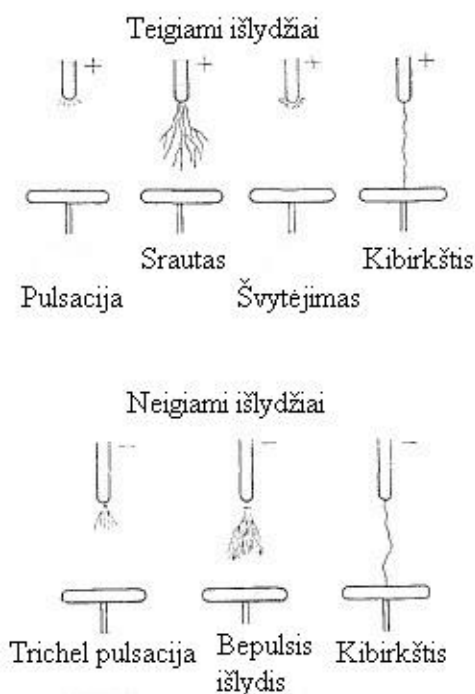
### 1.3.2. Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio reaktoriai

Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio (VI) reaktoriai naudoja asimetriškų elektrodų porą. Išlydį sukelia labai stiprus prie įelektrinto smaigalio (laido, adatos, elektrodo) esantis nevienalytis elektrinis

laukas, kuris juda katodo link. Išlydis vadinamas teigiamu, kai elektrodas su smailesniu išlinkimu, yra prijungtas prie teigiamo elektros šaltinio gnybto, neigiamu, kai smailesnis elektrodas prijungtas prie neigiamo šaltinio gnybto. VI reaktorių dažniausiai sudaro šių formų elektrodų sistemos:

- Adata – plokštuma (žr. 1.3 pav.).
- Strypas – cilindras (žr. 1.3 pav.).

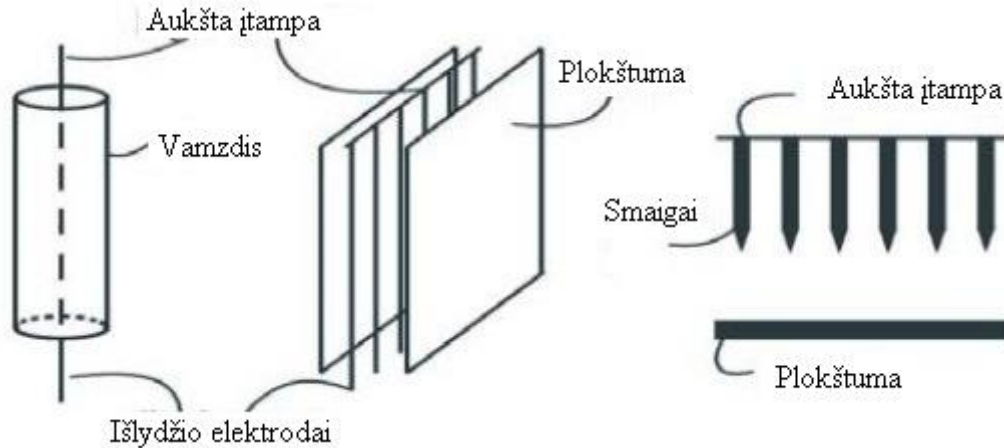
Vainikinis išlydis yra inicijuojamas laisvųjų elektronų įgreitinimu ir tolimesniais jų susidūrimo procesais. Dėl susidarančių elektronų/jonų porų ir jų atsiskyrimo procesų, sukuriama elektronų srautas, kuris palaiko vainikinį išlydį [14]. Vizualiai tai atrodo kaip silpnas švytėjimas aplink elektrodo smaigalį. Priklausomai nuo išlydžio tipo (teigiamo, neigiamo) šio srauto susikūrimo mechanizmas skiriasi. Esant teigiamam išlydžiui, jo plitimas priklauso nuo antrinių foto–jonizacinių reakcijų aplink smaigalį. Šis išlydis prasideda staigiais impulsais mažame tūryje aplink elektrodo smaigalį. Didinant įtampą išlydis pereina į srautinį, švytintį ir galiausiai į nestabilių kibirkštinių režimą. Esant neigiamam išlydžiui, jo plitimas priklauso nuo dujų molekulių susidūrimo, jis prasideda „Trichel“ impulsais, toliau seka bepulsis ir kibirkštinis režimai [18].



**1.2. pav.** Teigiamo ir neigiamo vainikinio išlydžio stadijos [18]

VI tipo reaktoriai gali būti naudojami ozono generavimui, vandens kokybės gerinimui, LOJ šalinimui iš oro, oro jonizavimui, medžiagų paviršiaus apdorojimui, KD nusodinimui iš oro srauto.

Vainikinio išlydžio reaktorių privalumai yra šie: didelis efektyvumas, palyginti mažos eksploataavimo išlaidos lyginant su kitomis technologijomis. Trūkumai: galimas izoliacinių medžiagų gadinimas, ozono generavimas, elektromagnetiniai trikdžiai, statinio krūvio išlydžiai [14].



1.3. pav. VI reaktoriaus elektrodų išdėstymas [19]

### 1.3.3. Nuolatinės pulsuojančios srovės vainikinio išlydžio reaktorius

Pulsuojantis vainikinio išlydžio reaktorius savo konstrukcija yra identiškas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio reaktoriui, tačiau yra naudojamas pulsuojančios srovės šaltinis. Šiame reaktoriuje įtampa gali pakilti ir nusileisti iki nulio per dešimtis nano sekundžių. Tai leidžia pasiekti aukštos įtampos išlydį ir neleisti dėl staigaus srovės sumažėjimo susidaryti kibirkščiai, kuri gali pakenkti reaktoriaus konstrukcijai bei sumažinti proceso efektyvumą. Išlydžiui reikalinga įtampa priklauso nuo atstumo tarp elektrodų, reikalingos pulso trukmės ir dujų sudėties. Pulso trukmė dažniausiai būna 100 – 200 ns, kad nesusidarytų kibirkštis. Šiame reaktoriuje dažniausiai naudojamas „adatos – plokštuma“ išdėstymas, kurio dėka energija geriau pasiskirsto dujų sraute [14].

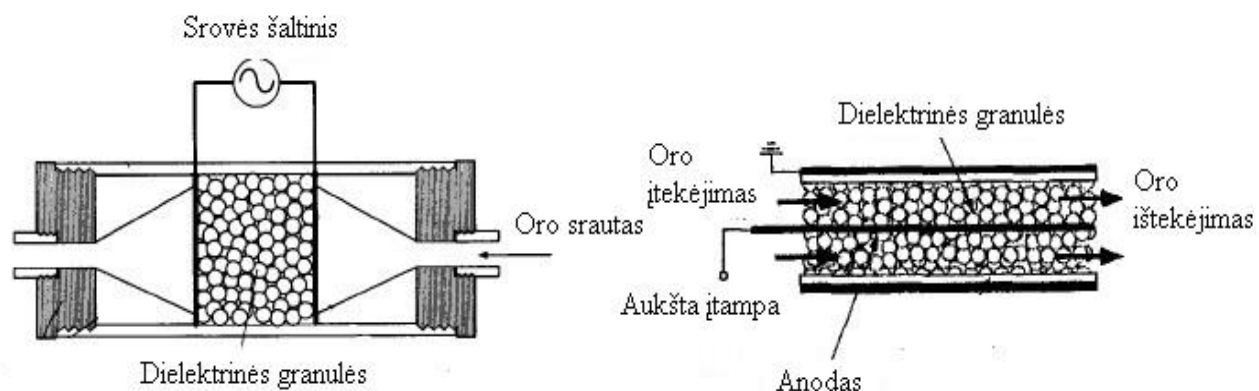
### 1.3.4. Feroelektrinės įkrovos reaktorius

Feroelektrinės įkrovos reaktorius yra įkrautas feroelektriko granulėmis, dažniausiai  $\text{BaTiO}_3$  dėl didelės savo dielektrinės konstantos. Kitos dažnai naudojamos įkrovos:  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{MgTiO}_4$ ,  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$ . Laboratorijose dažniausiai naudojami šie elektrodų ir įkrovos išdėstymai:

- Plokštelinis išdėstymas (žr. 1.4 pav.): įkrova užpildo tarpą tarp dviejų lygiagrečių elektrodo plokštelių.

- Cilindrinis išdėstymas (žr. 1.4 pav.): įkrova užpildo tarpą, kuris yra tarp tuščiavidurio cilindrinio elektrodo ir jame esančio strypinio elektrodo.

Veikiant įkrovą išoriniu elektriniu lauku vyksta jos poliarizacija, todėl elektrodų ir įkrovos granulių tarpusavio sąlyčio taškuose atsiranda stiprūs elektriniai laukai. Šios sąlygos leidžia dalinių išlydžių atsiradimą tarp besiliečiančių įkrovos granulių. Įkrovos naudojimas turi keletą pranašumų: išlyginamas per ją tekantis oro srautas, pasiekiamas didesnis energijos efektyvumas, kadangi iškrovoje vykstantis išlydis yra tolygesnis. Esant labiau išlygintam oro srautui, tankesnei ir daugiau tūrio užimančiai išlydžio zonai, geriau vyksta elektronų ir dujų molekulių sąveika, tačiau dėl tokios konstrukcijos reaktoriuje yra patiriami didesni slėgio nuostoliai [14].



1.4. pav. Įkrautinio reaktoriaus išdėstymai [16]

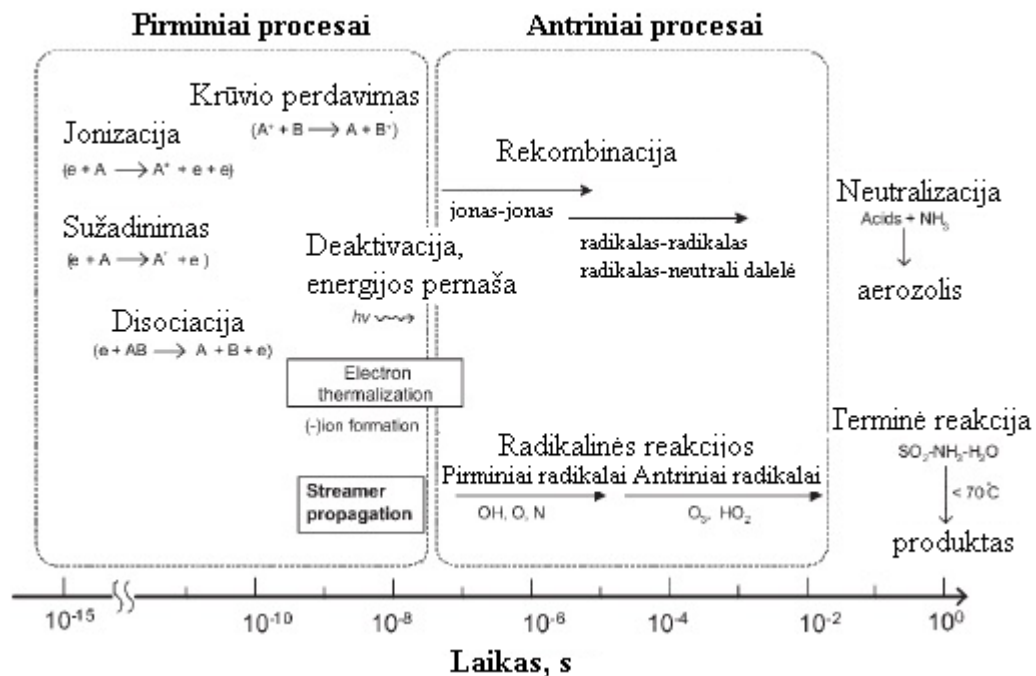
## 1.4. Reakcijų mechanizmai: pirminiai ir antriniai procesai

Vainikinis (corona) išlydis yra elektrinis dujų išlydis, kur, kaip dielektrikas, dažniausiai būna dujos. Cheminiai virsmai, kurie vyksta elektrinio išlydžio metu, yra įnešamos į dujų srautą energijos padarinys. Ši energija perduodama elektronų susidūrimo su dujų molekulėm metu, veikiant stipriam elektriniam laukui. Aktyviųjų elektronų susidūrimas su neutraliomis dujų molekulėmis sukelia jų jonizaciją, molekulių skilimus, elektroninius, vibracinius, rotacinius sužadinimus. Pagal vyksmų trukmę neterminėje plazmoje vykstančius procesus galima suskirstyti į pirminius ir antrinius procesus. Neterminėje plazmoje vykstantys procesai ir jų apytikslės trukmės pavaizduotos (žr. 1.5 pav).

Pirminiai procesai, kurie trunka ne ilgiau nei  $10^{-8}$  s, apima jonizaciją, sužadinimą, disociaciją, šviesos emisiją ir krūvio perdavimą. Pirminio proceso efektyvumas priklauso nuo naudojamo

energijos šaltinio ir jo parametru: elektros stovės krypties, srovės stiprio, įtampos, dažnio. Antriniai procesai – tai toliau vykstantys cheminiai virsmai su pirminio proceso metu susidariusiais produktais: elektronais, radikalais, jonais, sužadintomis molekulėmis. Antrinių procesų metu galimas papildomų radikalų ir aktyvių molekulių susidarymas ( $O_3$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ ). Kadangi šių cheminių virsmų laikas yra labai trumpas ( $10^{-3}$  s), dujų srauto išbuvimo laikas NP reaktoriuje turi labai mažai arba išvis neturi įtakos teršalų skaidymo efektyvumui.

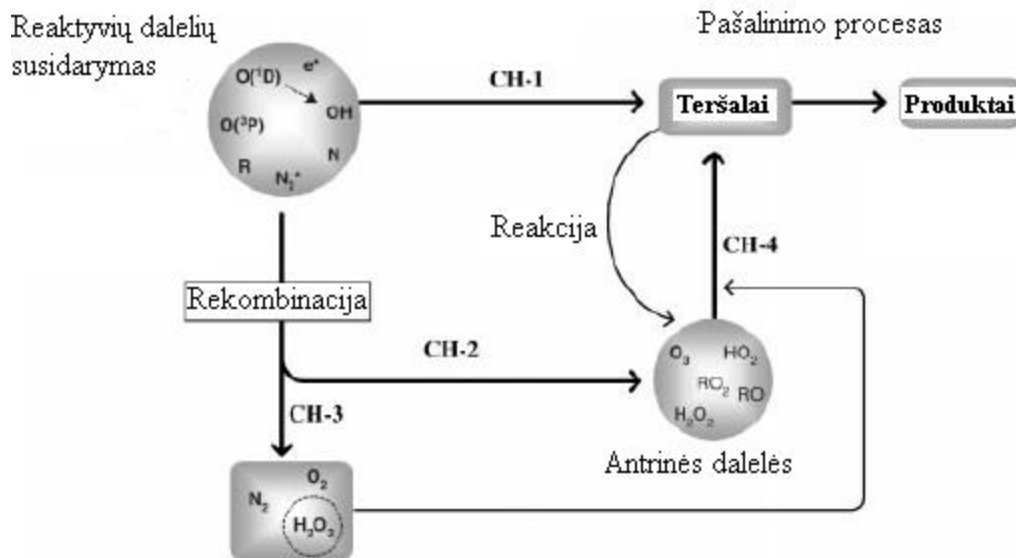
Teršalų skaidyme dalyvaujančių dalelių rūšis/grupė labai priklauso nuo skaidomo teršalo, tad geresnis supratimas apie skaidomus teršalus, jų atsparumą vienoms ar kitoms dalelėms, galimas chemines reakcijas yra būtinas norint technologiją pritaikyti realiems bandymams. Yra žinoma, kad chlorinti angliavandeniliai yra labai atsparūs OH radikalams, tačiau lengvai skaidomi elektronų disociacija, o olefinai ir nesotieji angliavandeniliai – gerai reaguoja su radikalais ir  $O_3$ , todėl yra lengvai skaidomi NP procesuose [15].



1.5. pav. Išlydžio metu vykstantys procesai ir reakcijos [15]

## 1.5. Radikalinių reakcijų reakingumas ir selektyvumas

Dalyvaujant radikalams cheminės reakcijos vyksta labai greitai dėl didelio radikalų reakingumo. Kad būtų pasiektas geras proceso efektyvumas reikalingas ne tik greitis, bet ir selektyvumas, kuris šiuo atveju yra atvirkščiai siejamas su reakingumu. Galimi radikalų virsmai pavaizduoti (žr. 1.6 pav.). Labiausiai pageidautinos reakcijos yra CH-1, kadangi radikalai tiesiogiai sąveikauja su teršalo molekulėmis. Tačiau lygiagrečiai gali vykti CH-2 reakcijos, kurių metu iš radikalų susidaro antriniai produktai/radikalai, taip pat gali vykti CH-3 reakcijos, kurių metu radikalai rekombinuoja atgal į dujų molekules, kurios toliau skaidyme nebedalyvauja. CH-2 reakcijų metu gali susidaryti nepageidaujami antriniai produktai. Esant labiau praskiestam teršalui šios šalutinės reakcijos (CH-2) ima vis labiau dominuoti, o tai gali nulemti prastą selektyvumą teršalams ir mažesnę galutinę teršalo skaidymo efektyvumą [15].



1.6. pav. Galimi radikalinių reakcijų būdai [15]

## 1.6. Veiksniai lemiantys teršalų skaidymo procesą

### 1.6.1. Temperatūra

Dažniausiai NP procesai pašalina LOJ daug efektyviau esant aukštesnei temperatūrai. Tai siejama su didesniu reakcijos greičiu tarp  $O$ ,  $OH^-$  radikalų ir LOJ dėl endoterminės šių reakcijų

prigimties. Didesnis efektyvumas taip pat gali būti paaiškinamas redukuoto elektrinio lauko ( $E/n$ ) padidėjimu kylant temperatūrai. Redukuotas elektrinis laukas yra elektrinio lauko ( $E$ ) ir dujų tankio ( $n$ ) santykis, tai svarbus dydis, nusakantis elektronų energiją plazmoje. Kylant dujų temperatūrai ir esant pastoviam slėgiui, dalelių judėjimas chaotiškėja, dujos plečiasi, o jų tankis mažėja [13].

