



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas jonizacinėmis technologijomis

Baigiamasis magistro projektas

Patricija Kirvelaitytė

Projekto autorė

Dr. Martynas Tichonovas

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas jonizacinėmis technologijomis

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

Patricija Kirvelaitytė

Projekto autorė

Dr. Martynas Tichonovas

Vadovas

Prof. Dr. Gintaras Denafas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Patricija Kirvelaitytė

Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas jonizacinėmis technologijomis

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Patricija Kirvelaitytė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Kirvelaitytė, Patricija. Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas jonizacinėmis technologijomis. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Martynas Tichonovas; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: jonizacijos efektyvumas, mikrobiologinė oro tarša, oro kokybė, anglies pluošto elektrodai, ozono susidarymas, aerozolių mažinimas, oro valymo efektyvumas.

Kaunas, 2026. 63 p.

Santrauka

Uždaroje patalpose oro kokybė yra tiesiogiai susijusi su žmogaus sveikata, nes ore esančios kietosios dalelės, bakterijos, grybiniai mikroorganizmai ir kiti bioaerozoliai gali prisidėti prie kvėpavimo takų ligų, alerginių reakcijų ir infekcijų plitimo. Ši problema yra ypač aktuali gydymo, ugdymo ir kitose viešose įstaigose, kuriose patalpomis naudojasi daug žmonių, o oro srauto apykaita ne visada užtikrina pakankamą mikrobiologinio užterštumo mažinimą. Dėl šios priežasties didėja paklausa papildomų, efektyvių ir tvarių oro valymo technologijų. Viena iš tokių technologijų yra oro jonizacija, kurios metu generuojamas teigiamų ir neigiamų jonų oro srautas, kuris gali sąveikauti su ore esančiomis kietosiomis dalelėmis ir mikroorganizmais.

Šio baigiamojo magistro projekto tikslas – optimizuoti oro jonizacijos elektrodų medžiagą ir konfigūraciją, siekiant maksimalaus jonų susidarymo efektyviam oro mikrobiologinėms ir kietųjų dalelių taršos mažinimui, kartu siekiant minimalaus ozono kiekio susidarymo. Tyrimo metu buvo suprojektuotas ir pagamintas oro jonizatorius, išbandytos skirtingos elektrodų medžiagos (volframas, varis, anglies pluoštas) bei jų konfigūracijos, įvertinta generuojamų jonų koncentracija, ozono susidarymas, mikrobiologinio oro užterštumo ir kietųjų dalelių skaičiaus mažėjimas naudojant skirtingas aukštas įtampas. Eksperimentuose buvo taikomi skirtingi jonizatoriaus poliarumai: teigiamas, neigiamas ir bipolinis. Mikroorganizmai buvo vertinami po inkubacijos skaičiuojant ant Petri lėkštelių užaugusias bakterijų kolonijas, o rezultatai perskaičiuojami į kolonijas sudarančių vienetų koncentracijas mililitre ir kubiniame metre. Duomenų analizei buvo naudojami aritmetiniai vidurkiai, standartiniai nuokrypiai, normalizuotos reikšmės, mažinimo efektyvumai ir eksponentinio mažėjimo aproksimacijos.

Atlikus elektrodų medžiagų ir konfigūracijų palyginimą nustatyta, kad tolimesniems bandymams tinkamiausi yra anglies pluošto elektrodai. Šie elektrodai pasižymėjo stabilium jonų generavimu ir pakankamai didele jonų koncentracija naudojant mažesnes įtampas, ypač taikant neigiamą ir bipolinį poliarumą. Tolimesniems tyrimams pasirinktos 4 kV ir 7 kV įtampos, nes jos leido palyginti žemesnės ir didesnės darbinės įtampos poveikį. Ozono matavimai parodė, kad didėjant įtampai didėja ir ozono koncentracija. Esant 4 kV įtampai ozono kiekis išliko mažas, o naudojant 7 kV ir 10 kV atvejais ozono koncentracija viršijo saugią ribą, todėl praktiniam taikymui būtina atsižvelgti į ozono susidarymo riziką ir pasirinkti tinkamas darbinės įtampas.

Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo bandymai parodė, kad jonizacijos metu sumažėjo mikroorganizmų koncentraciją ore, lyginant su kontroliniu bandymu. Po 40 min poveikio visų jonizatoriaus poliarumų efektyvumas viršijo 80 %, o po 60 min priartėjo prie 95–100 %. Didžiausias efektyvumas nustatytas taikant neigiamo poliarumo 7 kV įtampą – $99,57 \pm 0,18$ %. Kietųjų dalelių

šalinimo eksperimente, naudojant 7 kV įtampą, duomenys buvo normalizuoti ir analizuoti pagal dalelių skaičiaus mažėjimo kitimą laike. Gauti rezultatai parodė, kad jonizacija paspartina kietųjų dalelių skaičiaus mažėjimą, o eksponentinio mažėjimo funkcijos koeficientai leidžia palyginti skirtingų poliarumų poveikį.

Apibendrinant galima teigti, kad jonizacinės technologijos gali būti taikomos mikrobiologiniam oro užterštumui ir kietųjų dalelių skaičiui mažinti, tačiau jų praktinis naudojimas turi būti vertinamas atsižvelgiant ne tik į oro valymo efektyvumą, bet ir į ozono susidarymą. Tyrimo rezultatai rodo, kad anglies pluošto elektrodai yra tinkama medžiaga jonizatoriui, o neigiamo poliarumo režimas pasižymi didžiausiu mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumu. Saugiam taikymui rekomenduojama optimizuoti darbinę įtampą taip, kad būtų užtikrinamas pakankamas jonų generavimas ir neviršijamos saugios ozono koncentracijos ribos.

Kirvelaitytė, Patricija. The Abatement of Microbial Air Pollution Using Ionization Technologies. Master's Final Degree Project supervisor dr. Martynas Tichonovas; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: ionization efficiency, microbiological air contamination, air quality, carbon fiber electrodes, ozone formation, aerosol reduction, air purification efficiency.

Kaunas, 2026. 63 pages.

Summary

In indoor environments, air quality is directly linked to human health, as airborne particulate matter, bacteria, fungal microorganisms and other bioaerosols can contribute to respiratory diseases, allergic reactions and the spread of infections. This problem is particularly intense in healthcare, educational and other public institutions where many people use the premises and air circulation does not always ensure sufficient reduction of microbiological contamination. For this reason, there is a growing demand for additional, effective and sustainable air purification technologies. One such technology is air ionization, which generates a stream of positive and negative ions that can interact with airborne particles and microorganisms.

The objective of this master's thesis is to optimize the material and configuration of air ionization electrodes to maximize ion generation for effective reduction of microbiological and particulate matter pollution in the air, while minimizing ozone production. During the study, an air ionizer was designed and manufactured, different electrode materials (tungsten, copper, carbon fiber) and their configurations were tested and the concentration of generated ions, ozone formation, reduction in microbiological air contamination and the number of particulate matter using different high voltages. Different ionizer polarities were applied in the experiments: positive, negative and bipolar. Microorganisms were assessed after incubation by counting the bacterial colonies that had grown on Petri dishes and the results were converted into concentrations of colony-forming units per milliliter and per cubic meter. Arithmetic means, standard deviations, normalized values, reduction efficiencies and exponential decay approximations were used for data analysis.

A comparison of electrode materials and configurations revealed that carbon fiber electrodes are the most suitable for further testing. These electrodes were characterized by stable ion generation and a sufficiently high ion concentration at lower voltages, particularly when using negative and bipolar polarities. Voltages of 4 kV and 7 kV were selected for further studies, as they allowed for a comparison of the effects of lower and higher operating voltages. Ozone measurements showed that ozone concentration increases as voltage increases. At 4 kV, the ozone level remained low, while at 7 kV and 10 kV, the ozone concentration exceeded safe limits, therefore, for practical applications, it is necessary to consider the risk of ozone formation and select appropriate operating voltages.

Tests to reduce microbiological air contamination showed that the concentration of microorganisms in the air decreased during ionization compared to the control test. After 40 minutes of exposure, the efficiency of all ionizer polarities exceeded 80 % and after 60 minutes, it approached 95–100 %. The highest efficiency was observed when applying a 7 kV voltage with negative polarity – $99,57 \pm 0,18$ %. In the experiment on the removal of particulate matter using a 7 kV voltage, the data were

normalized and analysed based on the change in the number of particles over time. The results showed that ionization accelerates the decrease in the number of particulate matter and the coefficients of the exponential decay function allow for a comparison of the effects of different polarities.

In summary, it can be stated that ionization technologies can be applied to reduce microbiological air contamination and the number of solid particles, however, their practical use must be evaluated not only in terms of air purification efficiency but also in terms of ozone formation. The results of the study show that carbon fiber electrodes are a suitable material for an ionizer and the negative polarity mode exhibits the highest efficiency in reducing microbiological air contamination. For safe operation, it is recommended to optimize the operating voltage so as to ensure sufficient ion generation while not exceeding safe ozone concentration limits.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Literatūros analizė.....	14
1.1. Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas, poveikis žmogaus sveikatai, mikrobiologinio užterštumo nustatymo metodai	14
1.2. Plazminių – jonizacinių technologijų panaudojimas oro mikrobiologiniam užterštumui sumažinti.....	17
1.3. Ore esančių jonų ir ozono kiekio matavimo metodai	20
1.4. Nagrinėjamų technologijų poveikio mikroorganizmams mechanizmai.....	20
1.5. Taikymas praktikoje ir eksperimentiniai tyrimai	22
1.6. Aplinkosaugos ir reguliavimo aspektai	28
1.7. Privalumai ir trūkumai prieš alternatyvius metodus.....	28
1.8. Literatūros analizės apibendrinimas	30
2. Tyrimų metodika	31
2.1. Tyrimo planas	31
2.2. Naudota įranga.....	31
2.3. Naudotos medžiagos.....	32
2.4. Eksperimento eiga	32
2.4.1. Jonizatoriaus ir bandymo patalpos paruošimas	32
2.4.2. Elektrodo gamyba ir jų bandymas	34
2.4.3. Ozono koncentracijos matavimas.....	34
2.4.4. Kietųjų dalelių šalinimo eksperimentas.....	35
2.4.5. Pasiruošimas mikrobiologinei bandymo daliai	35
2.4.6. Aukštos įtampos šaltinių patikrinimas.....	36
2.4.7. Mikrobiologinio bandymo dalis ore	36
2.5. Panaudotų Petri lėkštelių šalinimas	37
2.6. Rezultatų analizė	37
3. Rezultatai ir jų aptarimas.....	39
3.1. Aukštos įtampos šaltinių patikrinimas.....	39
3.2. Bandymas su skirtingomis elektrodo medžiagomis	39
3.3. Ozono matavimai ir rezultatų įvertinimas	43
3.4. Mikrobiologinis bandymas ore.....	46
3.5. Kietųjų dalelių šalinimo eksperimentas.....	54
Išvados	57
Literatūros sąrašas	58

Lentelių sąrašas

1 lentelė: Alternatyvių priemonių ir įrenginių palyginimas su jonizacinėmis technologijomis	30
2 lentelė. Išmatuotos aukštos įtampos šaltinio vertės.....	39
3 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant volframo elektrodus skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis	39
4 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant vario elektrodus, kurių vielutės yra storos ir arti viena kitos, skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis	40
5 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant vario elektrodus, kurių vielutės yra storos ir toli viena kitos, skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis	40
6 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant vario elektrodus, kurių vielutės plonos, skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis	41
7 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant anglies pluošto elektrodus skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis	41
8 lentelė. Išmatuota generuojamo ozono koncentracija, kai naudojami anglies pluošto elektrodai ir 4 kV skirtingų poliarumų įtampa.....	44
9 lentelė. Išmatuota generuojamo ozono koncentracija, kai naudojami anglies pluošto elektrodai ir 7 kV skirtingų poliarumų įtampa.....	44
10 lentelė. Išmatuota generuojamo ozono koncentracija, kai naudojami anglies pluošto elektrodai ir 10 kV skirtingų poliarumų įtampa.....	45
11 lentelė. Suskaičiuotos užaugusios bakterijų kolonijos, apskaičiuoti kolonijų formavimosi vienetai mililitre, mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas ir šių dydžių paklaidos, naudojant 4 kV įvairių poliarumų įtampą ir jonizatoriaus nenaudojant visai	47
12 lentelė. Suskaičiuotos užaugusios bakterijų kolonijos, apskaičiuoti kolonijų formavimosi vienetai mililitre, mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas ir šių dydžių paklaidos, naudojant 7 kV įvairių poliarumų įtampą	49
13 lentelė. Apskaičiuotas kolonijų formavimo vienetai kubiniame metre ištraukto oro, naudojant 4 kV ir 7 kV teigiamo, neigiamo, bipolinio poliarumo įtampas ir nenaudojant jonizatoriaus visai.....	50
14 lentelė. Gautos kiekvieno jonizatoriaus režimo eksponentinio mažėjimo funkcijos, charakteringieji mažėjimo laikai, mažėjimo koeficientai ir determinacijos koeficientai	55

Paveikslų sąrašas

1 pav. Oro impaktorių tipai: a) mikrobinių oro dalelių surinkimas agarų plokštele; b) mikrobinių oro dalelių surinkimas skysčiu [6 p. 3]	15
2 pav. Cikloninis mėginių paėmimo būdas: a) schematiškai pavaizduotas mėginio paėmimas; b) cikloninis mėginių ėmimo prietaisas [6 p. 4]	16
3 pav. Elektrostatinio mėginių ėmimo būdo scheminis pavaizdavimas [6 p. 6].....	17
4 pav. Deguonies molekulės skilimas elektriniame lauke ir ozono molekulių formavimasis [12 p. 3]	19
5 pav. Klasterių formavimasis aplink mikroorganizmus ir virusus [18 p. 3].....	21
6 pav. Vaizdas į bandymų kamerą iš viršaus ir jos išdėstymas: a) pažymėtos bandymo įrangos lokacijos ir mėginių ėmimo vietos, C1–C5 – ant kameros grindų vienas šalia kito padėti nusodinimo mėginiai; b) imitacinė HVAC schema ir atitinkantys išmatavimai. Vienetai paversti iš pėdų į metrus [30 p. 3]	23
7 pav. Reanimacijos kambario išplanavimas žiūrint iš viršaus, ozono generatoriaus vieta ir ozono detektoriaus lokacija palatoje [31 p. 2].....	25
8 pav. Koaksialinio DBD įrenginio schema [21 p. 3]	26
9 pav. Eksperimentinės patalpos vaizdas iš viršaus [21 p. 4]	27
10 pav. Elektromagnetinių bangų skalė įskaitant visas UV spinduliuotės rūšis [15 p. 12]	29
11 pav. Tyrimo planas.....	31
12 pav. Jonizatoriaus brėžinys, nubraižytas „FreeCad“ programoje	32
13 pav. Bandymo patalpa, naudota atlikti eksperimentams	33
14 pav. Supaprastinta bandymo schema, kai naudojamas bipolinio režimo jonizatoriaus tipas.....	33
15 pav. Pagamintos elektrodų kombinacijos: a) vario elektrodai, pagaminti iš plonų vielučių; b) anglies pluošto elektrodai, pagaminti iš anglies pluošto siūlų; c) vario elektrodai, pagaminti iš storų vielučių, kurios yra toli viena nuo kitos (kai išorinės vielutės atlenkiamos 90 ° nuo centrinės padėties)	34
16 pav. Maišas, skirtas biologinėms atliekoms šalinti	37
17 pav. Skirtingų elektrodo medžiagų generuojamų jonų koncentracijos priklausomybė nuo naudojamos įtampos, kai naudojamas teigiamas jonizatoriaus režimas.....	42
18 pav. Skirtingų elektrodo medžiagų generuojamų jonų koncentracijos priklausomybė nuo naudojamos įtampos, kai naudojamas neigiamas jonizatoriaus režimas.....	42
19 pav. Skirtingų elektrodo medžiagų generuojamų jonų koncentracijos priklausomybė nuo naudojamos įtampos, kai naudojamas bipolinis jonizatoriaus režimas	43
20 pav. Ozono koncentracijos kitimas laike, naudojant skirtingus jonizatoriaus režimus bei 4 kV, 7 kV ir 10 kV įtampų vertes	46
21 pav. Gautas Petri lėkštelės su užaugusiomis <i>L. casei</i> bakterijų kolonijomis, naudojant teigiamo poliarumo 4 kV įtampą, gautas mėginys neskiestas: a) po 0 min; b) po 20 min; c) po 40 min; d) po 60 min.....	46
23 pav. Gautas Petri lėkštelės su užaugusiomis <i>L. casei</i> bakterijų kolonijomis, naudojant bipolinio poliarumo 4 kV įtampą, gautas mėginys neskiestas: a) po 0 min; b) po 20 min; c) po 40 min; d) po 60 min.....	47
22 pav. Gautas Petri lėkštelės su užaugusiomis <i>L. casei</i> bakterijų kolonijomis, naudojant neigiamo poliarumo 4 kV įtampą, gautas mėginys neskiestas: a) po 0 min; b) po 20 min; c) po 40 min; d) po 60 min.....	47

24 pav. Kolonijų formavimosi vienetų mililitre kitimas laike, naudojant 4 kV ir 7 kV įtampas, kai jonizatorius veikia skirtingai režimais: a) bendras kitimas laike nuo 0 iki 60 min; b) kitimas nuo 40 iki 60 min.....	52
25 pav. Mikroorganizmų koncentracijos kitimas laike, kai naudojamas 4 kV ir 7 kV įvairių poliarumų jonizatoriaus režimai.....	53
26 pav. Jonizacijos mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumo kitimas laike, naudojant 4 kV ir 7 kV įtampas, kai jonizatorius veikia skirtingai režimais: a) bendras kitimas laike nuo 0 iki 60 min; b) kitimas nuo 40 iki 60 min	53
27 pav. Normalizuotas kietųjų dalelių skaičiaus kitimas laike naudojant 7 kV įvairių poliarumų jonizatorių, bei nenaudojant jonizatoriaus visai	54

Įvadas

Vis daugiau ir daugiau žmonių miršta nuo įvairiausių ligų, patogenų, bakterijų ir pelėsių, pasklidusių ore. Pelėsis gali sukelti alergijas, kvėpavimo sutrikimus, kosėjimą. Kiekvienas žmogus turi teisę į švarų ir neužterštą orą. Orą, kuriuo galėtų kvėpuoti be baimės, kad pakenks savo sveikatai. COVID-19 pandemija, besitęsianti iki šiol, sezoniniai gripo antplūdžiai ir kitos oru plintančios ligos verčia susimąstyti apie oro kokybės gerinimo įrenginius, mikrobiologinio oro užterštumo mažinimą kasdieninėse patalpose. Gydymo įstaigose, ligoninėse ir net poliklinikose galima nustatyti dideles koncentracijas bakterijų, virusų ore, kurios gali sukelti ligą bei, kai kuriems žmonėms, mirtį.

Kai šiuolaikinis žmogus didžiąją savo laiko dalį praleidžia patalpose ir uždaroje erdvėje, pavyzdžiui, autobusuose, ofisuose, namuose, parduotuvėse, oro kokybė yra labai svarbi. Oro mikrobiologinio užterštumo sumažinimas gali padėti visuomenei apsaugoti nuo oru plintančių ligų ir infekcijų, net tuberkuliozės ir gripo.

Jonizacinės priemonės, pavyzdžiui, vienpoliai, bipoliniai jonizatoriai bei jų įvairūs tipai (adatiniai jonizatoriai ir t. t.) ir plazmos išlydžio įrenginiai gali pagerinti oro kokybę iki beveik 100 %. Jonizacinių prietaisų veikimo principas paremtas jonų gamyba, kurie prisijungia prie ore esančių dalelių ir mikroorganizmų taip nukenksmindami bei nusodindami juos ant paviršių.

Šiame darbe bus aptariamos jonizacinės priemonės, jų panaudojimas, pritaikymas kasdieniame gyvenime. Žinoma, kiekvienas įrenginys turi ir trūkumų, susidarantių šalutinių produktų, kurie kartais gali būti pavojingesni nei virusai ir bakterijos, pavyzdžiui, jonizacijos metu susidarantis ozonas. Taip pat, bus aptariamos ir alternatyvios priemonės siekiant sumažinti mikrobiologinį oro užterštumą, jų efektyvumus. Bus išsiaiškinta, kuri jonizatoriaus elektrodų medžiaga yra geriausia siekiant gauti didžiausią kiekį generuojamų jonų, taip pat ir mažiausią generuojamo ozono kiekį. Darbe bus nustatomas mikrobiologinio oro užterštumo bei kietųjų dalelių taršos mažinimo efektyvumas su skirtingais jonizatoriaus poliarumo tipais bei konfigūracijomis.

Šio darbo tikslas – optimizuoti oro jonizatoriaus įrenginio elektrodų medžiagos tipą ir konfigūraciją, siekiant maksimalaus jonų susidarymo efektyviam oro mikrobiologinėms ir kietųjų dalelių taršos mažinimui, kartu siekiant minimalaus ozono kiekio susidarymo.

Šio darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti teorinę literatūrą ir išsiaiškinti mikrobiologinio oro užterštumo nustatymo bei pagrindinius jonizacinius prietaisus;
2. išanalizuoti jonizacinių prietaisų veikimo principus ir mikrobiologinių dalelių bei aerosolinių patogenų nukenksminimo schemas;
3. sukurti ir išbandyti keičiamos medžiagos ir konfigūracijos (išsidėstymo) elektrodus skirtus oro jonizavimo įrenginiui, siekiant maksimalaus jonų generavimo ir mažiausio generuojamo ozono kiekio bandymų kameroje;
4. įvertinti jonų ir ozono generavimo lygius esant skirtingoms elektrodų konfigūracijoms ir elektrodų medžiagoms, juos palyginti tarpusavyje ir nustatyti optimaliausią įtampą;
5. įvertinti optimalios elektrodų konstrukcijos efektyvumą ir nustatyti efektyviausią įtampą bei jos poliarumą mikrobiologiniam oro užterštumui mažinti;

6. nustatyti efektyviausią įtampą ir jos poliarumą kietųjų dalelių skaičiui ore mažinti.

1. Literatūros analizė

1.1. Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas, poveikis žmogaus sveikatai, mikrobiologinio užterštumo nustatymo metodai

Pandemijos, kurios šį šimtmetį sukretė pasaulį įrodė, kad įvairios virusinės ar bakterinės ligos, plintančios oru yra ypač pavojingos. COVID-19, pradėjusi plisti 2019 metų pabaigoje, nusinešė daugybę žmonių gyvybių. Tuberkuliozė, jau daugelį metų žinoma kaip plintanti ir labai pavojinga plaučių liga, gripas bei daugelis kitų, ne tik sezoninių ligų, plinta oru. Be to, ne tik ligų sukėlėjai, bet ir pelėsis gali sukelti kvėpavimo sunkumų bei stiprias alergines reakcijas. Veikiamos gravitacinių jėgų, didesnės mikrobiologinės dalelės ore ilgai neišsilaiko – jos pasiekia paviršius ir ant jų nusėda kaip dulkės [1, 2]. Norint pagerinti gyvenimo kokybę, apsisaugoti nuo nepageidaujamų susirgimų, reikia užtikrinti tinkamą oro kokybę [2].

Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas yra svarbus uždavinys, siekiant pagerinti žmonių, ypač pacientų, būklę taikant oro kokybės gerinimo technologijas. Gerėjant gyvenimo kokybei ir didėjant galimybėms dirbti bei mokytis iš namų, žmonės apie 85 % laiko praleidžia uždaroje patalpose: namuose, biuruose, traukiniuose, lėktuvuose ir kitose vidaus erdvėse. Oro užterštumo didėjimas glaudžiai susijęs su nepakankamai vėdinamomis patalpomis. Tačiau vėdinimo sistemos, tokios kaip šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemos, dar vadinamos HVAC sistemomis (angl. *heating, ventilation and air conditioning*), gali ne tik išsausinti orą, bet ir sudaryti palankesnes sąlygas virusams plisti bei daugintis oro cirkuliacijos būdu. Naudojant šias sistemas nustatyta, kad gali padidėti bakterijų ir grybelių, pavyzdžiui, pelėsio, koncentracijos, kurios siejamos su didesniu ligų, tokių kaip bronchinė astma, tuberkuliozė ir gripas, plitimu [2, 3]. Taigi, mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas priklauso ne tik nuo vėdinimo, bet ir nuo papildomų technologijų, tokių kaip UV (ultravioletinių) spindulių, oro jonizacijos ir filtravimo sistemų, integracijos [2].

Įkvėpus oru plintančių patogenų, jie gali sukelti kvėpavimo takų infekcijas, apimančias nosį, ryklę, gerklą, trachėją, bronchus ir alveoles [4]. Alveolėse vyrauja drėgna ir šilta aplinka, kurioje gausu maistinių medžiagų, todėl galima daryti prielaidą, kad oru plintantys patogenai yra linkę kauptis apatiniuose kvėpavimo takuose. Siekiant efektyviai sumažinti šių patogenų kiekį kvėpuojamame ore, sumažinti jų pavojingumą ir apsaugoti sveikus žmones, turėtų būti diegiamos oru plintančių patogenų šalinimo technologijos, ypač sveikatos priežiūros ir patikros įstaigose, tokiose kaip ligoninės, poliklinikos ir klinikos [2, 5].

Yra trys pagrindiniai veiksniai, lemiantys patogenų plitimą oru: taršos šaltinis, plitimo kelias ir žmonių jautrumas. Uždaroje patalpose mikrobiologinės oro taršos plitimo keliai gali būti įvairūs. Patogenai gali sklisti iš atvirų kanalizacijos sistemų, pavyzdžiui, vonių, kriauklių ar tualetų, taip pat patekti į patalpas per vėdinimo angas. Sergantis žmogus patogenus ir virusines ligas gali platinti kalbėdamas, čiaudėdamas, kosėdamas ar kvėpuodamas. Be to, įvairūs paviršiai ir medžiagos, pavyzdžiui, rankšluosčiai ar kilimai, gali kaupti bakterijas ir taip prisidėti prie mikrobiologinės oro taršos plitimo patalpose [2, 5].

