



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

APLINKOS APSAUGOS KATEDRA

Renata Spiečiūtė

**ORO VALYMO BIOFILTRO SU POLIMERINE
ĮKROVA EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR VERTINIMAS**

**EXPERIMENTAL RESEARCH AND EVALUATION OF AIR-CLEANING
BIOFILTER WITH POLYMERIC CHARGE**

Baigiamasis magistro darbas

Aplinkos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H17004

Aplinkos ir klimato inžinerijos specializacija

Bendrosios inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2012

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Aplinkos inžinerijos fakultetas

Aplinkos apsaugos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Aplinkos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: **Oro valymo biofiltro su polimerine įkrova eksperimentiniai tyrimai ir vertinimas**

Autorius **Renata Spiečiūtė**

Vadovas dr. **Alvydas Zagorskis**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas biofiltro su polimerine įkrova panaudojimas oro valymui nuo lakiųjų organinių junginių. Darbo tikslas buvo ištirti ir įvertinti biofiltro su polimerine įkrova efektyvumą ir aerodinamines savybes, valant orą nuo lakiųjų organinių junginių.

Pirmajame skyriuje pateikta klimato kaitą veikiančių teršalų ir biotechnologijų taikymo analizė, išanalizuotas lakiųjų organinių junginių poveikis aplinkai ir biotechnologijų jiems mažinti ypatumai, aptartos biologiniam oro valymui naudojamos įkrovos. Taip pat apžvelgtas matematinio modeliavimo taikymas biofiltraciniams procesams modeliuoti. Antrajame skyriuje pateikta biofiltro su polimerine įkrova aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų metodika, rezultatų analizė bei išvados. Trečiajame skyriuje aprašyta biofiltro efektyvumo tyrimų metodika, pateikta rezultatų analizė ir išvados. Ketvirtajame skyriuje pateikta biofiltro efektyvumo modeliavimo metodika, gautų rezultatų analizė bei išvados.

Išnagrinėjus teorinius ir praktinius biofiltro su polimerine įkrova panaudojimo orui nuo lakiųjų organinių junginių valyti aspektus, pateiktos baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos, naudotos literatūros sąrašas bei autoriaus publikacijų sąrašas.

Darbą sudaro 9 dalys: įvadas, literatūrinė apžvalga, biofiltro efektyvumo ir aerodinaminio pasipriešinimo eksperimentinių tyrimų metodikos ir rezultatai, modeliavimo skyrius, išvados, rekomendacijos, naudotos literatūros sąrašas bei autoriaus publikacijų sąrašas.

Darbo apimtis – 97 p. teksto be priedų, 44 iliustr., 83 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: biofiltras, polimerinė įkrova, mikroorganizmai, lakieji organiniai junginiai, acetonas, butanolis, ksilenas

Vilnius Gediminas Technical University
Environmental engineering faculty
Environment protection department

ISBN ISSN
Copies No.
Date-....-....

Environmental engineering study programme master thesis

Title: **Experimental Research and Evaluation of Air-cleaning Biofilter with Polymeric Charge**

Author **Renata Spiečiūtė**

Academic supervisor **dr. Alvydas Zagorskis**

Thesis language

☒ Lithuanian
☐ Foreign (English)

Annotation

The final Master thesis analyzes the usage of biofilter with polymeric charge for air cleaning from volatile organic compounds. The objective of paper is to explore and assess the efficiency and aerodynamic properties of biofilter with polymeric charge, while cleaning air from volatile organic compounds.

The first part presents the analysis of application of pollutants and biotechnologies, which affect the climate change, analyzes the impact of volatile organic compounds on environment and features of biotechnologies to reduce them, discusses the charges, used for biological air cleaning. Moreover, it reviews the application of mathematical simulation for simulating bio-filtration processes. The second part presents the methodology of research on aerodynamic resistance of biofilter with polymeric charge, analysis of results and findings. The third part describes the methodology of research on biofilter efficiency, presents the analysis of obtained results and findings. The fourth part presents the simulation methodologies of efficiency of biofilter, analysis of obtained results and findings.

After analyzing theoretical and practical aspects of using biofilter with polymeric charge for cleaning the air from volatile organic compounds, conclusions and recommendations of final thesis as well as the list of references and author's publications are presented.

The paper consists of 9 parts: introduction, literature overview, methodologies and results of experimental research of efficiency and aerodynamic resistance of biofilter, simulation section, conclusions, recommendations, list of references and author's publications.

Volume of thesis – 97 pages of text without appendices, 44 figures, 83 references.

Keywords: biofilter, polymeric charge, microorganisms, volatile organic compounds, acetone, butanol, xylene

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	11
PROBLEMA.....	11
DARBO AKTUALUMAS	11
DARBO TIKSLAS	12
DARBO UŽDAVINIAI.....	12
DARBO NAUJUMAS.....	12
DARBO PRAKTINĖ VERTĖ.....	12
1. KLIMATO KAITĄ VEIKIANČIŲ TERŠALŲ IR BIOTECHNOLOGIJŲ JIEMS MAŽINTI APŽVALGA	13
1.1. KLIMATO KAITĄ VEIKIANČIŲ TERŠALŲ ANALIZĖ.....	13
1.2. LAKIŲJŲ ORGANINIŲ JUNGINIŲ POVEIKIS APLINKAI.....	17
1.3. LAKIŲJŲ ORGANINIŲ JUNGINIŲ MAŽINIMO PRIEMONĖS.....	20
1.4. ORO VALYMO BIOTECHNOLOGIJŲ TAIKYMO YPATUMAI	24
1.5. BIOLOGINIAM ORO VALYMUI NAUDOJAMŲ ĮKROVŲ ANALIZĖ.....	28
1.6. ĮKROVŲ SAVYBIŲ VERTINIMAS	31
1.7. MATEMATINIŲ MODELIŲ TAIKYMAS BIOFILTRACINIAMS PROCESAMS MODELIUOTI	32
1.8. PIRMOJO SKYRIAUS IŠVADOS.....	36
2. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO TYRIMAS	38
2.1. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO TYRIMO METODIKA	38
2.2. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS.....	45
2.3. ANTROJO SKYRIAUS IŠVADOS.....	48
3. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA EFEKTYVUMO TYRIMAS	49
3.1. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA EFEKTYVUMO TYRIMO METODIKA.....	49
3.2. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA EFEKTYVUMO TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS	58

3.3. TREČIOJO SKYRIAUS IŠVADOS	76
4. BIOFILTRACINIŲ PROCESŲ MATEMATINIS MODELIAVIMAS.....	77
4.1. BIOFILTRE VYKSTANČIOS TERŠALŲ DEGRADACIJOS MODELIAVIMO METODIKA	77
4.2. BIOFILTRE VYKSTANČIOS TERŠALŲ DEGRADACIJOS MODELIAVIMO REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS	81
4.3. KETVIRTOJO SKYRIAUS IŠVADOS.....	87
BENDROSIO IŠVADOS	88
REKOMENDACIJOS.....	90
LITERATŪROS SĄRAŠAS	91
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS.....	97
PADĖKA.....	98

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Pagrindinių teršalų kiekiai, išmesti į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių 2008-2010 m.	16
1.2 pav. Pagrindinių teršalų kiekiai, išmesti į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių 2010 m.	17
1.3 pav. LOJ emisijos iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvos Respublikoje 1995 – 2010m.	19
1.4 pav. Teršalų emisijos iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvoje 2010 metais	20
1.5 pav. Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai	21
1.6 pav. Biologinio oro valymo įrenginių klasifikacija	26
1.7 pav. Principinė kasetinio biofiltro schema	27
1.8 pav. Bioplėvelės gyvavimo ciklas. 1: Pavienės ląstelės paviršiuje. 2: Ląstelių įsitvirtinimas. 3 ir 4: Mikroorganizmų populiacijos gausėjimas. 5: Pavienės ląstelės ištrūksta iš bioplėvelės.	29
1.9 pav. Bendras bioįkrovos vaizdas: a – gamtinio ceolito ir medienos skiedrų mišinys; b – įkrovos bioplėvelė	30
1.10 pav. Matematinio modeliavimo skirstymas	33
2.1 pav. Didelį filtruojančio paviršiaus plotą turintys polimeriniai rutuliukai	38
2.2 pav. Oro valymo biofiltras, užpildytas dirbtinės kilmės įkrova	39
2.3 pav. Aspiratoriai „M 822“ ir „APV 4-12“	43
2.4 pav. Diferencinis slėgio matuoklis „DSM-1“	43
2.5 pav. Multifunkcinis fizinių parametrų analizatorius „Testo 400“	44
2.6 pav. Biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, įkrovai esant sausai	45
2.7 pav. Biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo įkrovos sekcijų skaičiaus, įkrovai esant drėgnai	46
2.8 pav. Sausos ir drėgnos įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo palyginimas, esant skirtingam oro srauto greičiui	47
3.1 pav. Principinė biofiltro schema: 1 – biofiltro korpusas; 2 – polimerinė biofiltro įkrova; 3 – cirkuliacinio vandens rezervuaras; 4 – teršalų tiekimo kamera; 5 – aspiratorius; 6,7,8,9,10 – guminės sujungimo žarnelės	51
3.2 pav. Dirbtinės kilmės biofiltro įkrova – didelį filtruojančio paviršiaus plotą turintys polimeriniai rutuliukai	52
3.3 pav. Biofiltras su polimerine įkrova	53
3.4 pav. Nešiojamas LOJ kontrolės prietaisas „MiniRAE 2000“	55
3.5 pav. Biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus	58
3.6 pav. Biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus	59
3.7 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	61
3.8 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	62
3.9 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	63
3.10 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	64
3.11 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	65
3.12 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	66
3.13 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	68