### 1.6.2. Drėgmės kiekis

Drėgmės kiekis yra labai svarbus rodiklis kalbant apie praktinį NP pritaikymą pramonėje, kadangi pramoninių procesų emisijose dažnai būna vandens garų, kurių koncentracija yra nuolat svyruojanti. Drėgmės poveikis proceso efektyvumui priklauso nuo garų koncentracijos, skaidomo LOJ ir naudojamo išlydžio tipo. Vanduo labai svarbus junginys plazminiuose procesuose dėl jo skylimo produktų:



Oksidacinės  $\text{OH}^-$  savybės yra daug stipresnės nei daugelio kitų oksidantų, pvz: deguonies atomų, peroksido radikalų. Vandens garų įnešimas į sistemą gali sukelti elektrinių ir fizinių išlydžio rodiklių pakitimus. DBI reaktoriuje drėgmės pokytis gali sumažinti mikroišlydžių stiprį tarp granulių, o tai sąlygos mažesnę susidarančios aktyvios plazmos zonos tūrį. Vainikinio išlydžio metu, didėjant drėgmės kiekiui, stebimas srovės stiprio mažėjimas prie duotos įtampos ir mažesnis  $\text{OH}^-$  radikalų susidarymas dėl vykstančių rekombinacijos reakcijų.

Drėgmės įtaka yra ištirta daliai lakiųjų organinių junginių. Pasirodo, kad ne visada poveikis būna neigiamas/stabdantis, nes yra tokių LOJ, kurių skaidymui papildomas drėgmės kiekis visiškai nedaro įtakos arba net pagerina. Kai kuriais bandymais yra nustatyta, kad egzistuoja optimalus drėgmės kiekis, kuriam esant pasiekiamas geriausias išvalymo efektyvumas, pvz: 20% santykinės drėgmės toluenui ir tetra-chlor-etilenui [13].

Nustatyta, kad papildoma drėgmė gali slopinti ozono susidarymą dėl  $\text{O}(^1\text{D})$  sunaudojimo, kuris yra ozono susidarymo šaltinis. Taip pat nustatyta, kad vandens garai mažina CO susidarymą ir pagerina selektyvumą ties  $\text{CO}_2$ .





Reaktoriuose, kuriuose yra katalizatorius, drėgmė gali padengti jo paviršių, sumažinti sąveiką su LOJ/O<sub>3</sub> ir taip slopinti katalizatoriaus gebėjimą adsorbuoti šiuos junginius. Todėl renkantis katalizatorių reikia atsižvelgti į jo atsparumą reakcijoms su H<sub>2</sub>O.

### **1.6.3. Deguonies kiekis**

Panašiai kaip ir su drėgmės kiekiu, deguonies koncentracija turi įtakos išlydžiui ir vykstančioms cheminėms reakcijoms. Nedidelis deguonies koncentracijos padidėjimas salygoja geresnį deguonies radikalų atsiradimą ir geresnį teršalų šalinimo efektyvumą. Tačiau dėl savo prigimtinių elektroneigiamų savybių, didesni deguonies kiekiai gali prisijungti elektronus. Tai mažina elektronų tankį ir jų pasiskirstymą bei atliekamas roles skaidyme. Deguonies radikalai taip pat gali reaguoti su sužadintom azoto molekulėm ir atomais, kurie įprastom sąlygom dalyvauja LOJ destrukcijoje. Kaip ir atvejui su drėgme egzistuoja optimalios deguonies salygos LOJ skaidymui, kurios svyruoja tarp 1% ir 5% [13].

### **1.6.4. Oro debitas**

Oro debito mažinimas siejamas su ilgesniu išbuvimo laiku reaktoriuose, iš kurio seka ilgesnė sąveika tarp teršalo ir elektronų, radikalų. Sistemoje, kurioje yra katalizatorius, mažinant debitą taip pat ilgėja teršalų sąveika, o dėl to gerėja išvalymo efektyvumas. Tačiau verta paminėti, kadangi reaktoriuje vykstančių reakcijų trukmė labai maža, skirtumas tarp neženkliai keičiamų debitų įtakos gali neturėti [13].

### **1.6.5. Pradinė LOJ koncentracija**

Pramonėje išsiskirančiose išlakose esančių LOJ koncentracijos nėra pastovios ir gali svyruoti įvairiam intervale, todėl plačiai vykdomi tyrimai su skirtingom LOJ koncentracijomis. Kai pradinė koncentracija padidėja, kiekvienai LOJ molekulei atitenka mažesnis kiekis elektronų ir radikalų, todėl dalis tyrimų nurodo, kad energijos tankis, reikalingas suskaidyti 63 % LOJ, yra tiesinė funkcija, priklausanti nuo pradinės LOJ koncentracijos.

Daliai halogenintų angliavandenilių (HFC-134a, CFC-12, HCFC-22, TCE) pradinė koncentracija išvalymo efektyvumui beveik neturi įtakos. Tai gali būti paaiškinama pirmuose teršalo etapuose susidaranciais produktais, radikalais ir jonais, kurie vėliau dalyvauja to paties teršalo skaidymo tolimesnėse stadijose [13].

## 1.7. Antrinis organinis aerolis, kilmė, pavojus žmogui

Idealiu atveju norėtusi, kad NP proceso metu LOJ būtų verčiami į CO<sub>2</sub> ir H<sub>2</sub>O kaip galutinius produktus, tačiau realybėje susidaro ir nepageidaujami šalutiniai produktai: NO<sub>x</sub>, ozonas ir antrinis organinis aerolis [1, 20, 21, 22, 23].

Aerolio žala žmogaus sveikatai priklauso nuo dalelių formos ir dydžio, fizinių ir cheminių savybių, koncentracijos ore, poveikio laiko. Kvėpuojant šiomis dalelėmis galima susirgti astma, chronišku bronchitu, sulaukti ankstyvos mirties [23]. Kenksmingiausia yra alveolinė dalelių frakcija, kurių įkvėpus, šios patenka į plaučių alveoles ir pasilieka jose. Dalelės didesnės kaip 10 μm, susilaiko viršutiniuose kvėpavimo takuose, o mažesnės kaip 0.25 μm iš dalies iškvėpiamos. Aštrių kraštų dulkės žaloja plaučių audinį [29].

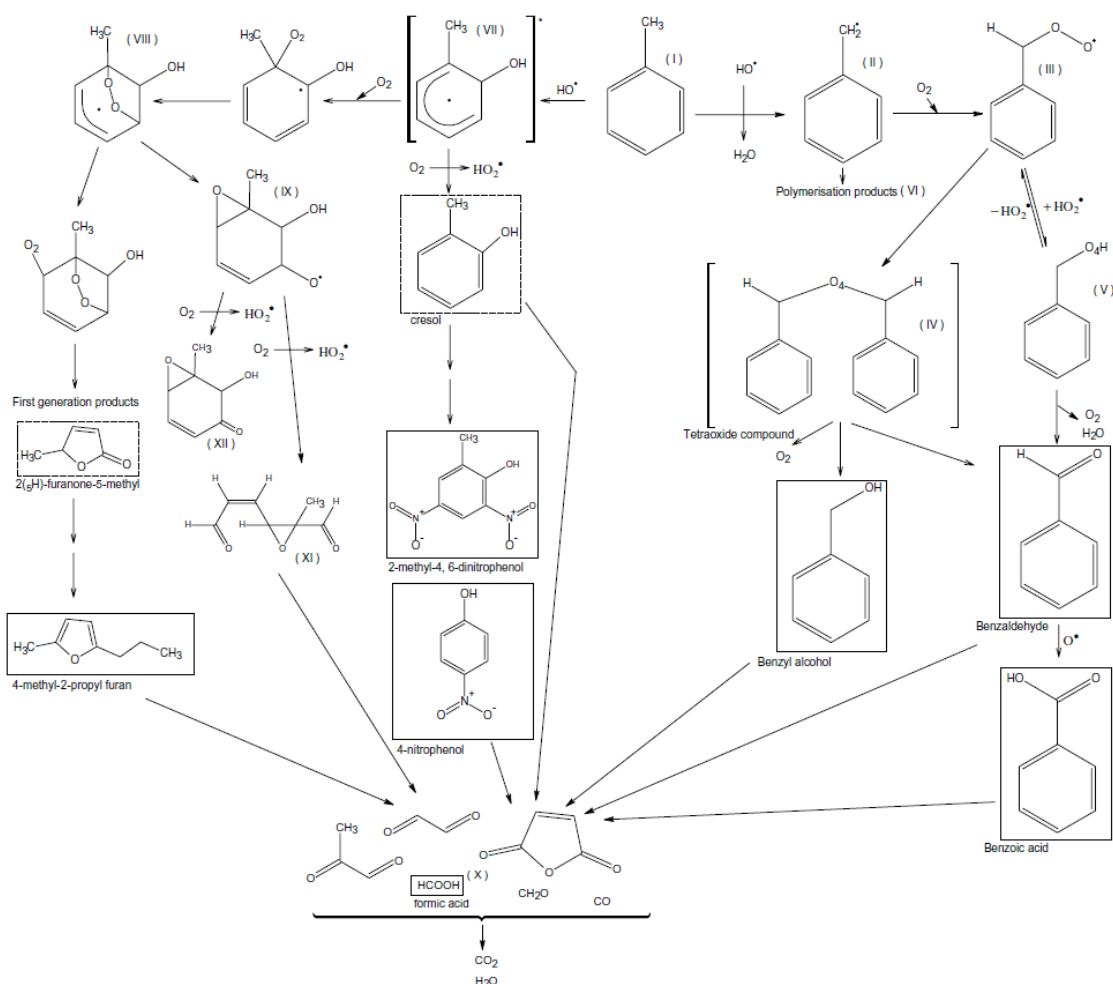
Pirminis aerolis – tai medžiaga, kuri pirminėje savo formoje yra išleidžiama kietųjų dalelių pavidalu. Antrinis organinis aerolis – tai dalelės, kurios susiformuoja vykstant oksidacijos reakcijoms tarp LOJ ir OH<sup>-</sup>, O<sub>3</sub> ir/ar NO<sub>3</sub> radikalų [24]. Yra skirtumas tarp procesų, kontroliuojančių šių dalelių skaičių, ir procesų, kontroliuojančių jų masę, pvz.: garų (amoniako, sieros, azoto rūgšties, antrinių organinių junginių) kondensacija ant jau esančių dalelių gali pakeisti jų masę, bet nebūtinai įtakoti jų skaitinės koncentracijos. Tiek koncentracija, tiek masė yra svarbūs rodikliai norint geriau suprasti šių dalelių įvairius poveikio sveikatai aspektus.

## 1.8. Aerolio sudėtis ir susidarymą lemiantys veiksniai

Antrinio organinio aerolio (AOA) susidarymui įtakos turi NO<sub>x</sub> kiekis oro sraute, nes šie junginiai įtakoja O<sub>3</sub>, OH<sup>-</sup> kiekius ore, kurie lemia AOA susidarymą [25].

Vienas iš aerolio susidarymo būdų yra vykstanti plazmos polimerizacija LOJ šalinimo metu. NT procesų metu, judriesiems elektronams susiduriant su LOJ molekulėmis prasideda grandininė dujinės fazės polimerizacijos reakcija, susidarant didelės molekulinės masės dehidrogenazės produktams. Aerolis susidaro šių dalelių nukleazės (sulipimo) reakcijų metu. Vieni autoriai aprašo, kad aerolio susidarymo procesai panašūs į suodžių susidarymą degimo kameroje arba į aerolio susidarymą atmosferinio išlydžio sąlygom [26]. Aerolio, kuris susidarė iš stireno naudojant pulsuojančią vainikinio išlydžio reaktorių, sudėties analizės metu paaiškėjo, kad jis sudarytas iš C ir O atomų, O/C santykis – 0.15. Aerolyje esanti anglis sudarė šiuos ryšius: C-C/C-H (61.44 %), C-O-

C/C-OH (21.86 %), C=O, O=C-H/aromatinis žiedas-OH (14.92%), COOH/COO-R (1.78 %) Aerosolis buvo dalinai tirpus NaOH ir visiškai tirpus metanolyje (CH<sub>3</sub>OH) ir acetone (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) [1].

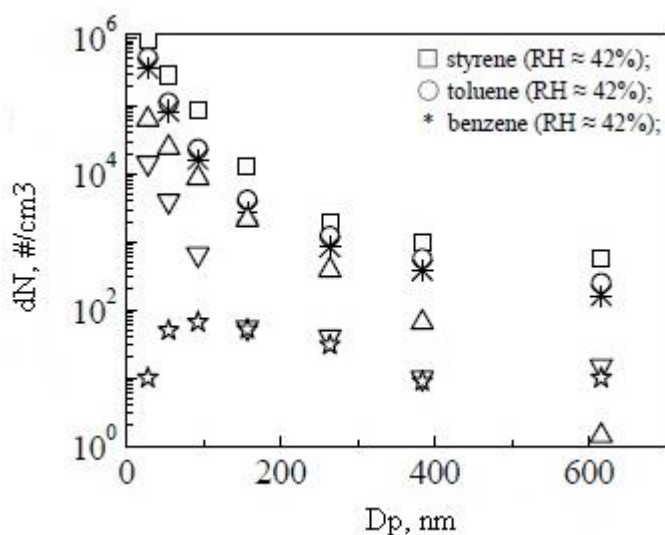


**1.7. pav.** Galimi tolueno skylimo produktai neterminės plazmos teigiamo vainikinio išlydžio reaktoriuje [27]

Be polimerizacijos, oksidacijos procesai taip pat gali turėti įtakos aerozolio susidarymui. Oksidacijos produktai susidarę kambario temperatūroje ir atmosferiniame slėgyje yra nelakūs junginiai: acetofenonas, benzoine rūgštis – iš stireno, benzoinė rūgštis ir 4-metil-2-nitrofenolis – iš tolueno, 2-nitro-fenolis, 3-nitro-fenolis ir 4-nitrocatecho – iš benzeno [26]. Literatūroje aprašomų eksperimentų sąlygos (naudojamos galios, reaktorių tipai, teršalo koncentracijos, oro debitai) yra labai skirtingos, todėl teisingai palyginti dalelių susidarymą viename ir kitame įrenginyje yra sudėtinga. Aprašoma, kad NT metu susidarantių dalelių skaitinės koncentracijos dažniausiai svyruoja  $10^5 - 10^7$

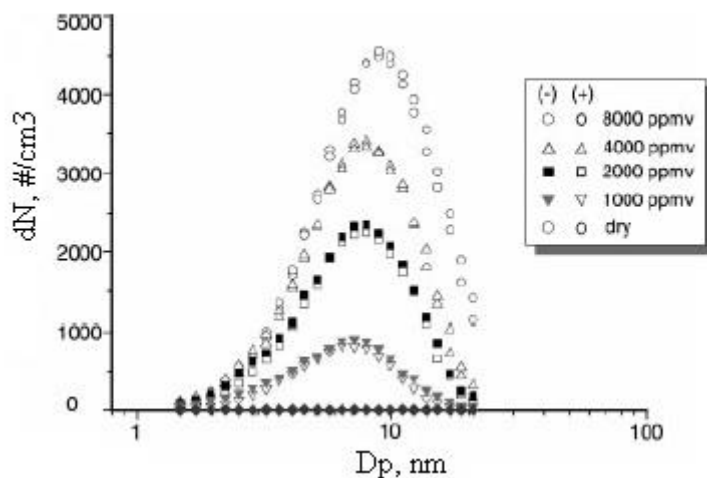
$\#/cm^3$  [15, 26], o susidaranti dalelių diametrai – vainikinio išlydžio reaktoriuje 28 – 157 nm [12], 10 – 80 nm, 100 – 1000 nm feroelektriniame įkrautiniame reaktoriuje  $<100$  nm [15]. Visgi pastebėta, kad didžiausi dalelių kiekiai susidaro vainikinio išlydžio reaktoriuose.

1.8 paveiksle vaizduojamas aerozolio skaitinės koncentracijos ir diametro pasiskirstymas skaidant stireną, tolueną ir benzeną vainikinio išlydžio reaktoriuje esant vienodom sąlygom. Pastebėta, kad didėjant dalelių diametru susidaranti jų skaitinės koncentracijos mažėja. Skaidant 3 skirtingus teršalus esant tom pačiom sąlygom, susidaranti aerozolio kiekiai skiriasi prie atitinkamų dalelės diametrų ir mažėja šia seka: stirenas → toluenas → benzenas. Spėjama, kad šį rezultatą nulėmė skirtingas anglies kiekis panauduotuose LOJ [15].



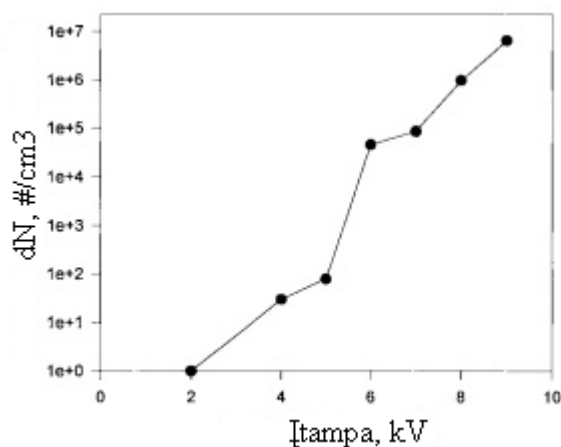
**1.8. pav.** Aerozolio pasiskirstymas VI reaktoriuje, skaidant skirtingus teršalus [15]

Aprašoma, kad aerozolio susidarymui gali turėti įtakos ore esantis drėgmės kiekis, kadangi atlikus jo cheminę analizę pastebėti  $H_2O_2$  kiekiai, kurie yra  $OH^\cdot$  radikalų rekombinacijos produktas. (žr. 1.9 pav.) vaizduoja aerozolio susidarymą švariame ore esant skirtingai oro drėgmei, prie didesnės oro drėgmės susidaranti dalelių kiekis didėja. Tačiau didžiausios dalelių koncentracijos siekia tik  $\sim 5 \times 10^3 \#/cm^3$ , todėl galima daryti prielaidą, kad skaidant teršalus drėgmė, susidaranti iš vandens garų, bendram dalelių skaičiui didelės įtakos neturės [15].



**1.9. pav.** Drėgmės įtaka aerozolio susidarymui [15]

Naudojant įkrautinį reaktorių, susidarančio aerozolio koncentracija didėja keliant reaktoriaus galią ir pradinę LOJ koncentraciją [28].