Iš išvardytų potencialių taršos šaltinių į aplinką dažniausiai patenka dulkės, lašeliai ir bioaerozoliai. Bioaerozoliai – tai ore esančios biologinės kilmės dalelės, kuriose gali būti tiek gyvų, tiek negyvų mikroorganizmų. Lašeliai, į orą patenkantys čiaudint ar kosint, dažniausiai pasklinda iki 2 m atstumu, nes jų dalelių skersmuo yra gana didelis, t. y., didesnis nei 500 µm. Tuo tarpu bioaerolių dalelės

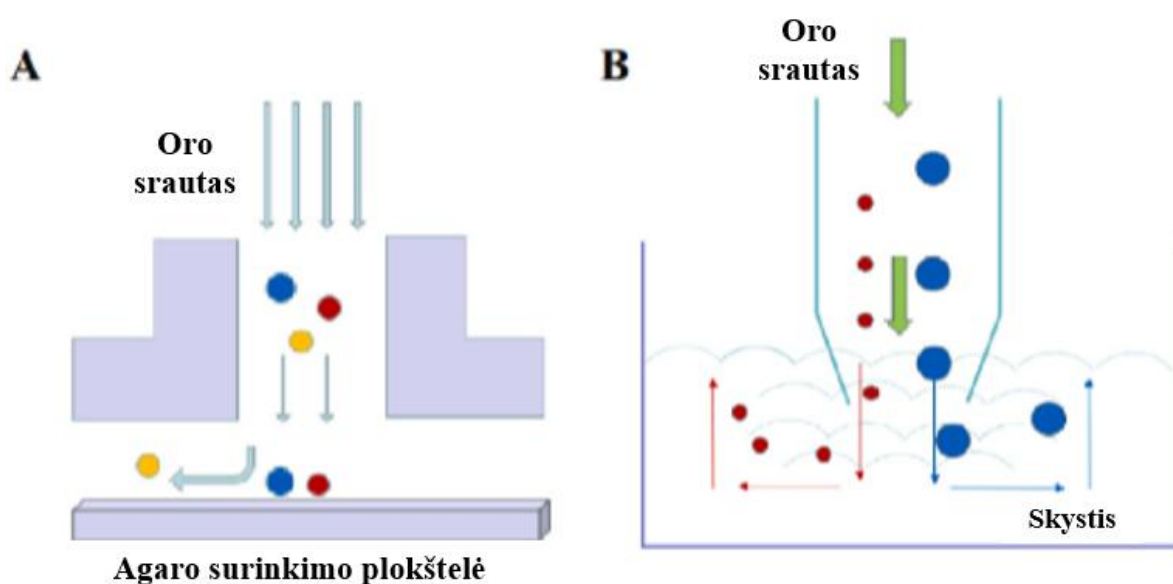
yra mažesnės, jų skersmuo siekia mažiau nei 100 μm , todėl jos gali pasklisti didesniais atstumais nei lašeliai [2, 5].

Bioaerozolių kontrolė yra labai aktuali kasdieniniame žmonių gyvenime dėl galimo infekcinio, alerginio ar toksinio jų poveikio. Oru plintantys patogenai kelia pavojų ne tik žmonėms ir jų populiacijoms, bet ir augalams. Dėl šių patogenų poveikio ant augalų lapų gali atsirasti dėmių, pradėti pūti stiebai ir pasireikšti kiti pažeidimai. Todėl mikrobiologinio oro užterštumo ir oro kokybės stebėjimas bei vertinimas yra esminis žingsnis, siekiant identifikuoti galimas kritines situacijas ir įgyvendinti tinkamas apsaugos priemones [6, 7].

Mikrobiologiniam oro užterštumui nustatyti gali būti taikomi pasyvūs ir aktyvūs metodai, tačiau iki šiol nėra vieningos nuomonės, kuris metodas yra tinkamiausias ir kaip turėtų būti interpretuojami gauti rezultatai. Svarbu pabrėžti, kad pasyvusis metodas yra standartizuotas pagal mikrobines oro taršos indeksą IMA (angl. *Index of Microbial Air Contamination*) [7].

Aktyvūs mikrobiologinio oro užterštumo nustatymo metodai leidžia įvertinti ir išmatuoti mikroorganizmų koncentraciją ore. Šie metodai yra pagrįsti specialių įrenginių naudojimu, kai žinomas arba nustatytas oro tūris nukreipiamas į maistinių medžiagų turinčią terpę. Gauti rezultatai gali būti išreikšiami kolonijas sudarančiais vienetais viename kubiniame metre oro, t. y., CFU/m³. Aktyviam metodui įgyvendinti gali būti naudojami įvairūs prietaisai: oro impaktoriai, impingeriai, išcentriniai mėginių ėmimo įrenginiai, filtravimo sistemos, elektrosstatiniai ir cikloniniai mėginių ėmimo prietaisai [6, 7].

Oro impaktorius – tai prietaisas, kurio veikimas pagrįstas mikrobinių dalelių inercijos poveikiu. Taikant šį metodą, oras nukreipiamas statmenai ir vertikaliai patenka ant agarų plokštelių. Oro srautu pernešamos mikrobines dalelės, kurių skersmuo yra didesnis už nustatytą ribinį skersmenį, yra sulaikomos ant terpės paviršiaus (1a pav.) [6, 8]. Tokie impaktoriai yra vieni dažniausiai naudojamų prietaisų mikrobiologinio oro užterštumo mėginiams paimti. Šis metodas leidžia ne tik nustatyti mikroorganizmų koncentraciją ore, bet ir įvertinti mikrobinių dalelių pasiskirstymą pagal skersmenį [6].

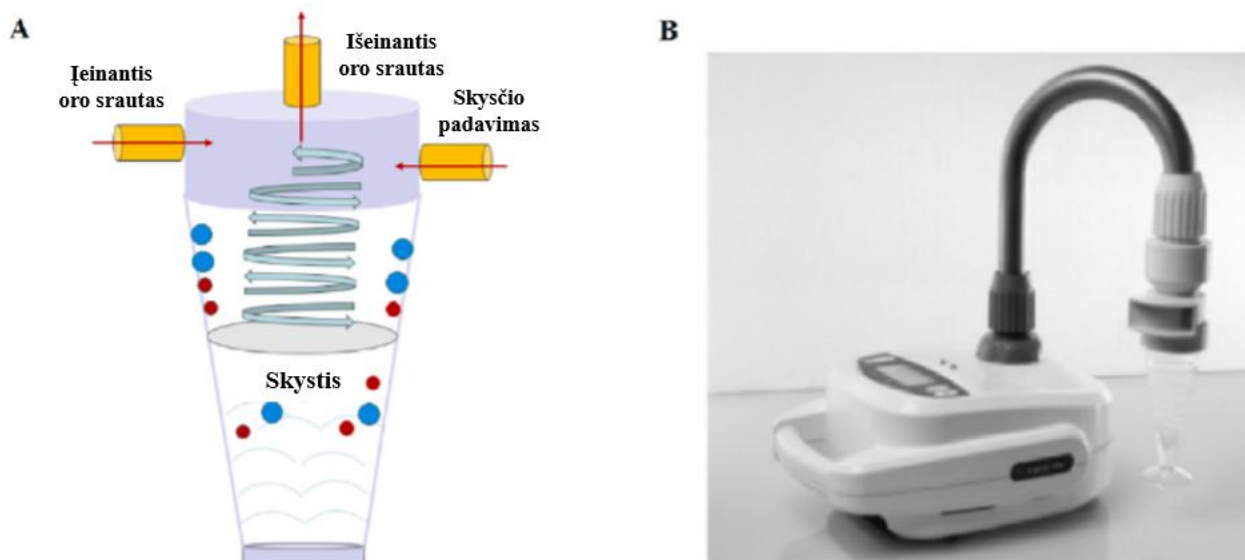


1 pav. Oro impaktorių tipai: a) mikrobinių oro dalelių surinkimas agarų plokštelė; b) mikrobinių oro dalelių surinkimas skysčiu [6 p. 3]

Impaktoriaus veikimo principas pagrįstas tuo, kad dalelėmis užterštas oro srautas praeina pro antgalį ir atsitrenkia į smūginę plokštelę. Kiekviena prietaiso dalis, dažniausiai vadinama pakopa, surenka tam tikro dydžio mikrobines daleles, o mažesnės dalelės lieka oro sraute ir patenka į kitas pakopas. Šis metodas leidžia apdoroti didelį oro kiekį, tačiau per didelis oro srautas gali pažeisti ore esančius mikroorganizmus, o dalis dalelių gali būti nesulaikoma. Dėl šios priežasties didelis oro srautas gali sumažinti dalelių surinkimo efektyvumą ir mikroorganizmų gyvybingumą [6].

Impaktoriaus veikimo principas gali būti pritaikomas ir naudojant skystąją surinkimo terpę, kai agarą plokštelė pakeičiama skysčiu. Toks skystinis impaktorius veikia panašiai kaip impingeris: jo viduje esantis skystis naudojamas ore esančioms dalelėms surinkti (1b pav.). Surinktų dalelių skersmuo nustatomas atsižvelgiant į oro srauto greitį ir atstumą tarp antgalio išėjimo angos bei skysčio paviršiaus. Nors šis metodas yra efektyvesnis ir gali išlaikyti panašų efektyvumą kaip mėginių ėmimas naudojant agarą plokšteles, dėl skysčių garavimo savybės jis nėra tinkamas ilgalaikiam veikimui [6].

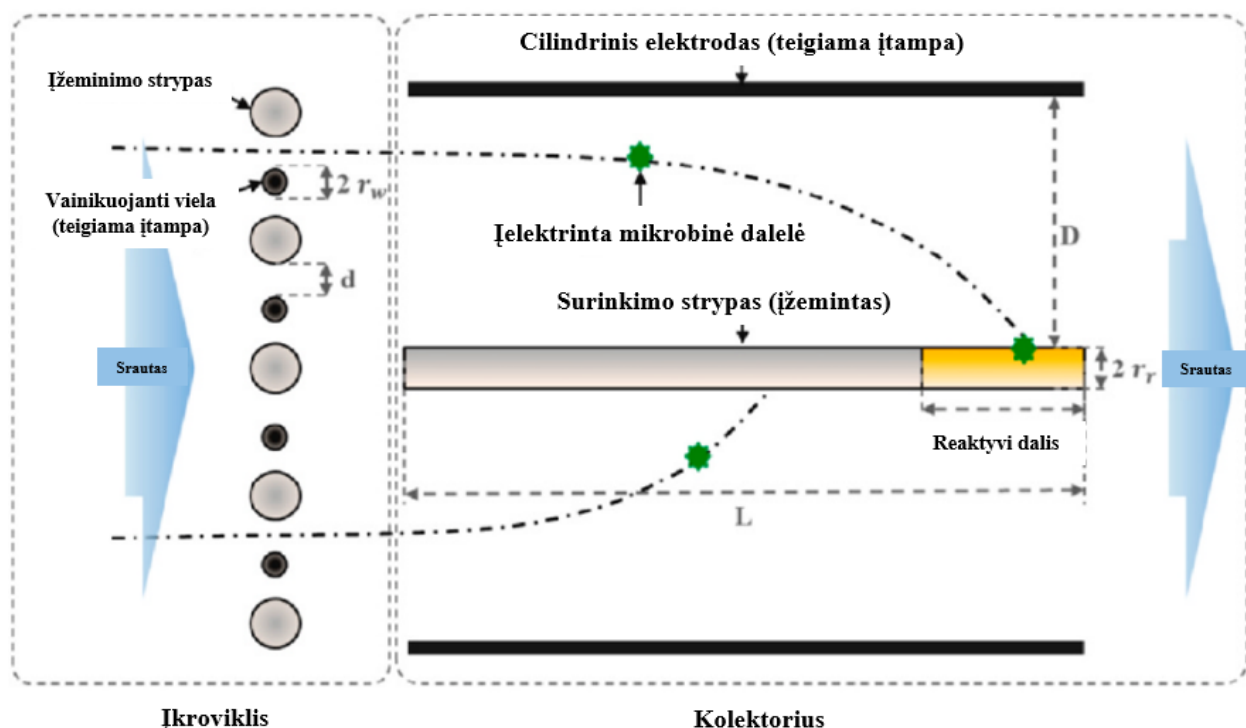
Cikloninis mėginių paėmimo būdas – tai metodas, pagrįstas stiprios sukimosi inercijos sukūrimu, leidžiančiu atskirti oro sraute esančias mikrobines daleles. Veikiamos sukimosi jėgos, dalelės nukreipiamos į prietaiso sienelės, juda išilgai šoninės sienelės ir galiausiai patenka į mėginių ėmimo skystį, esantį cikloninio mėginių ėmimo prietaiso dugne (2a ir 2b pav.). Daugelis drėgnųjų sienelių cikloninių mėginių ėmimo prietaisų arba centrifuginių smūgio principu veikiančių mechanizmų gali surinkti 10–15 mL skysčio su dalelėmis, kai oro srauto greitis siekia 100–1000 L/min. Nors šis mėginių ėmimo būdas yra dažnai taikomas dideliems oro srautams tirti, jo veikimui įtakos gali turėti žema temperatūra, nes prietaiso viduje naudojamas skystis. Be to, skysčio garavimas taip pat gali sumažinti mikrobinių dalelių surinkimo efektyvumą [6].



2 pav. Cikloninis mėginių paėmimo būdas: a) schematiškai pavaizduotas mėginių paėmimas; b) cikloninis mėginių ėmimo prietaisas [6 p. 4]

Elektrostatinis mėginių ėmimo būdas pagrįstas aukštos įtampos elektrostatinio lauko naudojimu. Šiame lauke įelektrinti oru plintantys mikroorganizmai gali būti adsorbuojami ir surenkami ant priešingu krūviu įelektrintų paviršių. Mikrobines daleles, patekusias į elektrinį lauką, yra įelektrinamos jonizatoriais, o dėl elektrostatinės sąveikos nukreipiamos ir nusodinamos ant agarą

plokštelės. Šis mėginių ėmimo būdas gali būti papildomas skystąja terpe, kuri taip pat padeda surinkti daleles (3 pav.) [6, 9].



3 pav. Elektrostatinio mėginių ėmimo būdo scheminis pavaizdavimas [6 p. 6]

Filtravimo sistemos – tai metodas, taikomas mikrobiologiniams organizmams iš oro surinkti naudojant filtras [10]. Užterštam orui tekant per filtruojančią medžiagą, dalelės joje sulaikomos dėl difuzijos, inercinio susidūrimo ir adsorbcijos procesų. Po filtravimo filtras gali būti panardinamas į skystį tolesnei analizei. Dažniausiai gautas skystis naudojamas mikrobiniams dalelėms auginti ant agarų lėkštelių. Be to, filtrai gali būti tiriami tiesiogiai, taikant mikroskopinės analizės metodus. Šiuo metu filtravimo metodas laikomas vienu patikimiausių ir dažniausiai taikomų metodų, nes pasižymi dideliu atsparumu temperatūros pokyčiams, efektyvumu, mažomis sąnaudomis ir paprastumu [6].

Pasyvus mėginių ėmimo metodas – tai metodas, kuriam nereikia sudėtingų technologijų ar brangių prietaisų. Jis pagrįstas mikroorganizmų nusėdimu ant paviršių. Rezultatai išreiškiami kolonijas sudarančiais vienetais, tenkančiais plokštelei per tam tikrą laiką, t. y., CFU / plokštelė / laikas. Kaip buvo paminėta prieš tai, šis metodas yra standartizuotas pagal mikrobinės oro taršos indeksą IMA, kuris atitinka suskaičiuotą CFU skaičių ant Petri lėkštelės. Šios 9 cm skersmens lėkštelės paliekamos atviros užterštame ore, taikant 1/1/1 schemą: 1 valandą, 1 metro aukštyje virš grindų ir 1 metro atstumu nuo sienų bei kitų didelių kliūčių [7].

1.2. Plazminių – jonizacinių technologijų panaudojimas oro mikrobiologiniam užterštumui sumažinti

Oro jonizacija – tai procesas, kurio metu neutralus atomas ar molekulė įgyja teigiamą arba neigiamą krūvį, atitinkamai prarasdamas (-a) arba prisijungdamas (-a) elektronus. Elektrinis laukas sukelia oro jonizaciją, kai tarp elektros srovės ir ore esančių molekulių, dažniausiai deguonies, vyksta elektronų perdavimas. Oro jonizavimo technologijose gali būti generuojami teigiami ir neigiami jonai, todėl, priklausomai nuo elektrinio lauko poliarumo, ir atitinkamai, generuojamų jonų tipo, šios

technologijos vadinamos vienpole arba bipoline jonizacija. Jonizatorių darbo efektyvumas dažniausiai vertinamas pagal šių jonų susidarymo produktyvumą dėl to, kad jonų kiekį yra palyginti nesunku išmatuoti naudojantis nesudėtinga įranga.

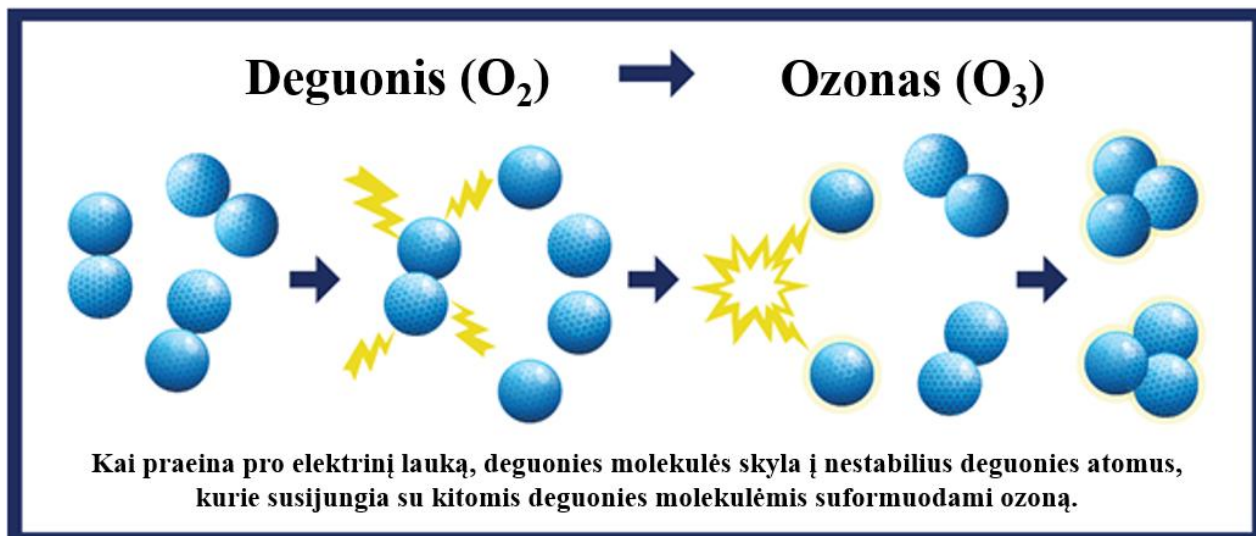
Tačiau yra būtina paminėti ir kitą jonizacijos metu susidarantių produktų rūšį – radikalus. Yra žinoma, kad be jonų, elektrinio išlydžio metu, susidaro ir įvairios reaktyviosios deguonies formos (angl. *reactive oxygen species* – *ROS*). Radikalų formavimasis yra dar aktyvesnis ore esant drėgmei, tokiu atveju, radikalai susidaro veikiant natūraliai ore esantį deguonį ir vandens molekules [11, 12]. Galutiniame procese, iš jonizatoriaus yra sukuriama teigiamų ir neigiamų oro jonų bei laisvųjų radikalų mišinys. Apžvelgiant radikalų formavimosi procesus, ypatingai išskiriant aktyviųjų deguonies formų susidarymą yra nustatyta, kad jonizacijos metu ore deguonies molekulės prisijungia elektronus ir tampa neigiamaisiais deguonies jonais ($O_2^{\cdot-}$), dar vadinamais superoksido radikalinais anijonais [11]. Superoksido jonai yra ypač nestabilūs ir labai reaktyvūs laisvieji radikalai. Ore yra ne tik deguonies, bet ir kitų molekulių, tarp jų – vandens molekulių, nuo kurių priklauso oro drėgnumas. Oro jonizacijos metu vandens molekulės (H_2O) gali būti suskaidomos į teigiamuosius vandenilio jonus (H^+) ir hidroksilo radikalus (OH^{\cdot}). Hidroksilo radikalas taip pat yra labai nestabilus ir reaktyvus laisvasis radikalas. Remiantis teoriniu veikimo principu, oro jonizacijos metu susidarę jonai gali sąveikauti su ore esančiais teršalais, dalelėmis ir mikroorganizmais, taip prisidedami prie oro kokybės gerinimo [11, 12].

Plazminės – jonizacinės technologijos – tai technologijos, kuriose naudojamos jonizuotos dujos. Plazma apibūdinama kaip stipriai jonizuotos dujos, susidaranti dėl aukštos elektrinės įtampos išlydžio. Dažniausiai ją sudaro elektronus, teigiamieji jonai ir neutralios dalelės, tokios kaip atomai ar molekulės. Mokslinėje literatūroje plazminės – jonizacinės technologijos dažniausiai apibūdinamos kaip oro dezinfekcijai, oro kokybės gerinimui ir oro valymui taikomos technologijos. Jos gali būti skirstomos į bipolinius jonizatorius (angl. *bipolar ionizers*), vienpolius jonizatorius (angl. *unipolar ionizers*), vainikinio išlydžio jonizatorius (angl. *corona discharge ionizers*), adatinius bipolinius jonizatorius, dar vadinamus NBPI (angl. *needlepoint bipolar ionizers*), taip pat šaltąją arba neterminę bei atmosferinę plazmą naudojančias technologijas [13-17].

Bipolinė jonizacija susidaro tada, kai prie specialaus vamzdelio su dviem elektrodais prijungiamas kintamosios įtampos šaltinis. Šio proceso metu generuojami teigiami ir neigiami jonai. Bipolinės jonizacijos reiškinį galima pastebėti ir gamtoje, ypač kalnuose ar netoli krioklių, kur teigiamų ir neigiamų jonų susidarymo metu oras natūraliai gryninamas. Jonizacijos proceso metu neutralus atomas ar molekulė įgyja teigiamą arba neigiamą krūvį, atitinkamai prarasdamas (-a) arba prisijungdamas (-a) elektroną. Bipolinės jonizacijos metu, kai oro srautas patenka į aukštos įtampos lauką, kurį generuoja elektrodai, pradeda formuotis teigiami (H^+) ir neigiami (O_2^-) jonai bei kiti šalutiniai produktai, pavyzdžiui, ozonas. Vienpolių jonizatorių veikimo principas yra panašus į bipolinių jonizatorių, tačiau šiuo atveju generuojami ne abiejų rūšių, t. y., teigiami ir neigiami, jonai, o tik vieno tipo – teigiami arba neigiami – jonai [15, 18].

Vainikinio išlydžio jonizatoriai – tai jonizatoriai, kurie generuoja teigiamus ir neigiamus jonus naudodami elektrodų porą arba elektros srovės laidininkus. Neigiamai įkrautas elektrodas skleidžia elektronus, kurie prisijungia prie oro molekulių ir taip generuoja neigiamų jonų, arba anijonų, srautą. Tuo tarpu teigiamas elektrodas pritraukia elektronus iš ore esančių molekulių ar atomų, todėl susidaro teigiamų jonų, arba katijonų, srautas. Šiems srautams susimaišius, susidaro anijonų ir katijonų mišinys. Tačiau viena pagrindinių ne tik vainikinio išlydžio, bet ir kitų jonizatorių problemų yra

nepageidaujama ozono gamyba. Tarp šių jonizatorių elektrodų yra oro tarpas, veikiantis kaip dielektrikas. Vainikinio išlydžio metu tarp elektrodų susidaranti aukšta įtampa suardo deguonies molekules į deguonies atomus, todėl vyksta deguonies jonizacija. Norint pasiekti deguonies jonizaciją, elektrinis laukas turi viršyti 12,07 eV, t. y., deguonies jonizacijos energiją. Susidarę nestabilūs deguonies atomai (O) jungiasi su deguonies molekulėmis (O_2) ir sudaro ozoną (O_3). Ozono formavimosi schema pateikta 4 paveiksle [12, 15, 19].



4 pav. Deguonies molekulės skilimas elektriniame lauke ir ozono molekulių formavimasis [12 p. 3]

Dažniausiai naudojami bipolinio tipo jonizatoriai yra adatiniai bipoliniai jonizatoriai. Jie priskiriami vainikinio išlydžio jonizatoriams ir yra panašūs savo veikimo principu, tačiau šių technologijų tapatinti nereikėtų. Skirtingai nei vainikinio išlydžio jonizatoriai, adatiniai bipoliniai jonizatoriai gali generuoti didelius jonų kiekius ir labai mažus ozono kiekius, kurie gali būti laikomi santykinai saugiais. Naudojant adatinius bipolinius jonizatorius, deguonies jonizacijos energija nėra pasiekama, nes šiuose įrenginiuose naudojamas mažesnės nei 12 eV energijos plazmos laukas. Šioje technologijoje naudojama elektrodų pora: vienas elektrodas yra teigiamas, kitas – neigiamas. Taip sukuriama plazmos, arba aukštos įtampos elektrinis laukas, kuris pašalina elektronus iš ore esančių atomų ar molekulių, turinčių mažesnę nei 12 eV jonizacijos potencialą. Vis dėlto, siekiant, kad šis įrenginys efektyviai mažintų mikrobiologinį oro užterštumą, būtina, kad susidarytų reaktyviosios dalelės, tokios kaip $O_2^{\cdot -}$ ir OH^{\cdot} – kaip žinoma iš literatūros, jonizacija ore, ypač esant drėgmei, sukuria sąlygas tiek jonams, tiek radikalams formuotis [12, 15, 19].

Plazminės oro valymo technologijos – tai technologijos, kuriose aukšta įtampa naudojama per ją praeinančioms dujoms jonizuoti. Dėl jonizacijos dujų molekulėse gali būti nutraukiami cheminiai ryšiai ir vykti įvairūs cheminiai pokyčiai. Terminę plazmą taikančios oro valymo technologijos naudoja aukštą įtampą ir didelį srovės stiprį, taip sukurdamos aukštos temperatūros liepsninę plazmą. Tačiau taikant plazmines technologijas gali susidaryti ir nepageidaujamų šalutinių produktų, tokių kaip kietosios dalelės, ozonas, anglies monoksidas ir formaldehidas [16, 20].

Neterminės plazmos technologija pastaraisiais metais plačiai tiriama siekiant pagreitinti oro dezinfekcijos ir valymo procesus. Taikant šį metodą generuojami didelės energijos elektronai, kurių energija gali siekti nuo 1 eV iki 10 eV, o aplinkoje esančios dujos išlieka kambario temperatūros. Paprasčiau tariant, šie elektronai yra greitunami elektriniame lauke. Siekiant generuoti teigiamus ir

neigiamus jonus, taikant neterminės plazmos technologiją naudojamas kintamosios srovės energijos šaltinis. Neterminės plazmos technologijomis generuojami neigiami ir teigiami jonai bei reaktyvieji radikalai, tokie kaip hidroksilo, superoksido ir hidroperoksido radikalai. Neterminės plazmos metu generuojamų dujų temperatūra yra žemesnė nei terminės plazmos atveju, o susidarančių radikalų tankis yra didesnis, todėl pasiekiamas didesnis reaktyvumas [16, 20, 21].

Atmosferinės plazmos technologija – tai plazminės technologijos, galinčios veikti atmosferos slėgyje. Šiose technologijose gali būti naudojama tiek terminė, tiek neterminė plazma [20].

1.3. Ore esančių jonų ir ozono kiekio matavimo metodai

Norint įvertinti jonizatoriaus efektyvumą, svarbu nustatyti, kiek jonų jis generuoja. Ore esantys jonai yra elektriškai įkrautos dalelės, kurios gali būti teigiamos arba neigiamos [22]. Tokios dalelės susidaro vykstant tiek natūraliems, tiek dirbtiniams procesams, pavyzdžiui, kosminės spinduliuotės, radioaktyviųjų medžiagų skilimo arba oro jonizacijos metu. Vienas dažniausiai taikomų jonų matavimo metodų yra Gerdieno kondensatorius. Šiame kondensatoriuje oras tarp elektrodų cirkuliuoja naudojant ventiliatorių. Ore esantys jonai, priklausomai nuo jų krūvio, yra traukiami prie skirtingų kondensatoriaus elektrodų. Dėl skirtingo judrumo ir krūvio jonai pasiskirsto, todėl šiuo metodu galima nustatyti tiek jonų judrumą, tiek jų koncentraciją [23].