3.14 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	69
3.15 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	70
3.16 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, esant skirtingai pradinei acetono garų koncentracijai, kai oro srauto greitis lygus $0,04 \text{ m/s}$	71
3.17 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, esant skirtingai pradinei butanolio garų koncentracijai, kai oro srauto greitis lygus $0,04 \text{ m/s}$	72
3.18 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, esant skirtingai pradinei ksileno garų koncentracijai, kai oro srauto greitis lygus $0,04 \text{ m/s}$	72
3.19 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir valomo teršalo prigimties, kai kiekvieno teršalo pradinė koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	73
3.20 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir valomo teršalo prigimties, kai kiekvieno teršalo pradinė koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	74
3.21 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir valomo teršalo prigimties, kai kiekvieno teršalo pradinė koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	75
4.1 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	81
4.2 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	82
4.3 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	83
4.4 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	84
4.5 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	85
4.6 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$	86

IVADAS

Problema

Klimato kaita arba visuotinis atšilimas – tai viena didžiausių aplinkosauginių, socialinių ir ekonominių problemų, su kuriomis šiuo metu susiduria žmonija. Pagrindiniu šiltnamio efektą sukeliančių dujų šaltiniu išlieka energetika, antroje vietoje – transportas, trečioje – namų ūkis, o pramonės indėlis šiuo metu yra mažesnis. Nors visuotinis atšilimas yra globali problema, tačiau šią problemą sąlygoja vietos veiksniai. Todėl vietos lygmeniu turi būti įgyvendinamos priemonės, siekiant išvengti klimato kaitos ir jos padarinių.

Daugeliui klimato kaitą sąlygojančių teršalų būdinga tai, kad jie gali išlikti aplinkos ore gana ilgą laiką ir oro masės juos perneša toli nuo kilmės šaltinių. Dėl oro taršos keičiasi klimatas (ypač didelė CO_2 , CH_4 , N_2O įtaka), prastėja miestų oro kokybė (CO , LOJ , NO_x , SO_2), susidaro troposferinis ozonas (CH_4 , LOJ , CO , NO_x), rūgštėja dirvožemis ir paviršinis vanduo (NH_3 , NO_x , SO_2), vyksta eutrofikacija (NH_3 , NO_x). Tai neigiamai atsiliepia visų pirma žmonių sveikatai, žemės ūkio produktyvumui, biologinei įvairovei, miškų būklei ir kitiems aplinkos komponentams. Taip pat lakūs organiniai junginiai turi nemalonų specifinį kvapą.

Dabartiniu metu pasaulyje plačiai taikomi įvairūs oro valymo nuo cheminių teršalų metodai: adsorbcija, terminė ir katalitinė oksidacija, absorbcija, biologinis oro valymas. Nors biologinis oro valymo metodas yra iš visų pigiausias metodas, tačiau šiuo metu taikomi biofiltrai nėra ilgaamžiai, turi didelį aerodinaminį pasipriešinimą, mažą sąlyčio su įkrova paviršiaus plotą, dėl to nėra pakankamai efektyvūs.

Darbo aktualumas

Lakiųjų organinių junginių mišiniams valyti iš oro būtina taikyti efektyvius ir nebrangius oro valymo metodus, todėl biologinis oro valymas yra labai aktualus visame pasaulyje. Taip pat būtina užtikrinti biologiniuose įrenginiuose taikomos įkrovos ilgaamžiškumą. Skirtingos konstrukcijos biologinius oro valymo įrenginius gana plačiai tyrinėjo vokiečių mokslininkai Hubner, Maier ir Sabo. Biofiltrų su dirbtinės kilmės įkrova konstrukcijas aktyviai tyrė amerikiečiai bei japonai Cox, Deshusses, Lu, Chang, Liu. Siekiant padidinti įkrovos paviršiaus plotą ir ilgaamžiškumą, biofiltrai užkrauti sintetine, neorganinės kilmės įkrova, kuri drėkinama aktyvuotu, maistinių medžiagų prisotintu tirpalu.

Darbo tikslas

Šio mokslinio darbo tikslas – ištirti ir įvertinti biofiltro su polimerine įkrova efektyvumą ir aerodinamines savybes, valant orą nuo lakiųjų organinių junginių.

Darbo uždaviniai:

- Nustatyti biofiltro su polimerine įkrova efektyvumo priklausomybes nuo įkrovos aukščio, į įrenginį tiekiamo oro srauto greičio, teršalo pradinės koncentracijos ir prigimties;
- Įvertinti biofiltro aerodinaminį pasipriešinimą, taikant dirbtinės kilmės įkrovą;
- Taikant programinius modelius, atlikti biofiltre vykstančių sorbcinių procesų modeliavimą, o gautus rezultatus palyginti su eksperimentiniais.

Darbo naujumas

Biofiltro su polimerine įkrova kompleksiniai teoriniai, eksperimentiniai tyrimai, biofiltracinių procesų modeliavimas.

Darbo praktinė vertė

Naudojant pigius užpildus ir tam tikrai panaudojimo sričiai pasiūlytas konstrukcijas biologiniai oro valymo įrenginiai gali būti ekologiški, ekonomiškai, saugūs ir efektyvūs. Kadangi biofiltre taikoma įkrova yra ilgaamžė, todėl bus galima sutaupyti lėšų jos keitimui. Dėl taisyklingos dirbtinės įkrovos formos, sumažėja įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas, todėl biofiltras gali išvalyti didesnius oro kiekius, be to, jame gali būti įrengtas mažesnės galios variklis. Taip sumažinamos įrenginio eksploatacinės išlaidos.

1. KLIMATO KAITĄ VEIKIANČIŲ TERŠALŲ IR BIOTECHNOLOGIJŲ JIEMS MAŽINTI APŽVALGA

1.1. KLIMATO KAITĄ VEIKIANČIŲ TERŠALŲ ANALIZĖ

Didžioji šiltnamio efektą sukeliančių dujų dalis susidaro natūraliai. Tačiau nuo XVIII a. pramonės revoliucijos žmonės taip pat prisideda prie jų išsiskyrimo. Todėl šiltnamio efektas sustiprėjo ir temperatūra Žemėje kyla – klimatas kinta.

Oro kokybė yra svarbus darnaus vystymosi prioritetas. Ji įtakoja žmonių sveikatą, pasaulio klimato kaitą, žemės ūkio, kultūrinius objektus. Pagrindiniai oro teršėjai yra mobilus transportas, energetikos objektai, pramonės įmonės ir kiti.

Oro kokybė vertinama lyginant išmatuotą teršalų koncentraciją su nustatytomis užterštumo normomis – ribinėmis vertėmis. Miestų ore nuolat matuojama azoto oksidų (NO_2 , NO ir NO_x), sieros dioksido (SO_2), kietųjų dalelių (KD_{10}), anglies monoksido (CO), ozono (O_3), benzeno, švino koncentracija (Teršalų emisijos... 2010).

Dauguma šiltnamio dujų natūraliai yra atmosferoje (vandens garai, anglies dioksidas, metanas, azoto oksidas, ozonas), tačiau didelis jų kiekis yra išmetama žmogaus veiklos.

Metanas išskiriamas kasant, gaminant, transportuojant anglį, gamtines dujas ar naftos produktus. Metanas taip pat susidaro yrant organinėms atliekoms sąvartynuose, auginant gyvulius, miškų gaisrų metu.

Azoto oksidas išsiskiria deginant įvairų kurą bei naudojant azoto trąšas.

Ozonas yra naudingas viršutiniame atmosferos sluoksnyje, tačiau požemio sluoksnyje – tai oro teršalas. Daugiausia jo susidaro dėl automobilių išmetamųjų dujų.

Anglies dioksidas išmetamas į atmosferą deginant kietas atliekas, įvairų kurą (naftos produktus, gamtines dujas, anglį), medieną ir medžio produktus, eksploatuojant automobilius. Tai labiausiai šiltnamio efektą įtakojančios dujos (Medvedskienė 2006).