**1.10. pav.** Įtampos įtaka aerozolio susidarymui [28]

Technologijų tobulinimas, kuris užtikrintų NP skaidymo metu susidarančio aerozolio mažinimą, reikalauja geresnio vykstančių procesų supratimo, aerozolio koncentracijų ir dydžio pasiskirstymo informacijos šiuose reaktoriuose. Aerozolių susidarymo mechanizmai vis dar mažai ištyrinėti, todėl detalesni tyrimai, nusakantys jų formavimąsi, augimą ir įtaką kitiems cheminamiams virsmams taip pat yra būtini.

## 1.9. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Lakieji organiniai jungiai yra plačiai naudojami kaip komponentai daugelio produktų (dažų, plastikų, medžio dirbinių, valymo agentų, oro gaiviklių, kosmetikos, apdailos priemonių, grindų ir sienų dangalų, benzino ir t.t) gamyboje. Dažniausiai pasitaikantys priedai būna: formaldehidai, benzenas, etilbenzenas, toluentas, heksanas ir ksilenas. Didžioji dalis šių produktų po gamybos atsiduria vidaus patalpose, kur kambario temperatūroje iš jų pradeda garuoti minėti komponentai. Poveikis žmogaus sveikatai, priklausomai nuo junginio, jo kiekio ir sąlyčio laiko, gali būti labai įvairus: nuo svaigulio, galvos skausmo, akių, nosies, gerklės dirglumo, sauso kosulio, niežtinčios odos, nuovargio, jautrumo kvapams iki širdies aritmijos, CNS pažeidimų ir vėžinių susirgimų (leukemija).

LOJ kiekiui ore mažinti pritaikoma daug technologinių sprendimų: adsorbicija, fotokatalizė, biofiltrai, augalinė filtracija, membraninė separacija, neterminės plazmos metodai. Praktiniame pritaikyme egzistuoja didelė minėtų technologijų variacija. Dėl nuolat griežtėjančių oro kokybės reikalavimų ir visuomenės spaudimo naudoti aplinkai draugiškesnes technologijas, nuolat ieškoma naujų inovatyvių sprendimų bei būdų kaip patobulinti jau esamus.

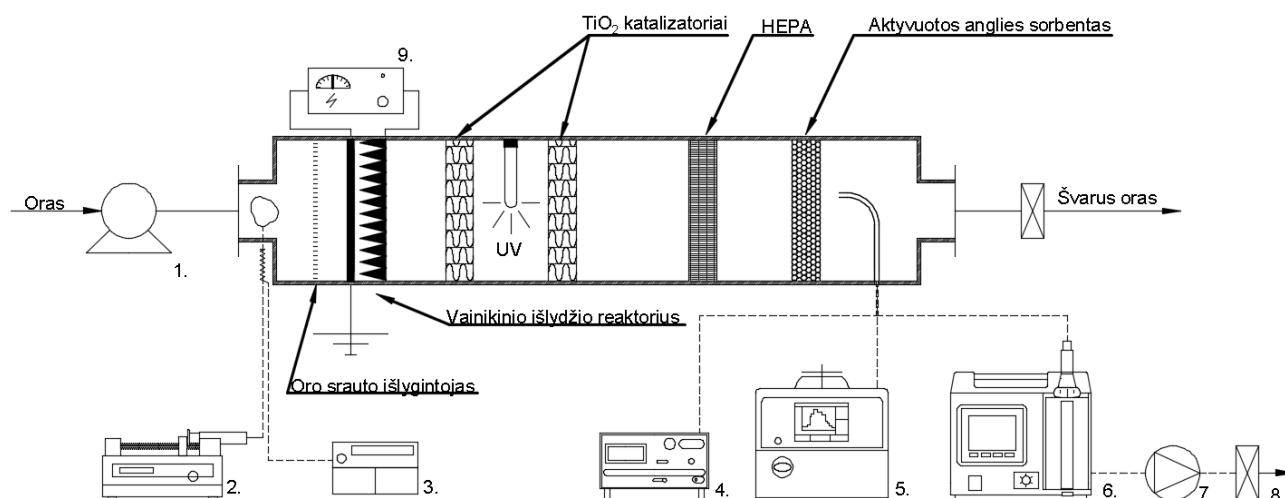
Viena iš labiausiai šiuo metu plėtojamų oro valymo technologijų yra neterminės plazmos metodai. Šia technologija pasiekiamas labai aukštas LOJ išvalymo efektyvumas, tačiau procesų metu susidaro nepageidaujami antriniai produktai: ozonas, azoto oksidai ir antrinis organinis aerosolis. Šiame darbe pagrindinis dėmesys bus kreipiamas į aerosolio susidarymo problemą. Aerosolio žala žmogaus sveikatai priklauso nuo dalelių formos ir dydžio, fizinių ir cheminių savybių, koncentracijos ore, poveikio laiko. Kenksmingiausia yra alveolinė dalelių frakcija, kurių įkvėpus, šios patenka į plaučių alveoles ir ten pasilieka.

Dėl aukšto efektyvumo, paprastos konstrukcijos ir lengvos priežiūros, nuspręsta pasirinkti nuolatinės srovės vainikinio išlydžio reaktorių. Kartu prie reaktoriaus nuspręsta sukomplektuoti papildomą fotokatalinę/sorbicinę LOJ skaidymo sistemą ir įvertinti jos įtaką susidarančiam antriniam aerosoliui. Toluenas buvo pasirinktas kaip skaidomas teršalas dėl plataus jo panaudojimo įvairiose namų apdailos ir apyvokos priemonėse.

## 2. METODINĖ DALIS

### 2.1. Pilotinė kompleksinė vainikinio išlydžio oro valymo sistema

Aplinkosaugos inžinerijos katedroje sukonstruotą kompleksinę oro teršalų skaidymo sistemą (žr. 2.1 pav.) sudarė pagrindinis stačiakampio formos metalinis karkasas/reaktorius. Jame buvo įtaisytas oro srauto išlyginimo tinklas, vainikinį išlydį generuojantis reaktorius su pastovios aukštos 22 kV įtampos ir kintamo (0 – 5 mA) stiprio energijos šaltiniu, TiO<sub>2</sub> katalizatorių plokštelės, UV spinduliuotę generuojanti lempa, aktyvios anglies sorbentas ir HEPA H11 filtras. Pastoviam oro tiekimui į reaktorių buvo naudojamas oro siurblys (1), keičiant jo apsukų dažnį ir matuojant srautą anemometru reaktoriaus gale buvo nustatytas atitinkamas oro debitas. Lakieji organiniai junginiai į reaktorių buvo tiekiami švirkštinės pompos (2) pagalba. Švirkštas buvo užpildomas LOJ ir pastoviu debitu stumiamas žarnelėm į reaktoriaus pradžią. Beveik pasiekus reaktoriaus galą, žarnelė, kuria tekėjo toluenas, buvo apvyniota nichromo viela ir kaitinama, kad toluenas pradėtų intensyviau garuoti. Įkaitintas ir garuojantis toluenas toliau pateko į vatą, kuri įtaisyta angos skerspjuvyje centre. Siurblio tiekiamas oras keliaudamas per vatą išnešdavo LOJ ir nešdavo per reaktorių. Oras su teršalais pirma praeidavo oro išlyginimo plokštę, tam kad būtų tolygiau paskirstyti reaktoriaus skerspjuvyje. Veikiant vainikinio išlydžio reaktoriui tarp elektrodų sukuriamas stiprus elektrinis laukas ir įvyksta išlydis. Šioje zonoje vyksta ne tik ozono, aktyviųjų radikalų susidarymas, tolueno skaidymas bet ir nepageidaujamas aerozolio susidarymas.



2.1. pav. Pilotinė kompleksinė vainikinio išlydžio sistema

## 2.2. Aerozolio susidarymą lemiančių veiksnių nustatymo eksperimentas

Tyrimo esmė buvo nustatyti aerozolio susidarymą lemiančius veiksnius. Eksperimento planas (žr. 1 priedas) susidedantis iš 30 bandymų buvo sudarytas naudojant „Modde 7“ programą. Tyrimas buvo vykdomas reaktoriuje palikus tik srautą išlyginančią plokštelę ir vainikinio išlydžio reaktorių, o kaip LOJ naudojant tolueną. Eksperimento kintamieji parametrai pasirinkti: reaktoriaus galia (20, 55, 90 W), pradinė tolueno koncentracija (4, 7, 10 mg/m<sup>3</sup>), tiekiamo oro debitas (50, 100, 150 m<sup>3</sup>/h). Susidarančio aerozolio kiekio (dN, #/m<sup>3</sup>) ir masės (dM) matavimai buvo atliekami orą siurbiant iš reaktoriaus galo elektriniu žemo slėgio daugiapakopiu dalelių impaktoriumi (6) ir nanodalelių skaitikliu (5). Vieno bandymo matavimai buvo renkami 6 minutes nuo to momento kai oro kokybės matuoklio (4) (IQM 60, Aeroqual, JAV) nemetaninių junginių koncentracijos parodymai tapo pastovūs.

## 2.3. Skirtingų skaidymo procesų įtakos nustatymo eksperimentas

Šio tyrimo esmė buvo nustatyti skirtingų skaidymo procesų įtaką susidarančio aerozolio kiekiui. „Modde 7“ programa sudarytas eksperimento planas (žr. 2 priedas) iš 50 bandymų. Tyrimo metu pastovūs sistemos parametrai buvo: oro debitas (150 m<sup>3</sup>/h) ir pradinė tolueno koncentracija (10 mg/m<sup>3</sup>). Palaikant pastovų oro debitą ir pradinę LOJ koncentraciją buvo keičiamas labiausiai aerozolio susidarymo procesą sąlygojantis parametras – reaktoriaus galia (40, 50, 60, 70, 80 W). Tiriama skirtingų kompleksinės skaidymo sistemos kombinacijų įtaka dalelių susidarymui: (O<sub>3</sub>; O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>; O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>+UV; O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>+TiO<sub>2</sub>; O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>+UV+TiO<sub>2</sub>; O<sub>3</sub>+UV; O<sub>3</sub>+AA; O<sub>3</sub>+AA+UV; O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>+TiO<sub>2</sub>+AA; O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>+UV+TiO<sub>2</sub>+AA; O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>+UV+TiO<sub>2</sub>+AA+Filtras HEPA H11). Aerozolio matavimai buvo atliekami ELPI ir SMPS įrenginiais orą nusiurbiant iš reaktoriaus galo.

## 2.4. Analitiniai instrumentai

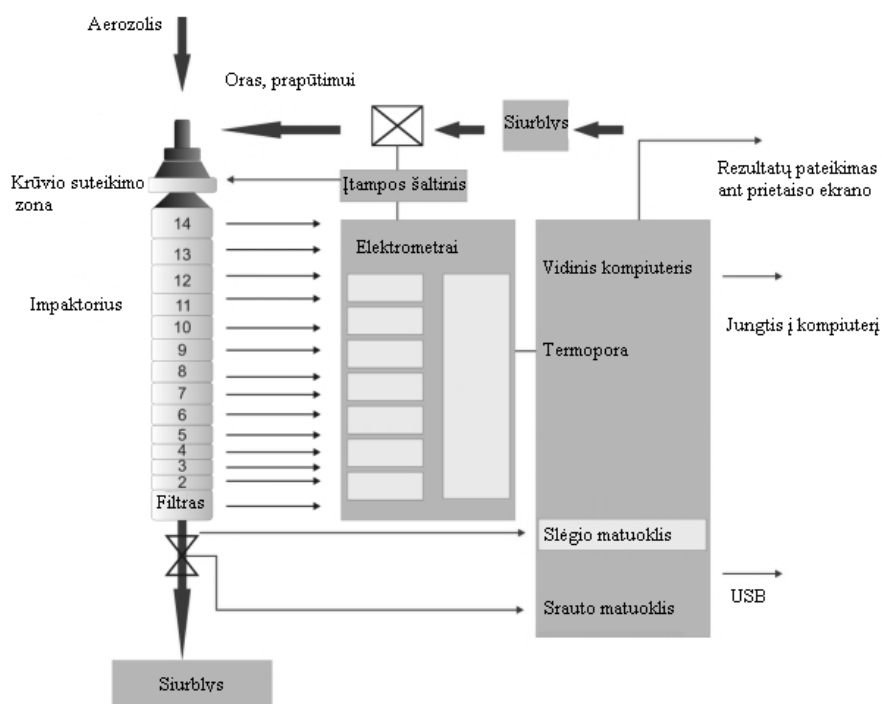
### 2.4.1. Elektrinis žemo slėgio daugiapakopis dalelių impaktorius

Elektrinis žemo slėgio impaktorius (ELPI+ Electrical Low Pressure Impactor, Decati Ltd., Suomija) – tai prietaisas, gyvu laiku matuojantis ore esančių dalelių koncentraciją ir frakcinį pasiskirstymą. Visų pirma dalelės yra įkraunamos vainikinio išlydžio zonoje ir keliauja į žemo slėgio daugiapakopį impaktorių, kur yra suklasifikuojamos pagal aerodinaminį diametą. Kiekviena



impakatoriaus pakopa yra elektriškai izoliuota ir prijungta prie jautrių elektrometrų. Dalelės nusėdančios atitinkamoje impakatoriaus pakopoje atsimušdamos perduoda elektrinį krūvį ir sukuria srovę, kuri yra išmatuojama. Ši srovė yra proporciška skaitinei dalelių koncentracijai ir dydžiui atitinkamoje pakopoje.

ELPI matuoja daleles 14-oje kanalų ir apima dydžius nuo 0.006 iki 10  $\mu\text{m}$ . 13 impakatoriaus kanalų renka daleles nuo 0.017 iki 10  $\mu\text{m}$  ir surenka jas taip, kad būtų galima vėliau chemiškai išanalizuoti, o paskutinis filtro kanalas renka mažiausias 0.006 – 0.017  $\mu\text{m}$  daleles [30].



**2.2. pav.** Elektrinis žemo slėgio daugiapakopis dalelių impaktorius [30]

#### 2.4.2. Nano dalelių skaitiklis

Nano dalelių skaitiklis (Nanoscan SPMS, modelis 3910, TSI, JAV) yra analitinis instrumentas skirtas įvairios kilmės sub–mikroninio dydžio dalelėms ore matuoti. Pagrindinės šio prietaiso dalys yra: ciklonas, diferencinio mobilumo analizatorius ir dalelių kondensacinis skaitiklis.

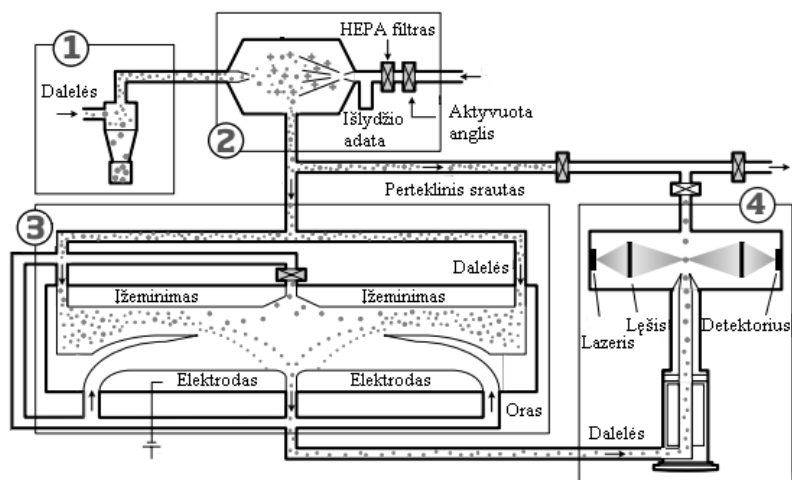
Į prietaisą patenkančios dalelės pirma praeina cikloną, kuriame atskiriamos per dideles dalelės, kad išvengtų prietaiso užsikimšimo. Toliau, nuo dalelių, kurios nebuvo nusodintos ciklone yra nuimamas krūvis (padaromos neutralios, bekrūvės) ir nukreipiamos į išlydžio zoną, kur kiekvienai dalelei yra suteikiamas krūvis (elektronas). Įkrautos dalelės tada patenka į diferencinio mobilumo analizatorių. Šis prietaisas daleles skirsto į 13 kanalų pagal jų skersmenį (11.5; 15.4; 20.5; 27.4; 36.5;

48.7; 64.9; 86.6; 115.5; 154; 205.4; 273.8; 365.2 nm). Analizatorių sudaro du elektrodai, tarp kurių laipsniškai keičiasi įtampa. Priklausomai nuo įkrautos dalelės dydžio ir elektrodo kuriamo elektrinio lauko stiprumo, tik tam tikro dydžio dalelės praeina pro plyši tarp elektrodų ir keliauja į dalelių kondensacinę – optinę skaičiavimo sistemą. Dalelės, kurios yra per lengvos, sugaudomos cirkuliuojančio nešančio oro ir nukreipiamos į filtrą. Dalelės, kurios yra per didelės, yra pritraukiamos prie elektrodo, prilimpa arba atsimuša ir pagautos oro srauto yra nukreipiamos į filtrą.

Dalelių kondensacinis–optinis skaičiuotuvas yra prietaisas skirtas aptikti daleles, kurios dėl savo mažo dydžio yra sunkiai aptinkamos standartiniais optiniais metodais. Pagrindinis šios prietaiso veikimo principas yra alkoholio garų kondensavimas ant dalelių, kad palengvinti jų skaičiavimo procesą. Šioje prietaiso dalyje vyksta 3 procesai:

- Iso-propil alkoholio garinimas į dalelių srautą.
- Alkoholio garų kondensacija ant dalelių (dalelių augimas).
- Optinis dalelių aptikimas ir skaičiavimas.

Optinę prietaiso dalį sudaro lazeris, lešiai, absorberis, fotodaugiklis, analoginis signalo transformatorius ir mikroprocesorius. Lazero skleidžiama šviesa lešiais sufokusuojama į matuojamą srauto tūrį. Kai dalelė praeina per lazerį, šviesa yra išsklaidoma, dalis šviesos yra surenkama fotodaugiklyje ir paverčiama elektriniu signalu, kurį skaičiuoja mikroprocesorius. Esant didelėms dalelių koncentracijoms pasitaiko momentų, kai pro lazerį tuo pačiu metu praeina keletas dalelių. Kadangi nėra būdų kaip jas išskirti, ši grupė dalelių užfiksuojama kaip viena, o tai sukelia paklaidas rezultatuose [31, 32].