Atmosferoje esantis ozonas yra labai svarbus įvairioms gyvybės formoms Žemėje palaikyti. Stratosferinis ozonas, esantis maždaug 15–65 km aukštyje, padeda sulaikyti pavojingą UV spinduliuotę, kurios bangos ilgis yra didesnis nei 290 nm, ir taip apsaugo Žemės paviršių nuo žalingo jos poveikio [24]. Ozonas taip pat plačiai naudojamas vandens, maisto, vidaus ar viešųjų patalpų dezinfekcijai. Vis dėlto ozonas gali daryti žalingą poveikį žmogaus sveikatai, augmenijai, tekstilės medžiagoms, įvairiems istoriniams objektams ir meno kūriniams. Todėl labai svarbu stebėti ozono koncentraciją, siekiant įvertinti patalpų ar lauko aplinkos užterštumą ir pritaikyti tinkamas oro taršos mažinimo strategijas [25].

Ozono matavimo būdai skirstomi į tiesioginius ir netiesioginius metodus. Tiesioginiai matavimo metodai, tokie kaip fotoakustinė, vidurinės infraraudonosios spinduliuotutės MIR (angl. *mid-infrared*) absorpcinė ir UV absorpcinė spektroskopija, leidžia ozono koncentraciją nustatyti realiuoju laiku. Tačiau šiems metodams reikalingi brangūs, gana dideli ir sunkūs prietaisai. Tuo tarpu netiesioginiai metodai yra lengviau prieinami ir paprasčiau taikomi. Jie gali būti skirstomi į fluorescencinius, spektrofotometrinius, skaitmeninių vaizdų analizės, amperometrinius, voltimetrinius ir laidumo metodus [25].

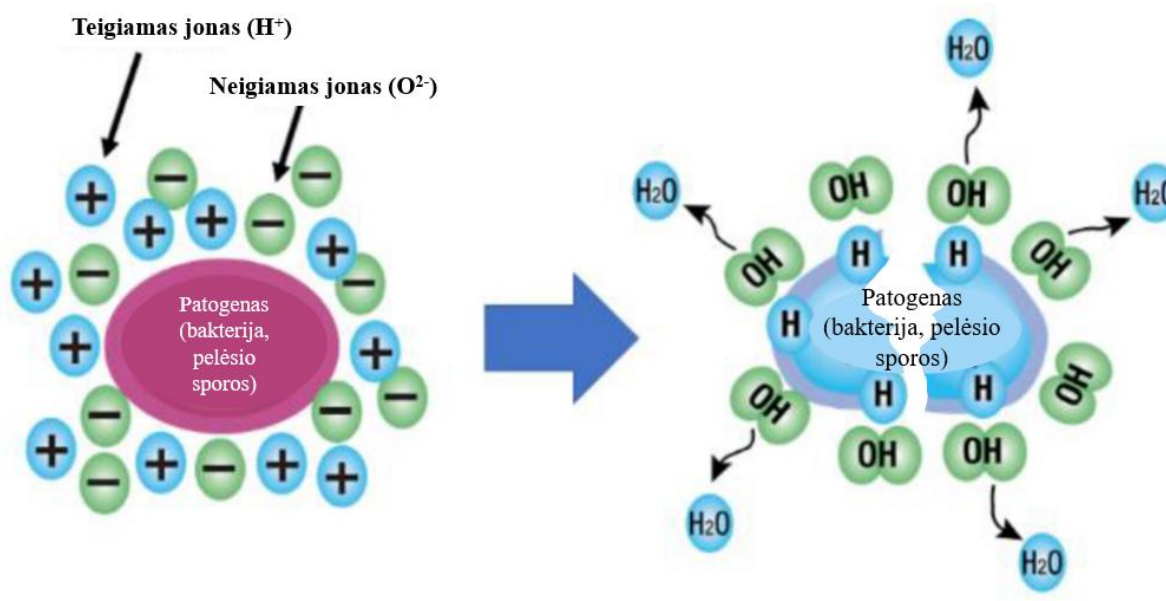
1.4. Nagrinėjamų technologijų poveikio mikroorganizmams mechanizmai

Bipolinės jonizacijos metu pastebėta, kad statiniai krūviai gali lemti bakterijų ir kitų mikroorganizmų žūtį bei sumažinti jų nusėdimą ant paviršių. Kaip minėta prieš tai, šios jonizacijos metu generuojami teigiami vandenilio jonai (H^+) ir superoksido radikaliniai anijonai ($O_2^{\cdot -}$), kai vandens molekulės patenka į aukštos įtampos elektrinį lauką tarp jonizatoriaus elektrodų. Mikroorganizmų ir virusų nukenksminimo mechanizmas bipolinės jonizacijos metu yra siejamas su jonų kaupimusi aplink mikroorganizmus ir virusus. Šis procesas skatina OH^{\cdot} radikalų formavimąsi, o aplink mikroorganizmus susitelkę jonai sudaro vadinamuosius klasterius (angl. *Clusters*) (5 pav.). Susiformavę radikalai pašalina vandenilį iš mikroorganizmų struktūrų ir, jam susijungus su kitomis dalelėmis, formuojasi vandens molekulės. Dėl šių reakcijų pažeidžiamos mikroorganizmų ir virusų

struktūros, todėl jie yra nuklenksminami. Bipolinės jonizacijos metu susidarančių klasterių poveikis virusams siejamas su baltymų, sudarančių virusų struktūrą, modifikacija [13, 15, 18].

Vienpolės jonizacijos metu generuojami tik vieno tipo jonai – teigiami arba neigiami. Nors specifiniai procesai, lemiantys mikroorganizmų biocidinį poveikį, dar nėra visiškai išaiškinti, literatūroje siūlomas vienas galimas mechanizmas: jonai telkiasi aplink mikroorganizmus ir formuoja klasterius. Šio poveikio metu tiek neigiami, tiek teigiami jonai gali sukelti bakterijoms oksidacinį stresą. Toks stresas lemia ląstelių žūtį, nes oksidaciniai pažeidimai paveikia ląstelių komponentus ir DNR. Svarbu paminėti, kad anijonai gali veikti bakterijas, pelėsį ir virusus uždarose patalpose. Kaip ir kitų jonizatorių veikimo metu, gali susidaryti ozonas, kuris taip pat pasižymi mikroorganizmus naikinančiu poveikiu ir gali prisidėti prie jonizatorių efektyvumo mažinant mikrobiologinę oro taršą [17, 26].

Vainikinio išlydžio metu oras jonizuojamas aukštos įtampos išlydžio būdu. Stipriausias elektrinis laukas susidaro ties aštriais laidininkų galais, pavyzdžiui, atvirų laidelių ar vielų galuose. Dėl susidariusio stipraus elektrinio lauko šiuose taškuose įvyksta išlydis, kurio metu jonizuojamas oras. Susidarę jonai, kaip ir kitų jonizatorių atveju, gali sukelti mikroorganizmams oksidacinį stresą ir ardyti jų membranas. Jonizacijos metu išsiskyręs ozonas taip pat pasižymi biocidiniu poveikiu [17, 26, 27].



5 pav. Klasterių formavimasis aplink mikroorganizmus ir virusus [18 p. 3]

Adatinių bipolinių jonizatorių mikroorganizmų naikinimo principas yra panašus į kitų jonizatorių veikimo mechanizmą. Jonizacijos metu vyksta reakcijos su vandens garais, kurių metu susidarę jonai formuoja klasterius aplink patogenus. Šie klasteriai gali pašalinti vandenilį, kuris yra svarbi bakterijų ir pelėsio membranų sudedamoji dalis. Pašalinus vandenilį ir pažeidus mikroorganizmo struktūras, mikroorganizmas žūsta [15].

Šaltosios, arba neterminės, plazmos metu generuojamos reaktyviosios deguonies ir azoto formos, laisvieji radikalai, elektronai ir jonai, taip pat gali būti aptinkami UV fotonai [28]. Laisvieji radikalai ir jonai ardo mikroorganizmų membranas. Prie papildomo membranų ardymo gali prisidėti ir UV-C spinduliuotė, kuri šiuo metu plačiai taikoma dezinfekcijai. Reaktyviosios deguonies ir azoto formos

per membranų kanalus gali įsiskverbti į mikroorganizmų vidų pasyviosios difuzijos būdu. Šio proceso metu dėl lipidų oksidacijos susidaro elektrostatinės poros, kurios dar labiau pažeidžia mikroorganizmų membranas [28, 29].

1.5. Taikymas praktikoje ir eksperimentiniai tyrimai

Siekiant geriau suprasti jonizatorių veikimo principus ir tinkamai suplanuoti eksperimentinę darbo dalį, buvo atlikta aktualių mokslinių tyrimų analizė. Šiame skyriuje nagrinėjami keli mikrobiologinės oro taršos mažinimo technologijų taikymo pavyzdžiai: ozono naudojimas, bipolinės jonizacijos taikymas kartu su fotokatalitiniu įrenginiu ir neterminės plazmos technologija.

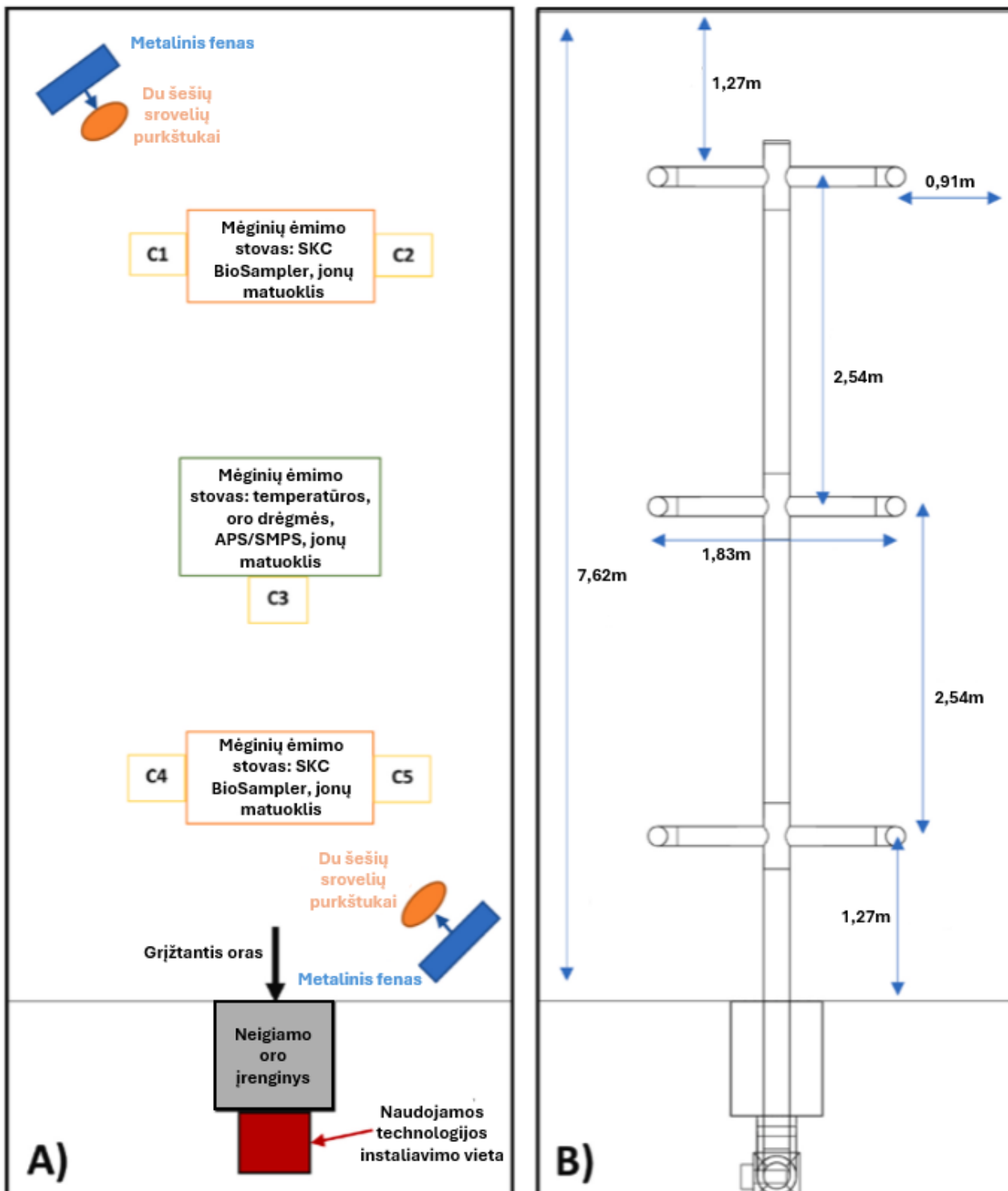
Analizuojant bipolinius jonizatorius pastebima, kad jie dažnai taikomi kartu su kitomis oro valymo technologijomis. Vienas iš tokių pavyzdžių – bipolinės jonizacijos derinimas su fotokatalitiniu įrenginiu. Fotokatalitiniai įrenginiai veikia naudodami tam tikras fotokatalitines medžiagas, pavyzdžiui, titano dioksida, ir UV spinduliuotę, kuri taip pat prisideda prie mikroorganizmų nukenksminimo ore. Mikroorganizmai gali būti nukenksminami dėl UV spinduliuotės poveikio arba dėl oksiduojančių radikalų, susidarančių apšvitinus fotokatalitinį paviršių. Tiek bipoliniai jonizatoriai, tiek fotokatalitiniai įrenginiai vertinami pagal EPA (angl.: *Environmental Protection Agency*) reikalavimus [30].

Analizuojamo eksperimento tikslas buvo, naudojant didelės apimties bandymų kamerą ir standartizuotą bandymų metodą, įvertinti bipolinės jonizacijos ir fotokatalitinių prietaisų veiksmingumą mažinant virusų koncentraciją ore ir ant paviršių. Šie prietaisai buvo testuojami pagal EPA reikalavimus ir sumontuoti į HVAC sistemą, įrengtą bandymų kameroje. Siekiant įvertinti mikroorganizmų nukenksminimo efektyvumą, tyrime naudotas bakteriofagas MS2. Jis pasirinktas dėl saugumo aplinkiniams žmonėms. Šis virusas neturi apvalkalo, todėl laikomas atsparesniu chemiškai nukenksminimui nei apvalkalą turintys virusai, pavyzdžiui, SARS-CoV-2. Dėl šios priežasties eksperimento rezultatai gali būti taikomi vertinant ir kitų patogenų nukenksminimo galimybes. Svarbu paminėti, kad bandymų kameroje cirkuliavo tas pats oras [30].

Bandymo kameros matmenys buvo 3,66 m x 3,05 m x 7,62 m, o jos tūris siekė 85,06 m³. Kamera buvo sudaryta iš plieninio rėmo, dažytų medienos plokščių ir metalinės grindų dangos. Temperatūra bandymų kameroje buvo reguliuojama aušinamojo vandens sistema, o santykinė oro drėgmė kontroliuojama naudojant sausintuvą ir dejonizuoto vandens garų drėkintuvą. Aerodinaminiame tunelyje buvo įrengtos kelios didelio efektyvumo kietųjų dalelių filtrų baterijos, skirtos bandymų kameros orui filtruoti prieš bandymus ir po jų [30].

Bandymai buvo atliekami 22 ± 2 °C temperatūroje ir esant 30–35 % santykiniam oro drėgnumui. Toks santykinis drėgnis pasirinktas todėl, kad virusų gyvybingumas mažėja, kai santykinė oro drėgmė yra didesnė nei 50 %. Bandymų kameroje buvo sumontuota imitacinė HVAC sistema, sudaryta iš cinkuoto plieno ortakio. „Omni-Aire 1000 V“ neigiamo oro srauto prietaisas su pašalintu HEPA filtru imitavo šalto oro grįžtamąjį srautą, kuris cirkuliavo bandymų kameroje per HVAC sistemą. Eksperimentų metu neigiamo oro srauto prietaisas buvo nustatytas veikti 32,51 m³/min našumu, todėl per vieną valandą buvo užtikrinami septyni oro pasikeitimai. Skirtinguose bandymų kameros kampuose buvo pastatyti du metaliniai ventiliatoriai, kurių sukuriamas oro srautas siekė 441,35 m/min. Tokiu būdu buvo užtikrinamas oro maišymasis cirkuliacijos metu (6 pav.) [30].

Po kiekvieno bandymo bandymų kameroje esantis oras buvo tikrinamas. Tarp bandymų oras buvo išvalomas atidarant sklendes trumpuosiuose kameros galuose ir naudojant HEPA filtrus, kol ore esančių dalelių kiekis tapdavo nereikšmingas. Pakartotiniai mėginiai, paimti iš skirtingų bandymų kameros vietų, buvo panašūs, todėl galima daryti prielaidą, kad oras bandymų kameroje cirkuliavo tinkamai [30].



6 pav. Vaizdas į bandymų kamerą iš viršaus ir jos išdėstymas: a) pažymėtos bandymo įrangos lokacijos ir mėginių ėmimo vietos, C1–C5 – ant kameros grindų vienas šalia kito padėti nusodinimo mėginiai; b) imitacinė HVAC schema ir atitinkantys išmatavimai. Vienetai paversti iš pėdų į metrus [30 p. 3]

Oro mėginiai buvo imami naudojant „SKC BioSamplers“ mėginių ėmimo prietaisus, prijungtus prie oro mėginių ėmimo siurblių, veikiančių 12,5 L/min greičiu. Kiekvienas mėginių ėmimo laikotarpis truko 10 min., todėl per kiekvieną mėginių ėmimą vienam mėginiui buvo surenkamas 125 L oro tūris. Svarbu paminėti, kad mėginiai buvo imami kvėpavimo zonoje, maždaug 1,5 m aukštyje virš grindų. Pirmasis oro mėginys, pažymėtas kaip 0 min. laiko taškas, buvo paimtas iš karto prieš 10 min. trukmės MS2 aerizacijos laikotarpį. Tai buvo daroma siekiant įsitikinti, kad prieš pradėdant aerizacijos paskleidimą kameroje nėra gyvybingų virusų [30].

Kiekviename „BioSampler“ prietaise buvo 20 mL fosfatų buferinio fiziologinio tirpalo (PBS). Surinkti skystieji mėginiai nuo paėmimo iki pasėjimo buvo laikomi ant ledo. Prieš pasėjimą mėginiai 2 min. buvo maišomi sukuriniu maišytuvu. Jie buvo sėjami taikant įprastą minkštojo agaro perdengimo metodą, naudojant dešimtkartinius skiedimus ir 100 µL mėginio tūrį [30].

Eksperimento metu iš viso buvo surinkta 16 mėginių: 5 mėginiai buvo surinkti naudojant bipolinės jonizacijos prietaisą, 6 – naudojant fotokatalitinį prietaisą, o 5 buvo kontroliniai mėginiai, kai nenaudota jokia oro valymo technologija. Visi bandymai buvo atliekami vienodomis aplinkos sąlygomis, t. y., palaikant vienodą temperatūrą, santykinę oro drėgnį ir oro srautą. Pagrindinis ir vienintelis skirtumas tarp bandymų buvo ortakiuose sumontuota oro valymo technologija. Bandymai buvo atliekami kas 90 min., o mėginiai imami 0, 15, 30, 60 ir 90 min. laiko taškuose [30].

Šaltosios plazmos bipolinės jonizacijos prietaisas pirmųjų dviejų bandymų metu buvo įjungtas likus pusei valandos iki MS2 aerizacijos pradžios, o trečiojo, ketvirtojo ir penktojo bandymų metu – likus 90 min. iki aerizacijos. Dėl to vidutinė jonų koncentracija ore prieš MS2 aerizaciją atitinkamai siekė apie 1000–2000 jonų/cm³ ir 2500–6000 jonų/cm³. Po MS2 įpurškimo buvo pastebėtas jonų koncentracijos sumažėjimas beveik iki foninės koncentracijos. Tai galėjo įvykti dėl jonų sąveikos su aerizacijos dalelėmis ir galimos krūvio neutralizacijos. MS2 kiekis buvo normalizuotas pagal pradinę koncentraciją, nustatytą 0 min. laiko taške kiekviename atitinkamame bandyme, kad pradinio bioaerizacijos susidarymo skirtumai neturėtų įtakos rezultatų vertinimui [30].

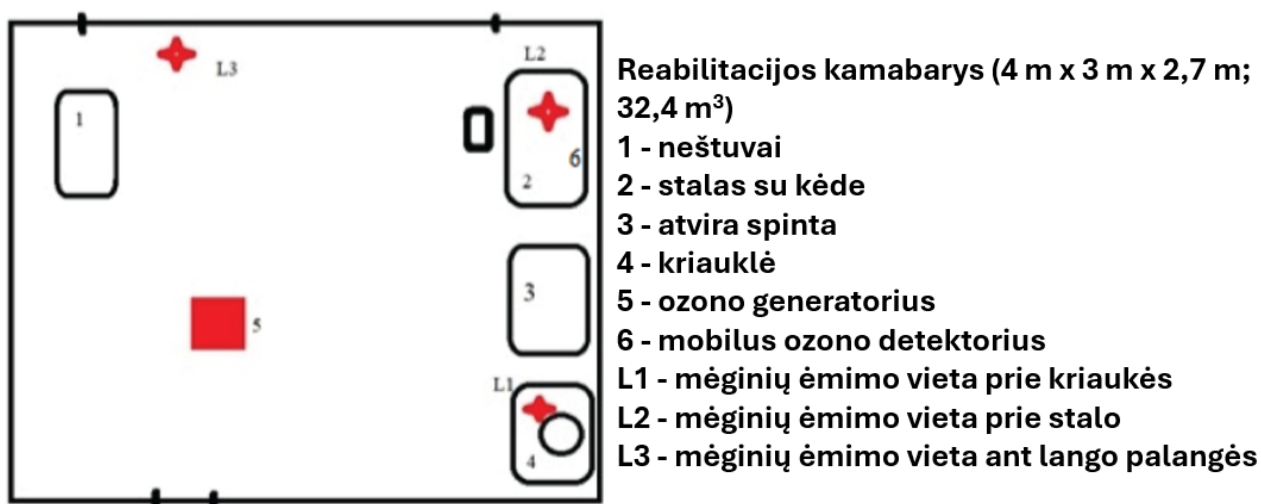
Kontrolinių bandymų metu nustatyta, kad natūralus mikroorganizmų nusėdimas ant paviršių ir kameros sienelių gali sumažinti mikrobiologinio oro užterštumo koncentraciją. MS2 koncentracijos kiekvienu mėginių ėmimo laiko momentu buvo lyginamos su kontroliniais BPI bandymais, o rezultatai apskaičiuoti pagal log₁₀ sumažėjimą kiekvienu mėginių ėmimo laiku. Šio tyrimo metu nustatyta, kad taikant bipolinės jonizacijos prietaisą galima pasiekti iki 87 % mikrobiologinėmis dalelėmis užteršto oro mažinimo efektyvumą [30].

Ozonas pasižymi dezinfekcinėmis savybėmis dėl stipraus oksidacinio poveikio. Jis plačiai naudojamas vandens dezinfekcijai, taip pat gali būti taikomas oro dezinfekavimui ligoninėse, gydymo įstaigose ir panašiose patalpose. Siekiant įvertinti ozono dezinfekcinės savybės ir jo efektyvumą mažinant mikroorganizmų kiekį ore, buvo pasirinktas eksperimentas, atliktas ligoninės palatoje. Šios patalpos matmenys buvo 4 m x 3 m x 2,7 m, o tūris siekė 32,4 m³. Palatoje buvo kriauklė, stalas, kėdė, drabužių spinta ir neštuvai. Patalpos vėdinimo sistemą sudarė natūralus vėdinimo šaltinis – langas – ir centralizuota vėdinimo sistema su HEPA filtrais. Viso eksperimento metu palatoje buvo palaikoma 23 °C temperatūra ir 55 % santykinis oro drėgnis. Eksperimentinės palatos išdėstymas pateiktas 7 paveiksle [31].

Prieš pradėdant eksperimentą su ozonu, palatos vėdinimo sistemos angos buvo sandariai uždarytos, o centrinė vėdinimo sistema išjungta. Oro mėginiai buvo imami du kartus: prieš ozono naudojimą,

siekiant nustatyti pradinį mikrobiologinio oro užterštumo lygį, ir po ozono panaudojimo. Mėginiai buvo imami trijose vietose: ant palangės, stalo ir kriauklės. Tam naudotas mobilus 250 L oro mėginių ėmimo prietaisas „MAS-100“. Šio prietaiso veikimas pagrįstas aplinkos oro išsiurbimu per perforuotą dangtį, nukreipiant oro srautą į standartines Petri lėkštelėse esančias auginimo terpes. Ant terpės patekę mikroorganizmai vėliau inkubuojami ir suskaičiuojami [31].

Ozono dujoms generuoti buvo naudojamas mobilus ozono generatorius „Mozone GPF 8008“, į patalpą išleido oro ir ozono mišinį, kol ozono koncentracija ore pasiekė 15,71 mg/m³. Tokiai koncentracijai patalpoje pasiekti eksperimento autoriams prireikė apie 1 valandos. Eksperimento metu temperatūra ir santykinis oro drėgnis patalpoje atitinkamai siekė 23 °C ir 60 %. Atstumas tarp ozono generatoriaus ir mėginių ėmimo vietų buvo apie 1,5 m. Ozono koncentracija palatoje buvo nuolat stebima nešiojamuoju ozono detektoriumi, kuris taip pat buvo pastatytas 1,5 m atstumu nuo ozono generatoriaus. Pasibaigus mikroorganizmų apdorojimui ozonu ir ozonui susiskaidžius, buvo atliktas pakartotinis oro matavimas. Svarbu paminėti, kad visi eksperimentai kiekvienoje mėginių ėmimo vietoje buvo kartojami tris kartus [31].



7 pav. Reanimacijos kambario išplanavimas žiūrint iš viršaus, ozono generatoriaus vieta ir ozono detektoriaus lokacija palatoje [31 p. 2]

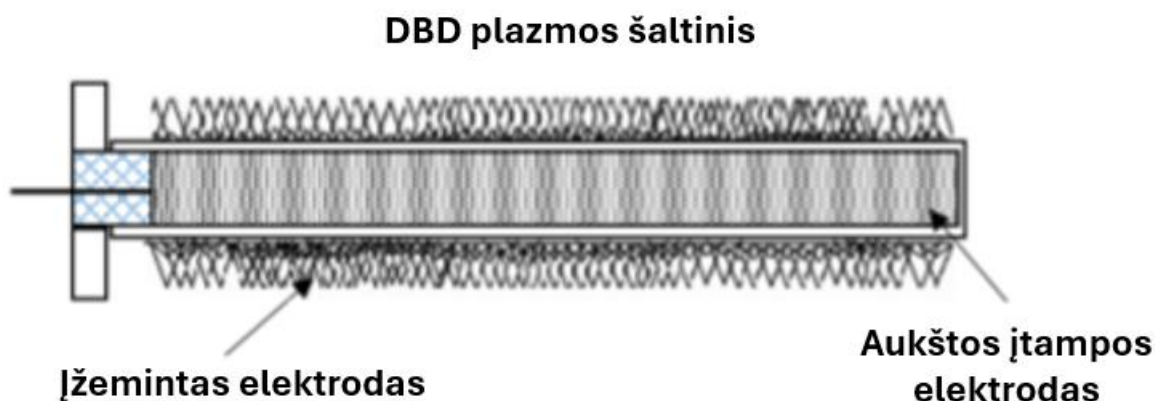
Oro mėginiai buvo imami tiesiogiai ant TSA agaro, chromogeninio UTI agaro ir Saboraado dekstrozės agaro, skirto pelėsiui nustatyti. Chromogeninis agaras buvo naudojamas bakterijoms identifikuoti. Ant TSA ir chromogeninio UTI agaro išaugusios bakterijos buvo identifikuojamos pagal kolonijų morfologiją ir spalvą [31].