Pagrindinių teršalų šaltiniai ir mažinimo principai

Anglies dioksidas (CO_2) laikomas pagrindiniu šiltnamio efektą sukeliančiu veiksniu. Dėl atmosferoje gausėjančio CO_2 kiekio visoje Žemėje kyla temperatūra. Mažas šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis yra naudingas, nes padeda palaikyti gyvenimui tinkamą Žemės paviršiaus temperatūrą, tačiau per didelis jų kiekis kelia grėsmę žmonijos išlikimui - tirpsta ledynai, kyla vandenyno lygis ir t.t. Atsiranda vis daugiau faktų, liudijančių apie žmonių veiklos įtaką globaliai klimato kaitai. Ypatingai didelę reikšmę turi nuolat didėjančios anglies dioksido emisijos dėl pastoviai augančio iškastinio kuro deginimo. Dauguma mokslininkų mano, kad CO_2 koncentracijos

atmosferoje stabilizavimui ir klimato kaitos sušvelninimui pasaulinės CO₂ emisijos turi būti sumažintos daugiau kaip 50%. Tai gali būti pasiekta trimis būdais:

- Didinant energijos sunaudojimo efektyvumą ir mažinant jos poreikius ;
- Naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius (pvz., vėjas arba saulė);
- Gaudant ir laidojant dabartiniu metu išmetamą CO₂.

Tampa aišku, kad didinant energijos efektyvumą ir naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius kol kas neįmanoma sumažinti emisijas iki siekiamo lygio. Trečioji priemonė – CO₂ sugavimas ir laidojimas – taip pat būtina užkertant kelią globaliam klimato kitimui. CO₂ laidojimas žemėje nėra naujovė. Daugelyje šalių geologinėse struktūrose milijonus metų egzistuoja gamtinės CO₂ saugyklos. Pasaulis yra priklausomas nuo iškasamo kuro ir energetinė sistema negali būti pakeista akimirksniu, tai užtruktų metu metus. Geologinis anglies dioksido laidojimas užtikrintų laipsnišką perėjimą nuo energijos šaltinių, susijusių su iškasamu kuru, prie įvairiapusės sistemos, minimaliai veikiančios klimato kaitą. Šiuo pereinamuoju periodu dabartinė energetinė sistema išliks tokia pati, bet turi būti sukurtos naujos infrastruktūros, pavyzdžiui, elektrinės ir didelės gamyklos bus aprūpintos anglies dioksido gaudymo įranga ir vamzdynais, transportuojant CO₂ į geologinio laidojimo vietas.

Sieros dioksidas (SO₂) yra dujos, kurios besijungdamos su vandens garais atmosferoje suformuoja rūgščius lietus. Ir šlapi ir sausi teršalo išmetimai yra kenksmingi: naikina augmeniją, blogina dirvos, statybinių medžiagų ir vandens telkinių kokybę, gali neigiamai paveikti žmogaus sveikatą. Tarša SO₂ yra pavojingesnė, kai kietųjų dalelių ir kitų teršalų koncentracijos ore yra didelės.

Pagrindinis SO₂ šaltinis yra sieros turinčio organinio kuro, dažniausiai anglies ir naftos produktų, deginimas. Dažniausiai tai yra elektrinės bei kai kurios pramonės įmonės. Sieros kiekio dyzeliniame kure sumažinimas padėjo stipriai sumažinti SO₂ taršą iš transporto sektoriaus. Šiuo metu problemos dėl SO₂ iškyla tik miestuose, kur anglis vis dar plačiai naudojama gyvenamųjų būstų šildymui, pramonėje ir elektrinėse. SO₂ sumažinti galima keičiant kuro rūšis (pvz. anglis, dujos), mažinant sieros kiekį kure arba taikant „vamzdžio galo“ sprendimus, kaip išmetamų dujų nusierinimas (Yang *et al.* 2007).

Azoto oksidai (NO_x) formuojasi aukštoje temperatūroje vykstančiuose degimo procesuose, azotui oksiduojantis ore arba kure. NO_x emisijos iš mobilių ir stacionarių taršos šaltinių yra rimta aplinkosauginė problema, nes azoto oksidai sukelia rūgščiuosius lietus, fotocheminį smogą, ozono

destrukciją ir visuotinio atšilimo efektus (Wan *et al.* 2010). Pagrindinis azoto oksidų – azoto oksido (NO) ir azoto dioksido (NO₂) – šaltinis yra kelių transportas, iš kur išmetama apie pusę azoto oksidų kiekio Europoje. Todėl didžiausios NO ir NO₂ koncentracijos susidaro miestuose, kur eismo intensyvumas didžiausias. Kiti svarbūs taršos šaltiniai yra elektrinės, šiluminės elektrinės ir pramonės procesai. Taršą galima sumažinti sumažinant teršalų išmetimo iš transporto kiekį, apribojant transporto srautus, o pramonės įmonėse – pakeičiant įmonės gamybos sąlygas. Nepaisant didelių pastangų mažinti NO_x koncentracijas urbanizuotose vietovėse, šis teršalas išlieka vienu žalingiausių teršalų, sukeliančių žmonių sveikatos sutrikimus (Shirahama *et al.* 2005).

Laikųjų organinių junginių (LOJ) pagrindinis šaltinis yra kelių transportas, jie išsiskiria degant ir garuojant naftos produktams. Be to, LOJ į orą išmetami deginant medieną ir anglį, bei pramoninių procesų metu, kur benzenas naudojamas daugybės svarbių chemijos produktų gamybai, pavyzdžiui valikliams, pluoštui ir kitiems. LOJ emisijos į atmosferą smarkiai įtakoja oro kokybės blogėjimą ir aplinkos taršą (Saravanan ir Rajamohan 2009).

Taršos lakiaisiais organiniais junginiais mažinimo priemonės apima tokius sprendimus kaip taršos iš mobiliųjų taršos šaltinių bei pramonės įmonių mažinimas (Paulauskienė 2008).

Policikliniai aromatiniai angliavandeniliai (PAA) susidaro, kai kuras nesudeginamas iki galo, paprastai tokiuose šaltiniuose kaip anglies ir medienos deginimas gyventojų būstuose, taip pat susidaro apdirbant medieną ir išmetami į orą iš kelių transporto. Labiausiai lakūs PAA išmetami dujų pavidalu, kitais atvejais – kaip kietosios dalelės. Nors paprastai jie išmetami labai mažais kiekiais, tačiau jie yra labai toksiški ir kancerogeniški.

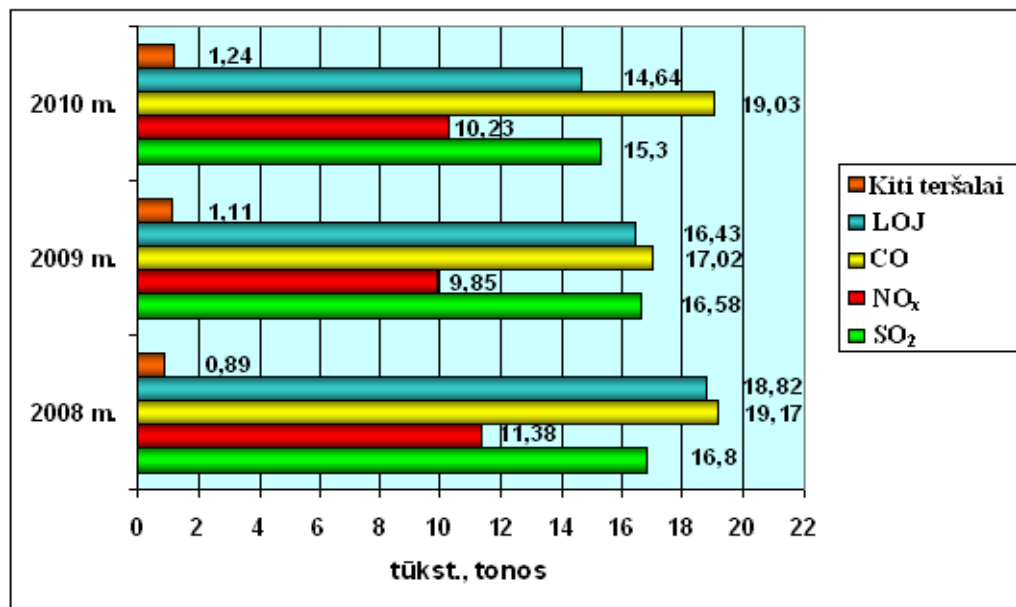
Kietosios dalelės. KD₁₀ ir KD_{2.5} į orą išskiriamos iš dviejų pagrindinių šaltinių. Pirmasis yra tiesioginis kietųjų dalelių išmetimas į orą iš daugybės šaltinių, tokių kaip kuro deginimas (transportas, energijos gavyba, pramonė), dirvos erozija, vėjo pustomos dulkės ir mechaninis smulkinimas (pvz., kasyba, statybos). Iš šių šaltinių išmetamos kietosios dalelės vadinamos *pirminėmis*. Antrasis šaltinis tai kietųjų dalelių formavimasis atmosferoje tarpusavy reaguojant kitiems teršalams, pvz.: sieros dioksidui, azoto oksidams ir amoniakui, kurie suformuoja kietus sulfatus ir nitratus, bei LOJ, kuriems oksiduojantis susidaro organiniai aerosoliai.