**2.3. pav.** Nano dalelių skaitiklio schema: 1 – ciklonas, 2 – krūvio suteikimo zona, 3 – diferencialinis mobilumo analizatorius, 4 – kondensacinis–optinis skaitiklis [18]

### 2.4.3. Aeroqual oro kokybės matuoklis

Aeroqual oro kokybės matuoklis (QM–60, Aeroqual Limited, Naujoji Zelandija) naudoja GSS technologiją kartu su integruotu foto–joniziciniu detektoriumi ir ne dispersiniu IR sensoriu tam, kad tiksliai išmatuotų anglies dioksido (CO<sub>2</sub>), anglies monoksido (CO), lakiųjų organinių junginių (LOJ), azoto dioksido (NO<sub>2</sub>) ir ozono (O<sub>3</sub>) koncentracijas. Matuojami duomenys yra talpinami SD kortelėje arba siunčiami tiesiai į kompiuterį tiesioginiam stebėjimui.

## 2.5. Konceptinio elektrinio dalelių matuoklio skaičiavimo formulės

Atsižvelgiant į tai, kad matavimuose yra naudojama brangi ir didelių gabaritų technika, buvo nuspręsta suprojektuoti konceptinį dalelių matuoklį. Šiuo prietaisu būtų galima stebėti reaktoriuje susidarančių dalelių koncentraciją realiu laiku ir pagal tai reguliuoti reaktoriaus parametrus. Konceptinio elektrinio dalelių skaitiklio veikimo principas bus pagrįstas ore esančių dalelių įkrovimu vainikinio išlydžio metodu, dalelių filtravimu ir filtravimo metu perduoto elektros stiprio perskaičiavimu į dalelių skaitinę koncentraciją. Svabiausias dydis, į kurį reikia atsižvelgti konstruojant elektrinį dalelių skaitiklį, yra pramušimo įtampa  $U$ . Tai minimalus įtampos kiekis, prie kurio pradeda vykti dujų jonizacija ir yra apskaičiuojamas pagal Peek'o teoremą [33, 40]:

$$U = m_0 * E_0 * \delta * \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r}}\right) * r \quad (2.1)$$

Čia  $m_0$  – laido šiurkštumo faktorius;

$E_0$  – kritinis vainikinio išlydžio gradientas ore, V/m;

$\delta$  – oro tankio faktorius;

$r$  – elektrodo galiuko spindulys, m.

Įkrautoms dalelėms atsitrenkus į tinkelį, iš jų yra perduodama srovė, kuri fiksuojama elektrometru. Srovės parodymams perskaičiuoti į skaitinę dalelių koncentraciją yra naudojama įkrovimo efektyvumo funkcija ( $P_n$ ). Ši funkcija perskaičiuodama dydžius atsižvelgia į dalelės įgaunamą krūvio kiekį priklausomai nuo dalelės diametro ir galimus dalelių nuostolius prietaiso įkrovimo ir jonų gaudymo zonose [34].

Dalelių skaitinė koncentracija išreikšta per įkrovimo efektyvumą[35]:

$$N = \frac{I}{P_n * e * Q} \quad (2.2)$$

Čia  $I$  – srovės stipris, A;  
 $P_n$  – įkrovimo efektyvumas;  
 $e$  – elektrono krūvis, C;  
 $Q$  – oro debitas, m<sup>3</sup>/h;

Elektrinio lauko stiprumas:

$$E = \frac{U}{d} \quad (2.3)$$

Čia  $U$  – įtampa tarp elektrodų, V;  
 $d$  – atstumas tarp elektrodų, m.

Elektrinis jonų mobilumas:

$$Z_i = \frac{c_i}{E} \quad (2.4)$$

Čia  $c_i$  – vidutinis jonų greitis, m/s;

Dalelių išbuvimo trukmė įkrovimo zonoje:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (2.5)$$

Čia  $V$  – įkrovimo zonos tūris, m<sup>3</sup>.

Dalelės įgaunamo krūvio skaičius vykstant difuziniam įkrovimui:

$$n_d(D_p, t) = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * D_p * k * T}{e^2} \ln \left[ 1 + \frac{e^2 * c_i * D_p * N_i * t}{8 * \varepsilon_0 * k * T} \right] \quad (2.6)$$

Čia  $\varepsilon_0$  – vakumo dielektrinė skvarba, C<sup>2</sup>/N\*m<sup>2</sup>;

$D_p$  – dalelės diametras, m;

$k$  – Bolcmano konstanta J/K;

$T$  – dujų temperatūra, K;

$N_i$  – jonų tankis įkrovimo zonoje, #/cm<sup>3</sup>;

$t$  – išbuvimo trukmė įkrovimo zonoje, s.

Dalelės įgaunamo krūvio skaičius vykstant lauko įkrovimui:

$$n_c(D_p, \varepsilon_p, t) = \left( \frac{3 * \varepsilon_p}{\varepsilon_p + 2} \right) * \pi * \varepsilon_0 * E * D_p^2 * \left( \frac{Z_i * N_i * t}{4 * \varepsilon_0 + e * Z_i * N_i * t} \right) \quad (2.7)$$

Čia  $\varepsilon_p$  – dalelės skvarba;

$Z_i$  – elektrinis jonų mobilumas, m<sup>2</sup>/V;

Bendras dalelei suteikiamas krūvis vykstant vainikiam išlydžiui:

$$n_T(D_p, \varepsilon_p, t) = n_d(D_p, t) + n_c(D_p, \varepsilon_p, t) \quad (2.8)$$

Dalelių nuostoliai atsirandantys įkrovimo zonoje:

$$P_{charging}(D_p, \varepsilon_p, t) = e^{-2 * n_t * (D_p, \varepsilon_0, t) * B(D_p) * e * E * \frac{t}{r}} \quad (2.9)$$

Dalelės dinaminis mobilumo koeficientas:

$$B(D_p) = \frac{C_c(D_p)}{3 * \pi * \mu * D_p} \quad (2.10)$$

Čia  $\mu$  – dinaminė dujų klampa, Pa\*s.

Kaningemo koeficientas:

$$C_c(D_p) = 1 + \left( \frac{2 * \lambda}{D_p} \right) * \left[ 1.1142 + 0.558 * \exp \left( -0.999 * \frac{D_p}{2 * \lambda} \right) \right] \quad (2.11)$$

Čia  $\lambda$  – krūvio laisvasis kelias, nm.

Dalelių nuostoliai atsirandantys jonų gaudymo zonoje:

$$P_{trap}(D_p, \varepsilon_p, t) = 1 - \frac{2 * \pi * n_T(D_p, \varepsilon_p, t) * B(D_p) * e * U * L}{Q * \ln \left( \frac{r_{outer}}{r_{inner}} \right)} \quad (2.12)$$

Čia  $L$  – jonų gaudymo zonos ilgis, cm;

$r_{outer}$  – išorinio elektrodo spindulys, cm;

$r_{inner}$  – vidinio elektrodo spindulys, cm.

Bendri dalelių nuostoliai vainikinio išlydžio įkrovimo prietaise:

$$P_T(D_p, \varepsilon_p, t) = P_{charging}(D_p, \varepsilon_p, t) * P_{trap}(D_p, \varepsilon_p, t) \quad (2.13)$$

Įkrovimo efektyvumas išreikštas per dalelei suteikiamą kruvį ir patiriamus dalelių nuostolius prietaise:

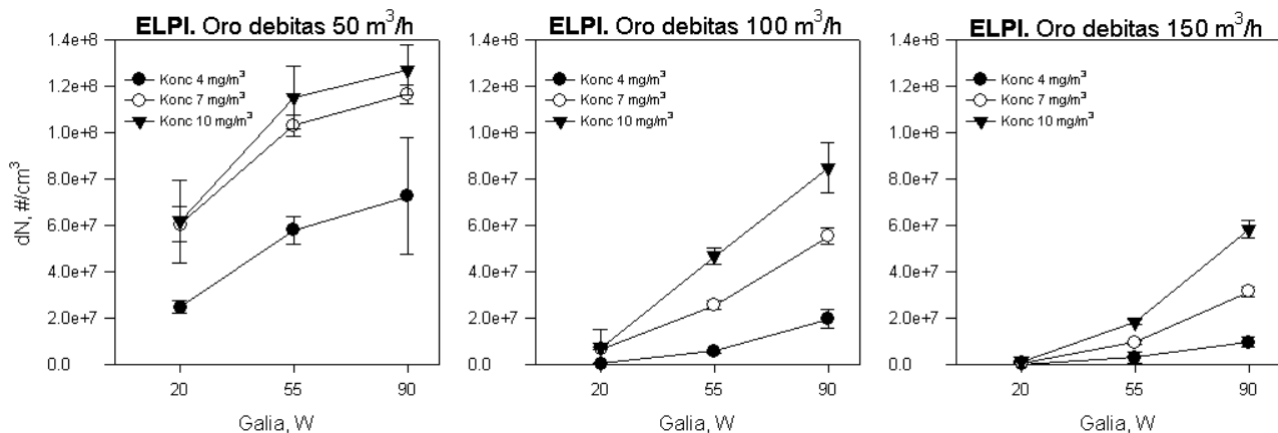
$$P_n(D_p, \varepsilon_p, t) = P_T(D_p, \varepsilon_p, t) * n_T(D_p, \varepsilon_p, t) \quad (2.14)$$

### 3. TYRIMŲ REZULTATAI

#### 3.1. Aerosolio susidarymą lemiančių veiksnių nustatymas

Atlikus suplanuotą eksperimentą, iš kiekviename etape išmatuotų aerosolio koncentracijos reikšmių buvo apskaičiuoti vidurkiai ir standartinės paklaidos. Išbrėžta ELPI prietaisu išmatuotų (žr. 3.1 pav) dalelių koncentracijos priklausomybė nuo reaktoriaus galios (20, 55, 90 W), esant skirtingoms tolueno koncentracijoms (4, 7, 10 mg/m<sup>3</sup>) ir leidžiamam oro debitui (50, 100, 150 m<sup>3</sup>/h). Iš grafikų matosi, kad didinant tolueno koncentraciją ir reaktoriaus galią, susidarančių dalelių kiekis taip pat auga. Didžiausios koncentracijos visad pasiekiamos prie aukščiausios galios ir koncentracijos. Didinant oro debitą stebimas dalelių koncentracijos mažėjimas prie visų pasirinktų tolueno koncentracijų ir reaktoriaus galių. Tai gali būti paaiškinama dėl trumpesnio LOJ užsibūvimo reaktoriuje, ko pasekoje susidaro mažiau dalelių, arba dėl įvykstančio dalelių srauto praskiedimo.

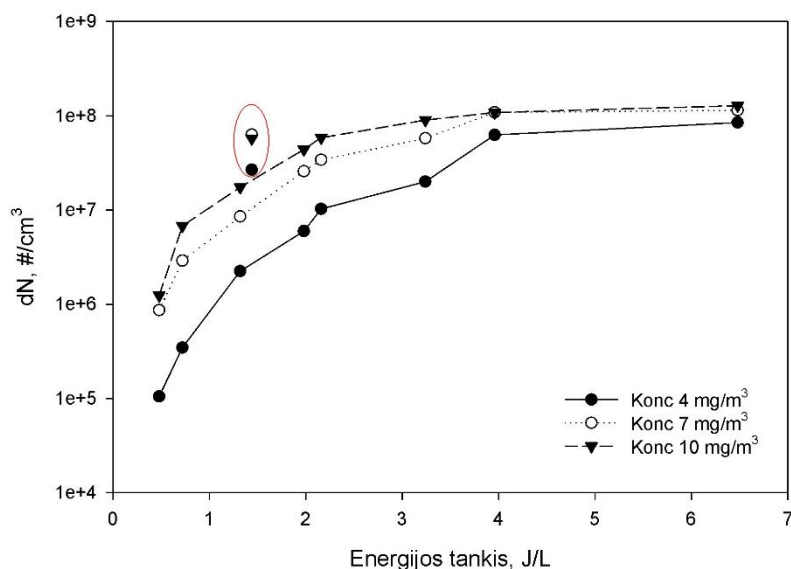
Didžiausios viso eksperimento dalelių koncentracijos užfiksuotos esant 50 m<sup>3</sup>/h oro debitui ir 10 mg/m<sup>3</sup> tolueno koncentracijai. Esant 20, 55 ir 90 W galiai, koncentracijos atitinkamai –  $6.1 \times 10^7$ ,  $1.1 \times 10^8$ ,  $1.2 \times 10^8$  #/cm<sup>3</sup>. Išlaikant 10 mg/m<sup>3</sup> tolueno koncentraciją ir reaktoriaus galias, bet pakėlus oro debitą iki 100 m<sup>3</sup>/h, koncentracijos atitinkamai sumažėja –  $7.3 \times 10^6$ ,  $4.6 \times 10^7$ ,  $8.4 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup> ir tai atitinka 88, 58, 30 % koncentracijos sumažėjimą. Debitą pakėlus iki 150 m<sup>3</sup>/h, užfiksuotos koncentracijos –  $1.4 \times 10^6$ ,  $1.8 \times 10^7$ ,  $5.8 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>, tai – atitinkamai 97, 83, 51 % koncentracijos sumažėjimas. Yamamoto, T. et al. skaidydamos CFC-133 feroelektrinės įkrovos reaktoriuje, aprašė reaktoriaus galią kaip dalelių kiekį didinantį parametą. Oro debito eksperimentas parodė, kad padvigubinus oro debitą, susidarančių dalelių kiekis sumažėja iki 10 kartų [28].



3.1. pav. ELPI prietaisu išmatuotos dalelių koncentracijos

Kad aiškiau pamatyti, ar tolueno koncentracija, ar reaktoriaus galia labiau įtakoja dalelių kiekį, buvo sudaromas grafikas, kuris vaizduoja dalelių koncentracijos priklausomybę nuo energijos tankio. Energijos tankis – tai oro tūrio vienetui apvalyti tenkančios energijos kiekis. Vienas vatas (W) atitinka 1 džaulį kart sekundė ( $J \cdot s$ ). Todėl pavertus oro debitą iš  $m^3/h$  į  $l/s$  ir sudauginus su galia, energijos tankis išreiškiamas kaip  $J/l$ . Grafike (žr. 3.2 pav) vaizduojami dalelių koncentracijos pokyčiai esant 3 skirtingoms tolueno koncentracijoms. Apvesti 3 taškai, kurie buvo gauti esant  $1.4 J/l$  ( $20 W$  ir  $50 m^3/h$ ) prie visų tolueno ( $4, 7, 10 mg/m^3$ ) koncentracijų. Šios užfiksuotos koncentracijos skyrėsi nuo bendrų pastebėtų dėsningumų, todėl buvo nuspręsta šiuos duomenis atmesti.

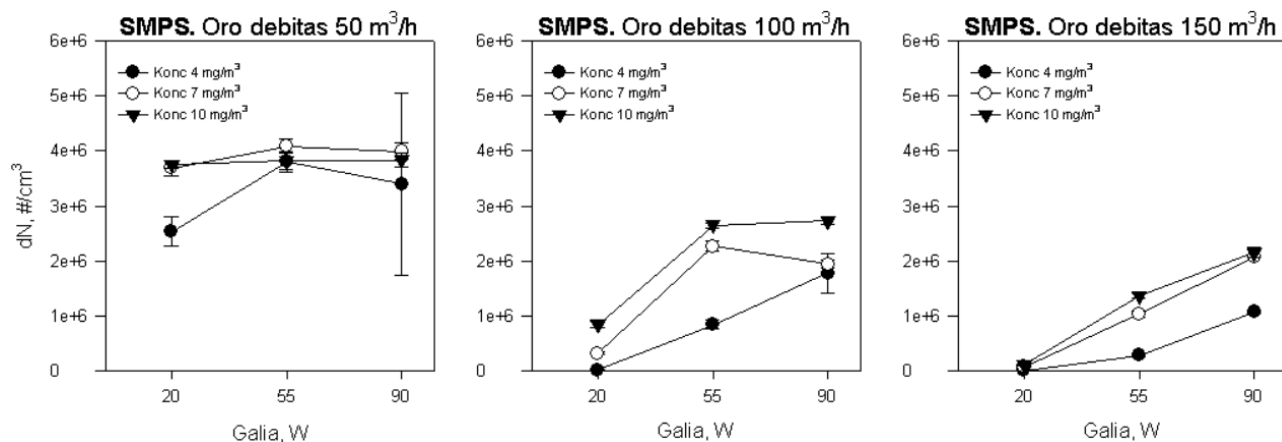
Tarp skirtingų tolueno teršalo koncentracijų pastebimas labai mažas (iki 10 kartų) susidarančio aerosolio skirtumas. Tuo tarpu pastebima, kad keliant energijos tankį nuo 0 iki  $4 J/L$  vyksta labai staigus aerosolio koncentracijos augimas (iki 1000 kartų). Nuo  $4 J/L$  šis augimas suletėja ir tampa logaritminio pobūdžio, kol galiausiai nusistovi. Visa tai gali būti paaiškinama tuo, kad esant mažam energijos tankiui, nėra suskaidomos visos ore esančios teršalo dujų molekulės. Didinant energijos tankį, ore lieka vis mažiau teršalo molekulių, kurios gali būti suskaidytos ir/arba polimerizuotis į aerosolį. Galiausiai pasiekiamas taškas, kurio metu didžioji dalis teršalo (99.99 %) yra suskaidyta ir tolimesnis energijos tankio didinimas mažai sąlygos dalelių susidarymą. Šis lėtas aerosolio koncentracijos augimas nėra begalinis ir sustotų, kai ore nebeliktų teršalo monomerų.