Aplinkos oro dezinfekavimas ozonu parodė, kad visose mėginių ėmimo vietose reikšmingai sumažėjo bendras bakterijų ir pelėsių skaičius. Prieš eksperimentą aptiktos šios bakterijų ir pelėsių rūšys: *Micrococcus spp.*; *Staphylococcus spp.*, *Bacillus spp.* ir *Acinetobacter spp.* Remiantis tyrimo rezultatais, *Micrococcus spp.* buvo dominuojanti bakterijų rūšis tiek prieš ozono naudojimą, tiek po jo visose trijose mėginių ėmimo vietose. Tyrimo metu nustatyta, kad ozono poveikis sumažino bakterijų kiekį ore: *Staphylococcus spp.* kiekis sumažėjo 58 %, *Bacillus spp.* sumažėjo 61 %, o *Micrococcus spp.* – 33 %. Svarbu paminėti, kad eksperimentas buvo atliktas naujose patalpose, kurios buvo įrengtos prieš 3 mėnesius ir kuriose iki tyrimo buvo gydyta tik apie 20 pacientų. Taip pat nurodoma, kad siekiant didesnio mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumo, ozono koncentraciją ore reikėtų padidinti daugiau nei iki 20 mg/m³ ir pailginti ozono poveikio laiką [31].

Kituose tyrimuose, kuriuose taip pat buvo taikomas ozonas, naudojant 4,8 ppm koncentraciją buvo pasiektas didesnis nei 90 % mikrobiologinio oro ir paviršių užterštumo sumažėjimo efektyvumas. Šiame eksperimente buvo tiriami *E. coli*, *S. aureus* ir grybeliniai mikroorganizmai [32].

Neterminės plazmos technologija, dar vadinama NTP, pastaraisiais metais plačiai analizuojama sterilizacijos ir patalpų oro valymo srityse. Kaip minėta prieš tai, taikant šią technologiją generuojami didelės energijos elektronai, kurių energija siekia 1–10 eV, o aplinkos dujų temperatūra išlieka artima kambario temperatūrai. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys antimikrobinį poveikį, yra lokalizuotas elektrinis laukas, reaktyviųjų deguonies formų (ROS) susidarymas ir įkrautų dalelių, t. y., teigiamų bei neigiamų jonų, formavimasis [21].

Analizuojamame eksperimente buvo naudojama šaltosios plazmos technologija. Ši technologija generuoja teigiamus ir neigiamus jonus kartu su OH^{*} gali efektyviai naikinti aerozoliuose esančius patogeninius mikroorganizmus uždaroje patalpose. Įrenginio veikimas pagrįstas paviršinio dielektrinio barjero išlydžio koncepcija, dar vadinama SDBD (angl.: *surface dielectric barrier discharge*). Šiame įrenginyje plazma buvo naudojama kartu su TiO₂ nanodalelių oksidatoriumi. Toks procesas laikomas pranašesniu už kai kuriuos kitus metodus, nes koaksialinėje DBD geometrijoje generuojami didelės energijos elektronai. Eksperimento metu uždaroje bandymų aplinkoje buvo naudojamos *E. coli* bakterijos ir MS2 bakteriofagas. Koaksialiniu DBD principu veikiančio įrenginio schema pateikta 8 paveiksle [21].



8 pav. Koaksialinio DBD įrenginio schema [21 p. 3]

TiO₂ nanodalelių katalizatorius buvo padengtas ant išorinių ižemintų elektrodų. Šio sluoksnio storis siekė apie 0,9–1,1 μm, siekiant sudaryti skirtingo stiprumo elektrinį lauką. Plazminis išlydis buvo generuojamas atmosferos slėgyje, naudojant aplinkos orą kaip dujų nešiklį. Paviršiniam dielektrinio barjero išlydžiui gauti buvo naudojamas kintamasis bipolinis impulsinis galios generatorius, veikiantis 1–6 kV, 5–40 kHz, 1 A ir 2 μs impulsais [21].

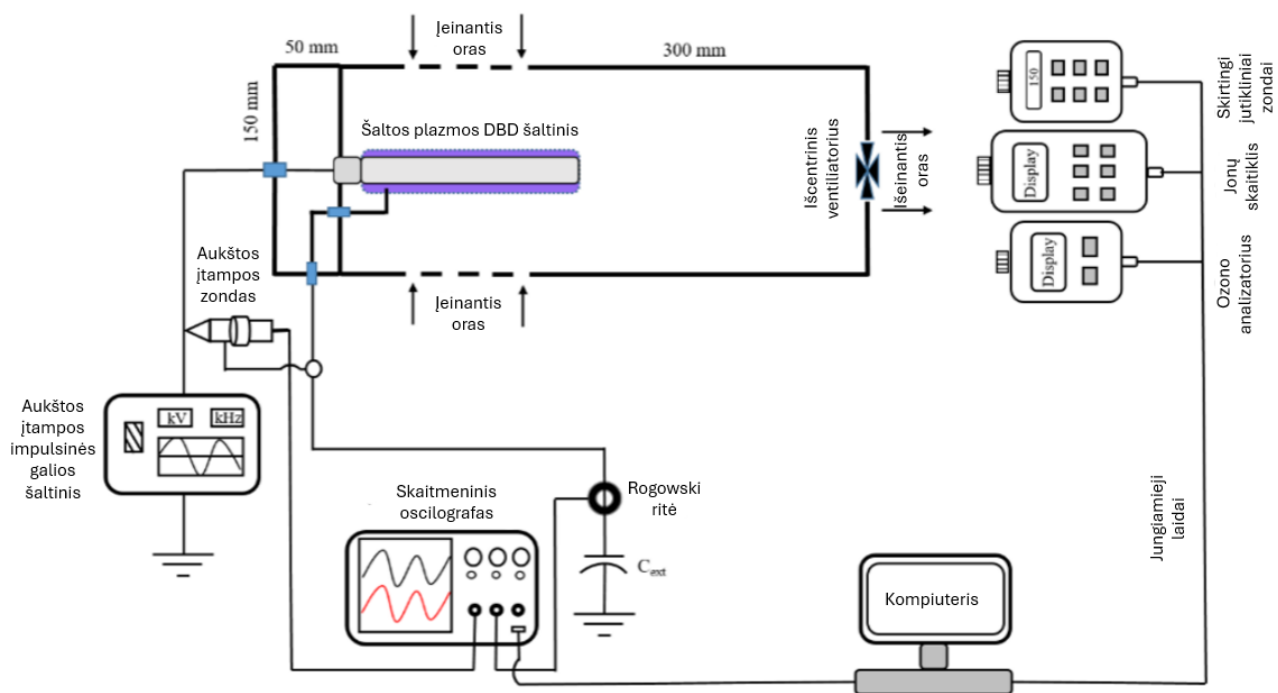
Siekiant atlikti elektrinių parametrų apibūdinimą ir oro kokybės analizę, buvo naudojamas 9 paveiksle pateiktas prietaisų išdėstymas. Naudojama įtampa buvo matuojama aukštos įtampos zondų, o išlydžio srovė – greito atsako srovės transformatoriumi. Išlydžio srovės ir naudojamos įtampos bangų formos buvo analizuojamos keturių kanalų skaitmeniniu oscilografu. Kadangi plazmos metu nuolat generuojami teigiami ir neigiami jonai, jų koncentracija buvo analizuojama oro jonų skaitikliu. Ozono koncentracija realiuoju laiku buvo matuojama atskiru prietaisu, kurio tikslumas siekė apie 1 ppb. Šis

prietaisais buvo sumontuotas atskirai nuo eksperimentinės įrangos, kad būtų galima stebėti susidarancio ozono koncentraciją [21].

Plazminis įrenginys buvo patalpintas į nerūdijančio plieno stačiakampę dėžę. Dėžės matmenys buvo 350 mm x 150 mm x 150 mm, o tūris siekė 7875000 mm³. Siekiant užtikrinti dėžės ventiliaciją, joje buvo įrengtos keturios 20 mm skersmens angos. Prie dviejų anų buvo sumontuotas išcentrinis ventiliatorius, skirtas jonams paskleisti į eksperimentinę patalpą. Šio ventiliatoriaus tiekiamo oro srauto greitis siekė 225 m³/h [21].

Mikrobinis nukenksminimas buvo vertinamas matuojant bendrą mikroorganizmų skaičių TMC (angl. *total microbial counts*) ir bendrą grybelių skaičių TFC (angl. *total fungal counts*) patalpoje su veikiančia ventiliacija ir be jos. Matavimai buvo atliekami naudojant oro mėginių ėmimo įrenginį. Eksperimentinės patalpos matmenys buvo 3 m x 2,4 m x 2,4 m, o tūris siekė 17,28 m³. Vis dėlto, matuojant TMC ir TFC patalpoje be ventiliacijos, buvo nustatytas tam tikras oro nuotėkis per du stumdomus stiklinius langus, nors likusi patalpos dalis buvo sandari. Mėginių ėmimo įrenginys buvo patalpos viduje, viename kambario kampe. Tikslaus vėdinimo greičio eksperimento autoriams išmatuoti nepavyko [21].

TMC ir TFC matavimams buvo naudojamos maistinio agaro lėkštelės. Vieno mėginio paėmimui buvo naudojamas 1000 L oro tūris. Oro mėginių ėmimo įrenginys buvo pastatytas eksperimentinėje patalpoje, o mėginiai imti prieš įjungiant prietaisą ir po jo veikimo. Eksperimento metu patalpoje buvo palaikoma 25 °C temperatūra ir mažesnis nei 60 % santykinis oro drėgnis. Gauti mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumo rezultatai siekė apie 99,999 % tiek bakterijoms, tiek grybeliams. Taigi galima daryti išvadą, kad šiame poskyryje aptartų technologijų kontekste neterminės, arba šaltosios, plazmos įrenginiai pasižymėjo didžiausiu mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumu [21].



9 pav. Eksperimentinės patalpos vaizdas iš viršaus [21 p. 4]

1.6. Aplinkosaugos ir reguliavimo aspektai

Ozonas yra labai pavojingas žmogaus sveikatai ir jis turi būti ribojamas siekiant užtikrinti gerą dezinfekciją ir saugumą žmogui, esančiam patalpoje. Iš literatūros analizės pastebėta, kad ozonas yra generuojamas ne tik ozono generatoriumi, bet jis, kaip šalutinis produktas, išsiskiria oro jonizacijos metu. Visi jonizatoriai generuoja tam tikrą ozono kiekį: vieni mažesnę, kiti didesnę. Todėl yra labai svarbu nubrėžti ribą, iki kurios dar yra saugi ozono koncentracija.

Kad ozono kiekis aplinkoje būtų kuo mažesnis, reikia naudoti kuo įmanoma mažesnę įtampą jonizacijos metu. Tačiau jonų skaičius išlieka taip pat svarbus – kuo daugiau jonų, tuo geresnis jonizavimo efektyvumas siekiant sumažinti oro mikrobiologinį užterštumą. Jonų skaičius tiesiogiai priklauso nuo naudojamos įtampos. Taigi, eksperimento metu svarbu rasti tinkamą įtampą, kurioje gamintūsi kiek įmanoma daugiau jonų, o ozono koncentracija neviršytų nustatytos saugios ribos žmogui [33, 34].

Remiantis Europos parlamento ir tarybos direktyva dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje (2008/50/EB) ozono koncentracija per 8 valandas dienoje neturėtų viršyti $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (61,1 ppb). Ši koncentracija neturėtų viršyti daugiau nei 25 dienų gaunamą koncentraciją per kalendorinius metus. Tačiau, remiantis Pasaulio Sveikatos Organizacijos (PSO, angl.: *World Health Organization*, WHO) rekomendacijomis, vidutinė 8 valandų ozono koncentracija neturėtų viršyti $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (50,9 ppb). Ši organizacija nustato ilgalaikį siekiamąjį tikslą [35, 36].

Siekiant surasti informaciją apie ribojamą jonizuotų dalelių kiekį aplinkos ore kyla sunkumų. Nepavyko rasti specifinės direktyvos, kuri reguliuotų jonų emisijas ir jų koncentraciją. Vis dėlto, kaip ir daugelis prietaisų, jonizatoriai turi atitikti tam tikrus bendruosius saugos ir kokybės reikalavimus. Pavyzdžiui, oro jonizatoriai, žymimi UL 2998, į orą išmeta tik apie 5 ppb kiekį ozono. Šis standartas yra rekomenduojamas US EPA visiems įrenginiams, kurie yra pagrįsti bipolinio jonizatoriaus veikimo principu [37].

Taigi galima teigti, jog renkantis jonizatorių reikėtų atkreipti dėmesį į jo generuojamo ozono kiekį. Tai padeda įvertinti standartų žymėjimai ant jonizatorių, pavyzdžiui, UL žymėjimas.

1.7. Privalumai ir trūkumai prieš alternatyvius metodus

Dažniausiai sutinkami mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo metodai yra UV spinduliuotės naudojimas patalpose (pvz., operacinėse), paviršių valymas etanoliu, vandenilio peroksidu ir kita alternatyvia chemija, įvairių oro filtrų naudojimas kasdieniauose buitiniuose prietaisuose ir oro kondicionavimo bei šildymo sistemose. Tačiau ne visi naudojami metodai yra efektyvūs. Kalbant apie paviršių dezinfekavimą cheminėmis priemonėmis, dalis mikroorganizmų žūsta iš karto po sąlyčio su šiais skysčiais, tačiau tai nėra efektyvu. Pavyzdžiui, paviršių dezinfekavimo etanoliu efektyvumas yra nuo 62 % iki 80 %. Kol bus nuvalyti visi patalpoje esantys paviršiai, ore pasklidę mikroorganizmai gali nusėsti ant paviršių, o prieš tai juos naikinęs skystis, dėl etanolio ir kitų dezinfekcinių priemonių lakumo, jau gali būti išgaravęs. Taip pat, šis metodas yra didelis iššūkis siekiant nuvalyti didesnius paviršius ar dideles patalpas [38].

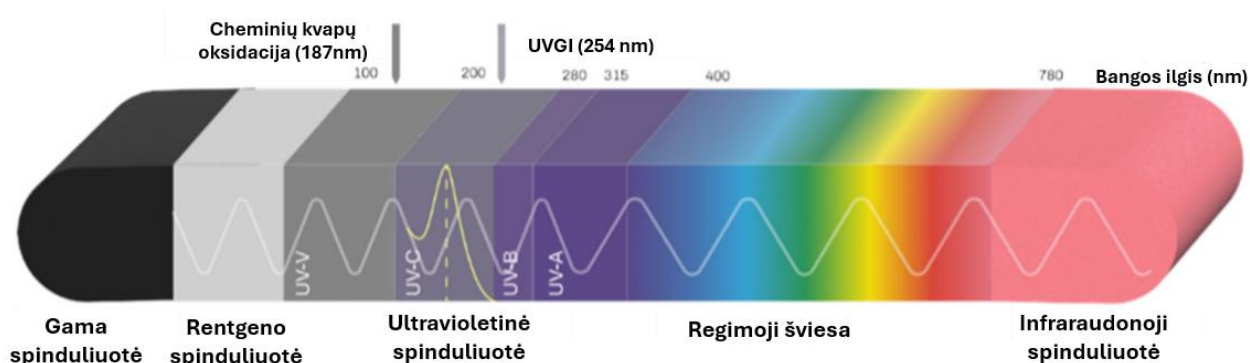
Kitas iš būdų yra dezinfekuoti patalpas dujomis, tokiomis kaip etileno oksidu ar ozonu. Šios dujos apsaugo nuo mikrobines infekcijos. Tačiau ir šis būdas yra neefektyvus. Dujos yra pavojingos

žmogaus sveikatai, todėl dezinfekuojamas patalpas reikėtų uždaryti viso valymo proceso metu, o jam pasibaigus gerai išvėdinti. Tai reikalautų ir geros ventiliacinės sistemos [39, 40].

Didelio efektyvumo dalelių filtrai (HEPA) taip pat gali būti naudojami, siekiant išgryninti patalpų orą nuo dulkių, kietųjų dalelių ir ore esančių mikroorganizmų. Mechaniniai filtrai yra sudaryti iš porėtos medžiagos, pagamintos iš pluoštų arba iš ištemptų membraninių struktūrų, o jų porų dydis gali skirtis dėl nevienodo medžiagų persiklojimo. Tankumas ir veiksmingos aplinkos didinimas (sąlyčio plotas), kuri kontaktuoja su užterštu oru, pašalina ore esančias daleles. Tačiau yra vienas trūkumas – jis nesunaikina ore esančių mikroorganizmų, o juos tik sulaiko. Taip pat, šie filtrai nėra efektyvūs labai mažoms dalelėms, nes jie praleidžia mažo skersmens aerozolius bei gali sukelti slėgio kritimus kondicionavimo sistemose. Filtrai užsikemša, juos reikia nuolat keisti į naujus arba chemiškai valyti norint, kad oro valymo efektyvumas liktų nepakitęs [15, 21].

Adsorbicija remiasi oro teršalų pagavimu ant adsorbuojančios medžiagos. Šis metodas buvo sėkmingai pritaikomas lakiųjų organinių junginių ir neorganinių teršalų „sugavimui“ ant adsorbentų. Dažniausiai naudojami adsorbentai yra aktyvinta anglis, zeolitai, silicio gelis, aktyvintas aliuminis, mineralinis molis ir kiti polimerai. Šie adsorbentai gali būti lengvai inkorporuoti į pastatų paviršius siekiant pašalinti oro teršalus nenaudojant papildomos elektros energijos. Šis metodas yra priskiriamas pasyviai oro teršalų mažinimui. Tačiau jis visiškai nesunaikina mikrobiologinių oro teršalų, kurie kelia potencialią žalą žmogaus sveikatai. Kaip šalutinis produktas susidaro pavojingos kietosios atliekos, kurios turi būti tinkamai tvarkomos [15].

UV spinduliuotės naudojimas yra vienas iš populiariausių mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo technologijų. UV spinduliuotės spektras yra skirstomas į vakuuminį UV (100–200 nm), UVC (200–280 nm), UVB (280–320 nm) ir UVA (320–400 nm). Žinoma, kad visa UV spinduliuotė sukelia tam tikrus fotocheminius efektus, tačiau bangos ilgis tarp UVC, ypač UVGI (ultravioletinė spinduliuotė, pasižyminti bakterocidiniu efektu) (253,7 nm), yra ypač žalingas ląstelėms, nes jį sugeria RNR ir DNR baltymai. Elektromagnetinių bangų spektras pateiktas 10 paveiksle, įskaitant ir ultravioletinių spinduliuočių dažnius, paminėtus prieš tai. UV spinduliuotė gali sukelti molekulių skilimus ties paprastaisiais kovalentiniais ryšiais tarp C, H, O ir N nukleotidų grandinėje, kas sukelia negrįžtamus molekulinis pokyčius visuose mikroorganizmuose. Tačiau naudojant UV spindulius išsiskiria ozonas, todėl visos UV sistemos turi būti nuosekliai tikrinamos, prižiūrimos ir kontroliuojamos. Ši technologija gali kelti pavojų žmonių sveikatai, gali pažeisti akis, odą, skatinti odos vėžio riziką, bei šios technologijos efektyvumas yra žemas, kai teršalų koncentracijos yra mažos bei užtrunka ilgą laiką tarpą norint dezinfekuoti didesnes patalpas [15, 21].



10 pav. Elektromagnetinių bangų skalė įskaitant visas UV spinduliuotės rūšis [15 p. 12]

1.8. Literatūros analizės apibendrinimas

Analizuojant literatūrą išsiaiškinta, kad mikrobiologinis užterštumas gali būti nustatytas dviem metodais: pasyviais ir aktyviais. Aktyviam metodui įgyvendinti galima naudoti šiuos prietaisus: oro impaktoriai, impingeriai, išcentrinės mašinos, filtravimo sistemos, elektrostatiniai ir cikloniniai mėginių ėmimo įrenginiai. Oro impaktoriai yra dažniausiai naudojami iš aktyvių metodų, o vienas iš dažniausiai pasitaikančių pasyvių metodų yra bakterijų ir mikroorganizmų nusodinimas ant Petri lėkštelių.

Pastebėta, kad dažniausiai sutinkami jonizaciniai prietaisai yra bipoliniai, vienpoliai, adatiniai jonizatoriai, taip pat neterminės / šaltosios plazmos technologijos. Jų veikimo principas yra pagrįstas jonizuotų dujų kūrimu, išlydžio generavimu, kurio metu susidaro vandenilio ir deguonies jonai. Šie jonai aktyviai ardo mikroorganizmų sienelės ir jų sandarą formuodami klusterius apie juos.

Aktualiausiuose išanalizuotuose eksperimentuose buvo aptariami keli prietaisai: bipolinis jonizatorius, oro dezinfekcija ozonu ir neterminės plazmos technologijos naudojimas. Bipolinio jonizatoriaus efektyvumas buvo 87 %; dezinfekcijos ozonu efektyvumas siekė daugiau nei 99 % ir neterminės plazmos technologija pasiekė neįtikėtinai didelį efektyvumą: > 99 %.

Šiai dienai naudojami alternatyvūs metodai yra paviršių dezinfekcija etanoliu ar vandenilio peroksidu, UV spinduliuotės naudojimas, dezinfekcija ozonu ir kitomis dujomis. Visi šie būdai yra efektyvūs, tačiau ne visi yra saugūs žmogui. UV spinduliuotė kelia didelę grėsmę žmogaus sveikatai, paviršių dezinfekavimas įvairia chemija nepasiekia ilgalaikio poveikio, ji veikia momentiška su paviršiaus sąlyčiu, ozono dezinfekcijos metu būtina užtikrinti tinkamas koncentracijas, kurias reglamentuoja EU direktyvos ir WHO organizacija. 1 lentelėje pateikiami ir kitų alternatyvių metodų mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumai bei laikas, per kurį metodas pasiekia įvardytą efektyvumą.

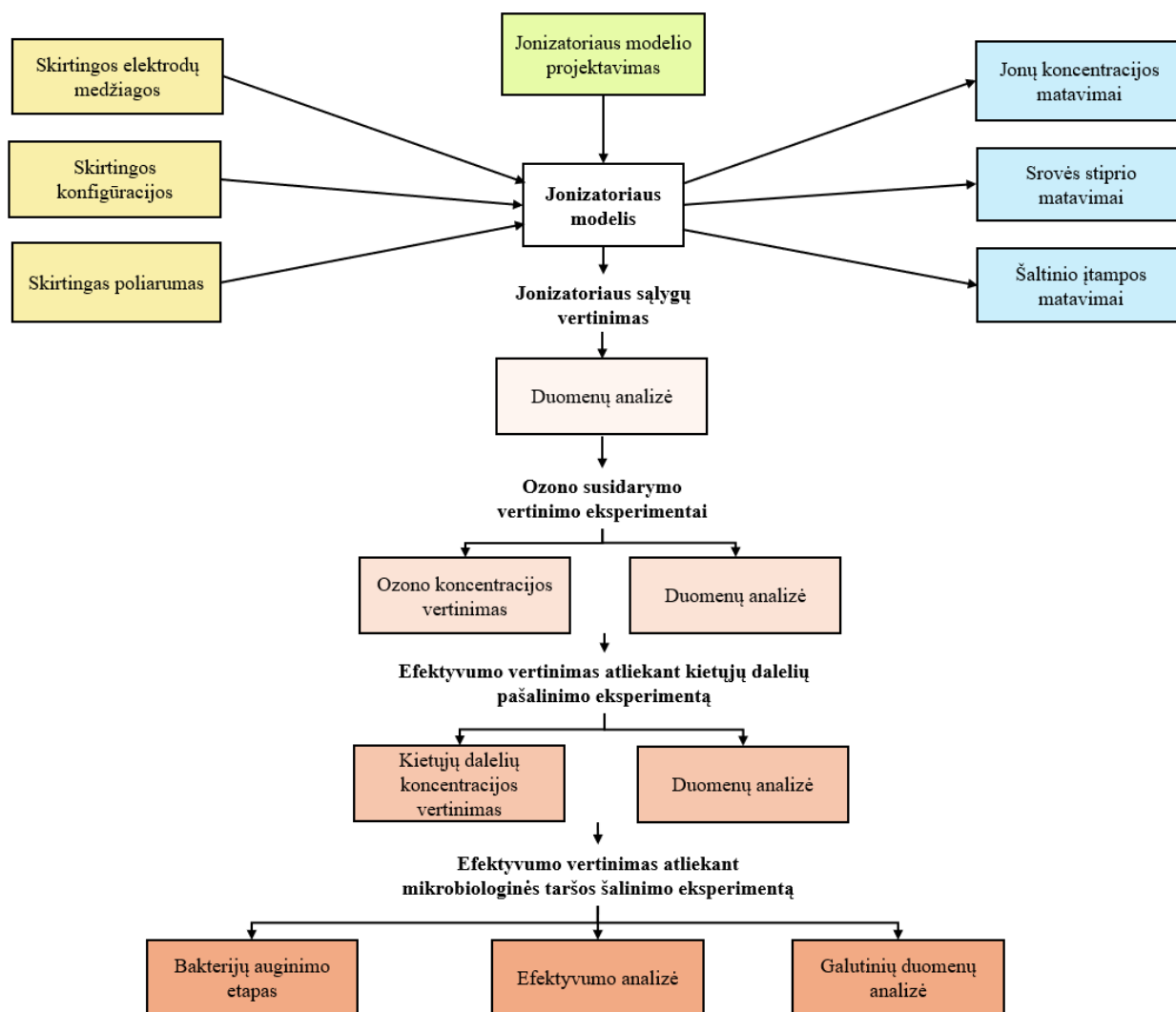
1 lentelė: Alternatyvių priemonių ir įrenginių palyginimas su jonizacinėmis technologijomis

Įrenginys	Efektyvumas	Laikas, per kurį pasiekiamas efektyvumas	Šaltinis
UV spinduliuotė	> 99 %	Iš karto	[21]
Bipoliniai jonizatoriai	Iki 87 %	Apie 90 min	[30]
Šaltosios plazmos įrenginys	> 99 %	Per 90 min	[21]
Dezinfekcija ozono dujomis	> 90 %	Apie 2 h	[32]
Paviršių dezinfekavimas etanoliu ar vandenilio peroksidu	nuo 62 % iki 80 %	Iš karto	[38]

2. Tyrimų metodika

2.1. Tyrimo planas

Šis tyrimas atliktas septyniais etapais: jonizatoriaus sukūrimas; elektrodų medžiagos, konfiguracijos ir poliarumo bandymai; jonų koncentracijos, srovės stiprio ir šaltinio įtampos matavimai; gautų jonizatoriaus sąlygų vertinimas; ozono susidarymo vertinimo eksperimentai; kietųjų dalelių šalinimo eksperimentai ir mikrobiologinės oro taršos šalinimo eksperimentai. Tyrimo plano schema pavaizduota 11 paveiksle.