Taršos kietosiomis dalelėmis mažinimo būdai susiję su taršos iš mobiliųjų šaltinių mažinimu. Pramonės įmonėse gali būti keičiami gamybos procesai, papildomai pritaikomi „vamzdžio galo“ sprendimai arba keičiama kuro rūšis.

Anglies monoksidas (CO) yra toksinės dujos, išmetamos į atmosferą degimo procesų metu arba oksiduojantis angliavandeniliams bei kitiems organiniams junginiams. Europos miestuose beveik visas CO kiekis (90%) išmetamas iš kelių transporto priemonių, o kita dalis iš gyvenamųjų namų ir komercinių pastatų katilinių. Šis junginys atmosferoje išsilaiko apie mėnesį, po to oksiduojasi į anglies dioksidą (CO₂). Pagrindinė taršos CO mažinimo priemonė yra taršos iš kelių transporto mažinimas.

Ozonas (O₃), priešingai nei kiti aukščiau paminėti teršalai, nėra tiesiogiai išmetamas į atmosferą, o yra antrinis teršalas, susidarantis reaguojant NO₂, angliavandeniliams ir saulės šviesai, paprastai tai būdinga regiono ar dar stambesniai masteliui. Ozono kiekiai miestuose yra didesni nei kaimų teritorijoje, kadangi ten išmetami dideli NO kiekiai, kurie įtakoja vietinį ozono skaidymą (Yang *et al.* 2007).

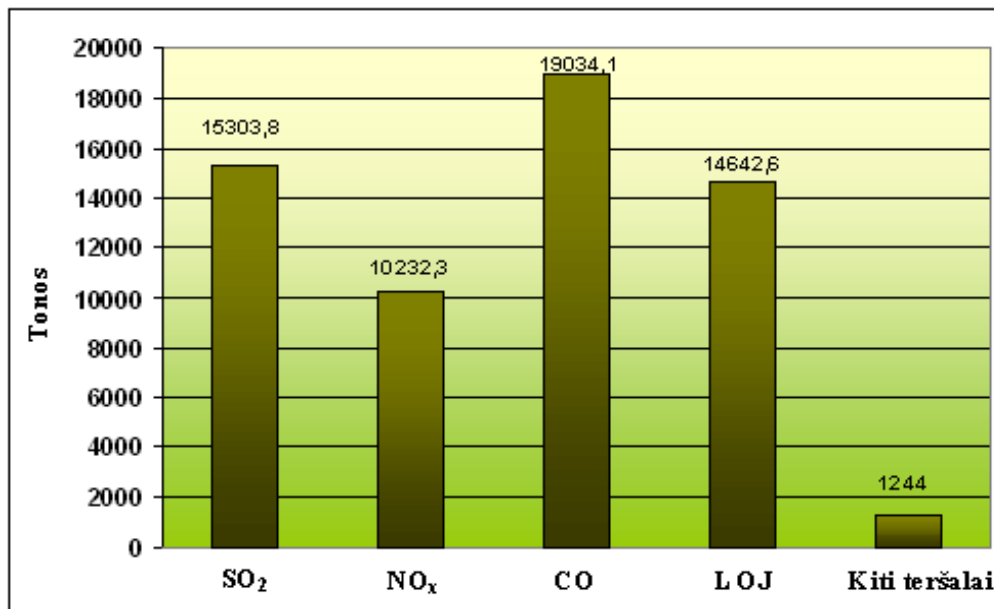
Saulės šviesa suteikia ozonui susiformuoti reikalingos energijos, todėl didelės ozono koncentracijos paprastai aptinkamos šiltomis saulėtomis vasaros dienomis. Taršos ozonu problema gali būti mažinama regionų, valstybės ir tarptautiniu lygiu mažinant taršą LOJ, NO_x. Europoje tai leido sumažinti didžiausius ozono kiekius, tačiau pasauliniai LOJ ir NO_x išmetamų kiekių padidėjimai lemia ozono foninių koncentracijų didėjimą pasauliniu mastu.



1.1 pav. Pagrindinių teršalų kiekiai, išmesti į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių 2008-2010 m.

Remiantis tolimų tarpvalstybinių oro teršalų pernašų Konvencijos nuostatomis, Lietuva privalo kiekvienais metais paruošti ataskaitą apie į atmosferą išmestus pagrindinius teršalus. Tam tikslui atliekama detali emisijų inventorizacija. Taip pat įvertinamos ir modeliuojamos kritinės

apkrovos. Nors į atmosferą išmetamų teršalų kiekis kiekvienais metais yra skirtingas, Lietuva nustatytų limitų neviršija. Atskirų teršalų emisijos 2009 m. buvo gerokai mažesnės už nustatytą emisijos limitą: SO₂ išmetimai sudarė apie 22% leistino išmetimo dydžio, NO_x – 62%, LOJ – 78%, NH₃ – 35% (Aplinkos apsaugos...2009).



1.2 pav. Pagrindinių teršalų kiekiai, išmesti į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių 2010 m.

Lietuvoje 2010 metais teršalų emisijos iš stacionarių taršos šaltinių siekė 63878,3 tonos. Iš jų 15303,8 tonos sudarė sieros dioksidas, 19034,1 t. – anglies monoksidas, azoto oksidų kiekis buvo mažesnis – 10232,3 tonos, o lakiųjų organinių junginių emisijos siekė 14642,6 tonos.

1.2. LAKIŲJŲ ORGANINIŲ JUNGINIŲ POVEIKIS APLINKAI

Šiuo metu sparčiai plečiantis pramonei, augant ekonomikai, išlieka didelė rizika dėl nuolat didėjančios oro taršos (Andres *et al.* 2009). Atmosferos teršimas ypač padidėjo XX a. antrojoje pusėje dėl intensyvios energetikos, pramonės bei transporto plėtros. Šie taršos šaltiniai ir toliau tebėra didžiausi atmosferos teršėjai. Pramonės įmonės gamybos procesų metu naudoja įvairias chemines medžiagas (dažus, klijus, tirpiklius, cheminio valymo ir spausdinimo medžiagas ir kt.), kurios į atmosferą išskiria LOJ. Šie teršalai kelia pavojų ne tik žmonių sveikatai, bet ir sudaro sąlygas pažemio ozono koncentracijos padidėjimui. Todėl būtina ieškoti sprendimų, kaip suvaldyti taršą lakiisiais organiniais junginiais (Medvedskienė 2006).

LOJ – tai bet kuris organinis junginys, kurio garų slėgis esant 293,15 K temperatūrai yra 0,01 kPa ar didesnis, arba kuris pasižymi atitinkamu lakumu esant konkrečioms naudojimo

sąlygoms. Šios medžiagos yra kenksmingos, kadangi dėl savo fizikinių-cheminių, cheminių arba toksikologinių savybių, naudojimo būdo arba buvimo darbo aplinkoje gali kelti pavojų darbuotojų sveikatai ar sukelti mirtį arba ūmius ar lėtinius sveikatos sutrikimus (Lakieji organiniai...2009).

Lakieji organiniai junginiai išsiskiria kaip dujos iš tam tikrų skysčių ir paviršių. LOJ apima nemažą dalį cheminių medžiagų, iš kurių daugelis turi trumpalaikį arba ilgalaikį neigiamą poveikį žmonių sveikatai. Daugumos LOJ koncentracijos yra didesnės patalpos viduje nei lauke (Medvedskienė 2006).