**3.2. pav.** Energijos tankio įtaka susidarančio aerosolio kiekiui

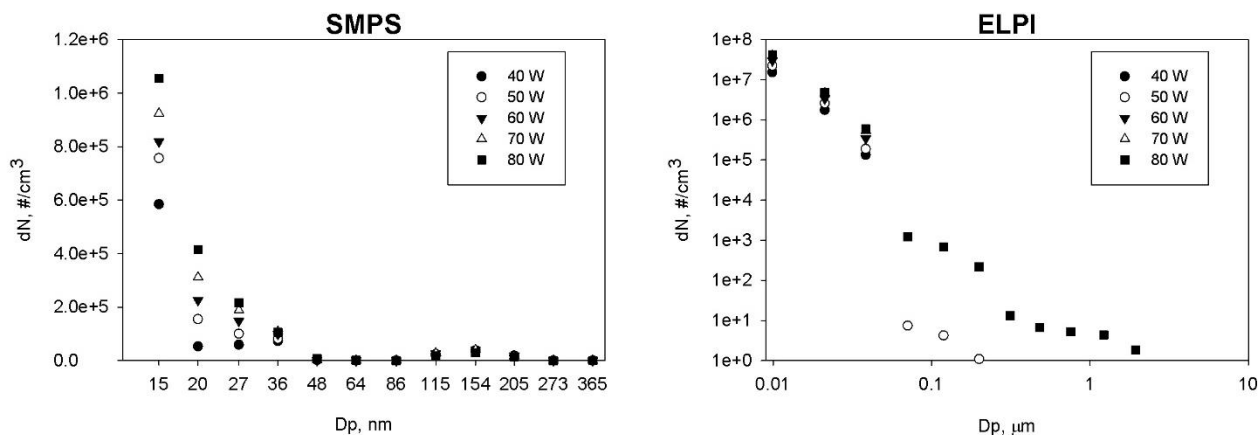


SMPS prietaisu užfiksuotuose duomenyse (žr. 3.3 pav.) taip pat įžiūrimos anksčiau minėtos priklausomybės. Tačiau esant didesnėms nei  $2 \times 10^6 \text{ #/cm}^3$  dalelių koncentracijoms, pastebimos didelės paklaidos ir neprognozuoti koncentracijų svyravimai. Šie nukrypimai gali būti paaiškinti dėl gerokai viršijamų siūlomų ( $1 \times 10^6 \text{ #/cm}^3$ ) prietaiso aptikimo ribų.



3.3. pav. SMPS prietaisu išmatuotos dalelių koncentracijos

Prie visų galių, smulkiausių dalelių (10 – 50 nm) koncentracija buvo didžiausia ir sudarė net 99 % viso matavimo kiekio. Esant 80 W, ELPI prietaisu užfiksuotų mažiausių 10, 21, 38 nm frakcijų koncentracijos atitinkamai  $4.2 \times 10^7$ ,  $4.9 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^5 \text{ #/cm}^3$ , SMPS prietaisu 11, 15, 20 nm –  $1.1 \times 10^6 \text{ #/cm}^3$ ,  $4.1 \times 10^5 \text{ #/cm}^3$ ,  $3 \times 10^5 \text{ #/cm}^3$ . Panašūs rezultatai aprašomi tolueno ir benzeno skaidymo eksperimente, atliktame vainikinio išlydžio reaktoriuje. Autoriai ELPI prietaisu didžiausias dalelių koncentracijas nustatė 10 – 50 nm dydžio frakcijose, o koncentracijos siekė  $1 \times 10^6 \text{ #/cm}^3$  [1, 15, 26].



3.4. pav. Išmatuotų dalelių frakcinė sudėtis

### 3.2. Dalelių koncentracijos vidurkių palyginimo analizė

Tam, kad patikrinti, ar pasirinkti reaktoriaus parametrai turėjo statistiškai reikšmingos įtakos susidarančių dalelių kiekiui, buvo tikrinama nulinė hipotezė ( $H_0$ ) – tarp užfiksuotų koncentracijų nėra statistiškai reikšmingo skirtumo. Atliktas vidurkių palyginimas naudojant 3-way ANOVA dispersinę statistinę analizę. Sudarytos 3 dispersinės nepriklausomų kintamųjų dydžių grupės (reaktoriaus galia, oro debitas, tolueno koncentracija) ir viena priklausomo kintamojo grupė – susidariusių dalelių koncentracija. Kiekvieną nepriklausomųjų grupę sudarė 3 lygiai, kurių kiekvieno imtis yra  $N = 117$ . Atliktos analizės rezultatų lentelės (žr. 2 lentelė) paskutiniame stulpelyje matosi, kad grupėse aptiktas statistiškai reikšmingas skirtumas tarp koncentracijų ( $p < 0.05$ ).

**2 lentelė.** ANOVA dispersinės statistinės analizės rezultatai

Grupė	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	5.706E+17	26	2.195E+16	1230.262	.000
Intercept	6.229E+17	1	6.229E+17	34917.580	.000
Galia	1.408E+17	2	7.038E+16	3944.981	.000
Debitas	3.181E+17	2	1.591E+17	8916.931	.000
Konc	6.669E+16	2	3.334E+16	1869.168	.000
Galia * Debitas	1.625E+16	4	4.064E+15	227.790	.000
Galia * Konc	1.565E+16	4	3.911E+15	219.248	.000
Debitas * Konc	8.938E+15	4	2.234E+15	125.250	.000
Galia * Debitas * Konc	4.201E+15	8	5.252E+14	29.438	.000
Error	5.780E+15	324	1.784E+13		
Total	1.199E+18	351			
Corrected Total	5.764E+17	350			

ANOVA analizė parodė tik statistiškai reikšmingo skirtumo buvimą grupėje, tačiau nenurodo konkrečiai tarp kurių lygių. Tam, kad tai sužinoti, buvo atliktas papildomas daugkartinio lyginimo (Pairwise Multiple Comparisons) testas. Aerosolio koncentracijos (dN) daugkartinis lyginimas vyko imtinai pasirinkus 2 pastovias reaktoriaus sąlygas: galia ir debitas arba debitas ir koncentracija, arba koncentracija ir debitas. Keičiant likusią, trečiąją sąlygą, tikrinamas gautų koncentracijų tarpusavio skirtumo statistinis reikšmingumas.

Pateikta analizė (žr. 3 priedas) parodo, kad didžiąjai daliai (90%) gautų rezultatų  $H_0$  gali būti atmesta dėl gauto reikšmingumo lygmens ( $p < 0.05$ ). Tai reiškia, kad visų pasirinktų reaktoriaus parametrų keitimas reikšmingai sąlygojo susidarančių dalelių kiekius. Eksperimento sąlygos, kurias

keičiant, tarp susidarančių dalelių koncentracijų neaptikti reikšmingi skirtumai ( $p > 0.05$ ), pateiktos žemiau:

- Tarp 7 ir 10 mg/m<sup>3</sup>, esant 20 W, 150 m<sup>3</sup>/h, ( $p = 0.718$ ).
- Tarp 4 ir 7 mg/m<sup>3</sup> esant 20 W, 150 m<sup>3</sup>/h, ( $p = 0.696$ ).
- Tarp 4 ir 10 mg/m<sup>3</sup>, esant 20 W, 150 m<sup>3</sup>/h, ( $p = 0.452$ ).
- Tarp 4 ir 7 mg/m<sup>3</sup> esant 20 W; 100 m<sup>3</sup>/h, ( $p = 0.130$ ).
- Tarp 7 ir 10 mg/m<sup>3</sup> esant 20 W; 50 m<sup>3</sup>/h, ( $p = 0.094$ ).
- Tarp 20 ir 50 W esant 150 m<sup>3</sup>/h; 4 mg/m<sup>3</sup>, ( $p = 0.197$ ).
- Tarp 100 ir 150 m<sup>3</sup>/h esant 20 W; 4 mg/m<sup>3</sup>, ( $p = 0.203$ ).
- Tarp 100 ir 150 m<sup>3</sup>/h esant 20W; 7 mg/m<sup>3</sup>, ( $p = 0.884$ ).

### 3.3. Dalelių koncentracijų regresiniai modeliai

Siekiant interpoliuoti ar ekstrapoliuoti galimas susidarančių dalelių koncentracijas esant skirtingoms nei ištestuotoms sąlygoms buvo pritaikomi regresiniai modeliai. Siekiant išvengti neteisingų prognozių, SMPS prietaiso duomenys analizėje nebuvo naudojami. ELPI prietaisu surinktomis dalelių koncentracijoms (dN) pritaikyti 2 regresiniai (žr. 3.5 pav) modeliai: eksponentinis (3.1) modelis buvo pritaikytas duomenims gautiems, atliekant eksperimentus esant ( $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ) oro debitui. Logistinis trijų parametru (3.2) modelis pritaikytas duomenims gautiems, esant 100 ir 150 m<sup>3</sup>/h oro debitui. Šiame modelyje koeficientas  $a$  (viršutinė asimptotė) nurodo maksimalią ordinatės reikšmę, esant  $x_0$  modelio ordinatė įgyja vidurio reikšmę, o  $b$  elgiasi kaip krypties koeficientas. Kiekvienai koncentracijai buvo sudaryta po atskirą lygtį remiantis anksčiau minėtu pasirinktu modeliu. Keičiant atitinkamus lygties koeficientus ( $a$ ,  $b$ ) buvo stengiamasi pasiekti kuo aukštesnį determinacijos koeficientą ( $r^2$ ), šis dydis aprašo modelio atitikimą duomenims, o modelis laikomas gerai aprašantis duomenis kai  $r^2 > 0.95$ .

$$f(x) = a * (1 - \exp(-b * x)) \quad (3.1)$$

$$f(x) = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b} \quad (3.2)$$

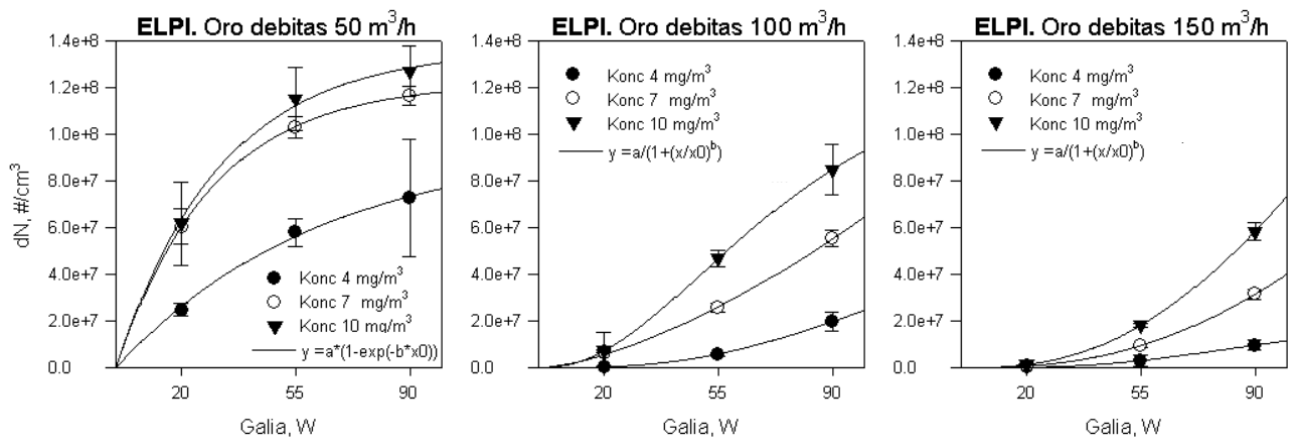
Sudarytos eksponentinio modelio lygtys duomenims, gautiems esant 50 m<sup>3</sup>/h oro debitui:

$$dN_{Q=50} = \begin{cases} 9.6 * 10^7 * (1 - \exp(-0.0161 * x)), \text{Konc.} = 4 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.99; \\ 1.2 * 10^8 * (1 - \exp(-0.0341 * x)), \text{Konc.} = 7 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.99; \\ 1.3 * 10^8 * (1 - \exp(-0.0314 * x)), \text{Konc.} = 10 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.98; \end{cases}$$

Sudarytos logistinio modelio lygtys duomenims, gautiems esant 100 ir 150 m<sup>3</sup>/h oro debitui:

$$dN_{Q=100} = \begin{cases} \frac{8.7 * 10^7}{1 + \left(\frac{x}{139.6}\right)^{-2.8}}, \text{Konc.} = 4 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.9; \\ \frac{1.3 * 10^{11}}{1 + \left(\frac{x}{159.7}\right)^{-1.5}}, \text{Konc.} = 7 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.98; \\ \frac{1.4 * 10^8}{1 + \left(\frac{x}{79.2}\right)^{-2.1}}, \text{Konc.} = 10 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.99; \end{cases} \quad (3.3)$$

$$dN_{Q=150} = \begin{cases} \frac{2.3 * 10^7}{1 + \left(\frac{x}{101}\right)^{-3.1}}, \text{Konc.} = 4 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.99; \\ \frac{4.3 * 10^8}{1 + \left(\frac{x}{248.6}\right)^{-2.5}}, \text{Konc.} = 7 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.99; \\ \frac{4.2 * 10^8}{1 + \left(\frac{x}{182.6}\right)^{-2.5}}, \text{Konc.} = 10 \text{ mg/m}^3, r^2 = 0.99; \end{cases} \quad (3.4)$$

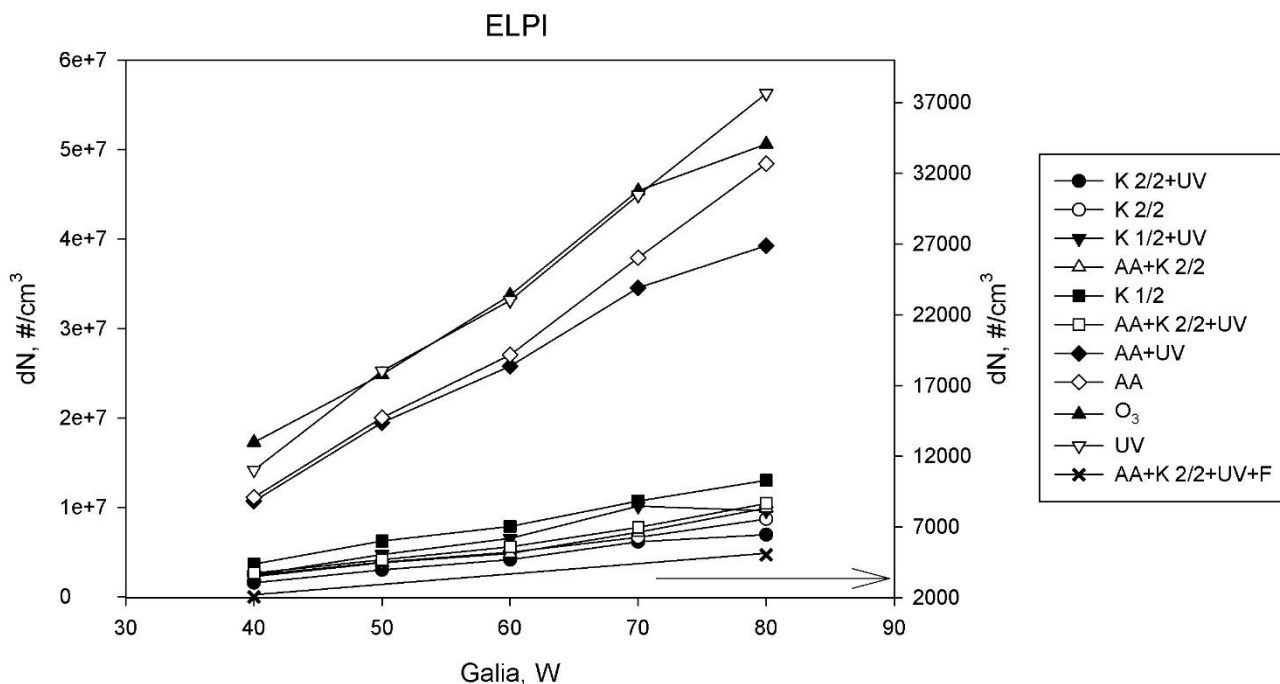


3.5. pav. Pritaikyti regresiniai modeliai ELPI išmatuotoms dalelių koncentracijoms

### 3.4. Skirtingų skaidymo procesų įtaka aerozolio susidarymui

3.6 paveikslas vaizduoja įvairių skaidymo etapų įtaką dalelių susidarymui. Reaktoriaus veikimas be jokių skaidymo etapų, dirbant tik vainikiniam išlydžiui, grafikuose žymimas O<sub>3</sub>. Iš vizualiai grafikuose pateiktų duomenų galima išskirti 2 rezultatų grupes: be katalizatoriaus ir su katalizatoriumi. Eksperimentai be katalizatoriaus (AA, UV, AA+UV) dalelių kiekiui žymios įtakos neturėjo. UV apšvietos įtaka susidarančių dalelių koncentracijoms buvo mažai pastebima. Panaši įtaka aprašoma literatūroje. Terpeno ozonolizės eksperimento metu įjungus UV spinduliuotę, susidarančio aerozolio kiekis sumažėjo tik 3 % [36]. Taip pat pastebėta, kad naudojant aktyvintos anglies sorbentą dalelių koncentracija tam tikrais matavimo etapais padidėjo net 10 % – tai gali būti susiejama su dalelių išpūtimu iš pačio sorbento dėl per didelio jo užsiterštumo arba per didelio oro debito.

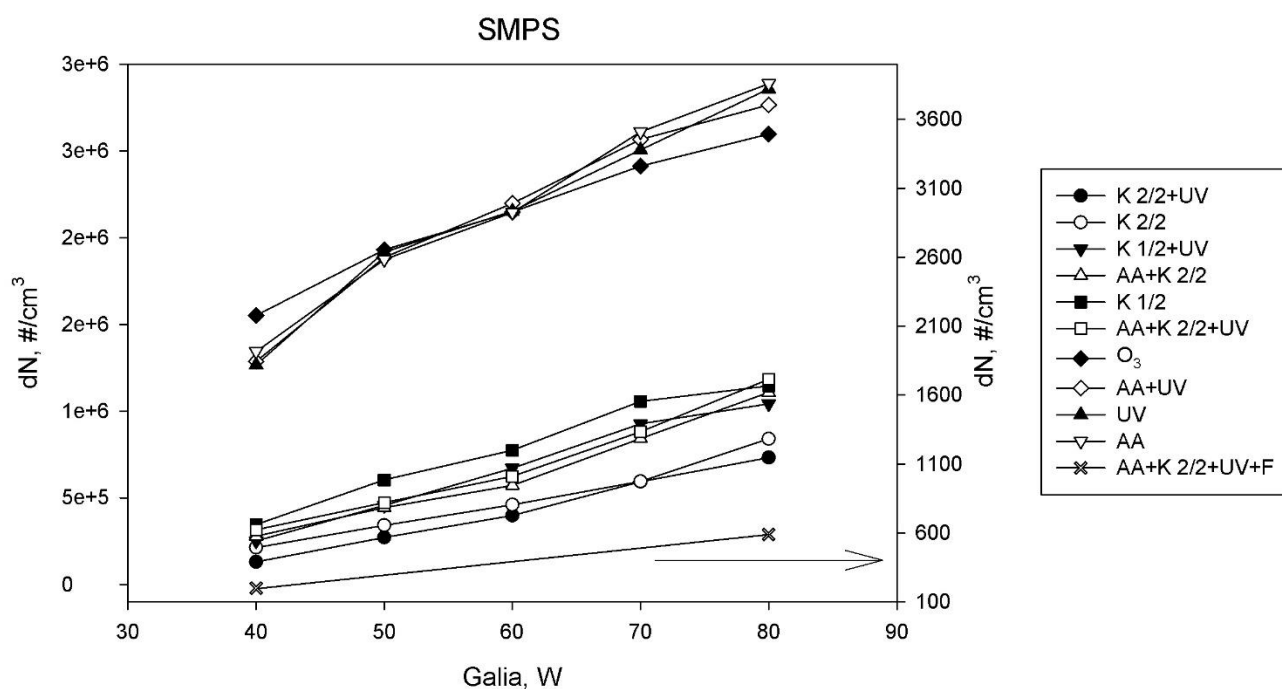
Į sistemą įdėjus vieną TiO<sub>2</sub> katalizatorių (K 1/2), susidarančių dalelių kiekis sumažėjo 75 %, o įjungus UV spinduliuotę (K 1/2+UV) – 81 %. Įdėjus dvigubą katalizatorių K 2/2, dalelių kiekis sumažėjo ~ 84%, o įjungus spinduliuotę (K 2/2+UV) ~ 88%.