11 pav. Tyrimo planas

2.2. Naudota įranga

Siekiant sukurti jonizatorių, kuris bus naudojamas jonų generacijai ir eksperimentui įgyvendinti, naudojamas 3D spausdintuvas (Original Prusa, Čekija). Jonizatoriaus ir įvairių jo elektrodų kombinacijoms suprojektavimui pasinaudota „FreeCad“ ir 3D spausdinimo programos. Jonų koncentracijai ore išmatuoti naudojamas jonų matuoklis „AIC3Pro“ (Alphalab Inc, JAV). Norint išmatuoti kietųjų dalelių skaičių ore, naudojamas žemo slėgio impaktorius „Elpi+“ (Dekati, Suomija).

Kadangi dirbama su mikroorganizmais, reikalinga sterili aplinka ir sterilūs indai, todėl autoklavas buvo naudojamas indams, vandeniui, pipečių antgaliams (10 ml ir 1 ml) bei mėgintuvėliams sterilizuoti, taip pat terpei Petri lėkštelėms paruošti. Naudojamos dvi automatinės pipetės: 1000 μ L (Capp Bravo, Vokietija) ir 10 mL (VITLAB, Vokietija). Mikrobiologinės oro taršos įvertinimui naudojamos priemonės bakterijų kultūroms išgryninti ir auginti: Petri lėkštelės ir termostatas (Lindberg/MPH, JAV) joms augti. Kadangi jonizacijos metu susidaro ozonas, jo koncentracijos stebėjimui naudotas ozono koncentracijos matuoklis „M 106 Ozone Analyzer“ (2B Tech, JAV).

Mikrobiologinei eksperimento daliai naudojami laboratoriniai indai: laboratoriniai stikliniai buteliai (500 mL, 1000 mL), cheminės stiklinės (800 mL ir 250 mL) ir 100 mL kolbos.

Mikroorganizmus paskleisti ore naudojamas Kolisono nebulizatorius. Norint paimti mėginius, naudojamas pilnai stiklinis impingeris su prijungta membranine pompa. Mikroorganizmų paskleidimui ant Petri lėkštelių naudojama Drigalskio mentelė. Užtikrinti sterilią erdvę, kai dirbama su gautais mėginiais, naudojama spiritinė lemputė.

Sukurti oro srautą jonizatoriuje naudojamas kompiuteriui skirtas ventiliatorius. Siekiant generuoti aukštą įtampą, naudojami du aukštos įtampos šaltiniai, kurie generuoja teigiamo ir neigiamo poliarumo įtampą. Taip pat, naudojamas ir įtampos šaltinis, skirtas ventiliatoriui. Teisingai išmatuoti oro srauto greitį prie jonizatoriaus elektrodų, naudojamas oro srauto greičio matuoklis „DEM900“ (Velleman, Belgija). Nustatyti tikslias elektrinių parametrų vertes bei jų matavimams naudojamas osciloskopas ir 1:1000 daliklis.

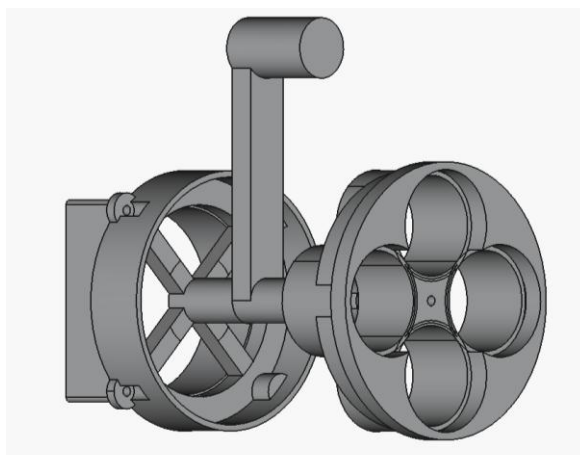
2.3. Naudotos medžiagos

Gaminant terpę Petri lėkštelėms naudojamas MRS agaras, selektyvus *L. casei* bakterijoms (Condalab, Ispanija). Gram teigiamos *Lactobacillus casei* (*L. casei*) bakterijos gaunamos iš jogurto. Pasigaminti fiziologinį ir kietųjų dalelių tirpalus panaudotas natrio chloridas (NaCl).

2.4. Eksperimento eiga

2.4.1. Jonizatoriaus ir bandymo patalpos paruošimas

Pasiruošimas eksperimentui buvo pradėtas nuo jonizatoriaus suprojektavimo „FreeCad“ programoje. Suprojektuoto jonizatoriaus brėžinys pateiktas 12 paveiksle.



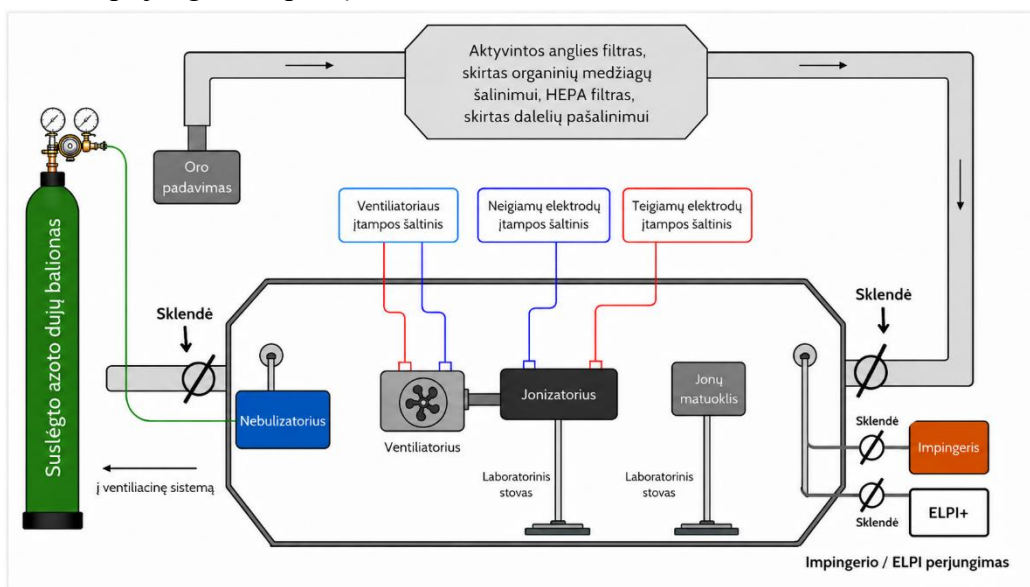
12 pav. Jonizatoriaus brėžinys, nubraižytas „FreeCad“ programoje

Norint užtikrinti saugią ir uždarą patalpą, eksperimentinė dalis buvo atliekama bandymo kameroje. Reali eksperimentinė erdvė pavaizduota 13 paveiksle, o eksperimento supaprastinta schema, kai naudojamas bipolinis jonizatoriaus tipas, pateikta 14 paveiksle. Kameros atviros vietos ir plyšiai yra uždengiami ir užsandarinami prisukant varžtais ir lipnia aliuminio juosta, kad oro nutekėjimas būtų kuo mažesnis.



13 pav. Bandymo patalpa, naudota atlikti eksperimentams

Suprojektuotas jonizatorius buvo atspausdintas 3D spausdintuvu. Vidinė dalis, kur kyšo elektrodai, apklijuoti aliuminio lipnia juosta, kad išlydžio metu krūvininkai galėtų saugiai nutekėti į žeminimo laidu. Kad oro srautas iš ventiliatoriaus būtų kuo tiksliau nukreipiamas link elektrodų ir jonų išsklaidymas būtų efektyviausias, ant jonizatoriaus buvo uždėtas uždangalas, pagamintas iš PVC vamzdžio. Plyšiai ir įėjimai užsandarinti lipnia juosta. Prisukamas ventiliatorius prie jonizatoriaus šono. Tuomet šis paruoštas jonizatorius pritvirtinamas prie laboratorijos stovo, kad būtų stabilioje padėtyje visą bandymo laikotarpį. Jonų matuoklis pritvirtinamas ant laboratorinio stovo taip, kad jis būtų nutolęs nuo jonizatoriaus elektrodų 20 cm atstumu. Dėl tikslesnių rezultatų, jonų matuoklio įžeminimo laidas prijungiamas prie įžeminimui skirtos vietos.

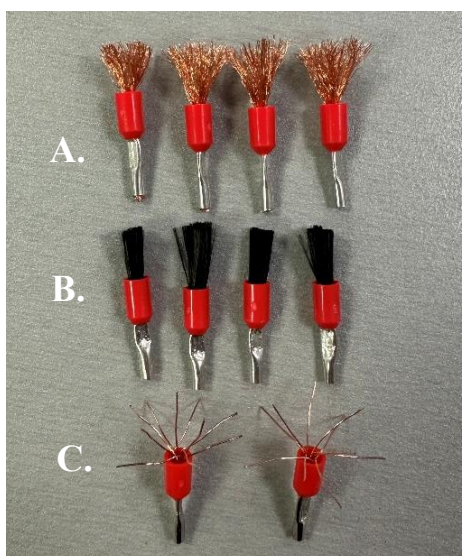


14 pav. Supaprastinta bandymo schema, kai naudojamas bipolinio režimo jonizatoriaus tipas

Kai yra paruošiamas jonizatorius, svarbu nustatyti, ties kokiomis ventilatoriaus įtampos šaltinio įtampų vertėmis yra pasiekiami įvairūs vėjo srauto greičiai prie jonizatoriaus elektrodų. Pasinaudojant vėjo srauto greičio matuokliu, išmatuojamas vėjo greitis prie elektrodų su skirtingomis ventilatoriaus įtampos vertėmis.

2.4.2. Elektrodų gamyba ir jų bandymas

Elektrodai šiame baigiamajame darbe buvo gaminami iš volframo, vario ir anglies pluošto. Volframo, vario ir anglies pluošto elektrodai ruošiami šių medžiagų vielutes ir siūlelius užpresuojant variniuose vamzdeliuose. Kiekvienos medžiagos elektrodų paruošiama įvairių kombinacijų: anglies pluošto elektrodai turi vieną kombinaciją, kai anglies pluošto siūleliai yra naudojami; variniai elektrodai paruošiami keliomis kombinacijomis, kai naudojama 10 vielučių, jos yra išskleidžiamos apie 5 mm nuo centrinės pradinės padėties ir, kai pilnai išplečiami (didžiausias susidaręs kampas tarp centrinės padėties ir vielutės yra 90°), taip pat, naudojami ir tokie elektrodai, kurie sudaryti iš daug mažų vielučių ir tos vielutės išplečiamos apie 5 mm nuo centrinės padėties. Volframiniai elektrodai gaminami iš 10 siūlelių. Kelios elektrodų kombinacijos pateiktos 15 paveiksle.



15 pav. Pagamintos elektrodų kombinacijos: a) vario elektrodai, pagaminti iš plonų vielučių; b) anglies pluošto elektrodai, pagaminti iš anglies pluošto siūlų; c) vario elektrodai, pagaminti iš storų vielučių, kurios yra toli viena nuo kitos (kai išorinės vielutės atlenkiamos 90° nuo centrinės padėties)

Kiekviena kombinacija yra bandoma su skirtingomis įtampomis (2, 4, 6, 8 ir 10 kV). Bandymai atliekami su skirtingo poliarumo įtampomis, t. y., naudojami vienpolio tipo jonizatorius (kai elektrodai yra prijungiami tik prie teigiamo arba neigiamo poliarumo aukštos įtampos šaltinio), ir su bipoliniu jonizatoriaus tipu, kai du iš keturių elektrodų prijungiami prie teigiamo poliarumo įtampos šaltinio ir likę du prijungiami prie neigiamo. Skirtingų medžiagų elektrodai bandomi vienodomis sąlygomis ir matuojami jų generuojamų jonų koncentracijos.

2.4.3. Ozono koncentracijos matavimas

Išbandžius įvairias elektrodų medžiagas bei nustačius įtampas, ties kuriomis generuojamas palankiausias jonų kiekis bandymų kameroje, svarbu įsitikinti, kad generuojamo ozono koncentracija nėra pavojinga. Šiam eksperimentui buvo naudojamas ozono koncentracijos matuoklis keliose pasirinktose įtampose bei tik su viena elektrodo medžiaga.

Šiai bandymo daliai buvo pasirinktos 4, 7 kV ir 10 kV įtampos bei atliekami matavimai su neigiamo, teigiamo ir bipolinio poliarumo jonizatoriais kiekvienai įtampai naudojant anglies pluošto elektrodus. Gauti duomenys buvo registruojami kas 2 minutes 30 minučių laiko tarpe.

Prieš kiekvieną bandymą registruojama nulinė koncentracija. Ši koncentracija naudojama gauti tikslius duomenis tolimesniuose ozono matavimuose.

2.4.4. Kietųjų dalelių šalinimo eksperimentas

Kietųjų dalelių eksperimentinei daliai pasirošiamos kietosios dalelės. Paruošiamas 100 mL 0,1 % NaCl tirpalas, kuris imituos kietųjų dalelių taršą eksperimentinėje bandymų kameroje. Norint paruošti šį tirpalą, reikia pasverti 0,1 g NaCl ir sumaišyti su 100 mL distiliuotu vandeniu.

Įjungiamas „Elpi +“ prietaisas ir paliekamas veikti 15 min, kad apšiltų ir būtų paruoštas matavimams.

Eksperimentas prasideda nuo fone esančių dalelių matavimo, kuris trunka 3 min. Po fono nustatymo, nebulizuojamas paruoštas tirpalas 2 min į bandymų kamerą naudojant Kolisono nebulizatorių. 2 min leidžiama dalelėms pasiskirstyti bandymų kameroje. Kai dalelės pasiskirsto bandymų kameroje, matuojamas dalelių mažėjimas 30 min. Matavimai susideda iš kontrolinio bandymo, kai veikia tik jonizatoriaus ventiliatorius, kad būtų maišomas oras, ir jonizatoriui veikiant 7 kV įtampos teigiamo, neigiamo ir bipolinio poliarumų režimais.

2.4.5. Pasiruošimas mikrobiologinei bandymo daliai

Atliekant eksperimentinę dalį su mikroorganizmais, svarbu pasiruošti sterilią aplinką ir naudojamas priemonės. Pirmiausia, bandymo kamera yra išdezinfekuojama naudojant dezinfekcinį skystį. Įrankių ir priemonių sterilizacijai buvo pasirenkamas autoklavavimo metodas. Paruošiami mėgintuvėliai, pipečių antgaliai, kolba, impingeris, Kolisono nebulizatorius autoklavavimo procesui. Paruošti mėgintuvėliai ir pipečių antgaliai sudedami į cheminę stiklinę, jos viršus taip pat uždengiamas folija.

Tuomet paruošiamas MRS agaras. Su analizinėmis svarstyklėmis pasisveriamas 56,16 g agaro ir sumaišomas su 800 mL distiliuotu vandeniu laboratoriniame stikliniame butelyje.

Paruošiamas 0,9 % NaCl fiziologinis tirpalas. Pasveriamas 4,5 g NaCl ir sumaišoma su 500 mL distiliuotu vandeniu.

Kai pasiruošiami visi reikiami laboratoriniai indai ir sumaišomas agaras bei fiziologinis tirpalas, į autoklavą pilamas distiliuotas vanduo, kol bus šiek tiek apsemtas dugnas. Ant dugno sudedami paruošti ne pilnai užsukti (dangtelis turi šiek tiek judėti) laboratoriniai stikliniai buteliai, įdedami sandariai su folija uždarytos cheminės stiklinės, su viduje esančiais mėgintuvėliais ir automatinė pipečių antgaliais, įdedamas impingeris ir nebulizatorius. Autoklavas sandariai užsukamas ir jo temperatūrą nustatoma iki 120 °C, ir laikas 20 min, Šis laikas skaičiuojamas nuo tada, kai autoklavas pilnai įkaista iki nustatytos temperatūros. Autoklave palaikomas 1 bar slėgis.

Praėjus nustatytam laikui iš autoklavo išleidžiami susidarę vandens garai, jis atidaromas. Nebesklindant garams iš autoklavo, ištraukiami sterilūs prietaisai ir laboratoriniai indai. Paruoštas agaras gerai suplakamas, kad visi sluoksniai išsimaišytų.

Tuomet pakartotinai dezinfekuojami paviršiai, kur bus dirbama. Į švarias Petri lėkšteles išpilstomas paruoštas agaras. Skysčio aukštis lėkštelėse siekia nuo 2 mm iki 4 mm. Lėkštelės uždaromos ir

paliekamos atvėsti. Atvėsus ir sustingus agarui, jos yra naudojamos iš karto atlikti eksperimentui, siekiant išvengti kontaminacijos, jos nebuvo laikomos šaldytuve.

2.4.6. Aukštos įtampos šaltinių patikrinimas

Naudoti aukštos įtampos šaltiniai jonizatoriaus elektrodams nėra komerciniai prietaisai, jie yra sukonstruoti, todėl labai svarbu įsitikinti, kad įtampos šaltinio skalėje matomos vertės atitinka realias vertes, kurios pasiekia elektrodus. Dėl šios priežasties naudojamas osciloskopas ir 1:1000 daliklis. Daliklis naudojamas, kad būtų galima osciloskopu matyti dideles įtampos vertes.

Pirmiausia osciloskopas įjungiamas ir prie vieno iš jo kanalų prijungiamas daliklis. Osciloskope nustatoma, kad vertės, pasiekiančios osciloskopą yra 1000 kartų mažesnės dėl naudojamo daliklio. Daliklio įžeminimo laidas prijungiamas prie įžeminimui skirtos vietos. Įjungiamas aukštos įtampos šaltinis, pasirenkama jo skalėje vieną iš verčių ir tuomet priliečiamas daliklis prie elektrodo. Stebimas osciloskopas ir jo registruojamas įtampos signalas. Tai pakartojame su visais elektrodais ir naudojamomis įtampos vertėmis.

2.4.7. Mikrobiologinio bandymo dalis ore

Pradedami ruošti bakterijų tirpalai. *L. casei* bakterijos užauginamos MRS agare inkubuojant, kuris yra selektyvus tik *L. casei* bakterijoms, 30 °C temperatūroje 72 valandas [41].

Kai bakterijos užauginamos, pasinaudojant sterilia Drigalskio mentele (kuri dezinfekuojama etanoliu ir nudeginama liepsna), nuimamos jų kolonijos nuo Petri lėkštelių. Šios kolonijos suspenduojamos fiziologiniame tirpale (0,9 % NaCl). Iš gautų šviežiai užaugusių bakterijų kultūrų ruošiama suspensija, jog visų mikrobiologinių bandymų metu būtų užtikrinamas vienodas bakterijų kiekis ore. Jų koncentracija normalizuojama spektrofotometru, naudojant 600 nm bangos ilgį, kol pasiekiamas optinis tankis lygus vienetui. Šis tankis atitinka, kad 1 mL yra 10^9 bakterijų. Spektrofotometro nulis nustatomas kaip fiziologinio tirpalo absorbcijos vertė [41].

Fiziologinis tirpalas su bakterijomis supilamas į Kolisono nebulizatorių, kurio darbinis slėgis yra parenkamas 2 bar. Po aerolizacijos, kai aerolizuojama 5 min naudojant suspaustas azoto dujas, įjungiamas jonizatoriaus ventiliatorius, kad patalpoje nusistovėtų pastovi bioaerolio koncentracija. Tuomet imamas oro mėginys, prieš oro apdorojimą jonizatoriumi [41].

Norint paimti mėginį iš oro, naudojamas pilnai stiklinis impingeris. Šis impingeris prijungiamas prie membraninės pompos, kurios oro srautas nustatomas 0,56 L/min. Į impingerį įpilama 10 mL fiziologinio skysčio. Impingeris paliekamas veikti 10 min [41].

Po veikimo, iš impingerio į sterilų mėgintuvėlį įpilamas skystis. Viskas daroma prie spiritinės lemputės, kad būtų sterilu. Šis skystis praskiedžiamas 10 ir 100 kartų. Iš gautų mėginių paimama po 100 µL ir užlašinama ant agaro. Su sterilia Drigalskio mentele mėginys paskleidžiamas ant agaro. Petri lėkštelės uždaromos ir įdedamos į inkubatorių 30 °C, 72 valandoms [41].

Po mėginių paėmimo įjungiamas jonizatorius (jonizatoriaus tipas ir elektrodai, kurie generuoja didžiausią kiekį jonų ir mažiausią kiekį ozono, yra nustatomas prieš tai aprašytuose bandymo etapuose) [41].

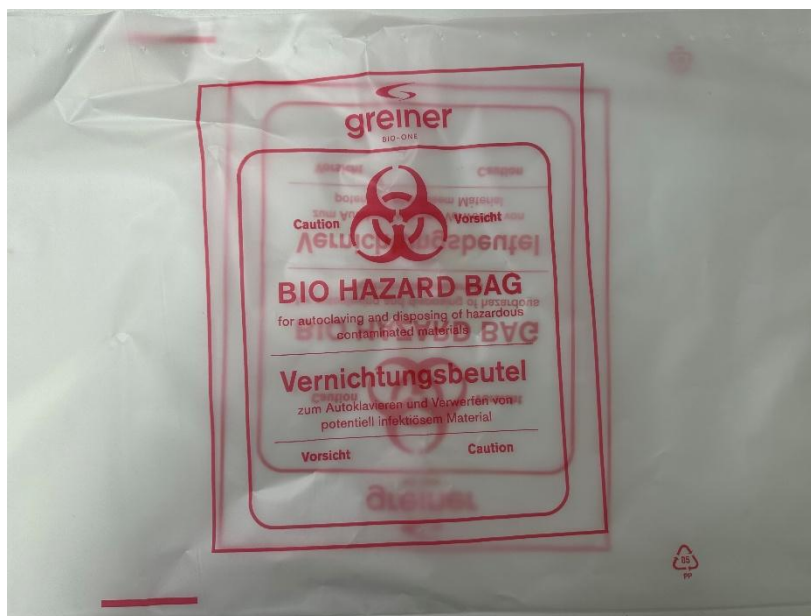
Po jonizatoriaus veikimo, paimami identiški mėginiai, jie praskiedžiami 10 ir 100 kartų. Mėginiai užlašinami ant agaro, paskleidžiami su sterilia Drigalskio mentele ir įdedami į inkubatorių [41].

Tai pakartojama po 20, 40 ir 60 min nuo jonizatoriaus įjungimo. Gaunamos Petri lėkštelės – prieš ir po jonizatoriaus veikimo oro mėginiais. Visi gauti mėginiai sėjami ant lėkštelių tris kartus [41].

Po inkubavimo laikotarpio lėkštelės išimamos iš inkubatoriaus ir suskaičiuojamos užaugusios bakterijų kolonijos. Jei kolonijos susilieja, skaičiuojamos su didesniu praskiedimu pagamintos lėkštelės. Suskaičiavus kolonijas, galima nustatyti jonizacijos efektyvumą, bei bakterijų kiekį 1 mL arba 1 m³ [41].

2.5. Panaudotų Petri lėkštelių šalinimas

Po eksperimentinės dalies su mikrobiologinėmis dalelėmis gaunamos panaudotos Petri lėkštelės. Šios lėkštelės, ant kurių užaugusios bakterijų kolonijos yra suskaičiuotos, sudedamos į biologinėms atliekoms skirtus maišus, pavaizduotus 16 paveiksle. Šie maišai yra autoklavuojami prieš tai paminėta tvarka: 120 °C 20 min. Po autoklavavimo proceso maišas su lėkštelėmis yra ištraukiamas iš autoklavo ir šalinamas kaip nepavojingos atliekos. Pasirinkta tokia tvarka, nes bakterijos nėra pavojingos ir naudojamos maisto pramonėje [42].



16 pav. Maišas, skirtas biologinėms atliekoms šalinti

2.6. Rezultatų analizė

Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo jonizacinėmis technologijomis efektyvumas apskaičiuojamas pagal sumažėjusį užaugusių kolonijų kiekį prieš ir po apdorojimo jonizuotomis dalelėmis. Tai įgyvendinti, pasiremiama Anderseno metodo formule (1). Šioje formulėje susiformavusių kolonijų skaičius (CFU) pateikiamas per kubinį metrą [43]:

$$\frac{CFU}{m^3} = \frac{N}{V}; \quad (1)$$

čia N – bendras susiformavusių kolonijų skaičius; V – mėginių ėmimo metu traukiamo oro tūris, m³.

Oro tūris, kuris buvo pertraukiamas per mėginio ėmimo laiką, apskaičiuojamas remiantis antrąja formule [43]:

$$V = Q \cdot t; \quad (2)$$

čia Q – naudotas oro srautas, m^3/min ; t – mėginių ėmimo laikas, min.

Kadangi apskaičiuojami susiformavę kolonijų vienetai yra ne tik iš gauto mėginio pasėtų lėkštelių, bet ir iš praskiestų mėginių, būtina pakoreguoti (1) formulę, kad ji tiktų apskaičiuoti gautus rezultatus.

$$\frac{CFU}{m^3} = \frac{N \cdot D \cdot V_m}{V_p \cdot V}; \quad (3)$$

čia D – praskiedimo koeficientas; V_m – bendras mėginio tūris, mL; V_p – į lėkštelę išsėtas tūris, mL.

Norint apskaičiuoti kolonijas sudarančių vienetų koncentraciją mėginyje viename mililitre, reikia remtis standartine serijinių skiedimų formule (4) [44].

$$\frac{CFU}{mL} = \frac{N}{D \cdot V_p}. \quad (4)$$

Jonizacijos efektyvumas apskaičiuojamas pagal trečią formulę [43]:

$$\eta = \left(1 - \frac{CFU_{po}}{CFU_{prieš}}\right) \cdot 100\%; \quad (5)$$

čia CFU_{po} – suskaičiuotos užaugusios bakterijų kolonijos po tam tikro laiko; $CFU_{prieš}$ – suskaičiuotos užaugusios bakterijų kolonijos prieš jonizatoriaus veikimą.

Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumo paklaida apskaičiuojama pagal (6) formulę taikant netiesioginių paklaidų skaičiavimo taisykles.

$$\Delta\eta = 100\% \cdot \frac{CFU_{po}}{CFU_{prieš}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta CFU_{po}}{CFU_{po}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta CFU_{prieš}}{CFU_{prieš}}\right)^2}; \quad (6)$$

čia $\Delta CFU_{prieš}$ ir ΔCFU_{po} yra standartiniai nuokrypiai kolonijų formavimosi vienetų prieš įjungiant jonizatorių ir įjungus jonizatorių po tam tikro bandymo laiko, apskaičiuojami iš gautų rezultatų naudojantis „Excel“ programa.

Duomenų analizė atlikta naudojantis „Origin“ ir „Excel“ programomis.