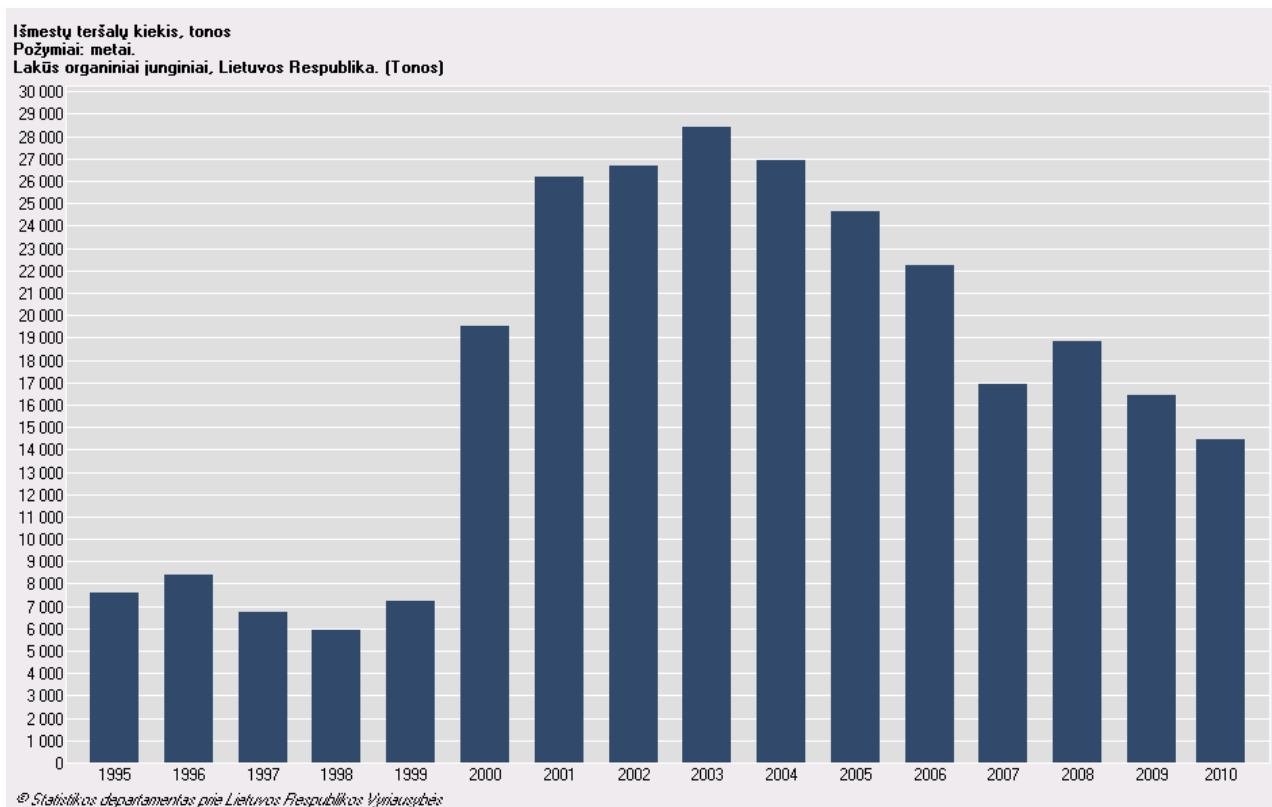
LOJ yra randami daugumoje produktų – nuo dažų ir dangų medžiagų iki kūno dezodorantų ir valymo skysčių. Anot JAV aplinkos apsaugos agentūros (United States Environmental Protection Agency – EPA), šie junginiai kelia didelį rūpestį. Lakieji organiniai junginiai yra vienas veiksnių, prisidedančių prie epizodinio ozono susidarymo, o taip pat ir dažnas oro teršalas, kenksmingas aplinkai ir žmonių sveikatai.

Ozonas aukštesniuose atmosferos sluoksniuose yra naudingas, kadangi apsaugo nuo pavojingų ultravioletinių saulės spindulių, tačiau pažemio ozonas laikomas oro teršalu, sutrikdančiu normalias žmogaus plaučių funkcijas. Ozono teršalus sudėtinga sukontroliuoti, kadangi jie nėra išmetami kaip kiti teršalai, o faktiškai susidarantys atmosferoje dėl fotocheminių procesų. Tame procese LOJ atlieka reikšmingą vaidmenį: LOJ ore reaguoja su azoto oksidais ir saulės šviesoje suformuoja ozoną. Kvėpuojant oru, kuriame ozono koncentracija yra didesnė nei leistina, žmonėms, sergantiems plaučių ligomis, pasireiškia ryškesni ligos simptomai. Be to, tai skatina dažnesnius astmos susirgimus (Lakieji organiniai... 2010).

Nuolatinis neapsisaugojimas nuo oro teršalų yra pagrindas dažniems plaučių audinių ir imuninės sistemos funkcijų sutrikimams. Dažniausiai pasireiškiantis neigiamas poveikis žmonių sveikatai yra:

- akių, nosies ir gerklės sudirginimas;
- galvos skausmas, svaigimas;
- koordinacijos praradimas;
- dusulys, astmos priepuoliai;
- pykinimas, vėmimas;
- vidaus organų (kepenų, inkstų) ir centrinės nervų sistemos pažeidimas;
- alerginė kūno reakcija;
- išsekimas, nuovargis;
- vėžys.

Tačiau dar ne visų lakiųjų organinių junginių poveikis žmogaus sveikatai ir aplinkai yra nustatytas. Daugelis tyrimų daryta tiriant pavienių LOJ poveikį žmogaus sveikatai. Taip pat mažiau žinoma apie kombinacinių cheminių medžiagų poveikį. Susirgimų rizikos grupėje dažniausiai yra jauni ir pagyvenusio amžiaus žmonės, taip pat turintys su kvėpavimo organais susijusių problemų ar jautresni cheminėms medžiagoms. Geriausia sveikatos apsaugos priemonė yra kiek įmanoma labiau riboti lakiųjų organinių junginių turinčių produktų naudojimą, naudoti valymo įrenginius ir kvėpavimo takus apsaugančias priemones (Medvedskienė 2006).

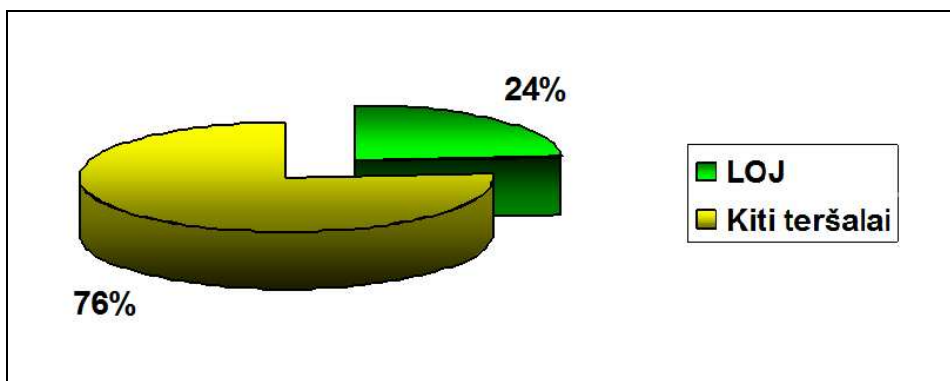


1.3 pav. LOJ emisijos iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvos Respublikoje 1995 – 2010m.

Lakiųjų organinių junginių emisijos į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių 2006 metais siekė 22,2 tūkst. t/metus. Iki 2008-ųjų šis skaičius sumažėjo iki 18,82 tūkst. t/metus. O iki 2010 metų LOJ emisijos sumažėjo iki 14,64 tūkst. t/metus.

Nors LOJ išmetami kiekiai pastaraisiais metais mažėjo, tačiau, lyginant su 1995 – 1999 metais, pastarųjų metų emisijos yra 2 – 3 kartus didesnės. LOJ vis dar sudaro daugiau nei ketvirtadalį išmetamų teršalų kiekio, todėl būtina taikyti šių teršalų mažinimo priemones.

Lietuvoje 2010 metais teršalų emisijos iš stacionarių taršos šaltinių siekė 63 878,3 tonos. Net 24 % 16 432,7 tonos – visų teršalų sudarė lakieji organiniai junginiai (1.4 pav.).



1.4 pav. Teršalų emisijos iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvoje 2010 metais

Lietuvoje nuo 2000 iki 2010 m į atmosferą išmetamų lakiųjų organinių junginių kiekių vidurkis buvo 23,3 tonos (Vaiškūnaitė 2011).

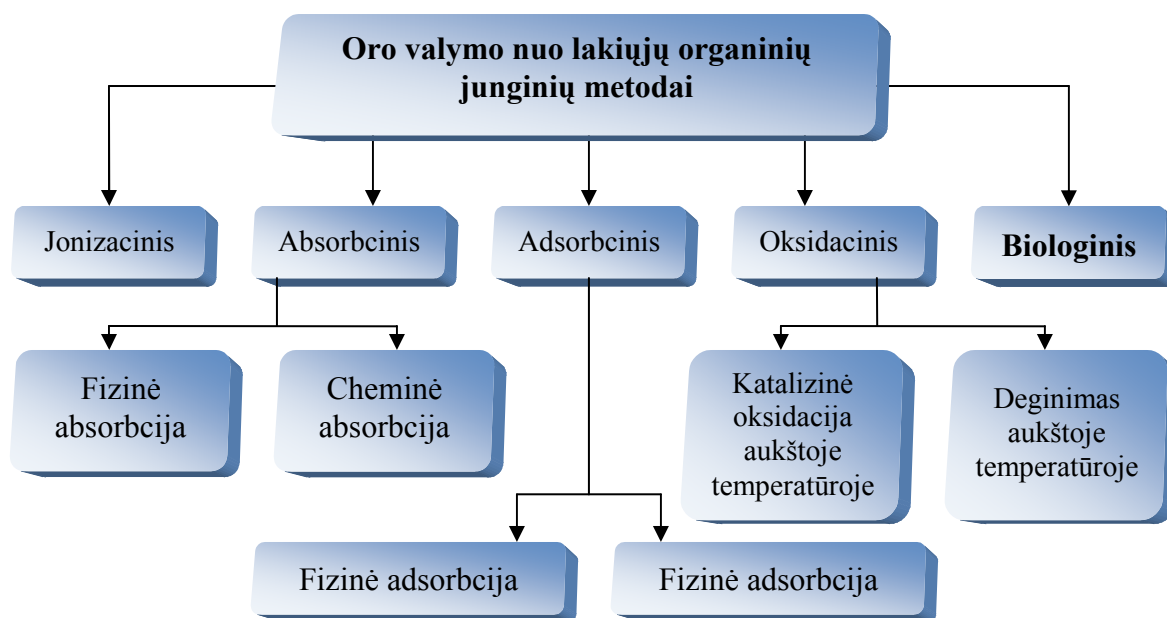
Lietuvai integruojantis į ES ypač didelis dėmesys skiriamas gerinant gyvenamosios ir darbo aplinkos oro kokybę. Dabartiniu metu vadovaujantis ES direktyvomis aplinkos oro sektoriuje griežtinami aplinkosauginiai reikalavimai bei įvedamos didesnės baudos už šių reikalavimų nesilaikymą, diegiami mažiau aplinkos orą teršiantys gamybos būdai bei pažangesnės oro valymo technologijos ir t.t. Šalia tradicinių oro valymo metodų (absorbcijos, adsorbcijos, katalizinės oksidacijos ir kt.) perspektyvu taikyti naujesnes, ekonomiškones bei efektyvesnes biologinio oro technologijas (Vaiškūnaitė 2004).