### 3.6. pav. Skirtingų skaidymo sistemos kombinacijų įtaka susidarančio aerozolio koncentracijai

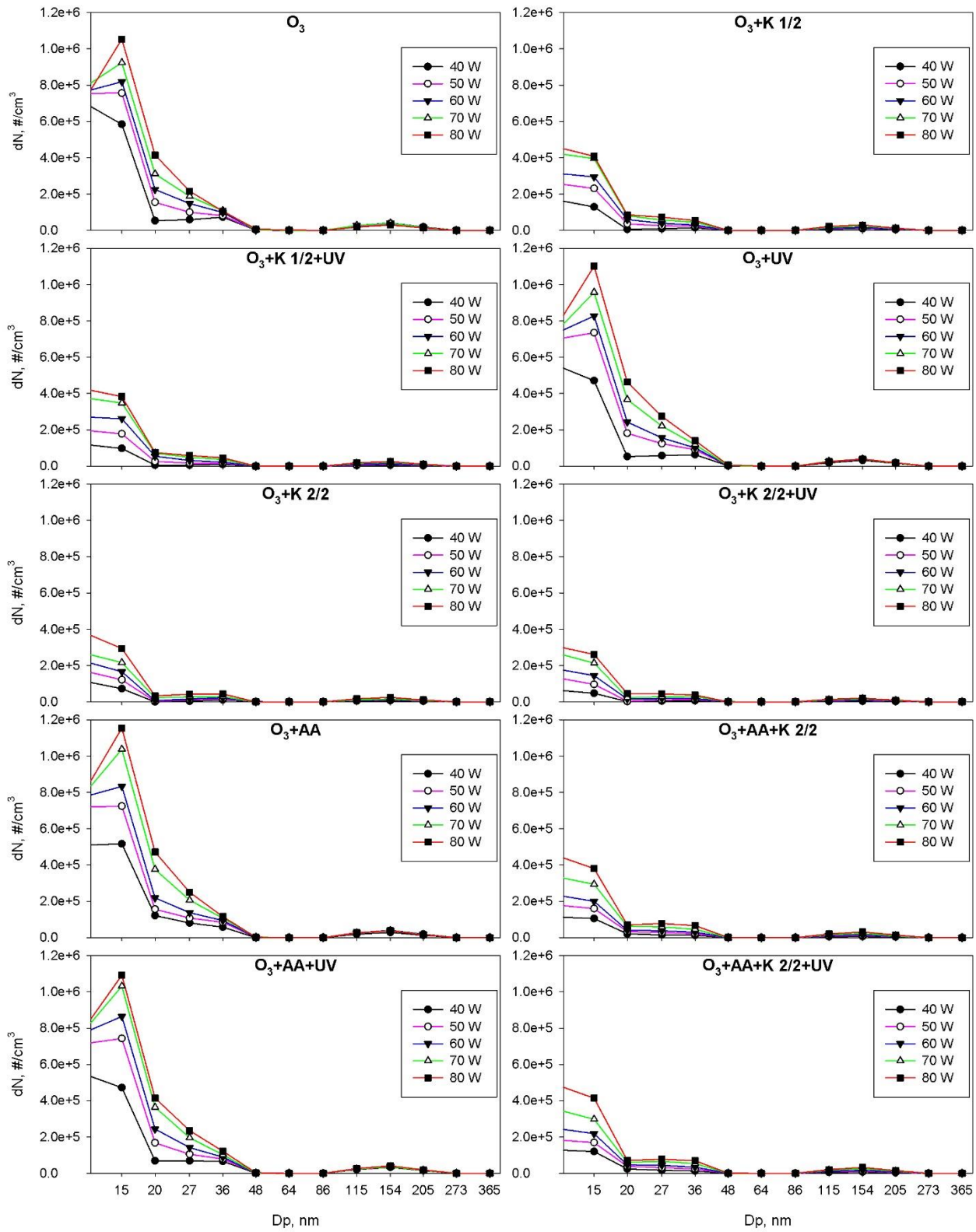
Panašūs rezultatai aprašomi ir literatūroje. DBI reaktoriuje skaidant tolueną ir panaudojus tik MnO<sub>x</sub>/CeMn/O<sub>x</sub>/CoMnO<sub>x</sub> katalizatorius, ELPI išmatuotos aerozolio koncentracijos sumažėjo > 50 %.

Autoriai aiškina, kad tai gali būti siejama su aerozolio adsorbavimusi katalizatoriaus paviršiuje. Taip pat pabrėžiama, kad šis veiksnys gali užblokuoti aktyviasias katalizatoriaus vietas ir sumažinti tolimesnį LOJ skaidymui efektyvumą [37]. Kitų autorių [39] eksperimente atliktas tolueno skaidymas DBI reaktoriuje stebint  $\text{TiO}_2$  ir UV kombinacijų įtaką. Jame aprašoma, kad katalizatorių apšvitinus papildoma UV spinduliuote, LOJ skaidymo efektyvumas vietomis pagerėja papildomu 10 %. Šis, didesnis LOJ suskaidymo efektyvumas, nulemia mažesnį susidarančių dalelių kiekį, kadangi lieka mažiau dujinio teršalo molekulių, kurios veikiamos plazmos, vėliau gali polimerizuotis į daleles. Didžiausiu efektyvumu pasižymėjo kombinacija su HEPA H11 filtru (F), kurio dalelių sulaikymo efektyvumas, kaip ir tikėtasi, buvo 99.9 %.



### 3.7. pav. Skirtingų skaidymo sistemos kombinacijų įtaka susidarančio aerozolio koncentracijai

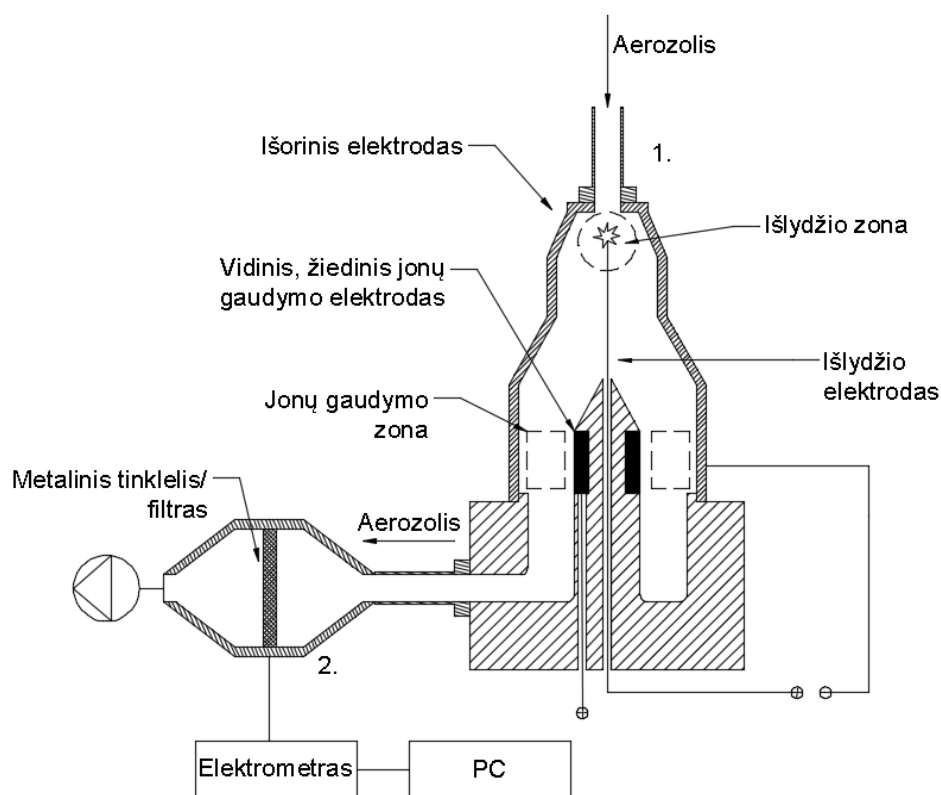
Skirtingų skaidymo etapų įtaka dalelių frakcinei sudėčiai pavaizduoda 3.8 paveiksle. Iš grafiko matosi, kad visi skaidymo etapai, mažindami aerozolio koncentraciją, įvairių dydžių daleles veikė vienodai, t.y. procesai nebuvo selektyvus tik mažesnėms ar didesnėms dalelėms. Didžiausias susidariusių dalelių kiekis buvo 10 – 50 nm dydžio. Antrasis iškilimas, kuris pastebimas ties 115 – 205 nm, susidaro dėl mažųjų dalelių aglomeracijos.



**3.8. pav.** SMPS išmatuotas aerozolio pasiskirstymas prie skirtingų skaidymo sistemos kombinacijų

### 3.5. Konceptinio elektrinio dalelių skaitiklio projektavimas

Suprojektuotą elektrinį dalelių skaitiklį (žr. 3.9 pav.) sudaro 2 pagrindinės dalys: krūvį suteikianti dalis (1) ir daleles filtruojanti dalis (2). Krūvį suteikiančioje dalyje vyksta du procesai – difuzinis įtekančių su oro srautu dalelių įkrovimas ir išlydžio metu susidaranti jonų gaudymas iš oro srauto. Pirmą dalį sudaro du koncentriniai elektrodai. Vidinis išlydžio elektrodas (50  $\mu\text{m}$  spindulio adata) ir išorinis elektrodas, kuris šiuo atveju yra korpusas. Atstumas nuo adatos smaigalio iki korpuso yra 1 cm, o išlydžio užimamas tūris yra 6.3  $\text{cm}^3$ . Išlydžio adata prijungta prie teigiamo, nuolatinės srovės šaltinio gnybto. Tarp adatos ir korpuso veikia aukšta 6.9 kV įtampa, srovės stipris 1  $\mu\text{A}$ . Įkrautos dalelės ir išlydžio metu susidarę jonai toliau teka per žemesnės 500 V įtampos jonų gaudymo zoną. Šioje zonoje gaudomi jonai, trukdantys tolimesniems matavimams. Jonų gaudymo elektrodas yra žiedo formos, kurio spindulys ir aukštis yra 1 cm. Atstumas tarp žiedo ir korpuso taip pat yra 1 cm. Antrąją, dalelės filtruojančią dalį, sudaro prie elektrometro prijungtas filtras/metalinis tinklelis. Sąlyčio su filtru metu, dalelė perduoda savo krūvį, kurio dydį išmatuoja prijungtas elektrometras. Išmatuota srovė perskaičiuojama į skaitinę koncentraciją pagal žemiau sudaryta funkciją.



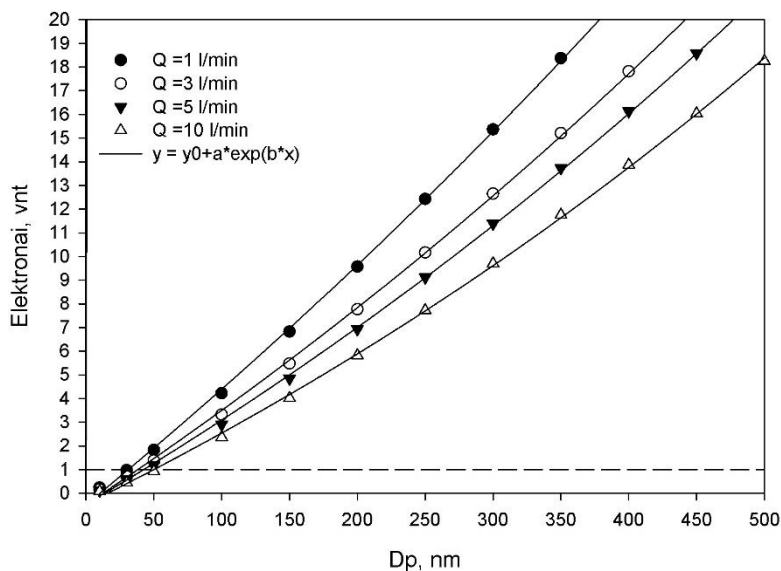
3.9. pav. Konceptinio elektrinio dalelių skaitiklio schema



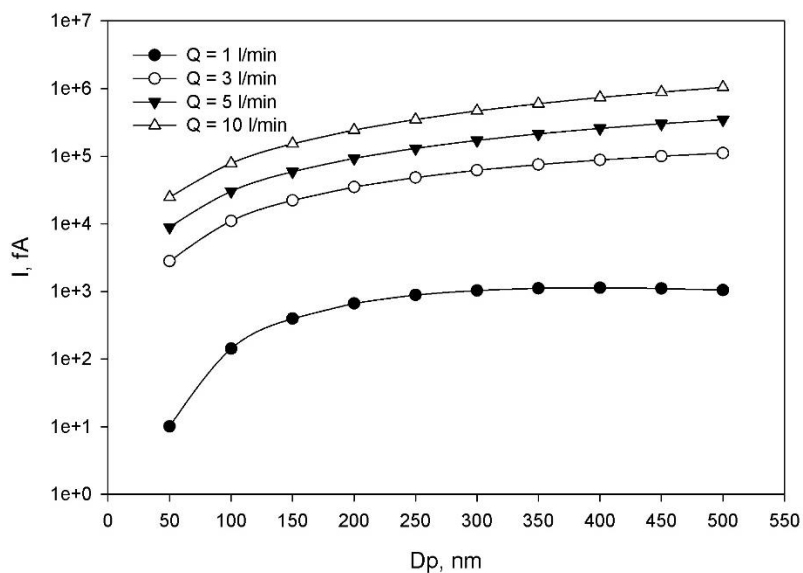
**3 lentelė.** Pagrindiniai suprojektuoto elektrinio dalelių skaitiklio parametrai

Parametras	Žymėjimas	Dydis
Išlydžio elektrodo įtampa	$U_0$ , kV	6.9
Jonų gaudymo elektrodo įtampa	$U$ , V	500
Srovės stipris	$I$ , $\mu\text{A}$	1
Įkrovimo zonos tūris	$V_{\text{ikro}}$ , $\text{cm}^3$	6.3
Jonų gaudymo zonos ilgis	$L$ , m	0.01
Išorinio elektrodo spindulys	$r_{\text{outer}}$ , cm	2
Jonų gaudymo elektrodo spindulys	$r_{\text{inner}}$ , cm	1
Išlydžio adatos spindulys	$r$ , m	0.00005
Atastumas nuo adatos iki korpuso	$d$ , m	0.01

Kad matavimai būtų teisingi, dalelė, praėjusi per krūvį suteikiančią dalį, turi įgauti bent 1 elektroną. Grafike (žr. 3.10 pav.) pateiktas dalelės įgyjamo krūvio skaičius, priklausomai nuo dalelės diametro ir oro debito. Pastebima, kad didėjant dalelės diametru, jos įgaunamas krūvio kiekis didėja. Tai siejama su didesniu dalelės paviršiaus plotu, kuris difuzinio įkrovimo metu padeda dalelei talpinti daugiau krūvių ir padidina tikimybę tokį įgauti (susitrenkti su elektronu). Didinant į matuoklį tiekiamo oro debitą mažėja išbuvimo trukmė išlydžio zonoje, todėl prie tokio pat diametro dalelė įgauna vis mažesnę krūvio kiekį. Esant 5 10 l/min oro debitams, mažesnės nei 50 nm dalelės neįgaus 1 elektrono, todėl sekančiame etape negalės būti išmatuotos. Esant būtinybei matuoti mažiausias daleles, būtų tikslinga pasirinkti kuo mažesnę oro debitą.

**3.10. pav.** Difuzijos būdu įgaunamas krūvio kiekis ant vienos dalelės

Tiksliam dalelių skaitinės koncentracijos apskaičiavimui būtina parinkti ne tik tinkamą oro debitą, bet ir tinkamo jautrumo elektrometrą. Kadangi šis dalelių skaitiklis nerūšiuodamas matuoja visų dydžių daleles, perskaičiuojant gautą srovės kiekį ir nežinant srauto frakcinės sudėties, neįmanoma teisingai įvertinti krūvio kiekio, kurį atnešė skirtingo diametro dalelės. Todėl naudojant įkrovimo efektyvumo formulės (2,2) išraišką, buvo apskaičiuotas srovės kiekis, kuris turėtų būti užfiksuotas filtruojant srautą, kurio užterštumas  $10^6 \text{ \#/cm}^3$  vieno diametro dalelių. Skaičiavimai buvo atlikti 6 skirtingiems dalelių dydžiams (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 nm) prie skirtingų oro debitų  $Q$  (1, 3, 5, 10 l/min). Iš grafiko (žr. 3.11 pav.) matosi, kad didėjant dalelių diametru, pernešamas elektros stipris didėja. Šis didėjimas nėra pastovus ir slūgsta su didėjančiu dalelės diametru. Tai gali būti paaiškinama patiriamais didesniais elektrostatiniais nuostoliais [38]. 1 l/min oro debito atveju šis reiškinys pastebimas labiausiai, kadangi daleles veikia silpnesnės difuzinės jėgos, kurios yra lengviau nustelbiamos elektrostatinėmis reiškinėmis. Apskaičiuotas elektrometro srovės jautrumas, priklausomai nuo sraute vyraujančių dalelių dydžio, turėtų svyruoti nuo 10 iki  $10^6$  fA.