3. Rezultatai ir jų aptarimas

3.1. Aukštos įtampos šaltinių patikrinimas

Naudojant pagamintus, o ne komercinius aukštos įtampos šaltinius, būtina juos patikrinti. Šiam patikrinimui naudojamas osciloskopas ir 1:1000 daliklis, kad būtų galima išmatuoti aukštas įtampas. Išmatuotų įtampų vertės pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Išmatuotos aukštos įtampos šaltinio vertės

U, kV	U išmatuota, kV (teigiamo poliaus šaltinis)	U išmatuota, kV (neigiamo poliaus šaltinis)
2	2,02	-1,98
4	4,03	-3,89
6	6,10	-6,01
8	8,40	-8,02
10	10,40	-9,97

Iš gautų rezultatų galima pastebėti, kad išmatuotos šaltinių vertės skiriasi nuo skalėje nurodytų verčių. Nuokrypiai nuo skalėje matomų verčių galėjo atsirasti dėl kalibravimo trūkumo, kuris atliekamas visiems komerciniams aukštos įtampos šaltiniams [45].

Taip pat, pagamintuose šaltiniuose naudojami tokie komponentai kaip rezistoriai, transformatoriai, potenciometrai ir kiti elementai, kurie turi tolerancijos. Dėl šios priežasties, nors ir įtampos šaltinis pagamintas naudojantis schemomis, gali duoti skirtingą išeinančią įtampą [45].

3.2. Bandyamas su skirtingomis elektrodo medžiagomis

Siekiant nustatyti elektrodo medžiagą, kuri būtų tinkama tolimesniems eksperimentams, buvo naudojami elektrodai pagaminti iš volframo, vario vielučių, kai storos vielutės yra arti ir toli viena nuo kitos, kai vielutės yra plonos, bei anglies pluošto. Buvo matuojama susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre esant 2, 4, 6, 8 ir 10 kV įtampoms. Pasirinktas toks elektrodų medžiagos įvertinimo būdas, nes kuo didesnę jonų koncentraciją generuojama žemose įtampose, tuo tokia medžiaga bus naudingesnė. Jonų koncentracija yra svarbi, nes kuo daugiau jonų generuoja elektrodo medžiaga, tuo yra didesnis mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas [46].

Išmatuoti duomenys, kai naudojami elektrodai iš volframo, pateikiami 3 lentelėje, kai naudojami vario elektrodai, kurių vielutės storos ir arti viena kitos – 4 lentelėje, kai vielutės storos ir toli viena nuo kitos – 5 lentelėje, o kai vielutės plonos – 6 lentelėje, anglies pluošto elektrodai – 7 lentelėje.

3 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant volframo elektrodus skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis

Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc. vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
Teigiamas	2	0,003	0,002	0,003	0,003	0,001
	4	0,007	0,006	0,0074	0,007	0,001
	6	0,609	0,006	0,512	0,376	0,324
	8	4,938	0,033	6,511	3,827	3,379
	10	7,581	0,519	8,598	5,566	4,400

Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc. vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
Neigiamas	2	0	0	0	0,000	0,000
	4	0	0	1,51	0,503	0,872
	6	0,804	0	5,42	2,075	2,925
	8	4,397	0,02	6,218	3,545	3,186
	10	6,658	0,155	7,258	4,690	3,939
Bipolinis	2	0,004	0,191	1,524	0,573	0,829
	4	11,775	10,194	16,766	12,912	3,430
	6	14,801	14,918	15,22	14,980	0,216
	8	13,281	16,684	17,493	15,819	2,235
	10	15,78	18,839	16,767	17,129	1,561

4 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant vario elektrodus, kurių vielutės yra storos ir arti viena kitos, skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis

Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc. vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
Teigiamas	2	0,004	0,002	0,003	0,003	0,001
	4	0,051	0,069	0,075	0,065	0,012
	6	9,417	9,365	9,273	9,352	0,073
	8	12,212	11,334	10,632	11,393	0,792
	10	15,364	16,374	16,213	15,984	0,543
Neigiamas	2	0	0	0	0,000	0,000
	4	0	0	0	0,000	0,000
	6	7,761	8,004	7,998	7,921	0,139
	8	9,386	8,708	9,014	9,036	0,340
	10	12,029	12,436	11,946	12,137	0,262
Bipolinis	2	0,005	0,002	0,007	0,005	0,003
	4	0,071	0,196	0,059	0,109	0,076
	6	18,356	17,836	18,537	18,243	0,364
	8	24,392	23,934	24,152	24,159	0,229
	10	26,308	25,367	25,405	25,693	0,533

5 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant vario elektrodus, kurių vielutės yra storos ir toli viena kitos, skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis

Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc. vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
Teigiamas	2	0,003	0,001	0,002	0,002	0,001
	4	2,834	2,724	2,701	2,753	0,071
	6	9,067	9,271	9,568	9,302	0,252

Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc, vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
	8	11,435	11,414	12,804	11,884	0,797
	10	14,576	15,035	15,001	14,871	0,256
Neigiamas	2	0	0	0	0,000	0,000
	4	0	0	0	0,000	0,000
	6	6,897	7,129	6,957	6,994	0,120
	8	8,665	9,148	9,598	9,137	0,467
	10	10,775	10,426	11,168	10,790	0,371
Bipolinis	2	0,004	0,058	0,027	0,030	0,027
	4	10,296	10,139	11,398	10,611	0,686
	6	16,021	17,306	18,383	17,237	1,183
	8	20,368	20,205	31,071	23,881	6,227
	10	24,306	25,354	25,981	25,214	0,846

6 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant vario elektrodus, kurių vielutės plonos, skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis

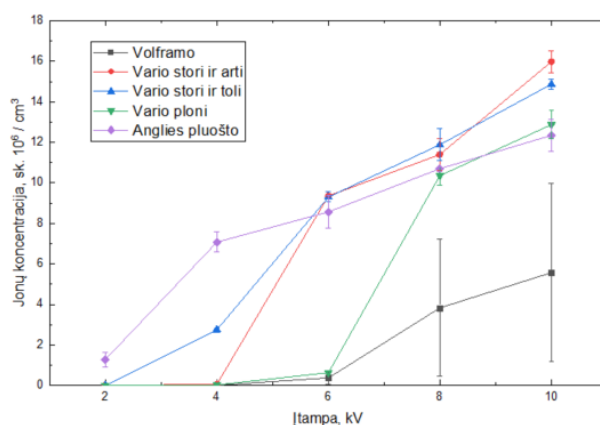
Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc, vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
Teigiamas	2	0,004	0,003	0,004	0,004	0,001
	4	0,013	0,066	0,019	0,033	0,029
	6	0,599	0,681	0,637	0,639	0,041
	8	9,857	10,489	10,732	10,359	0,452
	10	12,089	13,352	13,181	12,874	0,685
Neigiamas	2	0	0	0	0,000	0,000
	4	0,005	0,003	0,004	0,004	0,001
	6	5,925	5,42	4,615	5,320	0,661
	8	7,479	8,79	8,846	8,372	0,774
	10	9,084	10,675	9,738	9,832	0,800
Bipolinis	2	0,002	0,003	0,006	0,004	0,002
	4	0,695	0,527	1,026	0,749	0,254
	6	7,695	7,215	6,923	7,278	0,390
	8	13,268	14,215	13,459	13,647	0,501
	10	17,259	19,254	17,362	17,958	1,123

7 lentelė. Išmatuota susidariusi jonų koncentracija kubiniame centimetre naudojant anglies pluošto elektrodus skirtingose įtampose bei apskaičiuotas jonų skaičiaus vidurkis ir standartinis nuokrypis

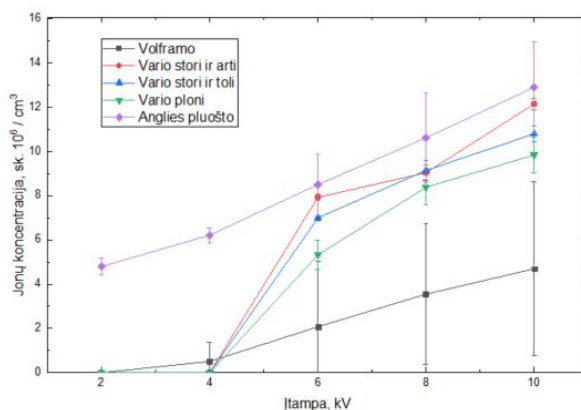
Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc, vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
Teigiamas	2	1,665	0,928	1,000	1,284	0,369
	4	7,357	6,499	7,360	7,072	0,496
	6	9,328	7,737	8,640	8,568	0,798

Būsena	U, kV	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³	Jonų konc, vidurkis, sk. · 10 ⁶ /cm ³	ΔJonų konc., sk. · 10 ⁶ /cm ³
	8	10,808	10,680	10,593	10,694	0,108
	10	13,235	11,700	12,096	12,344	0,797
Neigiamas	2	4,401	5,150	4,842	4,798	0,376
	4	5,934	6,122	6,586	6,214	0,336
	6	6,926	9,012	9,542	8,493	1,383
	8	8,268	11,651	11,912	10,610	2,033
	10	10,526	13,941	14,205	12,891	2,052
Bipolinis	2	0,298	8,183	6,637	5,039	4,178
	4	12,200	15,938	17,465	15,201	2,709
	6	17,336	19,493	20,696	19,175	1,702
	8	16,067	21,858	20,623	19,516	3,050
	10	16,486	23,019	21,381	20,295	3,399

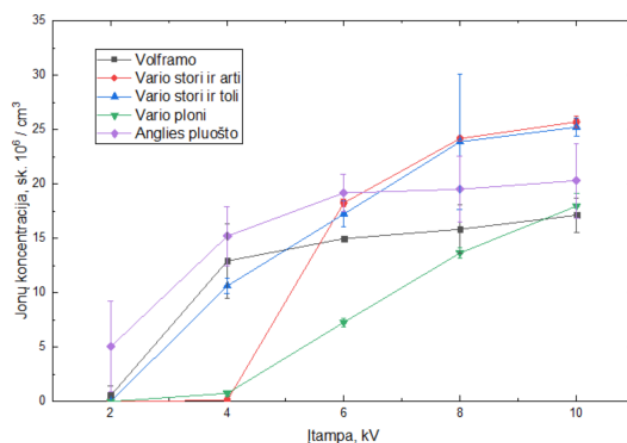
Iš gautų duomenų nubrėžiami grafikai. Jonų koncentracijos priklausomybė nuo naudojamos įtampos, kai matuojama teigiamos poliarumo įtampos režimu, pavaizduota 17 paveiksle, kai neigiamo – 18 paveiksle, kai bipolinio – 19 paveiksle. Grafikuose paklaidų linijos žymi standartinę nuokrypį.



17 pav. Skirtingų elektrodo medžiagų generuojamų jonų koncentracijos priklausomybė nuo naudojamos įtampos, kai naudojamas teigiamas jonizatoriaus režimas



18 pav. Skirtingų elektrodo medžiagų generuojamų jonų koncentracijos priklausomybė nuo naudojamos įtampos, kai naudojamas neigiamas jonizatoriaus režimas



19 pav. Skirtingų elektrodo medžiagų generuojamų jonų koncentracijos priklausomybė nuo naudojamos įtampos, kai naudojamas bipolinis jonizatoriaus režimas

Iš gautų duomenų, atlikus tyrimą su skirtingomis elektrodo medžiagomis ir jų konfigūracijomis, pastebima, kad anglies pluošto elektrodai pasižymi stabilium jonų generavimu ir didesniais jonų koncentracijos kiekiais ties mažesnėmis įtampomis, lyginant su kitų medžiagų elektrodais. Ties 4 kV matoma didesnė arba su kitomis medžiagomis palyginama jonų koncentracija, ypač naudojant neigiamą ir bipolinį jonizatoriaus režimus.

Siekiant įvertinti didesnės įtampos poveikį tolimesniuose eksperimentuose, buvo pasirinkta naudoti 7 kV įtampą su anglies pluošto elektrodais. Ši reikšmė pasirinkta dėl matomo jonų koncentracijos augimo įtampų intervale nuo 6 kV iki 8 kV kaip tarpinė įtampa.

Tokie įtampų pasirinkimai leidžia įvertinti skirtumą gaunamuose rezultatuose, kai naudojama žemesnė darbinė įtampa (4 kV) ir didesnė įtampa (7 kV), siekiant išvengti maksimalių įtampos verčių taikymo dėl galimo ozono generavimo.

Atsižvelgiant į generuojamas jonų koncentracijas šiose įtampose, gaunamų matavimų stabilumą ir literatūroje aprašytus anglies pluošto elektrodų privalumus, t. y., anglies pluošto elektrodai geba efektyviai generuoti jonus esant mažesnėms įtampoms bei ozono susidarymo rizika yra mažesnę, nei naudojant kitos medžiagos elektrodus, buvo pasirinkta naudoti būtent šias įtampas ir anglies pluošto medžiagos elektrodus tolimesniuose eksperimentuose, siekiant nustatyti ozono generavimo koncentracijas, kietųjų dalelių ir mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumus [17, 47].

3.3. Ozono matavimai ir rezultatų įvertinimas

Šioje bandymų dalyje buvo tiriama ozono koncentracija ore vykstant jonizacijai. Atlikus bandymus su skirtingomis elektrodų medžiagomis, buvo pasirinkta naudoti 4, 7 ir 10 kV įtampą, kai elektrodai pagaminti iš anglies pluošto. Bandymas buvo atliekamas 30 min kiekvienai įtampai, fiksuojant duomenis kas 2 minutes. Kiekvienai įtampai atliekami matavimai su skirtingu poliarumu – kai jonizatorius veikia teigiamu, neigiamu ir bipoliniu režimu. Gauti rezultatai pateikti 8, 9 ir 10 lentelėse atitinkamai, kai naudojama 4, 7 bei 10 kV įtampa.

Toks įtampų pasirinkimas buvo pagrįstas ankstesnių bandymų rezultatais. Atlikus bandymus su elektrodo medžiagomis, pasirinktos trys įtampos vertės, kuriose potencialiai gaunamas jonų

koncentracijos kiekis ore galėtų būti naudojamas tolimesnėse eksperimento dalyse dėl galimybės pasiekti aukštas mikrobiologinės oro taršos mažinimo efektyvumo vertes.

Ozono matavimai labai svarbūs siekiant įvertinti ore atsirandančią ozono taršą. Žinoma iš literatūros analizės, kad ozonas turi baktericidinių efektų. Dėl šios priežasties per didelė ozono koncentracija gali turėti įtakos ir gaunamiems rezultatams atliekant bandymus su mikrobiologinės oro taršos mažinimu [25, 31].

8 lentelė. Išmatuota generuojamo ozono koncentracija, kai naudojami anglies pluošto elektrodai ir 4 kV skirtingų poliarumų įtampa

Teigiamo poliarumo		Neigiamo poliarumo		Bipolinio poliarumo	
Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb
0	0	0	0	0	0
2	2	2	4,5	2	3
4	3,8	4	5,4	4	11
6	4,3	6	13,6	6	10,2
8	9,9	8	17,2	8	10,6
10	11,2	10	23,7	10	12
12	12,1	12	27,8	12	17
14	19,6	14	29,4	14	17,6
16	18,3	16	34,3	16	16,6
18	21,5	18	40	18	24,3
20	22,6	20	39,1	20	23,8
22	24,7	22	43,6	22	23,7
24	28,4	24	47,3	24	28,4
26	33,4	26	50,7	26	26,9
28	34,2	28	55	28	32,4
30	36	30	55,9	30	30,6

9 lentelė. Išmatuota generuojamo ozono koncentracija, kai naudojami anglies pluošto elektrodai ir 7 kV skirtingų poliarumų įtampa

Teigiamo poliarumo		Neigiamo poliarumo		Bipolinio poliarumo	
Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb
0	0	0	0	0	0
2	8,7	2	7,6	2	8,4
4	21,2	4	28,4	4	25,2
6	32	6	45,3	6	37
8	40,9	8	62,6	8	50,8
10	58	10	78,7	10	65,1
12	69,8	12	100	12	74,4
14	80,1	14	119,6	14	88,6
16	91,1	16	136,9	16	103,9

Teigiamo poliarumo		Neigiamo poliarumo		Bipolinio poliarumo	
Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb
18	102,9	18	155,1	18	115,6
20	107,6	20	175,8	20	126,2
22	119,8	22	191,4	22	140,5
24	129,4	24	215,4	24	152,2
26	143,6	26	228,2	26	167,8
28	152,9	28	254,3	28	173,8
30	163,7	30	263,9	30	188,7

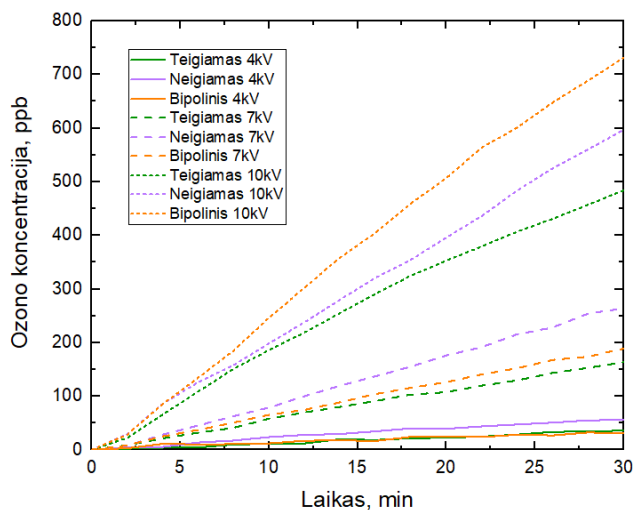
10 lentelė. Išmatuota generuojamo ozono koncentracija, kai naudojami anglies pluošto elektrodai ir 10 kV skirtingų poliarumų įtampa

Teigiamo poliarumo		Neigiamo poliarumo		Bipolinio poliarumo	
Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb	Laikas, min	Ozono konc., ppb
0	0	0	0	0	0
2	22	2	29	2	28
4	65,7	4	85,7	4	85,1
6	108,3	6	125,6	6	134,1
8	151	8	157,9	8	184,9
10	185,9	10	198,4	10	246,1
12	218,6	12	237,6	12	302,3
14	255	14	279,8	14	358,3
16	290,6	16	320,6	16	404,6
18	324,9	18	354,2	18	459,4
20	352,6	20	396	20	506,7
22	379,5	22	435,9	22	563,6
24	407,1	24	483,5	24	601,1
26	430,7	26	525,1	26	647,8
28	457,1	28	560,5	28	688,8
30	483,9	30	596,8	30	731

Visuose atliktuose matavimuose bandymų kameroje buvo palaikoma 43 % santykinė drėgmė ir 21,6 °C temperatūra.

Iš gautų duomenų nubrėžtas grafikas, pavaizduotas 20 paveiksle. Grafike pavaizduotos ozono koncentracijos skirtingose įtampose bei poliarumuose. Iš čia galima pastebėti, kad didėjant įtampai, didėja ir ozono koncentracija. Kai naudojama 4 kV įtampa, esant įvairiems įtampos poliarumams, jonizavimo metu susidaro labai mažas ozono kiekis ore, kuris yra saugus, nes neviršija 61,1 ppb ribos [36]. Taigi, siekiant sukurti jonizatorių, kuris būtų naudojamas kasdienėje aplinkoje, svarbu pasirinkti tinkamą įtampą dėl galimo šalutinio susidarančio ozono [12]. Pasirinkus 4 kV įtampą ozono koncentracija yra saugi.

Kai naudojama 7 kV ir 10 kV įtampa, ozono koncentracija viršija saugią nustatytą ribą, todėl jonizatorius, veikiantis ties šiomis įtampomis, būtų negalimas naudoti viešose patalpose [36].

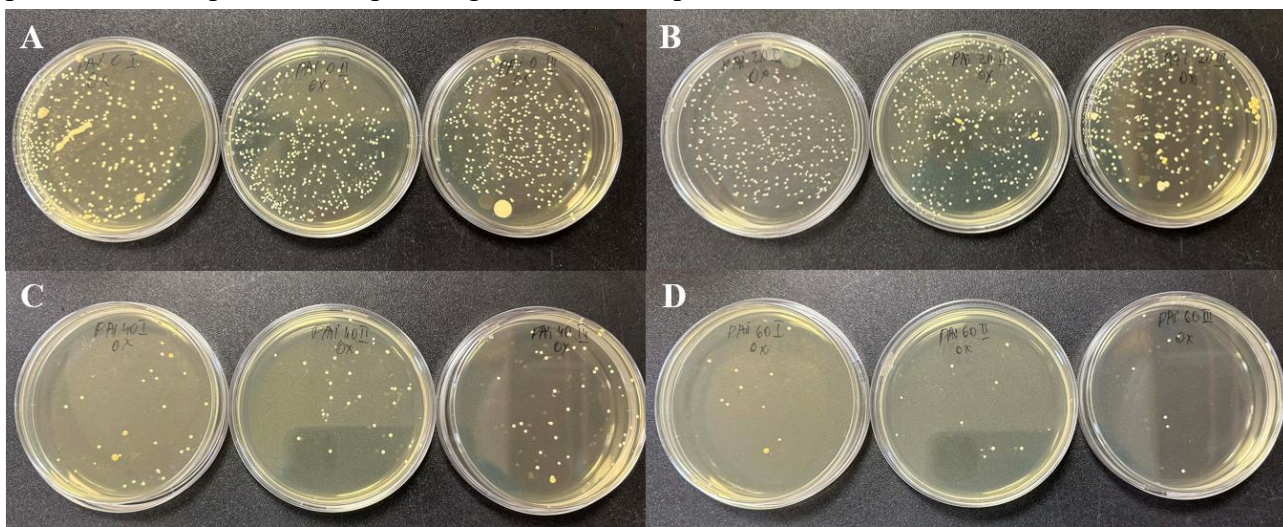


20 pav. Ozono koncentracijos kitimas laike, naudojant skirtingus jonizatoriaus režimus bei 4 kV, 7 kV ir 10 kV įtampų vertes

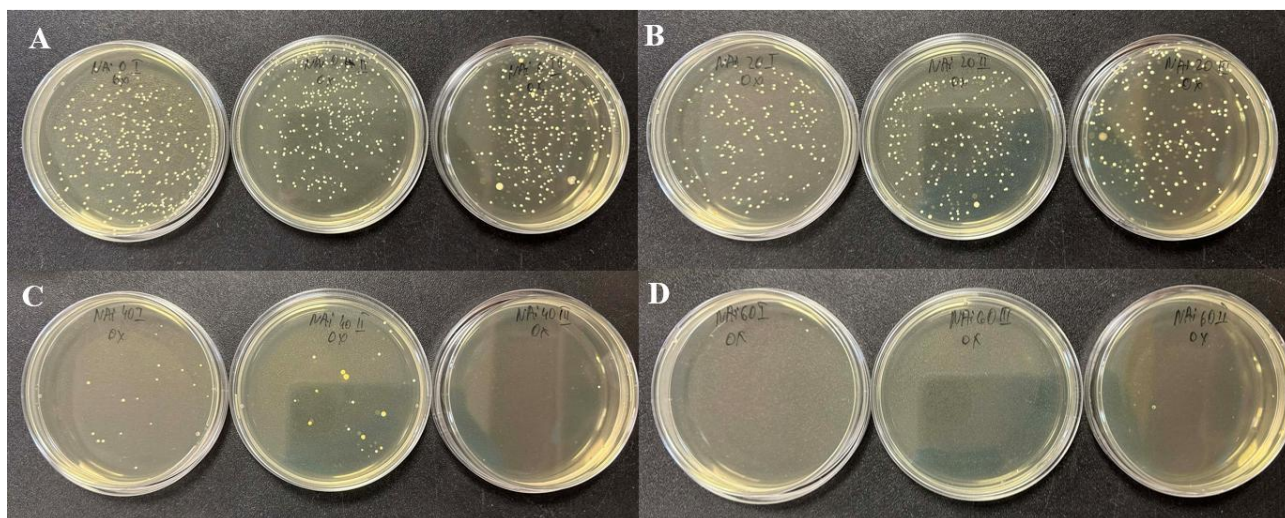
3.4. Mikrobiologinis bandymas ore

Šioje bandymo dalyje buvo tiriamas jonizatoriaus mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas, naudojant anglies pluošto elektrodus. Bandymas susidėjo iš keturių dalių: kontrolinio bandymo, kai uždaroje bandymo patalpoje nėra įjungiamas jonizatorius ir naudojant teigiamo, neigiamo ir bipolinio poliarumo įtampos jonizatorių. Oro mėginiai imami po 0, 20, 40 ir 60 min visais atvejais.

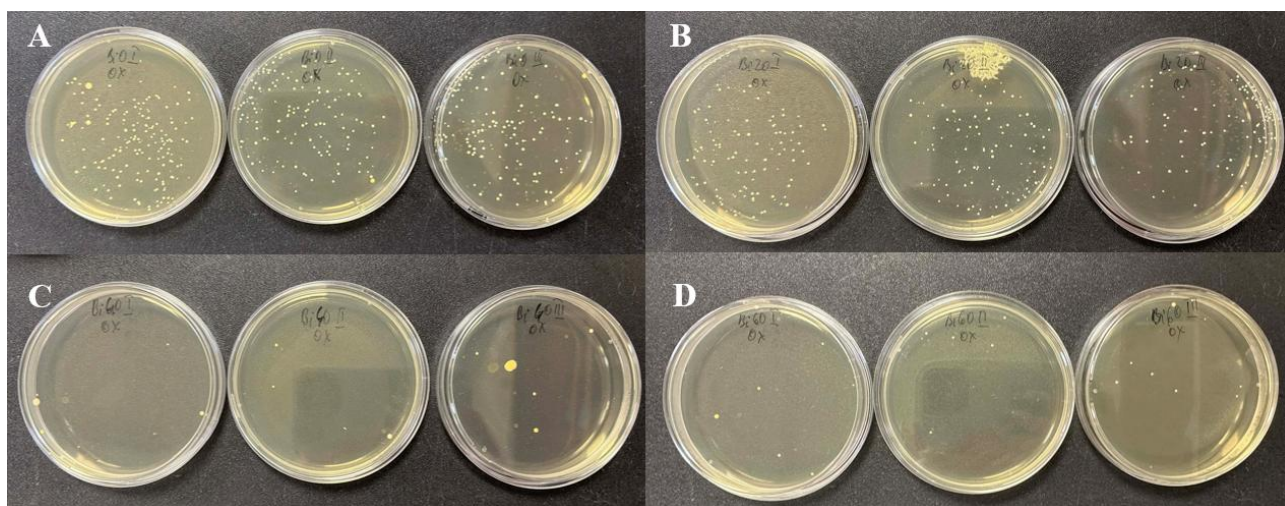
Gautos Petri lėkštelės su bandymo rezultatais po 0, 20, 40 ir 60 min naudojant 4 kV jonizatoriaus teigiamo, neigiamo ir bipolinio poliarumo įtampą, kai mėginys yra neskiedžiamas, po inkubacinio laikotarpio. 21 paveiksle pavaizduotos lėkštelės, naudojant teigiamo poliarumo jonizatorių, neigiamo poliarumo – 22 paveiksle, bipolinio poliarumo – 23 paveiksle.