1.3. LAKIŲJŲ ORGANINIŲ JUNGINIŲ MAŽINIMO PRIEMONĖS

Lakiųjų organinių junginių (LOJ) emisijos į atmosferą smarkiai įtakoja oro kokybės blogėjimą ir aplinkos taršą (Saravanan ir Rajamohan 2009). Pasaulyje plačiai taikomi įvairūs lakiųjų organinių junginių valymo iš oro metodai. Pasirinkimą lemia metodo efektyvumas ir pigumas (Chou and Li 2009).

Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai

Oro valymo metodas parenkamas pagal teršalų kilmę ir chemines savybes, kiekį, koncentraciją, technines sąlygas ir atsižvelgiant į ekonominius rodiklius. Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai pateikti 1.5 pav.



1.5 pav. Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai (Baltrėnas *et al.* 2004)

Jonizacinio metodo pasirinkimą lemia aukštas, iki 98 %, lakiųjų organinių junginių išvalymo laipsnis. Šis valymo metodas pagrįstas tuo, kad užterštas oras yra sužadinamas aukštosios įtampos. Ore esantis deguonis jungiasi su vienvalenčiu deguonimi, dėl to susidaro ozonas. Ore esantys teršalai jungiasi su ozono molekulėmis ir vėliau nusodinami nusodinimo kameroje. Šis metodas yra gana brangus, be to, šių įrenginių didelės eksploatacinės išlaidos (Yamamoto *et al.* 2005).

Absorbcinis oro valymo metodas. Absorbcija – tai oro srautų, užterštų dujinėmis priemaišomis, valymo metodas, pagrįstas kai kurių skysčių (absorbentų) savybe sugerti atskirus dujinius komponentus. Būtina absorbcijos sąlyga – absorbuojamasis komponentas turi tirpti absorbuojančiame skystyje. Fizinė absorbcija vyksta tuomet, kai absorbentais yra organiniai tirpalai, nereaguojantys su absorbuojamomis dujomis, ar vanduo. Vykstant cheminei absorbcijai, dujų molekulės reaguoja su absorbentais. Tai vandeniniai druskų tirpalai, organinės medžiagos ir įvairių medžiagų vandeninės dispersijos. Ištirpę organiniai junginiai absorbate mažina jo efektyvumą, todėl būtina jį nuolat keisti arba iš jo pašalinti ištirpusius junginius (Chang and Lu 2003).

Adsorbciniam oro valymo metodui plačiausiai naudojami adsorbentai yra aktyvintoji anglis, silikagelis, ceolitai, jonitai.

Šis metodas sukurtas remiantis kai kurių kūnų su ultramikroskopine struktūra fizinėmis savybėmis, leidžiančiomis pasirinktinai sugauti atskirus valomo dujų mišinio komponentus ir kaupiti

juos savo paviršiuje. Adsorbciniu būdu dujos išvalomos 90–98 %. Tačiau smulkios kai kurių medžiagų dalelės adsorbuojamos kur kas prasčiau. Didesniam adsorbento hidrauliniam pasipriešinimui įveikti reikia daug energijos sąnaudų, o filtro įkrovai reikalinga nuolatinė regeneracija.

Oksidacinis oro valymo metodas. Valant užterštą orą šiuo būdu, teršalai paverčiami nekenksmingais arba ne tokiais kenksmingais junginiais. Yra du oro valymo būdai: katalizinė oksidacija žemoje temperatūroje ir teršalų deginimas aukštoje temperatūroje.

Katalizinė analizė taikoma tuomet, kai išmetamas oras yra mažai užterštas. Naudojant katalizatorių, organiniai junginiai oksiduojasi 300 – 500 °C. Gilios oksidacijos katalizatoriai gali būti puslaidininkiai arba druskos. Daugiamolekulių organinių junginių dujos šiuo metodu yra nevalomos, be to, būtina užtikrinti katalizatoriaus apsaugą nuo dujose esančių kietųjų dalelių, kurios, patekusios ant katalizatoriaus, sumažina jo veiksmingumą (Zagorskis 2009).

Teršalų deginimas aukštoje temperatūroje yra veiksmingas būdas orui valyti nuo tirpiklių. Taikant šį metodą lakieji organiniai junginiai (LOJ) oksiduojami aukštoje temperatūroje. Dėl didelių energijos sąnaudų šis valymo metodas yra brangiausias iš visų metodų, todėl retai taikomas mažesnėse pramonės įmonėse, kuriose į aplinkos orą išsiskiria organinių junginių. Taikant šį metodą į aplinkos orą išskiriami antriniai klimato kaitą veikiantys produktai, tokie kaip anglies dvideginis.

Biologinio oro valymo metodo pasirinkimą lemia išvalymo efektyvumas, pigumas ir tai, kad susidaro nekenksmingų skilimo produktų, šios charakteristikos būdingos biologinio oro valymo metodui, pagrįstam organinių junginių biologine destrukcija, naudojant tam tikras mikroorganizmų kultūras (Gallastegui 2010).

Ekonominiu požiūriu biologinius oro valymo įrenginius perspektyvu naudoti mažesnių (iki 1000 mg/m³) koncentracijų teršalams šalinti, nes biologinis oro valymo metodas yra pigiausias iš visų pirmiau paminėtų metodų.

Biofiltravimas gali būti plačiai taikomas lakiųjų organinių junginių, išmetamų iš pramoninių ir komercinių šaltinių, kontrolei, taip pat nuotekų valymo įrenginiuose bei dirvožemio ir požeminio vandens regeneravimo operacijose.

Biofiltravimas yra oro taršos kontrolės technologija. Užteršto oro valymas vyksta jam einant per vieną ar kelis bioterpės sluoksnius. Bioplėvelėje esantys mikroorganizmai suskaido LOJ į anglies dioksidą ir vandenį.

Vienas svarbiausių biofiltrų elementų, užtikrinančių biologinį oro valymo procesą, yra bioįkrova. Bioįkrovos pobūdis, poringumas, drėgnis, pH, temperatūra, adsorbcinės ir absorbcinės savybės lemia mikroorganizmų populiacijos augimą ir vystymąsi, o tai biofiltre užtikrina efektyvų

oro srauto valymą (Malhautier *et al.* 2005; Žarnauskas, Zigmontienė 2008; Kim *et al.* 2009; Singh *et al.* 2010).

Biologiniuose oro valymo įrenginiuose naudojamos bioįkrovos gali būti pagamintos iš sintetinių ir organinių medžiagų. Sintetinės medžiagos – stiklo šukės, polistireno rutuliukai, molio plytų skeveldros, molio žiedai ir kt. Organinės bioįkrovos medžiagos – kompostas (žievės, lapai, popierius, purvas, šiaudai, nendrės ir kt.), durpės (viržynai, šaknys) arba kelių organinių medžiagų junginys (Baltrėnas ir Zagorskis 2007).

LOJ išmetimus ribojantys teisės aktai

Kartu su kitomis Europos Sąjungos valstybėmis narėmis Lietuva įsipareigojo mažinti lakiųjų organinių junginių (toliau – LOJ) išmetimą į aplinką, pasirašydama 1999 metais priimtą 1979 metų „Tolimų tarpvalstybinių oro teršalų pernašų“ konvencijos protokolą „Dėl išmetamų lakiųjų organinių junginių kiekių ir jų tarpvalstybinių pernašų ribojimo“ (Lietuvos Respublikos ratifikuota 2007-04-05).