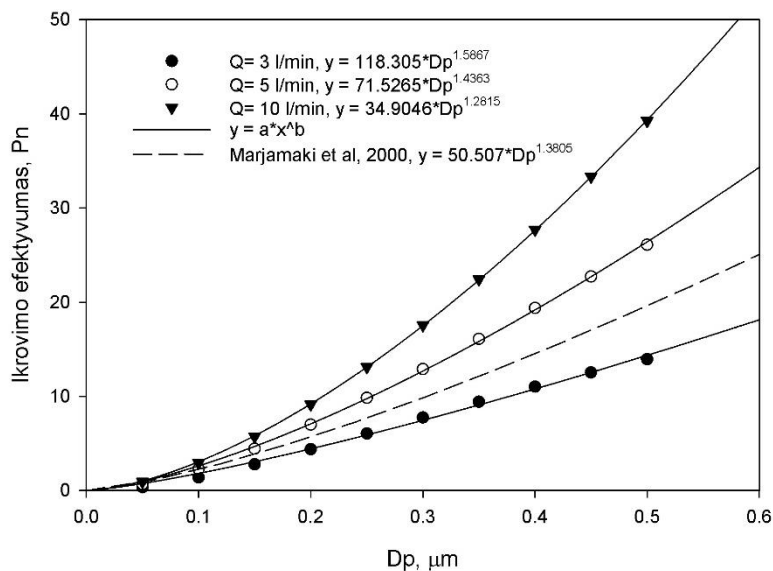
**3.11. pav.** Apskaičiuotos elektrometro srovės

Tiksliam srovės perskaičiavimui į koncentraciją reikalinga apskaičiuoti dalelių įkrovimo efektyvumą. Tai koeficientas ( $P_n$ ), kuris įvertina difuziniais ir elektriniais reiškiniais įgautą krūvio kiekį bei prietaise patirtus elektrostatinis pačių dalelių nuostolius. Apskaičiuoti koeficientai pateikti 3.12 paveiksle, o tarpiniai dydžiai 4 priede. Gautom reikšmėms pritaikytas rodiklinės (3.1) regresijos modelis ir sudarytos lygtys (3.2), kurių dėka galima išvesti tarpinio dalelės diametro efektyvumo

koeficientą ir statyti į perskaičiavimo formulę (3.3). Sudarytos principinio skaitiklio efektyvumo lygtis buvo palygintos su aprašytais literatūroje, kurios buvo gautos atlikus realaus prietaiso kalibracijos eksperimentus [35].

$$f(x) = a * x^b \quad (3.5)$$

$$Pn(D_p, Q) = \begin{cases} 118.305 * D_p^{1.5667}, Q = 3 \text{ l/min}, r^2 = 0.99; \\ 71.5265 * D_p^{1.4363}, Q = 5 \text{ l/min}, r^2 = 0.99; \\ 34.9046 * D_p^{1.2815}, Q = 10 \text{ l/min}, r^2 = 0.99; \end{cases} \quad (3.6)$$



### 3.12. pav. Įkrovimo efektyvumo koeficiento priklausomybė nuo dalelės diametro ir oro debito

Žinant arba numanant matuojamo srauto didžiausią susidarantių dalelių frakciją, perskaičiavimui naudojama sudaryta formulė:

$$N = \frac{I_{išmatuota}}{P_n(D_p, Q) * e * Q} \quad (3.7)$$

## IŠVADOS

1. Atlikus aerolio susidarymą lemiančių veiksnių eksperimentą, nustatyta, kad didžiausią įtaką susidarančių dalelių kiekiui turi reaktoriaus galia. Didėjanti reaktoriaus galia sąlygoja didesnę susidarančių dalelių kiekį. Priklausomai nuo sistemoje esančio oro debito, pakėlus reaktoriaus galią nuo 20 iki 90 W, susidarančių dalelių kiekis gali padidėti net 1000 kartų.
2. Atlikus skirtingų skaidymo procesų įtakos nustatymo eksperimentą, nustatyta, kad UV spinduliuotė ir aktyvios anglies sorbentas susidarančio aerolio kiekiui įtakos beveik neturėjo. Labiausiai dalelių susidarymą slopino dvigubo TiO<sub>2</sub> katalizatoriaus ir UV spinduliuotės kombinacija, kuri efektyviausiai mažino dalelių prekursorių (dalinai suskaidytų LOJ) koncentraciją ore. Šio metodo efektyvumas svyravo nuo 85 iki 91 % ir visas dalelių frakcijas mažino vienodai.
3. Suprojektuotas koncepcinis, difuzinio įkrovimo principu paremtas, dalelių skaitiklis, kuris gali būti naudojamas nuolatinei dalelių koncentracijai įrenginyje stebėti. Optimalios šio skaitiklio veikimo sąlygos yra prie 1 – 10 m<sup>3</sup>/h oro debito, esant ne didesnėms nei 10<sup>6</sup> #/cm<sup>3</sup> dalelių koncentracijoms. Kartu projektuojamo elektrometro matavimo jautrumas turėtų būti tarp 10 ir 10<sup>6</sup> fA. Sudarytas matematinis įkrovimo efektyvumo koeficiento apskaičiavimo modelis, kuris naudojamas išmatuotos srovės perskaičiavimui į dalelių skaitinę koncentraciją.
4. Atsižvelgiant į gautus rezultatus, galima teigti, kad buvo nustatytas optimalus aerolio dalelių mažinimo metodas. Kad maksimaliai išnaudoti šio metodo efektyvumą būtų tikslinga atlikti atitinkamus patobulinimus, pvz: didesnio spinduliavimo intensyvumo šaltinio parinkimas, efektyvesnis UV spinduliuotės išnaudojimas, keičiant šaltinio poziciją ir apšvietos kampą bei skirtingos geometrijos TiO<sub>2</sub> katalizatorių derinių panaudojimas. Norint sudarytą valymo sistemą pritaikyti praktiškai, eksperimentus reikėtų papildyti kokybiniais susidarančio aerolio tyrimais, kad įvertinti potencialią jo žalą žmogui ir aplinkai.

## LITERATŪRA

1. ZHANG, X. et al. Aerosol Formation and Decomposition of Benzene Derivatives by AC/DC Streamer Corona Discharge. *Seventh International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy*, 2010, p. 130–134.
2. THEVENET, F. et al. Plasma – catalyst coupling for volatile organic compound removal and indoor air treatment : a review. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, Vol. 224011.
3. SHIN, S.H. - JO, W.K. Longitudinal variations in indoor VOC concentrations after moving into new apartments and indoor source characterization. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, Vol. 20, no. 6, p. 3696–3707.
4. Lakieji organiniai junginiai. [Peržiūrėta 2015, birželio 13], JAV Aplinkos apsaugos agentūros tinklapyje: <http://www.epa.gov/iaq/voc.html>
5. LUENGAS, A. et al. A review of indoor air treatment technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2015, Vol. 14, no. 3, p. 499–522.
6. VILDOZO, D. et al. Photocatalytic oxidation of 2-propanol/toluene binary mixtures at indoor air concentration levels. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2011, Vol. 107, no. 3-4, p. 347–354.
7. OURRAD, H. et al. Limonene photocatalytic oxidation at ppb levels: Assessment of gas phase reaction intermediates and secondary organic aerosol heterogeneous formation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, Vol. 168-169, p. 183–194.
8. LU, Y. et al. Study on the removal of indoor VOCs using biotechnology. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, Vol. 182, no. 1-3, p. 204–209.
9. ONDARTS M, et al. Developments and new applications of biological gas treatment systems for the removal of micro-pollution in indoor air: study of the design parameters and the associated potential. *Proceedings of the 2010 Duke-UAM conference on biofiltration for air pollution control*, 2010.
10. KIM, K.J. et al. Volatile toluene and xylene removal efficiency of foliage plants as affected by top to root zone size. *HortScience*, 2014, Vol. 49, no. 2, p. 230–234.
11. XU, Z. et al. Formaldehyde removal by potted plant-soil systems. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, Vol. 192, no. 1, p. 314–318.

12. YOO, M.H. et al. Efficacy of indoor plants for the removal of single and mixed volatile organic pollutants and physiological effects of the volatiles on the plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2006, Vol. 131, no. 4, p. 452–458.
13. AGUADO, S. et al. Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes. *Journal of Membrane Science*, 2004, Vol. 240, no. 1-2, p. 159–166.
14. VANDENBROUCKE, A.M. et al. Non-thermal plasmas for non-catalytic and catalytic VOC abatement. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, Vol 195, p. 30-54.
15. KIM, H.H. et al. Comparative assessment of different nonthermal plasma reactors on energy efficiency and aerosol formation from the decomposition of gas-phase benzene. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, Vol. 41, no. 1, p. 206–214.
16. HACKAM, R. - AKIYAMA, H. Air pollution control by electrical discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, Vol. 7, no. 5, p. 654–683.
17. MATSUMOTO, T. et al. Non-Thermal Plasma Technic for Air Pollution Control. *Air Pollution – A Comprehensive Perspective*, 2012, p. 215–234.
18. CHANG, J.S. et al. Corona Discharge Processes. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1991, Vol. 19, no. 6, p. 1152–1166.
19. MÜLLER, S. - ZAHN, R.J. Air pollution control by non-thermal plasma. *Contributions to Plasma Physics*, 2007, Vol. 47, no. 7, p. 520–529.
20. LIU, J. et al. Decomposition of gaseous toluene using a continuous flow discharge plasma reactor with new configurations. *Environmental Technology*, 2015, Vol. 36, no. 24, p. 3084–3093.
21. SULTANA, S. et al. Abatement of VOCs with Alternate Adsorption and Plasma-Assisted Regeneration: A Review. *Catalysts*, 2015, p. 718–746.
22. DEMIDIOUK, V. et al. Toluene and butyl acetate removal from air by plasma-catalytic system. *Catalysis Communications*, 2003, Vol. 4, p. 51–56.
23. OGASAWARA, A. et al. Decomposition of Toluene Using Nanosecond- Pulsed-Discharge Plasma Assisted With Catalysts. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, Vol. 43, no. 10, p. 3461–3469.
24. HURLEY, M.D. et al. Organic aerosol formation during the atmospheric degradation of toluene. *Environmental Science and Technology*, 2001, Vol. 35, no. 7, p. 1358–1366.
25. KROLL, J.H. - SEINFELD, J.H. Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 2008, Vol. 42, no. 16, p. 3593–3624.

26. ZHANG, X. et al. Aerosol formation from styrene removal with an AC/DC streamer corona plasma system in air. *Chemical Engineering Journal*, 2013, Vol. 232, no. x, p. 527–533.
27. DURME, J. VAN et al. Abatement and degradation pathways of toluene in indoor air by positive corona discharge. *Chemosphere*, 2007, Vol. 68, no. 10, p. 1821–1829. .
28. YAMAMOTO, T. - JANG, B.W.L. Aerosol generation and decomposition of CFC-113 by the ferroelectric plasma reactor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, Vol. 35, no. 4, p. 736–742.
29. Adaškevičius, R. et al. Žmogaus sauga. Laboratoriniai darbai, 2011, 63 - 67 p.
30. Elektrinis žemo slėgio daugiapakopis dalelių impaktorius. [Peržiūrėta 2016, sausio 20], FI Dekati Ltd įmonės tinklapyje: <http://www.dekati.com/products/Fine%20Particle%20Measurement/ELPI%20AE%2B>
31. DMA ir CPC veikimo principai. [Peržiūrėta 2016, sausio 20], JAV TSI Inc įmonės tinklapyje: [http://www.tsi.com/uploadedFiles/\\_Site\\_Root/Products/Literature/Application\\_Notes/Review\\_on\\_CPC\\_and\\_SMPS\\_CPC-003-US-web.pdf?id=32305](http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/Review_on_CPC_and_SMPS_CPC-003-US-web.pdf?id=32305)
32. Nanodalelių skaitiklis SMPS. [Peržiūrėta 2016, sausio 20], JAV TSI Inc įmonės tinklapyje: [http://www.tsi.com/uploadedFiles/\\_Site\\_Root/Products/Literature/Spec\\_Sheets/NanoScan%20SMPS%203910\\_5001411.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/NanoScan%20SMPS%203910_5001411.pdf)
33. ADAMIAK, K. – ATTEN. P. Simulation of corona discharge in point-plane configuration. *Journal of Electrostatics*, 2004, Vol. 61, no. 2, p. 85–98.
34. OUF, F.X. - SILLON, P. Charging Efficiency of the Electrical Low Pressure Impactor's Corona Charger: Influence of the Fractal Morphology of Nanoparticle Aggregates and Uncertainty Analysis of Experimental Results. *Aerosol Science and Technology*, 2009, Vol. 43, no. 7, p. 685–698.
35. MARJAMAKI, M. et al. Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI). *Journal of Aerosol Science*, 2000, Vol. 31, no. 2, p. 249–261.
36. PRESTO, A. a et al. Secondary organic aerosol production from terpene ozonolysis. 1. Effect of UV radiation. *Environmental science & technology*, 2005, Vol. 39, no. 18, p. 7036–7045.
37. HUANG, Y. A comparison study of toluene removal by two-stage DBD-catalyst systems loading with MnOx, CeMnOx, CoMnOx. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015. p. 19240–19250. .
38. ERNANDEZ-SIERRA, A. et al. Unipolar charging of nanometer aerosol particles in a corona ionizer. *Journal of Aerosol Science*, 2003, Vol. 34, no. 6, p. 733–745.

39. HUANG, H. - YE, D. Combination of photocatalysis downstream the non-thermal plasma reactor for oxidation of gas-phase toluene. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, Vol. 171, no. 1-3, p. 535–541.
40. PEEK.F.W. Dielectric phenomena in high voltage engineering, 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill book Company, 1920, p. 38-57



# PRIEDAI

## 1. PRIEDAS

Aerolio susidarymą įtakojančių veiksnių eksperimentinis planas

Nr.	Reaktorio galia, W	Oro debitas, m <sup>3</sup> /h	Pradinė konc., mg/m <sup>3</sup>	SMPS dN, #/cm <sup>3</sup>	ELPI, dN, #/cm <sup>3</sup>
1	20	50	4	2.5E+06	2.5E+07
2	55	50	4	3.8E+06	5.8E+07
3	90	50	4	3.4E+06	7.3E+07
4	20	100	4	2.5E+04	3.7E+05
5	55	100	4	8.5E+05	6.0E+06
6	90	100	4	1.8E+06	2.0E+07
7	20	150	4	1.2E+04	1.7E+05
8	55	150	4	2.9E+05	3.2E+06
9	90	150	4	1.1E+06	9.7E+06
10	20	50	7	3.7E+06	6.1E+07
11	55	50	7	4.1E+06	1.0E+08
12	90	50	7	4.0E+06	1.2E+08
13	20	100	7	3.3E+05	6.6E+06
14	55	100	7	2.3E+06	2.6E+07
15	90	100	7	1.9E+06	5.5E+07
16	20	150	7	8.3E+04	7.6E+05
17	55	150	7	1.0E+06	9.6E+06
18	90	150	7	2.1E+06	3.1E+07
19	20	50	10	3.8E+06	6.2E+07
20	55	50	10	3.8E+06	1.2E+08
21	90	50	10	3.8E+06	1.3E+08
22	20	100	10	8.5E+05	7.3E+06
23	55	100	10	2.6E+06	4.7E+07
24	90	100	10	2.7E+06	8.5E+07
25	20	150	10	1.2E+05	1.4E+06
26	55	150	10	1.4E+06	1.8E+07
27	90	150	10	2.2E+06	5.8E+07
28	55	100	7	3.0E+06	4.5E+07
29	55	100	7	2.9E+06	4.2E+07
30	55	100	7	2.9E+06	4.4E+07

## 2. PRIEDAS

Skirtingų skaidymo procesų derinių įtaką susidarancio aerosolio kiekiui, eksperimentinis planas

Reaktoriaus galia, W	40		50		60		70		80	
Aerosolio koncentracija, #/cm <sup>3</sup>	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI
0. Tik ozonas	1.6E+06	1.7E+07	1.9E+06	2.5E+07	2.1E+06	3.4E+07	2.4E+06	4.5E+07	2.6E+06	4.8E+07
1. Katalizatorius (1/2)	3.5E+05	3.7E+06	6.0E+05	6.2E+06	7.7E+05	7.9E+06	1.1E+06	1.1E+07	1.1E+06	1.3E+07
2. Katalizatorius (1/2)+UV	2.5E+05	2.5E+06	4.6E+05	4.7E+06	6.7E+05	6.5E+06	9.3E+05	1.0E+07	1.0E+06	9.6E+06
3. Katalizatorius (2/2)	2.1E+05	2.4E+06	3.4E+05	3.9E+06	4.6E+05	5.0E+06	6.0E+05	6.7E+06	8.4E+05	8.7E+06
4. Katalizatorius (2/2)+UV	1.3E+05	1.6E+06	2.7E+05	3.0E+06	4.0E+05	4.2E+06	5.9E+05	6.2E+06	7.3E+05	7.0E+06
5. UV	1.3E+06	1.4E+07	1.9E+06	2.5E+07	2.2E+06	3.3E+07	2.5E+06	4.5E+07	2.9E+06	5.6E+07
6. Sorbentas	1.3E+06	1.1E+07	1.9E+06	2.0E+07	2.1E+06	2.7E+07	2.6E+06	3.8E+07	2.9E+06	4.8E+07
7. Sorbentas+UV	1.3E+06	1.1E+07	1.9E+06	1.9E+07	2.2E+06	2.6E+07	2.6E+06	3.5E+07	2.8E+06	3.9E+07
8. Katalizatorius (2/2)+sorbentas	2.8E+05	2.3E+06	4.4E+05	3.8E+06	5.7E+05	4.9E+06	8.4E+05	7.2E+06	1.1E+06	9.9E+06
9. Katalizatorius (2/2)+sorbentas+UV	3.2E+05	2.7E+06	4.7E+05	4.1E+06	6.2E+05	5.6E+06	8.8E+05	7.8E+06	1.2E+06	1.0E+07
10. Kat (2/2)+sorbentas+UV+HEPA	1.2E-01	2.1E+03							4.7E-01	5.0E+03

Skirtingų skaidymo procesų derinių įtaką susidarancio aerosolio kiekiui. Apskaičiuoti efektyvumai