21 pav. Gautos Petri lėkštelės su užaugusiomis *L. casei* bakterijų kolonijomis, naudojant teigiamo poliarumo 4 kV įtampą, gautas mėginys neskietas: a) po 0 min; b) po 20 min; c) po 40 min; d) po 60 min



23 pav. Gautos Petri lėkštelės su užaugusiomis *L. casei* bakterijų kolonijomis, naudojant neigiamo poliarumo 4 kV įtampą, gautas mėginys neskiestas: a) po 0 min; b) po 20 min; c) po 40 min; d) po 60 min



22 pav. Gautos Petri lėkštelės su užaugusiomis *L. casei* bakterijų kolonijomis, naudojant bipolinio poliarumo 4 kV įtampą, gautas mėginys neskiestas: a) po 0 min; b) po 20 min; c) po 40 min; d) po 60 min

Gauti rezultatai, suskaičiuavus užaugusias bakterijų kolonijas ant Petri lėkštelių, naudojant 4kV įtampą, pateikti 11 lentelėje. Naudojamas oro srauto greitis 1,5 m/s.

11 lentelė. Suskaičiuotos užaugusios bakterijų kolonijos, apskaičiuoti kolonijų formavimosi vienetai mililitre, mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas ir šių dydžių paklaidos, naudojant 4 kV įvairių poliarumų įtampą ir jonizatoriaus nenaudojant visai

Būsena	t, min	D, kartai	CFU I	CFU II	CFU III	CFU _{vid}	ΔCFU	CFU/mL, mL ⁻¹	ΔCFU/mL, mL ⁻¹	η, %	Δη, %
Kontrolė	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	172	170	188	176,67	9,87	17667	986,57		
		100	-	33	55	44,00	15,56	44000	1555,6		
	20	1	-	-	-	-	-	-	-	13,96	5,77
		10	148	156	-	152,00	5,66	15200	1609,3		

Būsena	t, min	D, kartai	CFU I	CFU II	CFU III	CFU _{vid}	ΔCFU	CFU/mL, mL ⁻¹	ΔCFU/mL, mL ⁻¹	η, %	Δη, %	
		100	21	36	25	27,33	7,77	27333	776,74			
	40	1	-	-	-	-	-	-	-	32,92	14,5	
		10	101	-	136	118,50	24,75	11850	1750			
	60	1	-	-	-	-	-	-	-	55,85	8,38	
		10	88	68	-	78,00	14,14	7800	1000			
Teigiamas	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		10	188	180	138	168,67	26,86	16867	2685,8			
		100	39	33	27	33,00	6,00	33000	600			
	20	1	-	-	-	-	-	-	-	45,26	12,19	
		10	98	76	103	92,33	14,36	9233	1436,4			
		100	-	-	-	-	-	-	-			
	40	1	-	96	144	120,00	33,94	1200	3394,1	84,39	4,1	
		10	20	29	30	26,33	5,51	2633	550,8			
	60	1	57	61	65	61,00	4,00	610	40	96,38	0,62	
		10	-	5	14	9,50	6,36	950	63,6			
	Neigiamas	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			10	-	232	162	197,00	49,50	19700	3500		
100			64	-	51	57,50	9,19	57500	919,2			
20		1	-	-	-	-	-	-	-	55,33	14,01	
		10	99	69	96	88,00	16,52	8800	1652,3			
		100	6	26	26	19,33	11,55	19333	1154,7			
40		1	149	160	-	154,50	7,78	15450	777,8	92,16	2,01	
		10	53	36	-	44,50	12,02	4450	850			
60		1	30	23	27	26,67	3,51	267	35,1	98,65	0,38	
		10	0	3	3	2,00	1,73	20	17,3			
Bipolinis		0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			10	217	199	189	201,67	14,19	20167	1418,9		
	100		-	27	35	31,00	5,66	31000	565,7			
	20	1	-	-	-	-	-	-	-	48,68	4,01	
		10	101	106	-	103,50	3,54	10350	353,6			
		100	14	12	11	12,33	1,53	12333	152,8			
	40	1	249	-	242	245,50	4,95	2455	494,9	87,83	0,89	
		10	70	-	101	85,50	21,92	8550	2192			
	60	1	112	110	-	111,00	1,41	1110	141,4	94,50	0,39	
		10	24	33	30	29,00	4,58	2900	458,3			

Ant Petri lėkštelių užaugusių kolonijų skaičius bei apskaičiuoti rezultatai, naudojant 7 kV įtampą, pateikti 12 lentelėje. Naudojamas oro srauto greitis 1,5 m/s. Kontrolės duomenys, pateikti 11 lentelėje, yra naudojami ir 7 kV įtampos jonizacijos efektyvumo skaičiavimams.

12 lentelė. Suskaičiuotos užaugusios bakterijų kolonijos, apskaičiuoti kolonijų formavimosi vienetai mililitre, mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas ir šių dydžių paklaidos, naudojant 7 kV įvairių poliarumų įtampą

Būseną	t, min	D, kartai	CFU I	CFU II	CFU III	CFU _{vid}	ΔCFU	CFU/mL, mL ⁻¹	ΔCFU/mL, mL ⁻¹	η, %	Δη, %	
Teigiamas	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		10	230	242	237	236,33	6,03	23633	602,8			
		100	3	3	10	5,33	4,04	5333	4041,5			
	20	1	-	-	-	-	-	-	-	-	55,29	2,22
		10	101	110	106	105,67	4,51	10567	450,9			
		100	10	9	-	9,50	0,71	9500	707,1			
	40	1	205	190	198	197,67	7,51	1977	75,1		91,64	0,38
		10	20	26	15	20,33	5,51	2033	550,8			
	60	1	71	80	61	70,67	9,50	707	95,1		97,01	0,41
		10	8	3	7	6,00	2,65	600	264,6			
	Neigiamas	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			10	189	200	195	194,67	5,51	19467	550,8		
100			20	14	26	20,00	6,00	20000	6000			
20		1	-	-	-	-	-	-	-	-	61,47	4,34
		10	82	77	66	75,00	8,19	7500	818,5			
		100	9	10	2	7,00	4,36	7000	4358,9			
40		1	77	69	62	69,33	7,51	693	75,1		96,44	0,4
		10	12	6	2	6,67	5,03	667	503,3			
60		1	5	8	12	8,33	3,51	83	35,1		99,57	0,18
		10	1	1	-	1,00	0,00	100	57,7			
Bipolinis		0	1	265	253	258	258,67	6,03	2587	60,3	-	-
			10	39	32	-	35,50	4,95	3550	494,9		
	100		4	6	3	4,33	1,53	4333	1527,5			
	20	1	123	135	110	122,67	12,50	1227	125		52,58	4,96
		10	32	-	-	32,00	-	3200	-			
		100	-	-	2	2,00	-	2000	-			
	40	1	23	21	-	22,00	1,41	220	10		91,49	0,43
		10	0	1	-	0,50	0,71	50	50			
	60	1	13	7	7	9,00	3,46	90	34,64		96,52	1,34
		10	0	1	1	0,67	0,58	67	57,7			

Siekiant įvertinti mikroorganizmų kolonijų formavimosi vienetų koncentraciją kubiniame metre ore (CFU/m³), buvo pasinaudota (3) formule. Mėginio ėmimo metu paimtas oro tūris apskaičiuojamas

remiantis (2) formule. Apskaičiuoti rezultatai ir standartinis nuokrypis, naudojant 4 kV ir 7 kV teigiamo, neigiamo, bipolinio poliarumo įtampas bei nenaudojant jonizatoriaus visai, pateikti 13 lentelėje.

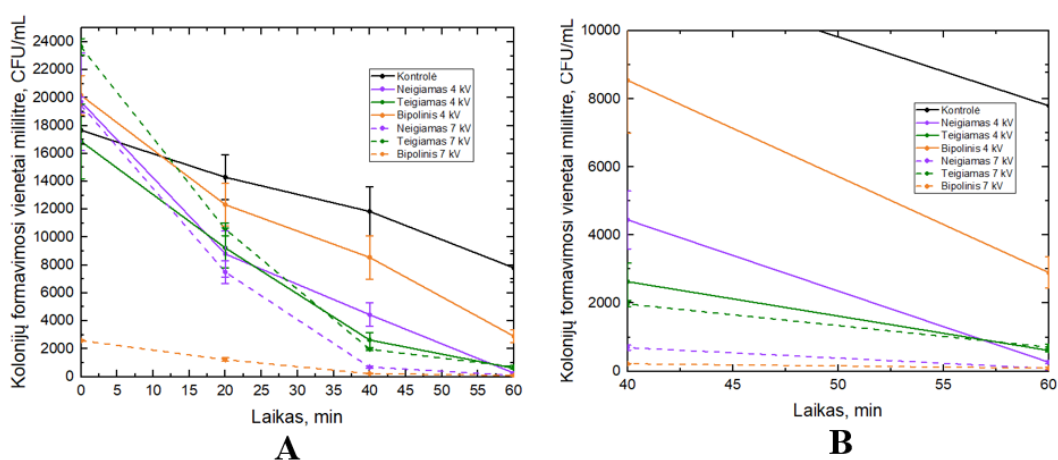
13 lentelė. Apskaičiuotas kolonijų formavimo vienetai kubiniame metre ištraukto oro, naudojant 4 kV ir 7 kV teigiamo, neigiamo, bipolinio poliarumo įtampas ir nenaudojant jonizatoriaus visai

Būsena	t, min	D, kartai	CFU/m ³ , m ⁻³ I	CFU/m ³ , m ⁻³ II	CFU/m ³ , m ⁻³ III	(CFU/m ³) _{vid} , m ⁻³	Δ(CFU/m ³), m ⁻³	
Kontrolė	0	1	-	-	-	-	-	
		10	3,071·10 ⁷	3,036·10 ⁷	3,357·10 ⁷	3,155·10 ⁷	1,762·10 ⁶	
		100		5,893·10 ⁷	9,821·10 ⁷	7,857·10 ⁷	2,778·10 ⁷	
	20	1	-	-	-	-	-	
		10	2,643·10 ⁷	2,786·10 ⁷		2,714·10 ⁷	1,010·10 ⁶	
		100	3,750·10 ⁷	6,429·10 ⁷	4,464·10 ⁷	4,881·10 ⁷	1,387·10 ⁷	
	40	1	-	-	-	-	-	
		10	1,804·10 ⁷	-	2,429·10 ⁷	2,116·10 ⁷	4,419·10 ⁶	
	60	1	-	-	-	-	-	
		10	1,571·10 ⁷	1,214·10 ⁷	-	1,393·10 ⁷	2,525·10 ⁶	
	Teigiamas 4 kV	0	1	-	-	-	-	-
			10	3,357·10 ⁷	3,214·10 ⁷	2,464·10 ⁷	3,012·10 ⁷	4,796·10 ⁶
100			6,964·10 ⁷	5,893·10 ⁷	4,821·10 ⁷	5,893·10 ⁷	1,071·10 ⁷	
20		1	-	-	-	-	-	
		10	1,750·10 ⁷	1,357·10 ⁷	1,839·10 ⁷	1,649·10 ⁷	2,565·10 ⁶	
		100	-	-	-	-	-	
40		1	-	1,714·10 ⁶	2,571·10 ⁶	2,143·10 ⁶	6,061·10 ⁵	
		10	3,571·10 ⁶	5,179·10 ⁶	5,357·10 ⁶	4,702·10 ⁶	9,835·10 ⁵	
60		1	1,018·10 ⁶	1,089·10 ⁶	1,161·10 ⁶	1,089·10 ⁶	7,143·10 ⁴	
		10	-	8,929·10 ⁵	2,500·10 ⁶	1,696·10 ⁶	1,136·10 ⁶	
Neigiamas 4 kV		0	1	-	-	-	-	-
			10	-	4,143·10 ⁷	2,893·10 ⁷	3,518·10 ⁷	8,839·10 ⁶
	100		1,143·10 ⁸	-	9,107·10 ⁷	1,027·10 ⁸	1,641·10 ⁷	
	20	1	-	-	-	-	-	
		10	1,768·10 ⁷	1,232·10 ⁷	1,714·10 ⁷	1,571·10 ⁷	2,950·10 ⁶	
		100	1,071·10 ⁷	4,643·10 ⁷	4,643·10 ⁷	3,452·10 ⁷	2,062·10 ⁷	
	40	1	2,661·10 ⁶	2,857·10 ⁶	-	2,759·10 ⁶	1,389·10 ⁵	
		10	9,464·10 ⁶	6,429·10 ⁶	-	7,946·10 ⁶	2,147·10 ⁶	
	60	1	5,357·10 ⁵	4,107·10 ⁵	4,821·10 ⁵	4,762·10 ⁵	6,271·10 ⁴	
		10	-	5,357·10 ⁵	5,357·10 ⁵	3,571·10 ⁵	3,093·10 ⁵	

Būsena	t, min	D, kartai	CFU/m ³ , m ⁻³ I	CFU/m ³ , m ⁻³ II	CFU/m ³ , m ⁻³ III	(CFU/m ³) _{vid} , m ⁻³	Δ(CFU/m ³), m ⁻³	
Bipolinis 4 kV	0	1	-	-	-	-	-	
		10	3,875·10 ⁷	3,554·10 ⁷	3,375·10 ⁷	3,601·10 ⁷	2,534·10 ⁶	
		100	-	4,821·10 ⁷	6,250·10 ⁷	5,536·10 ⁷	1,010·10 ⁷	
	20	1	-	-	-	-	-	
		10	1,804·10 ⁷	1,893·10 ⁷	-	1,848·10 ⁷	6,313·10 ⁵	
		100	2,500·10 ⁷	2,143·10 ⁷	1,964·10 ⁷	2,202·10 ⁷	2,728·10 ⁶	
	40	1	4,446·10 ⁶	-	4,321·10 ⁶	4,384·10 ⁶	8,839·10 ⁴	
		10	1,250·10 ⁷	-	1,804·10 ⁷	1,527·10 ⁷	3,914·10 ⁶	
	60	1	2,000·10 ⁶	1,964·10 ⁶	-	1,982·10 ⁶	2,525·10 ⁴	
		10	4,286·10 ⁶	5,893·10 ⁶	5,357·10 ⁶	5,179·10 ⁶	8,183·10 ⁵	
	Teigiamas 7 kV	0	1	-	-	-	-	-
			10	4,107·10 ⁷	4,321·10 ⁷	4,232·10 ⁷	4,220·10 ⁷	1,076·10 ⁶
100			5,357·10 ⁶	5,357·10 ⁶	1,786·10 ⁷	9,524·10 ⁶	7,217·10 ⁶	
20		1	-	-	-	-	-	
		10	1,804·10 ⁷	1,964·10 ⁷	1,893·10 ⁷	1,887·10 ⁷	8,052·10 ⁵	
		100	1,786·10 ⁷	1,607·10 ⁷	-	1,696·10 ⁷	1,263·10 ⁶	
40		1	3,661·10 ⁶	3,393·10 ⁶	3,536·10 ⁶	3,530·10 ⁶	1,340·10 ⁵	
		10	3,571·10 ⁶	4,643E·10 ⁶	2,679·10 ⁶	3,631·10 ⁶	9,835·10 ⁵	
60		1	1,268·10 ⁶	1,429·10 ⁶	1,089·10 ⁶	1,262·10 ⁶	1,697·10 ⁵	
		10	1,429·10 ⁶	5,357·10 ⁵	1,250·10 ⁶	1,071·10 ⁶	4,725·10 ⁵	
Neigiamas 7 kV		0	1	-	-	-	-	-
			10	3,375·10 ⁷	3,571·10 ⁷	3,482·10 ⁷	3,476·10 ⁷	9,835·10 ⁵
	100		3,571·10 ⁷	2,500·10 ⁷	4,643·10 ⁷	3,571·10 ⁷	1,071·10 ⁷	
	20	1	-	-	-	-	-	
		10	1,464·10 ⁷	1,375·10 ⁷	1,179·10 ⁷	1,339·10 ⁷	1,462·10 ⁶	
		100	1,607·10 ⁷	1,786·10 ⁷	3,571·10 ⁶	1,250·10 ⁷	7,784·10 ⁶	
	40	1	1,375·10 ⁶	1,232·10 ⁶	1,107·10 ⁶	1,238·10 ⁶	1,340·10 ⁵	
		10	2,143·10 ⁶	1,071·10 ⁶	3,571·10 ⁵	1,190·10 ⁶	8,988·10 ⁵	
	60	1	8,929·10 ⁴	1,429·10 ⁵	2,143·10 ⁵	1,488·10 ⁵	6,271·10 ⁴	
		10	1,786·10 ⁵	1,786·10 ⁵	-	1,786·10 ⁵	0	
	Bipolinis 7 kV	0	1	4,732·10 ⁶	4,518·10 ⁶	4,607·10 ⁶	4,619·10 ⁶	1,076·10 ⁵
			10	6,964·10 ⁶	5,714·10 ⁶	-	6,339·10 ⁶	8,839·10 ⁵
100			7,143·10 ⁶	1,071·10 ⁷	5,357·10 ⁶	7,738·10 ⁶	2,728·10 ⁶	
20		1	2,196·10 ⁶	2,411·10 ⁶	1,964·10 ⁶	2,190·10 ⁶	2,233·10 ⁵	
		10	5,714·10 ⁶	-	-	5,714·10 ⁶	-	

Būseną	t, min	D, kartai	CFU/m ³ , m ⁻³ I	CFU/m ³ , m ⁻³ II	CFU/m ³ , m ⁻³ III	(CFU/m ³) _{vid} , m ⁻³	Δ(CFU/m ³), m ⁻³
		100	-	-	3,571·10 ⁶	3,571·10 ⁶	-
	40	1	4,107·10 ⁵	3,750·10 ⁵	3,929·10 ⁵	3,929·10 ⁵	1,786·10 ⁴
		10	-	1,786·10 ⁵	8,929·10 ⁴	8,929·10 ⁴	8,929·10 ⁴
	60	1	2,321·10 ⁵	1,250·10 ⁵	1,250·10 ⁵	1,607·10 ⁵	6,186·10 ⁴
		10	-	1,786·10 ⁵	1,786·10 ⁵	1,190·10 ⁵	1,031·10 ⁵

Iš duomenų, pateiktuose 11 ir 12 lentelėse nubrėžiami grafikai, pavaizduoti 24 paveiksle. Grafike pavaizduota kolonijų formavimosi vienetai mililitre visą eksperimento laikotarpį nuo 0 min iki 60 min (24a pav.) ir laike nuo 40 min iki 60 min (24b pav.), o paklaidų juostos žymi standartinį nuokrypį.



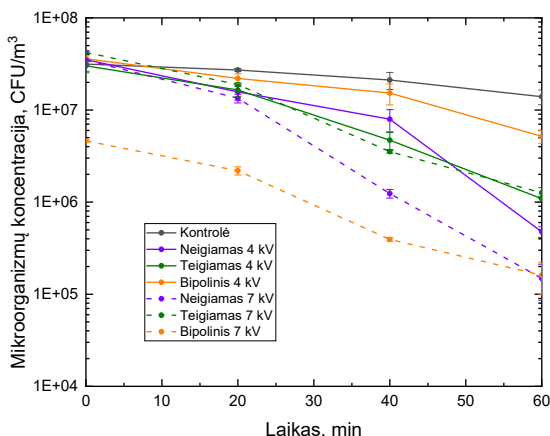
24 pav. Kolonijų formavimosi vienetų mililitre kitimas laike, naudojant 4 kV ir 7 kV įtampas, kai jonizatorius veikia skirtingai režimais: a) bendras kitimas laike nuo 0 iki 60 min; b) kitimas nuo 40 iki 60 min

Matyti, kad kontrolėje koncentracija taip pat mažėja, tačiau mažėjimas yra lėtesnis nei taikant jonizaciją. Tai reiškia, kad dalis mikroorganizmų galėjo nusėsti natūraliai dėl veikiamų gravitacinių jėgų. Jonizacija šį koncentracijos mažėjimą paspartino [48]. 24b pav. grafike aiškiau pastebimas jonizacijos poveikis kai naudojami 7 kV įtampos jonizatoriaus režimai, ypač didelis sumažėjimas pastebimas naudojant teigiamą ir neigiamą režimus.

Gauti rezultatai, pateikti 13 lentelėje, pavaizduoti 25 paveiksle. Grafiniam rezultatų pateikimui buvo naudojami tik tie rezultatai, kuriose kolonijų skaičius lėkštelėse buvo tarp 30–500. Iš gautų lėkštelių, kuriose užaugusių kolonijų skaičius buvo per didelis arba per mažas, į grafinę analizę nebuvo įtrauktos. Grafike pateiktos vidutinės CFU/m³ reikšmės, o paklaidų juostos žymi standartinį nuokrypį.

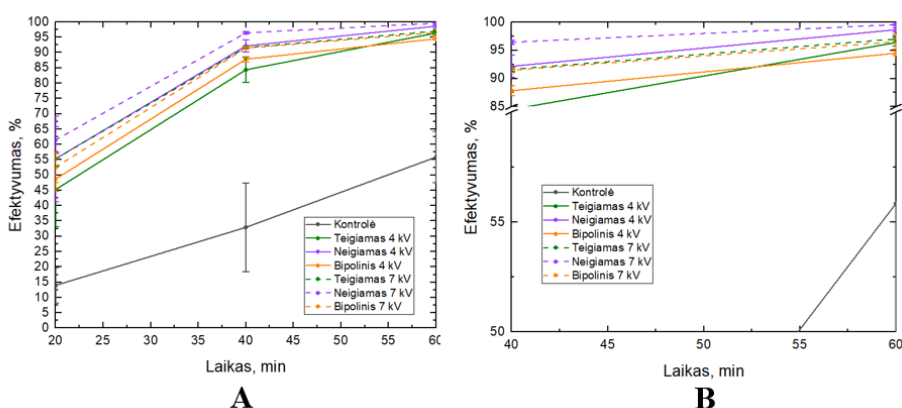
Iš grafiko pastebima, kad veikiant jonizatoriui mažėja mikrobiologinis oro užterštumas. Grafike pavaizduota kontrolinė linija mažėja nežymiai, nes jonizatorius neveikė. Ši linija išlieka aukšta visą bandymo laikotarpį. Įjungus jonizatorių, nepriklausomai ar buvo nustatytas 4 ar 7 kV įtampa, kolonijų formavimosi vienetai kubiniame metre išliko žemesni visą bandymo laikotarpį laike nuo 20 iki 60 min, nei kontroliniame bandyme gauti rezultatai. Taip pat, galima pastebėti, kad naudojant 7 kV

neigiamo ir bipolinio poliarumo įtampos režimus, buvo pasiektos mažiausios mikroorganizmų koncentracijos vertės po 60 min.



25 pav. Mikroorganizmų koncentracijos kitimas laike, kai naudojamas 4 kV ir 7 kV įvairių poliarumų jonizatoriaus režimai

Iš 11 ir 12 lentelių apskaičiuotų duomenų buvo nubrėžtas jonizatoriaus mikrobiologinio užterštumo mažinimo efektyvumo kitimas laike (26 pav.). Šiame grafike pavaizduotas bendras efektyvumo kitimas laike nuo 0 min iki 60 min (26a pav.) ir išdidintas vaizdas, kai efektyvumas laike kinta nuo 40 iki 60 min (26b pav.).



26 pav. Jonizacijos mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumo kitimas laike, naudojant 4 kV ir 7 kV įtampas, kai jonizatorius veikia skirtingai režimais: a) bendras kitimas laike nuo 0 iki 60 min; b) kitimas nuo 40 iki 60 min

Iš gautų rezultatų pastebima, kad kontroliniame bandyme efektyvumas didėja lėčiau ir po viso bandymo laikotarpio (60 min) buvo mažesnis nei taikant jonizaciją. Taikant jonizaciją visais jonizatoriaus režimais ir naudojant skirtingas įtampas pastebimas didesnis mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas. Praėjus 40 min bandymo laikotarpio, pastebima, kad visais jonizatoriaus veikimo režimais efektyvumas viršija 80 % efektyvumą, o po viso bandymo laikotarpio efektyvumas priartėja prie 95–100 %. Didžiausias efektyvumas pastebimas naudojant neigiamo poliarumo 7 kV įtampos jonizatoriaus režimą. Šis efektyvumas siekia $99,57 \% \pm 0,18 \%$ [21, 30].

Šių eksperimentų metu buvo naudojami anglies pluošto elektrodai. Jie yra tinkami mikrobiologinio oro užterštumui mažinti. Siekiant sumažinti mikrobiologinę oro taršą, efektyviausias jonizatoriaus

poliarumas buvo neigiamas. Vis dėlto, norint tokia technologiją pritaikyti praktiškai, būtina optimizuoti jonizatorius darbinę įtampą, kad būtų pasiektas didelis oro valymo efektyvumas ir nebūtų viršijama leistina ozono koncentracija ore.

3.5. Kietųjų dalelių šalinimo eksperimentas

Siekiant įvertinti kietųjų dalelių mažinimą naudojant jonizacines priemones, buvo naudojamas 7 kV teigiamo, neigiamo ir bipolinio poliarumo jonizatorius. Taip pat, atliekant kontrolinius bandymus, jonizatorius nebuvo naudojamas. Gautų duomenų pradinės vertės eksperimento metu nebuvo vienodos, todėl buvo pasirinktas duomenų normalizavimas. Tokiu būdu lengviau įvertinti duomenis bei nustatyti efektyvumus. Gauti duomenys pavaizduoti 27 paveiksle.

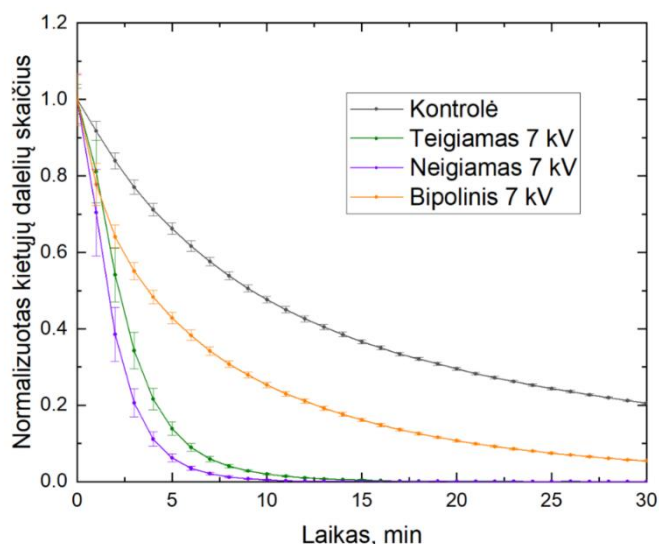
Kietųjų dalelių mažėjimui įvertinti gauti eksperimentiniai duomenys buvo aproksimuojami eksponentinio mažėjimo funkcija (7). Pagal gautus eksponentinio mažėjimo funkcijos koeficientus, apskaičiuotas mažėjimo koeficientas k (8), kuris padeda apibūdinti dalelių skaičiaus mažėjimo greitį. Kuo didesnė k reikšmė, tuo pastebimas didesnis dalelių skaičiaus mažėjimas [49, 50].

$$y = A_1 e^{-\frac{x}{t_1}} + y_0 = A_1 e^{-kx} + y_0; \quad (7)$$

čia y – normalizuotas kietųjų dalelių skaičius tam tikram laiko momentui; x – poveikio trukmė, min; A_1 – mažėjančio dalelių skaičiaus amplitudė; t_1 – charakteringas mažėjimo laikas, min; y_0 – liekamasis dalelių skaičius, prie kurio kreivė artėja kai ilgėja poveikio trukmė [49].

$$k = \frac{1}{t_1}. \quad (8)$$

Gautos eksponentinio mažėjimo funkcijos, jų charakteringieji mažėjimo laikai, mažėjimo koeficientai k ir determinacijos koeficientai kiekvienam bandymui pateikti 14 lentelėje.