Svarbiausias LOJ aplinkai keliamas pavojus – dalyvavimas fotocheminėse reakcijose (saulės radiacijos poveikyje), sukeliančiose Ozono susidarymą troposferoje (apatiniuose atmosferos sluoksniuose). Skirtingai nuo stratosferinio ozono, apsaugančio žemę nuo kenksmingų ultravioletinių spindulių, troposferoje susidarantis ozonas sukelia kvėpavimo ligas ir kenkia aplinkai (Lakieji organiniai...2009)

Lakiųjų organinių junginių skaičius yra labai didelis. Dėl šios priežasties baigtinio tokių junginių sąrašo nėra, todėl jiems taikomi bendresnio pobūdžio apibrėžimai. Pagal vieną iš jų, lakiaisiais organiniais junginiais laikomos medžiagos, susidedančios iš anglies, deguonies, vandenilio, halogenų ir t.t. ir pan. atomų, (išskyrus anglies oksidus ir neorganinius metalų karbidus), kurių virimo temperatūra yra mažesnė nei 250 laipsnių Celsijaus esant normaliam atmosferos spaudimui. Toks kriterijus naudojamas Europos Bendrijos direktyvoje 2004/42/EB.

Tuo tarpu, JAV Aplinkos apsaugos agentūra taiko fotocheminio reaktyvumo kriterijų, t.y. koku laipsniu kiekvienas lakus organinis junginys skatina ozono susidarymą atmosferoje, lyginant su etanu (Aplinkos ministerija...2009).

EB teisės aktus, reglamentuojančius sumažinti skirtus LOJ išmetimus galima išskirti į bendro pobūdžio direktyvas, skirtas įvairių rūšių, tame tarpe ir LOJ, išmetimams riboti (Taršos integruotos prevencijos ir kontrolės direktyva 1996/61/EB), specifinius teisės aktus, skirtus tam tikros rūšies veiklai reglamentuoti (direktyva 1994/63/EB dėl lakiųjų organinių junginių išsiskyrimo į aplinką

laikant benzina ir tiekiant jį iš terminalų į degalines kontrolės) ir teisės aktus, skirtus konkrečiai LOJ kontrolei. Paskutinei kategorijai priskirtinos dvi direktyvos:

- 1999 m. kovo 11 d. Tarybos Direktyva 1999/13/EB dėl tam tikrų veiklos rūšių ir tam tikrų įrenginių lakiųjų organinių junginių, susidarančių naudojant organinius tirpiklius, emisijų apribojimo.
- 2004 m. balandžio 21 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2004/42/EB dėl lakiųjų organinių junginių, susidarančių naudojant organinius tirpiklius tam tikruose dažuose, lakuose ir transporto priemonių pakartotinės apdailos produktuose, išmetamų kiekių ribojimo ir iš dalies keičianti Direktyvą 1999/13/EB.

Pirmosios direktyvos (1999/13/EB) tikslas sumažinti LOJ išmetimus iš įrenginių, naudojančių LOJ turinčius (arba vien iš LOJ susidedančius) tirpiklius (dar vadinama „tirpiklių“ direktyva). Direktyva apima tokias veiklos rūšis, kaip sausasis valymas, avalynės gamyba, spausdinimas, farmacinių produktų gamyba ir t.t. Į direktyvos reguliavimo sritį patenkančios veiklos išvardintos jos I-ame priede. Kartu ji nustato LOJ išmetimų ribines vertes kiekvienai veiklai (direktyvos IIA priedas), kurios atskirais atvejais priklauso nuo per metus sunaudojamo tirpiklio kiekio.

Įrenginiai, patenkantys į direktyvos 1999/13/EB reguliavimo sritį yra registruojami arba turi būti gautas leidimas jų eksploatacijai (Aplinkos ministerija...2009).

1.4. ORO VALYMO BIOTECHNOLOGIJŲ TAIKYMO YPATUMAI

Biologinis oro valymo metodas, palyginti su kitais oro valymo būdais, yra pakankamai naudingas, turintis nemažai svarbių privalumų: paprastą naudojimą, aukštą teršalų išvalymo laipsnį, nedideles ekonomines sąnaudas, be to, oro valymo metu išsiskiria nepavojingi skilimo produktai (Baltrėnas *et al* 2004).

Biofiltras – tai oro valymo įrenginys, kuriame kultivuojamos savaiminių mikroorganizmų asociacijos. Biofiltro darbo veikla yra labai sudėtinga ir priklausanči nuo mikroorganizmų (grybų, mikroskopinių gyvybių ir kt.) aktyvumo. Efektyviausias filtras toks, kuriame mikroorganizmų veikla pati aktyviausia.

Biofiltracija – tai lakiųjų organinių junginių (LOJ) iš užteršto oro pašalinimas ir suoksidinimas mikroorganizmų gyvenančių bioįkrovoje dėka. Milijardai čia gyvenančių mikroorganizmų biofiltro ribose paverčia organinius junginius į nekenksmingus junginius. Be abejo, šie mikroorganizmai vartoja tik saugiai suaktyvintus junginius drėgnoje, deguonimi turtingoje aplinkoje (Pineda *et al* 2004).

Biologinis valymo procesas visų pirma buvo panaudotas buitiniams ir pramoniniams nutekamiesiems vandenims valyti. Tik daug vėliau tie patys biocheminiai procesai buvo pritaikyti ir orui valyti nuo įvairių teršalų.

Biologinis oro valymas plačiai taikomas daugelyje užsienio šalių: Vokietijoje, Prancūzijoje, Anglijoje, Nyderlanduose ir kt. 1923 m. šis metodas buvo pasiūlytas kaip nemalonių emisijų kvapą neutralizuojantis metodas. 1955 m. Vokietijoje pritaikytas nedidelių koncentracijų odorantams (nemalonų ir specifinį kvapą turintiems teršalams) valyti. Pats pirmasis biofiltras buvo žemės filtro (su natūraliąja įkrova) konstrukcijos ir valė orą nuo nedidelių koncentracijų sieros vandenilio, merkaptano ir kitų sieros turinčių junginių (Baltrėnas *et al* 2002).

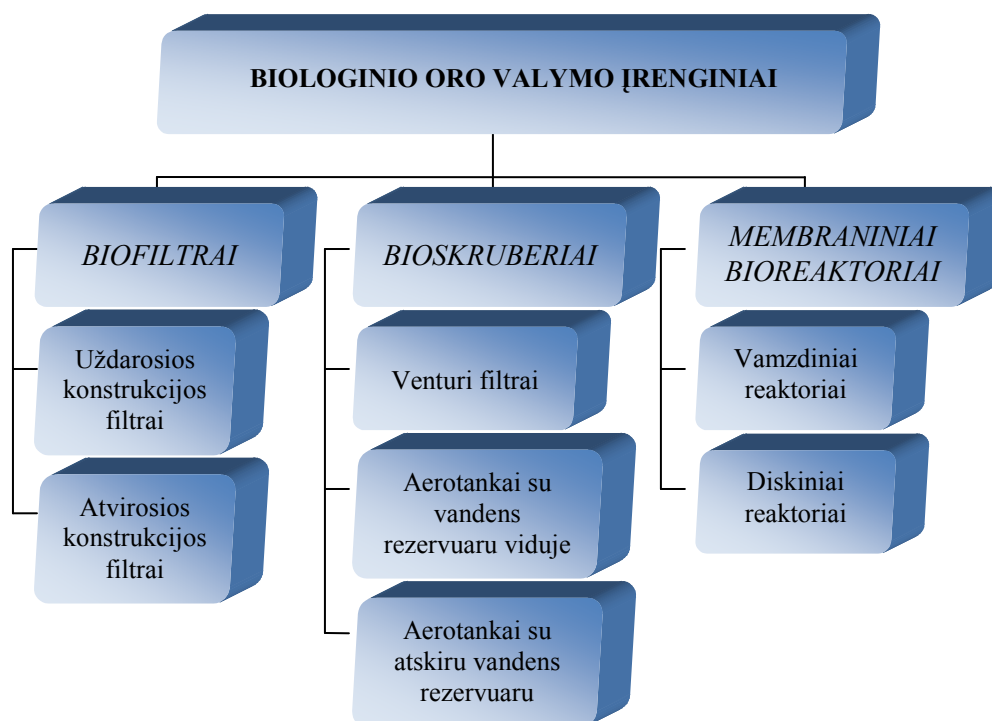
Nuo 1990 m. įvairiose pasaulio šalyse orui valyti jau pastatyta apie 500 biocheminės destrukcijos metodu veikiančių įrenginių, kurie naudojami nuo organinių ir neorganinių teršalų (pvz.: alifatinių, aromatinių angliavandenilių alkoholiams, aldehydų, organinių rūgščių, amino ir amoniako ir kt.).

Biologinio oro valymo įrenginiai ir jų klasifikacija

Biologinio oro valymo įrenginiai, naudojami orui valyti, yra klasifikuojami į tris pagrindines grupes (1.6 pav.): membraninius bioreaktorių, biofiltrus ir bioskruberius (Zagorskis *et al* 2004).

Biofiltracijos mechanizmą sudaro adsorbcijos, absorbcijos ir mikroorganizmų degradacijos kombinacijos. Mikroorganizmai, esantys biosluoksnyje absorbuodami nuolat metabolizuoja teršalus, paversdami juos į vandenį ir anglies dioksidą (Gallastegui 2010).

Atlikus teršalų cheminės sudėties ir koncentracijų analizę, nustatomas biofiltro efektyvumas. Biofiltrai geriausia veikia valant hidrofilinius teršalus, kai jų koncentracijos yra nedidelės. Kai kurie chemikalai suyra esant nedideliems kiekiams, tokie kaip chloruoti teršalai.