Skaidymo etapas	Reaktoriaus galia, W									
	40		50		60		70		80	
	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI	SMPS	ELPI
0. Tik ozonas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1. Katalizatorius (1/2)	77.7	78.7	68.7	74.9	63.9	76.6	56.2	76.4	55.9	72.8
2. Katalizatorius (1/2)+UV	83.8	85.7	76.3	81.0	68.8	80.6	61.6	77.6	59.9	79.9
3. Katalizatorius (2/2)	86.2	85.9	82.3	84.4	78.6	85.2	75.3	85.3	67.7	81.8
4. Katalizatorius (2/2)+UV	91.6	90.9	85.9	87.9	81.4	87.7	75.4	86.4	71.8	85.5
5. UV	18.4	17.9	0.7	-1.5	-0.2	1.7	-3.8	1.1	-10.0	-17.5
6. AA	13.4	35.5	2.9	19.4	0.1	19.8	-8.1	16.5	-11.2	-1.1
7. AA+UV	17.0	38.1	2.3	21.6	-2.3	23.5	-6.3	23.9	-6.5	18.0
8. Katalizatorius (2/2)+AA	82.1	86.8	77.0	84.6	73.4	85.6	65.1	84.1	57.4	79.3
9. Katalizatorius (2/2)+AA+UV	79.6	84.6	75.5	83.3	71.0	83.4	63.5	82.9	54.4	78.2
10. Kat (2/2)+AA+UV+F	99.999992	99.98801							99.99998	99.98949

Priklusomas kintamasis: dN

Galia	Konc	(I) Debitas	(J) Debitas	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval for Difference	
							Lower Bound	Upper Bound
20	4	50	100	26453384.615 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	23194210.958	29712558.273
			150	26695061.538 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	23435887.881	29954235.196
		100	50	-26453384.615 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-29712558.273	-23194210.958
			150	241676.923	1656662.684	.884	-3017496.734	3500850.580
		150	50	-26695061.538 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-29954235.196	-23435887.881
			100	-241676.923	1656662.684	.884	-3500850.580	3017496.734
	7	50	100	55844615.385 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	52585441.727	59103789.042
			150	57955846.154 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	54696672.497	61215019.811
		100	50	-55844615.385 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-59103789.042	-52585441.727
			150	2111230.769	1656662.684	.203	-1147942.888	5370404.426
		150	50	-57955846.154 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-61215019.811	-54696672.497
			100	-2111230.769	1656662.684	.203	-5370404.426	1147942.888
10	50	100	48707692.308 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	45448518.651	51966865.965	
		150	54571538.462 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	51312364.804	57830712.119	
	100	50	-48707692.308 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-51966865.965	-45448518.651	
		150	5863846.154 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	2604672.497	9123019.811	
	150	50	-54571538.462 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-57830712.119	-51312364.804	
		100	-5863846.154 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-9123019.811	-2604672.497	
55	4	50	100	56916923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	53657749.420	60176096.734
			150	60652307.692 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	57393134.035	63911481.349
		100	50	-56916923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-60176096.734	-53657749.420
			150	3735384.615 <sup>*</sup>	1656662.684	.025	476210.958	6994558.273
		150	50	-60652307.692 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-63911481.349	-57393134.035
			100	-3735384.615 <sup>*</sup>	1656662.684	.025	-6994558.273	-476210.958
	7	50	100	82423076.923 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	79163903.266	85682250.580
			150	97460000.000 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	94200826.343	100719173.657
		100	50	-82423076.923 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-85682250.580	-79163903.266
			150	15036923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	11777749.420	18296096.734
		150	50	-97460000.000 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-100719173.657	-94200826.343
			100	-15036923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-18296096.734	-11777749.420
	10	50	100	63646153.846 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	60386980.189	66905327.503
			150	91946153.846 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	88686980.189	95205327.503
		100	50	-63646153.846 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-66905327.503	-60386980.189
			150	28300000.000 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	25040826.343	31559173.657
		150	50	-91946153.846 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-95205327.503	-88686980.189
			100	-28300000.000 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-31559173.657	-25040826.343
90	4	50	100	64923076.923 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	61663903.266	68182250.580
			150	74709230.769 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	71450057.112	77968404.426
		100	50	-64923076.923 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-68182250.580	-61663903.266
			150	9786153.846 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	6526980.189	13045327.503
		150	50	-74709230.769 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-77968404.426	-71450057.112
			100	-9786153.846 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-13045327.503	-6526980.189
	7	50	100	63984615.385 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	60725441.727	67243789.042
			150	87176923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	83917749.420	90436096.734
		100	50	-63984615.385 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-67243789.042	-60725441.727
			150	23192307.692 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	19933134.035	26451481.349
		150	50	-87176923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-90436096.734	-83917749.420
			100	-23192307.692 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-26451481.349	-19933134.035
	10	50	100	45792307.692 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	42533134.035	49051481.349
			150	72376923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	69117749.420	75636096.734
		100	50	-45792307.692 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-49051481.349	-42533134.035
			150	26584615.385 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	23325441.727	29843789.042
		150	50	-72376923.077 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-75636096.734	-69117749.420
			100	-26584615.385 <sup>*</sup>	1656662.684	.000	-29843789.042	-23325441.727

Priklausomas kintamasis: dN									
Debitas	Konc	(I) Galia	(J) Galia	Mean Difference			95% Confidence Interval for Difference		
				(I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound	
50	4	20	55	-36100000.000*	1656662.684	.000	-39359173.657	-32840826.343	
			90	-58169230.769*	1656662.684	.000	-61428404.426	-54910057.112	
		55	20	36100000.000*	1656662.684	.000	32840826.343	39359173.657	
			90	-22069230.769*	1656662.684	.000	-25328404.426	-18810057.112	
		90	20	58169230.769*	1656662.684	.000	54910057.112	61428404.426	
			55	22069230.769*	1656662.684	.000	18810057.112	25328404.426	
	7	20	55	-48392307.692*	1656662.684	.000	-51651481.349	-45133134.035	
			90	-60907692.308*	1656662.684	.000	-64166865.965	-57648518.651	
		55	20	48392307.692*	1656662.684	.000	45133134.035	51651481.349	
			90	-12515384.615*	1656662.684	.000	-15774558.273	-9256210.958	
		90	20	60907692.308*	1656662.684	.000	57648518.651	64166865.965	
			55	12515384.615*	1656662.684	.000	9256210.958	15774558.273	
100	4	20	55	-54461538.462*	1656662.684	.000	-57720712.119	-51202364.804	
			90	-74230769.231*	1656662.684	.000	-77489942.888	-70971595.574	
		55	20	54461538.462*	1656662.684	.000	51202364.804	57720712.119	
			90	-19769230.769*	1656662.684	.000	-23028404.426	-16510057.112	
		90	20	74230769.231*	1656662.684	.000	70971595.574	77489942.888	
			55	19769230.769*	1656662.684	.000	16510057.112	23028404.426	
	7	4	20	55	-5636461.538*	1656662.684	.001	-8895635.196	-2377287.881
				90	-19699538.462*	1656662.684	.000	-22958712.119	-16440364.804
			55	20	5636461.538*	1656662.684	.001	2377287.881	8895635.196
				90	-14063076.923*	1656662.684	.000	-17322250.580	-10803903.266
			90	20	19699538.462*	1656662.684	.000	16440364.804	22958712.119
				55	14063076.923*	1656662.684	.000	10803903.266	17322250.580
7		20	55	-21813846.154*	1656662.684	.000	-25073019.811	-18554672.497	
			90	-52767692.308*	1656662.684	.000	-56026865.965	-49508518.651	
		55	20	21813846.154*	1656662.684	.000	18554672.497	25073019.811	
			90	-30953846.154*	1656662.684	.000	-34213019.811	-27694672.497	
		90	20	52767692.308*	1656662.684	.000	49508518.651	56026865.965	
			55	30953846.154*	1656662.684	.000	27694672.497	34213019.811	
150	4	20	55	-2142753.846	1656662.684	.197	-5401927.503	1116419.811	
			90	-10155061.538*	1656662.684	.000	-13414235.196	-6895887.881	
		55	20	2142753.846	1656662.684	.197	-1116419.811	5401927.503	
			90	-8012307.692*	1656662.684	.000	-11271481.349	-4753134.035	
		90	20	10155061.538*	1656662.684	.000	6895887.881	13414235.196	
			55	8012307.692*	1656662.684	.000	4753134.035	11271481.349	
	7	4	20	55	-8888153.846*	1656662.684	.000	-12147327.503	-5628980.189
				90	-31686615.385*	1656662.684	.000	-34945789.042	-28427441.727
			55	20	8888153.846*	1656662.684	.000	5628980.189	12147327.503
				90	-22798461.538*	1656662.684	.000	-26057635.196	-19539287.881
			90	20	31686615.385*	1656662.684	.000	28427441.727	34945789.042
				55	22798461.538*	1656662.684	.000	19539287.881	26057635.196
10		20	55	-17086923.077*	1656662.684	.000	-20346096.734	-13827749.420	
			90	-56425384.615*	1656662.684	.000	-59684558.273	-53166210.958	
		55	20	17086923.077*	1656662.684	.000	13827749.420	20346096.734	
			90	-39338461.538*	1656662.684	.000	-42597635.196	-36079287.881	
		90	20	56425384.615*	1656662.684	.000	53166210.958	59684558.273	
			55	39338461.538*	1656662.684	.000	36079287.881	42597635.196	

Priklusomas kintamasis: dN

Galia	Debitas	(I) Konc	(J) Konc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval for Difference		
							Lower Bound	Upper Bound	
20	50	4	7	-31907692.308 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-35166865.965	-28648518.651	
			10	-29123076.923 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-32382250.580	-25863903.266	
		7	4	31907692.308 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	28648518.651	35166865.965	
			10	2784615.385	1656662.684	.094	-474558.273	6043789.042	
		10	4	29123076.923 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	25863903.266	32382250.580	
			7	-2784615.385	1656662.684	.094	-6043789.042	474558.273	
	100	4	7	-2516461.538	1656662.684	.130	-5775635.196	742712.119	
			10	-6868769.231 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-10127942.888	-3609595.574	
		7	4	2516461.538	1656662.684	.130	-742712.119	5775635.196	
			10	-4352307.692 <sup>†</sup>	1656662.684	.009	-7611481.349	-1093134.035	
		10	4	6868769.231 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	3609595.574	10127942.888	
			7	4352307.692 <sup>†</sup>	1656662.684	.009	1093134.035	7611481.349	
150	4	7	10	-646907.692	1656662.684	.696	-3906081.349	2612265.965	
			10	-1246600.000	1656662.684	.452	-4505773.657	2012573.657	
		7	4	646907.692	1656662.684	.696	-2612265.965	3906081.349	
			10	-599692.308	1656662.684	.718	-3858865.965	2659481.349	
		10	4	1246600.000	1656662.684	.452	-2012573.657	4505773.657	
			7	599692.308	1656662.684	.718	-2659481.349	3858865.965	
	55	50	4	7	-44200000.000 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-47459173.657	-40940826.343
				10	-47484615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-50743789.042	-44225441.727
			7	4	44200000.000 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	40940826.343	47459173.657
				10	-3284615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.048	-6543789.042	-25441.727
			10	4	47484615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	44225441.727	50743789.042
				7	3284615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.048	25441.727	6543789.042
100	4	7	10	-18693846.154 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-21953019.811	-15434672.497	
			10	-40755384.615 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-44014558.273	-37496210.958	
		7	4	18693846.154 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	15434672.497	21953019.811	
			10	-22061538.462 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-25320712.119	-18802364.804	
		10	4	40755384.615 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	37496210.958	44014558.273	
			7	22061538.462 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	18802364.804	25320712.119	
	150	4	7	-7392307.692 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-10651481.349	-4133134.035	
			10	-16190769.231 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-19449942.888	-12931595.574	
		7	4	7392307.692 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	4133134.035	10651481.349	
			10	-8798461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-12057635.196	-5539287.881	
		10	4	16190769.231 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	12931595.574	19449942.888	
			7	8798461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	5539287.881	12057635.196	
90	50	4	7	-34646153.846 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-37905327.503	-31386980.189	
			10	-45184615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-48443789.042	-41925441.727	
		7	4	34646153.846 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	31386980.189	37905327.503	
			10	-10538461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-13797635.196	-7279287.881	
		10	4	45184615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	41925441.727	48443789.042	
			7	10538461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	7279287.881	13797635.196	
	100	4	7	-35584615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-38843789.042	-32325441.727	
			10	-64315384.615 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-67574558.273	-61056210.958	
		7	4	35584615.385 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	32325441.727	38843789.042	
			10	-28730769.231 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-31989942.888	-25471595.574	
		10	4	64315384.615 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	61056210.958	67574558.273	
			7	28730769.231 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	25471595.574	31989942.888	
	150	4	7	-22178461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-25437635.196	-18919287.881	
			10	-47516923.077 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-50776096.734	-44257749.420	
		7	4	22178461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	18919287.881	25437635.196	
			10	-25338461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	-28597635.196	-22079287.881	
		10	4	47516923.077 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	44257749.420	50776096.734	
			7	25338461.538 <sup>†</sup>	1656662.684	.000	22079287.881	28597635.196	

## Pradinės skaičiavimų konstantos ir dydžiai

Parametras	Žymėjimas	Dydis
Jonų gaudymo elektrodo įtampa	U, kV	6.9
Įkrovimo zonos tūris	$V_{\text{ikro}}, \text{cm}^3$	6.28
Dalelės diametras	$D_p, \text{nm}$	50 - 500
Oro debitas	Q, l/min	1 - 10
Dujų temperatūra	T, K	293
Elektrono krūvis	e, C	1.6E-19
Vidutinis jonų greitis	$c_i, \text{m/s}$	240
Vakumo skvarba	$\epsilon_0, \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$	8.85E-12
Dalelės skvarba	$\epsilon_p$	2
Dinaminė dujų klampa	$\mu, \text{Pa} \cdot \text{s}$	1.83E-05
Krūvio laisvasis kelias	$\lambda, \text{nm}$	66.5
Jonų gaudymo zonos ilgis	L, m	0.02
Jonų tankis įkrovimo zonoje	$N_i, \#/\text{cm}^3$	1.9E+14
Išorinio elektrodo spindulys	$r_{\text{outer}}, \text{cm}$	2
Jonų gaudymo elektrodo spindulys	$r_{\text{inner}}, \text{cm}$	1
Bolcmano konstanta	k, J/K	1.38E-23
Išlydžio adatos spindulys	r, m	0.00005
Laido šiurkštumo faktorius	$m_0$	1
Kritinis išlydžio gradientas ore	$E_0$	3.10E+06
Oro tankio faktorius	$\delta$	1

## Apskaičiuoti dalelės įgaunami krūviai

Dp, nm	Debitas, l/min			
	1	3	5	10
10	0.2	0.2	0.1	0.1
30	1.0	0.7	0.6	0.4
50	1.8	1.4	1.2	0.9
100	4.2	3.3	2.9	2.4
150	6.8	5.5	4.9	4.0
200	9.6	7.8	6.9	5.8
250	12.4	10.2	9.1	7.7
300	15.4	12.7	11.4	9.7
350	18.4	15.2	13.7	11.8
400	21.5	17.8	16.1	13.9
450	24.6	20.5	18.6	16.0
500	27.7	23.2	21.1	18.2

## Apskaičiuotos elektrometro srovės, fA.

Dp, nm	Debitas, l/min			
	1	3	5	10
50	10.0924	2807.728	8992.133	24775.04
100	142.4123	11054.17	30349.42	78695.06
150	394.6358	22255.88	59178.55	152940.2
200	663.4899	35005.24	93264.61	244069.4
250	884.3971	48448.01	131176.6	349843.5
300	1034.373	62021.55	171863.6	468552.7
350	1113.881	75341.72	214506.9	598789.6
400	1133.7	88142.45	258445.6	739344.4
450	1107.68	100239.6	303134.5	889148
500	1049.231	111507.7	348116.4	1047236

## Apskaičiuoti įkrovimo efektyvumo koeficientai (Pn) ir tarpiniai dydžiai

Dp, nm	Q = 3 l/min						
	nd	nc	nt	Pch	Ptrap	Pt	Pn
50	1.38	0.44	1.82	0.23	0.85	0.19	0.35
100	3.32	1.75	5.07	0.31	0.88	0.27	1.38
150	5.47	3.94	9.42	0.33	0.89	0.30	2.78
200	7.77	7.00	14.78	0.33	0.89	0.30	4.38
250	10.17	10.94	21.12	0.32	0.88	0.29	6.06
300	12.65	15.76	28.42	0.31	0.88	0.27	7.75
350	15.21	21.45	36.67	0.29	0.87	0.26	9.42
400	17.82	28.02	45.85	0.28	0.87	0.24	11.02
450	20.48	35.46	55.95	0.26	0.86	0.22	12.53
500	23.19	43.78	66.98	0.24	0.85	0.21	13.94

Dp, nm	Q = 5 l/min						
	nd	nc	nt	Pch	Ptrap	Pt	Pn
50	1.18	0.43	1.61	0.46	0.92	0.42	0.67
100	2.91	1.72	4.63	0.53	0.93	0.49	2.28
150	4.85	3.87	8.73	0.54	0.94	0.51	4.44
200	6.94	6.89	13.83	0.54	0.94	0.51	6.99
250	9.12	10.76	19.89	0.53	0.93	0.49	9.84
300	11.40	15.49	26.90	0.51	0.93	0.48	12.89
350	13.74	21.09	34.83	0.50	0.93	0.46	16.09
400	16.14	27.54	43.69	0.48	0.92	0.44	19.38
450	18.59	34.86	53.46	0.46	0.92	0.43	22.74
500	21.09	43.03	64.14	0.44	0.92	0.41	26.11

<b>Dp, nm</b>	<b>Q = 10 l/min</b>						
	<b>nd</b>	<b>nc</b>	<b>nt</b>	<b>Pch</b>	<b>Ptrap</b>	<b>Pt</b>	<b>Pn</b>
50	0.92	0.41	1.33	0.72	0.97	0.70	0.93
100	2.36	1.65	4.01	0.76	0.97	0.74	2.95
150	4.02	3.72	7.73	0.76	0.97	0.74	5.74
200	5.81	6.61	12.42	0.76	0.97	0.74	9.15
250	7.72	10.32	18.04	0.75	0.97	0.73	13.12
300	9.70	14.86	24.57	0.74	0.97	0.72	17.57
350	11.76	20.23	31.99	0.73	0.97	0.70	22.45
400	13.87	26.42	40.30	0.71	0.96	0.69	27.73
450	16.04	33.44	49.49	0.70	0.96	0.67	33.34
500	18.25	41.28	59.54	0.69	0.96	0.66	39.27