27 pav. Normalizuotas kietųjų dalelių skaičiaus kitimas laike naudojant 7 kV įvairių poliarumų jonizatorių, bei nenaudojant jonizatoriaus visai

14 lentelė. Gautos kiekvieno jonizatoriaus režimo eksponentinio mažėjimo funkcijos, charakteringieji mažėjimo laikai, mažėjimo koeficientai ir determinacijos koeficientai

Būsena	Funkcija	t ₁ , min	k, min ⁻¹	R ²
Kontrolė	$y = 0,794e^{-\frac{x}{11,751}} + 0,185$	11,751	0,085	0,9980
Teigiamas	$y = 1,023e^{-\frac{x}{2,513}} + 0,001$	2,513	0,398	0,9927
Neigiamas	$y = 1,046e^{-\frac{x}{1,754}} + 0,001$	1,754	0,570	0,9918
Bipolinis	$y = 0,706e^{-\frac{x}{8,401}} + 0,019$	8,401	0,119	0,9966

Iš gautų determinacijos koeficientų pastebima, kad kietųjų dalelių mažėjimo skaičiaus kitimą visais jonizatoriaus poliarumais aprašė gerai. Visų aproksimacijų determinacijos koeficientai buvo didesni nei 0,99, todėl eksponentinio mažėjimo modelis tinkamai aprašė kietųjų dalelių skaičiaus mažėjimo tendencijas.

Didžiausias mažėjimo koeficientas iš pateiktų 14 lentelėje yra naudojant neigiamą jonizatoriaus poliarumą. Šiuo atveju kietųjų dalelių skaičius mažėjo greičiausiai. Antrasis mažėjimo koeficientas pagal dydį buvo teigiamo jonizatoriaus poliarumo. Lėčiausias mažėjimas, naudojant jonizatorių pastebėtas naudojant bipolinį jonizatoriaus poliarumą. Taigi, bipolinio režimo metu nors ir kietųjų dalelių skaičius mažėjo, tačiau jo poveikis buvo silpnesnis nei naudojant neigiamą ir teigiamą jonizatoriaus poliarumus [50, 51].

Taigi, iš gautų eksponentinio mažėjimo koeficientų galima teigti, kad efektyviausias kietųjų dalelių skaičiaus mažinimo režimas buvo naudojant neigiamo poliarumo jonizatorių, po jo sekė teigiamo poliarumo, pastebimas mažiausias poveikis, lyginant su kontroliniais duomenimis, buvo nustatytas bipolinio poliarumo atveju.

Kadangi duomenys buvo normalizuoti pagal pradines kiekvieno bandymo reikšmes, kiekvieno jonizatoriaus režimo efektyvumas vertinamas pagal kietųjų dalelių skaičiaus mažėjimo koeficientus, normalizuotas galutines reikšmes ir standartinius nuokrypius.

Baigiamojo projekto tyrimo rezultatai buvo pristatyti tarptautinėse konferencijose: „Open Readings 2026“ ir „Chemija ir cheminė technologija 2026“.

Kirvelaitytė P.; Masionis J.; Tichonovas M.; Martuzevičius D. Abatement of Microbial Air Pollution Using Ionization Technologies // Open Readings 2026: 69th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences.

Kirvelaitytė P.; Masionis J.; Tichonovas M.; Martuzevičius D. Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimas jonizacinėmis technologijomis // Chemija ir cheminė technologija 2026: tarptautinė mokslinė konferencija.

Išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą nustatyta, kad mikrobiologinis oro užterštumas yra aktuali problema uždaroje patalpose, ypač sveikatos priežiūros, ugdymo ir kitose viešosiose erdvėse, nes ore esantys grybiniai mikroorganizmai, bioaerozoliai, bakterijos ir kietosios dalelės gali turėti neigiamą poveikį žmogaus sveikatai. Literatūros analizė parodė, kad mikrobiologiniam oro užterštumui nustatyti gali būti taikomi pasyvūs ir aktyvūs mėginių ėmimo metodai, o oro taršai mažinti gali būti naudojamos papildomos technologijos, tokios kaip filtravimas, UV spinduliuotė, ozonavimas, plazminės ir jonizacinės technologijos, pavyzdžiui, bipoliniai, vienpoliai, adatiniai jonizatoriai, taip pat neterminės / šaltosios plazmos technologijos.
2. Išanalizavus jonizacinių prietaisų veikimo principus nustatyta, kad mikrobiologinės taršos mažinimas yra susijęs su ore generuojamais teigiamais, neigiamais jonais ir reaktyviesiomis dalelėmis. Šios dalelės gali sąveikauti su ore esančiomis kietosiomis dalelėmis ir mikroorganizmais, skatinti jų nykimą, nusėdimą ant paviršių arba sukelti oksidacinį poveikį mikroorganizmų struktūroms.
3. Atlikus bandymus su skirtingomis elektrodų medžiagomis ir konfigūracijomis nustatyta, kad anglies pluošto elektrodai yra tinkamiausi įgyvendinti tolimesnius tyrimus. Šie elektrodai pasižymėjo stabiliu jonų generavimu ir didesnėmis jonų koncentracijos vertėmis esant mažesnėms įtampoms lyginant su kitų medžiagų generuojamomis jonų koncentracijomis, ypač taikant neigiamo ir bipolinio jonizatoriaus poliarumus. Atsižvelgiant į jonų generavimo rezultatus, matavimų stabilumą bei tikslą išvengti aukštų įtampų, tolimesni eksperimentai buvo atliekami naudojant anglies pluošto elektrodus ties 4 kV ir 7 kV įtampomis.
4. Ozono koncentracijos matavimai leidžia teigti, kad ozono susidarymas priklauso nuo naudojamos įtampos ir jonizatoriaus poliarumo. Didėjant įtampai, didėja ir ozono koncentracija, todėl renkantis tinkamą įtampą jonizatoriui svarbu atsižvelgti ne tik į jonų koncentraciją bet ir į ozono generuojamus kiekius. Dėl šios priežasties yra palankesnės mažesnės įtampos, kurios leidžia pasiekti pakankamą jonų koncentraciją ir kartu sumažinti ozono susidarymo riziką.
5. Mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo tyrimas leidžia teigti, kad jonizacijos taikymas efektyviau sumažino mikroorganizmų koncentraciją ore lyginant su natūraliu mikroorganizmų skaičiaus mažėjimu. Po 40 min (su anglies elektrodais) jonizatoriaus poveikio visais jonizatoriaus poliarumais mikrobiologinio oro užterštumo mažinimo efektyvumas viršijo 80 %, o po 60 min priartėjo prie 95–100 %. Didžiausias efektyvumas nustatytas naudojant neigiamo poliarumo 7 kV įtampą – $99,57 \% \pm 0,18 \%$.
6. Kietųjų dalelių šalinimo eksperimento metu nustatyta, kad jonizatoriaus naudojimas efektyviai spartino kietųjų dalelių skaičiaus mažėjimą ore. Buvo taikoma normalizuotų duomenų analizė, taikant eksponentinio mažėjimo funkciją, kuri parodė, kad didžiausias mažėjimo koeficientas gautas naudojant neigiamo poliarumo jonizatorių ($k = 0,570 \text{ min}^{-1}$), mažesnis – teigiamo poliarumo jonizatorių ($k = 0,398 \text{ min}^{-1}$), o mažiausias jonizacijos poveikis pastebėtas bipoliniu atveju ($k = 0,085 \text{ min}^{-1}$).

Literatūros sąrašas

1. SINGH, Ritu; ZIA, Hina ir SETH, Manu. *Engineering Solutions for Preventing Airborne Transmission in Hospitals with Resource Limitation and Demand Surge. Indian Journal of Critical Care Medicine*[interaktyvus], -04-01 , 2021, vol. 25, nr. 4, pp. 80972-5229. Prieiga per: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8138644/>. [žiūrėta 2025-03-10].
2. SONG, Lu; ZHOU, Jianfeng; WANG, Can; MENG, Ge; LI, Yunfei ir kt. *Airborne pathogenic microorganisms and air cleaning technology development: A review. Journal of hazardous materials*[interaktyvus] , 2022, vol. 424, pp. 110304-3894. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421023979>. [žiūrėta 2025-03-10].
3. ECDC. *Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19*[interaktyvus], -06-22 , 2020, pp. 5. Prieiga per: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/heating-ventilation-air-conditioning-systems-covid-19>. [žiūrėta 2025-04-20].
4. XU, Zhenqiang; SHEN, Fangxia; LI, Xiaoguang; WU, Yan; CHEN, Qi ir kt. *Molecular and Microscopic Analysis of Bacteria and Viruses in Exhaled Breath Collected Using a Simple Impaction and Condensing Method. PLoS ONE*[interaktyvus], -07-25 , 2012, vol. 7, nr. 7, pp. 8. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/230590051_Molecular_and_Microscopic_Analysis_of_Bacteria_and_Viruses_in_Exhaled_Breath_Collected_Using_a_Simple_Impaction_and_Condensing_Method. [žiūrėta 2026-03-16].
5. CORREIA, G.; RODRIGUES, L.; GAMEIRO DA SILVA, M. ir GONÇALVES, T. *Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. Medical hypotheses* , 2020, vol. 141, pp. 50306-9877. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030698772030801X>. [žiūrėta 2026-03-16].
6. LIU, Qing; YAN, Saisai; ZHANG, Miao; WANG, Chao ir XING, Dongming. *Air sampling and ATP bioluminescence for quantitative detection of airborne microbes. Talanta*[interaktyvus] , 2024, vol. 274, pp. 120039-9140. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914024004041>. [žiūrėta 2025-03-15].
7. VIANI, Isabella; COLUCCI, Maria Eugenia; PERGREFFI, Massimiliano; ROSSI, Deanna; VERONESI, Licia ir kt. *Passive air sampling: the use of the index of microbial air contamination. ACTA BIOMEDICA*[interaktyvus], 10 Apr , 2020, pp. 14. Prieiga per: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7975895/>. [žiūrėta 2025-03-15].
8. HAIG, C. W.; MACKAY, W. G.; WALKER, J. T. ir WILLIAMS, C. *Bioaerosol sampling: sampling mechanisms, bioefficiency and field studies. Journal of Hospital Infection*[interaktyvus], -04-01 , 2016, vol. 93, nr. 3, pp. 140195-6701. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195670116300044>. [žiūrėta 2026-03-16].
9. HAN, Taewon ir MAINELIS, Gediminas. *Design and development of an electrostatic sampler for bioaerosols with high concentration rate. Journal of Aerosol Science*[interaktyvus], -12 , 2008, vol. 39, nr. 12, pp. 130021-8502. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850208001377>. [žiūrėta 2026-03-17].
10. TANINO, Takanori; MATSUI, Masayoshi; KOGURE, Kiwamu ir OHSHIMA, Takayuki. *Collection and inactivation of airborne microorganisms using combination of water trap and electrical technologies. International Journal of Plasma Environmental Science and*

Technology[interaktyvus], -01-27 , 2022, vol. 16, nr. 1, pp. 8. Prieiga per: <http://ijpest.com/Contents/16/1/PDF/2022-16-e01002.pdf>. [žiūrėta 2025-03-17].

11. DANIELS, Stacy L. *Applications of Air Ionization for Control of VOCs and PMx*[interaktyvus] , 2001, pp. 15. Prieiga per: <https://air-plus.com/wp-content/uploads/2023/01/White-Paper-Applications-of-Air-Ionization-for-Control-of-VOCs-and-PMx-Dr.-Stacy-Daniels.pdf>. [žiūrėta 2026-03-16].

12. KRULL -INDEPENDENT CONSULTANT, Bronson ir LEE, Chris. *Bipolar Ionization: Understanding the Difference Between Theory and Practice*. *Synexis*[interaktyvus] , 2021, pp. 9. Prieiga per: https://synexis.com/wp-content/uploads/2023/02/BPI_TheoryAndPractice_WhitePaper_Final.pdf?srsId=AfmBOooZmJqKq4Ex1cLbDyq74YUwR1eh3bRByDtdzhqf3XQNQApXuFXs. [žiūrėta 2025-03-16].

13. KANESAKA, I.; KATSUSE, A. K.; TAKAHASHI, H. ir KOBAYASHI, I. *Evaluation of a bipolar ionization device in inactivation of antimicrobial-resistant bacteria, yeast, Aspergillus spp. and human coronavirus*. *Journal of Hospital Infection*[interaktyvus] , 2022, vol. 126, pp. 50195-6701. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195670122001062>. [žiūrėta 2025-03-17].

14. LUENGAS, Angela; BARONA, Astrid; HORT, Cecile; GALLASTEGUI, Gorka; PLATEL, Vincent ir kt. *A review of indoor air treatment technologies*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*[interaktyvus], -02-20 , 2015, vol. 14, nr. 3, pp. 261569-1705. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/273510674_A_Review_of_Indoor_Air_Treatment_Technologies. [žiūrėta 2025-03-16].

15. MATA, Teresa M.; MARTINS, António A.; CALHEIROS, Cristina S. C.; VILLANUEVA, Florentina; ALONSO-CUEVILLA, Nuria P. ir kt. *Indoor Air Quality: A Review of Cleaning Technologies*. *Environments*[interaktyvus], -09-07 , 2022, vol. 9, nr. 9, pp. 28. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2076-3298/9/9/118>. [žiūrėta 2025-03-10].

16. POURCHEZ, Jérémie; PEYRON, Aurélien; SARRY, Gwendoline; LECLERC, Lara; VERHOEVEN, Paul O. ir kt. *Antimicrobial Performance of an Innovative Technology of Atmospheric Plasma Reactors against Bioaerosols: Effectiveness in Removing Airborne Viable Viruses*. *Buildings*[interaktyvus], -10-01 , 2022, vol. 12, nr. 10, pp. 14. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/10/1587>. [žiūrėta 2025-03-15].

17. RADALJ, Andrea; NIKŠIĆ, Aleksandar; TRAJKOVIĆ, Jelena; KNEZEVIĆ, Tara; JANKOVIĆ, Marko ir kt. *Combating Pathogens Using Carbon-Fiber Ionizers (CFIs) for Air Purification: A Narrative Review*. *Applied Sciences*[interaktyvus], -08-20 , 2024, vol. 14, nr. 16, pp. 23. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/16/7311>. [žiūrėta 2025-03-15].

18. LICHT, Stephanie; HEHIR, Austin; TRENT, Stephen; DUNLAP, Darren; BORUMAND, Khash ir kt. *Use of Bipolar Ionization for Disinfection within Airplanes*. *Boeing Technical Report*[interaktyvus] , 2021, pp. 23. Prieiga per: <https://www.airora.com/wp-content/uploads/2022/09/boeing-use-of-bipolar-ionization-for-disinfection-within-airplanes-1.pdf>. [žiūrėta 2025-03-16].

19. SCHURK, DAVID N. *november2021_40-47_schurk*. *ASHRAE*[interaktyvus] , 2021, pp. 6. Prieiga per: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/ashrae%20journal/2021journaldocuments/november2021_40-47_schurk.pdf. [žiūrėta 2026-03-21].

20. URASHIMA, Kuniko. *Review of Plasma Technologies for Contribution of Environmental Purification*. *IEEE Open Journal of Nanotechnology*[interaktyvus] , 2022, vol. 3, pp. 7. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/365740841_Review_of_plasma_technologies_for_contribution_of_environmental_purification. [žiūrėta 2025-03-16].
21. JANGRA, Ramavtar; AHLAWAT, Kiran; DIXIT, Ambesh ir PRAKASH, Ram. *Efficient deactivation of aerosolized pathogens using a dielectric barrier discharge based cold-plasma detergent in environment device for good indoor air quality*. *Scientific Reports*[interaktyvus], -06-25 , 2023, vol. 13, nr. 1, pp. 14 [žiūrėta 2025-03-16].
22. HÖRRAK, U.; SALM, J. ir TAMMET, H. *Statistical characterization of air ion mobility spectra at Tahkuse Observatory: Classification of air ions*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*[interaktyvus], -04 , 2000, vol. 105, nr. D7, pp. 120148-0227. Prieiga per: <https://dSPACE.ut.ee/bitstreams/cbd5b108-ff1d-4322-b898-e7fe67ea8b01/download>. [žiūrėta 2025-03-16].
23. KOLARŽ, Predrag; MILJKOVIĆ, Budimir ir ČURGUZ, Zoran. *Air-ion counter and mobility spectrometer*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*[interaktyvus], -11-25 , 2011, vol. 279, pp. 40168-583X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X11010214>. [žiūrėta 2026-03-18].
24. TARASICK, David; GALBALLY, Ian E.; COOPER, Owen R.; SCHULTZ, Martin G.; ANCELLET, Gerard ir kt. *Tropospheric Ozone Assessment Report: Tropospheric ozone from 1877 to 2016, observed levels, trends and uncertainties*. *Elementa: Science of the Anthropocene*[interaktyvus] , 2019, vol. 7, pp. 392325-1026. Prieiga per: <https://doi.org/10.1525/elementa.376>. [žiūrėta 2026-03-21].
25. PETRUCI, João Flávio da Silveira; BARRETO, Diandra Nunes; DIAS, Mariana A.; FELIX, Erika P. ir CARDOSO, Arnaldo A. *Analytical methods applied for ozone gas detection: A review*. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*[interaktyvus] , 2022, vol. 149, pp. 1165520165-9936. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993622000358>. [žiūrėta 2025-03-21].
26. PARK, Jin-Soo; SUNG, Bong-Jo; YOON, Kyung-Soo ir JEONG, Choon-Soo. *The bactericidal effect of an ionizer under low concentration of ozone*. *BMC Microbiology*[interaktyvus], -07-30 , 2016, vol. 16, nr. 1, pp. 8. Prieiga per: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4967512/>. [žiūrėta 2026-03-21].
27. HYUN, Junho; LEE, Sang-Gu ir HWANG, Jungho. *Application of corona discharge-generated air ions for filtration of aerosolized virus and inactivation of filtered virus*. *Journal of Aerosol Science*[interaktyvus] , 2017, vol. 107, pp. 100021-8502. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850216302798>. [žiūrėta 2025-03-21].
28. WU, Yijiao; YU, Shiyu; ZHANG, Xiyin; WANG, Xianzhong ir ZHANG, Jiaojiao. *The Regulatory Mechanism of Cold Plasma in Relation to Cell Activity and Its Application in Biomedical and Animal Husbandry Practices*. *International Journal of Molecular Sciences*[interaktyvus], -04-12 , 2023, vol. 24, nr. 8, pp. 14. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/8/7160>. [žiūrėta 2025-03-21].
29. SZILI, Endre J.; HONG, Sung-Ha; OH, Jun-Seok; GAUR, Nishtha ir SHORT, Robert D. *Tracking the Penetration of Plasma Reactive Species in Tissue Models*. *Trends in Biotechnology*[interaktyvus], -06 , 2018, vol. 36, nr. 6, pp. 90167-7799. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779917301920>. [žiūrėta 2026-03-21].

30. RATLIFF, Katherine M.; OUDEJANS, Lukas; ARCHER, John; CALFEE, Worth; GILBERRY, Jerome U. ir kt. *Large-scale evaluation of microorganism inactivation by bipolar ionization and photocatalytic devices. Building and Environment*[interaktyvus] , 2023, vol. 227, pp. 110360-1323. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322010344>. [žiūrėta 2025-03-21].
31. PILETIĆ, Kaća; LINŠAK, Dijana Tomić; KOVAČ, Bruno; MEŽNARIĆ, Silvestar; REPUSTIĆ, Marin ir kt. *Ozone disinfection efficiency against airborne microorganisms in hospital environment: a case study. Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*[interaktyvus], -12-01 , 2022, vol. 73, nr. 4, pp. 7. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/366922117_Ozone_disinfection_efficiency_against_airborne_microorganisms_in_hospital_environment_a_case_study. [žiūrėta 2025-04-05].
32. PIRONTI, Concetta; MOCCIA, Giuseppina; MOTTA, Oriana; BOCCIA, Giovanni; FRANCI, Gianluigi ir kt. *The influence of microclimate conditions on ozone disinfection efficacy in working places. Environmental Science and Pollution Research*[interaktyvus], -07-27 , 2021, vol. 28, nr. 45, pp. 60944-1344. Prieiga per: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-15457-2>. [žiūrėta 2025-04-05].
33. PUSHPAWELA, Buddhi; JAYARATNE, Rohan; NGUY, Aline ir MORAWSKA, Lidia. *Efficiency of ionizers in removing airborne particles in indoor environments. Journal of Electrostatics*[interaktyvus] , 2017, vol. 90, pp. 60304-3886. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388617302279>. [žiūrėta 2026-03-21].
34. WENG, Haotian; ZHANG, Yaozhong; HUANG, Xiaolu; LIU, Xuan; TANG, Yunhui ir kt. *Pilot Study on the Production of Negative Oxygen Ions Based on Lower Voltage Ionization Method and Application in Air Purification. Atmosphere*[interaktyvus], -07-20 , 2024, vol. 15, nr. 7, pp. 17. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/7/860>. [žiūrėta 2026-03-21].
35. WHO. *What are the WHO Air Quality Guidelines?* [interaktyvus] [2021-09-22]. World Health Organization. Prieiga per: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>. [žiūrėta 2025-04-06].
36. EU law. *EUR-Lex - 02008L0050-20150918 - EN - EUR-Lex*. [interaktyvus] [2015-09-18]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/2015-09-18>. [žiūrėta 2026-03-16].
37. UL solutions. *Zero Ozone Emissions Validation | UL Solutions*. [interaktyvus]. Prieiga per: <https://www.ul.com/services/zero-ozone-emissions-validation>. [žiūrėta 2025-04-06].
38. CHEN, Lin; LEE, Win-ju; MA, Yvonne; JANG, Sung Sik; FONG, Karen ir kt. *The efficacy of different sanitizers against MS2 bacteriophage introduced onto plastic or stainless steel surfaces. Current Research in Food Science*[interaktyvus] , 2022, vol. 5, pp. 72665-9271. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665927122000041>. [žiūrėta 2026-03-21].
39. PEREIRA, Aricson; NAKKA, Gowtham ir GUPTA, Sakshi. *Beyond Ethylene Oxide (EtO): A comprehensive review of sustainable sterilization technologies for medical devices. Biomedical and Therapeutics Letters*[interaktyvus], -03-20 , 2025, vol. 12, nr. 2, pp. 12. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/390657558_Beyond_Ethylene_Oxide_EtO_A_comprehensive_review_of_sustainable_sterilization_technologies_for_medical_devices. [žiūrėta 2026-03-21].
40. MOCCIA, Giuseppina; DE CARO, Francesco; PIRONTI, Concetta; BOCCIA, Giovanni; CAPUNZO, Mario ir kt. *Development and Improvement of an Effective Method for Air and*

Surfaces Disinfection with Ozone Gas as a Decontaminating Agent. Medicina[interaktyvus], -10-30 , 2020, vol. 56, nr. 11, pp. 9. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1648-9144/56/11/578>. [žiūrėta 2026-03-21].

41. MASONIS, Justinas; ČIUŽAS, Darius; KRUGLY, Edvinas; TICHONOVAS, Martynas; PRASAUSKAS, Tadas ir kt. *Inactivation of Bioaerosol Particles in a Single-Pass Multi-Stage Non-Thermal Plasma and Ionization Air Cleaner. Plasma*[interaktyvus], -05-31 , 2025, vol. 8, nr. 2, pp. 19. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2571-6182/8/2/22>. [žiūrėta 2025-11-02].

42. EMMERT, Elizabeth A. B.; BYRD, Jeffrey; GYURE, Ruth A.; HARTMAN, Diane; WHITE, Amy ir kt. *Appendix to the Guidelines for Biosafety in Teaching Laboratories 2012*, pp. 19 [žiūrėta 2026-05-13].

43. MANIBUSAN, Sydonia ir MAINELIS, Gediminas. *Passive bioaerosol samplers: A complementary tool for bioaerosol research. A review. Journal of Aerosol Science*[interaktyvus] , 2022, vol. 163, pp. 160021-8502. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850222000374>. [žiūrėta 2025-11-02].

44. REYNOLDS, Jackie. *Serial Dilution Protocols* , 2005, pp. 7. Prieiga per: <https://share.google/xuetXxtLxFK6B4NOq>. [žiūrėta 2026-05-13].

45. C. -W. U; M. -K. Law; R. P. Martins ir C. -S. Lam. *Sub- μ W Auto-Calibration Bandgap Voltage Reference With 1σ Inaccuracy of $\pm 0.12\%$ Within -40°C to 120°C . IEEE Journal of Solid-State Circuits* , 2023, vol. 59, nr. 2, pp. 540–5501558-173X. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10195934>. [žiūrėta 2026-05-13].

46. ZHOU, Pei; YANG, Yi; HUANG, Gongsheng ir LAI, Alvin C. K. *Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow. Building and Environment*, -11-06 , 2017, vol. 127, pp. 70360-1323. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317305139>. [žiūrėta 2026-05-13].

47. SHIN, Dong Ho; WOO, Chang Gyu; KIM, Hak-Joon; KIM, Yong-Jin ir HAN, Bangwoo. *Comparison of Discharging Electrodes for the Electrostatic Precipitator as an Air Filtration System in Air Handling Units. Aerosol and Air Quality Research* , 2019, vol. 19, nr. 3, pp. 61680-8584. Prieiga per: <https://aaqr.org/articles/aaqr-18-10-tn-0367>. [žiūrėta 2026-05-13].

48. SANTARPIA, Joshua L.; RATNESAR-SHUMATE, Shanna ir HADDRELL, Allen. *Laboratory study of bioaerosols: Traditional test systems, modern approaches, and environmental control. Aerosol Science and Technology*, -12-09 , 2019, vol. 54, nr. 5, pp. 160278-6826. Prieiga per: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2019.1696452>. [žiūrėta 2026-05-13].

49. SHIUE, Angus; HU, Shih-Cheng ir TU, Mao-Lin. *Particles Removal by Negative ionic Air Purifier in Cleanroom. Aerosol and Air Quality Research* , 2011, vol. 11, nr. 2, pp. 81680-8584. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/270868830_Particles_Removal_by_Negative_ionic_Air_Purifier_in_Cleanroom. [žiūrėta 2026-05-13].

50. WU, Yi-Ying; CHEN, Yen-Chi; YU, Kuo-Pin; CHEN, Yen-Ping ir SHIH, Hui-Chi. *Deposition Removal of Monodisperse and Polydisperse Submicron Particles by a Negative Air Ionizer. Aerosol and Air Quality Research* , 2015, vol. 15, nr. 3, pp. 141680-8584. Prieiga per: <https://aaqr.org/articles/aaqr-14-08-0a-0166>. [žiūrėta 2026-05-13].

51. ROMAY, Francisco J.; OU, Qisheng ir PUI, David Y. H. *Effect of Ionizers on Indoor Air Quality and Performance of Air Cleaning Systems. Aerosol and Air Quality Research* , 2024, vol. 24, nr. 1, pp. 161680-8584. Prieiga per: <https://aaqr.org/articles/aaqr-23-10-oa-0240>. [žiūrėta 2026-05-13].