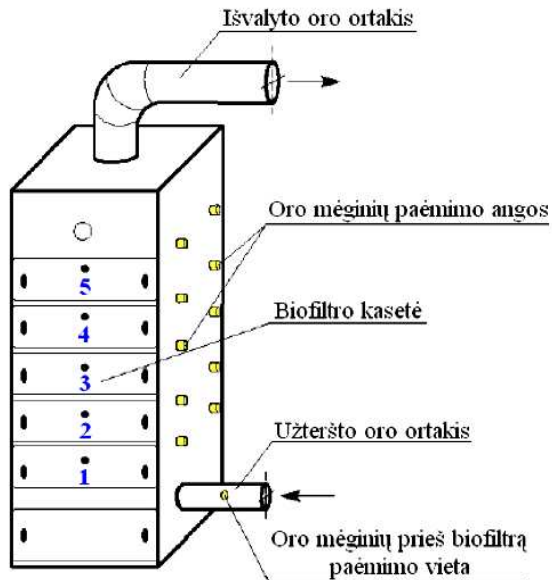


1.6 pav. Biologinio oro valymo įrenginių klasifikacija (Baltrėnas *et al.* 2004)

Biofiltro naudojimo trukmė priklauso nuo leidžiamo užteršto oro srauto, kultivuojamų mikroorganizmų veiklos bei nuo filtre palaikomų parametrų (temperatūros, drėgmės ir kt.) Dėl šios priežasties, ilgesnė gyvavimo trukmė sudaro sąlygas pastovesniam oro valymo efektyvumui, nors projektuojant stengiamasi sumažinti filtro matmenis, kad biofiltrai galėtų valyti kuo didesnę oro srautą. Paprastai dauguma bioterpių tarnauja iki 5 – 7 metų. (Baltrėnas *et al.* 2002).

Įprastai biofiltro terpę sudaro kompostas, kurį dažniausiai sudaro durpės, samanės, plastikas ar mediena ir kt. Biofiltro terpės esmė yra sudaryti dideli paviršių teršalų adsorbcijai ir absorbcijai. Terpė taip pat yra kaip maisto šaltinis mikroorganizmų populiacijai. Tiesa sakant, kai kurioms terpėms trūksta reikalingų maisto medžiagų ir reikalauja mechaninio maistingų medžiagų papildymo (azoto ar fosforo ir kt.) mikroorganizmų gyvybės palaikymui. Tiekiamų maistinių medžiagų kiekis priklauso nuo šalinimo teršalo pobūdžio, teršalo koncentracijos ir biofiltro veikimo specifikos (Cox *et al.* 2000). Dauguma biofiltrų tarnauja 5 – 7 metus, kol reikia pakeisti jų įkrovą (Pineda *et al.* 2004).

Principinė biologinio oro valymo įrenginio – kasetinio biofiltro – schema pavaiduota 1.7 paveiksle.



1.7 pav. Principinė kasetinio biofilto schema (Skaistys 2006)

Biofilto eksploatacijai reikalinga kas savaitinė apžiūra. Po mikroorganizmų aktyvacijos, kuri paprastai trunka iki dviejų savaitių, galima pradėti oro valymo procesą.

Pagrindiniai veiksniai nulemiantys tinkamą filtro įkrovą:

1. Galimybė išlaikyti drėgmę filtro bioterpėje.
2. Didelis paviršiaus plotas teršalų absorbcijai ir mikroorganizmų biomasei augti.
3. Būtinybė tiekti maistingas medžiagas mikroorganizmų kultivavimui išlaikyti.

Biologinio oro valymo įranga yra paprasta, aptarnavimas nesudėtingas (Skaistys 2006). Skirtingos konstrukcijos biologinius oro valymo įrenginius plačiai tyrinėjo vokiečių mokslininkai Maier, Hubner ir Sabo.

Lakiųjų organinių junginių emisijų į aplinkos orą mažinimui naudojami biofiltrai su sintetinė įkrova. Tokių biofiltrų konstrukcijas aktyviai tyrė amerikiečiai bei japonai: Deshusses, Cox, Lu, Chang, Liu. Siekiant padidinti įkrovos paviršiaus plotą ir ilgaamžiškumą, biofiltrai įkrauti sintetinė, neorganinės kilmės įkrova, kuri drėkinama aktyviuotu, maistinių medžiagų prisotintu tirpalu (Zagorskis 2011). Tokio tipo biofiltruose orui valyti palaikomas nuoseklesnis filtro veikimo režimas nei tradiciniuose biofiltruose, dėl geresnio slėgio kritimo, maistinių medžiagų koncentracijos ir pH reguliavimo (Cai ir kt. 2007).

Biofiltro parametrai gali labai kisti, priklausomai nuo biofiltro gamintojo, valomų teršalų prigimties, pramonės šakos, kurioje įrenginys naudojamas. Paprastai biologinės įkrovos aukštis svyruoja nuo 1 iki 4 metrų. Sąlyčio su biologine įkrova laikas paprastai būna 10 s – 30 s, kai kuriais atvejais net 2 – 5 s (Gabriel and Deshusses 2003a, b). Biofiltrai pasižymi gana aukštu aerodinaminiu pasipriešinimu, jis gali siekti 100 – 500 Pa.

1.5. BIOLOGINIAM ORO VALYMOUI NAUDOJAMŲ ĮKROVŲ ANALIZĖ

Pagrindiniai biologinio oro valymo principai

Biologinis oro valymo procesas vyksta keliais etapais:

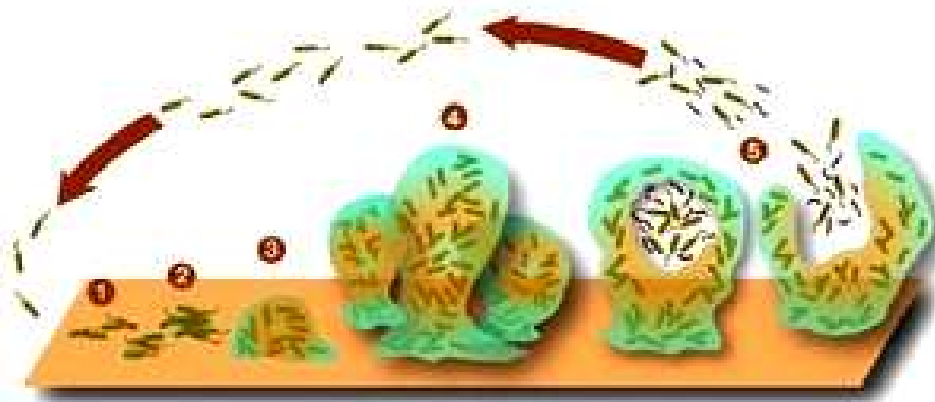
- Su oru patekusias organines medžiagas absorbuoja filtruojančioje terpėje esantys mikroorganizmai.
- Vandens fazėje mikroorganizmai lengvai suskaido absorbuotąsias medžiagas, kartu didėja ir jų masė.

Biologinio oro valymo metu teršalų pernešimas iki kiekvienos bioįkrovoje esančios mikroorganizmų ląstelės vyksta per tris pagrindines dujų-vandens-bioplėvelės fazes.

Dujinėje fazėje teršalai transportuojami konvekciniu būdu ir difunduoja į vandens fazę. Vandens fazėje teršalai pirmiausia absorbuojami ir difunduojami, paskui per vandens fazę pernešami ir difuzijos būdu patenka į bioplėvelę. Šioje bioplėvelės stadijoje teršalai difunduoja ir patenka į bioįkrovoje esančius mikroorganizmus, kur įvairių biocheminių reakcijų metu vyksta biologinis teršalų skaidymas (Skaistys 2006; Pineda *et al.* 2004)

Praktikoje kaip filtruojančios terpės naudojamos natūralios ir sintetinės medžiagos. Natūralios – kompostas, durpės, žagarų ir durpių mišinys, žemė, pušų žievė ir kt. Pavyzdžiui, oro valymo įrenginyje kaip įkrova gali būti panaudoti kelių natūralių terpių deriniai. Tai yra, kaip terpė gali būti naudojamos ir odos skiautės, sumaišytos su susmulkintais maldais.

Vienas iš pagrindinių veiksnių, nuo kurių priklauso mikroorganizmų vystymasis (1.8 pav.) ir biologinio proceso efektyvumas, yra drėgmė.



1.8 pav. Bioplėvelės gyvavimo ciklas. 1: Pavienės ląstelės paviršiuje. 2: Ląstelių įsitvirtinimas. 3 ir 4: Mikroorganizmų populiacijos gausėjimas. 5: Pavienės ląstelės ištrūksta iš bioplėvelės (Vaiškūnaitė 2004)

Biologiniam oro valymui naudojami mikroorganizmai geriausiai auga ir vystosi, kai bioterpės drėgmė yra 70 – 85 % (Skaistys 2006; Vaiškūnaitė 2004).

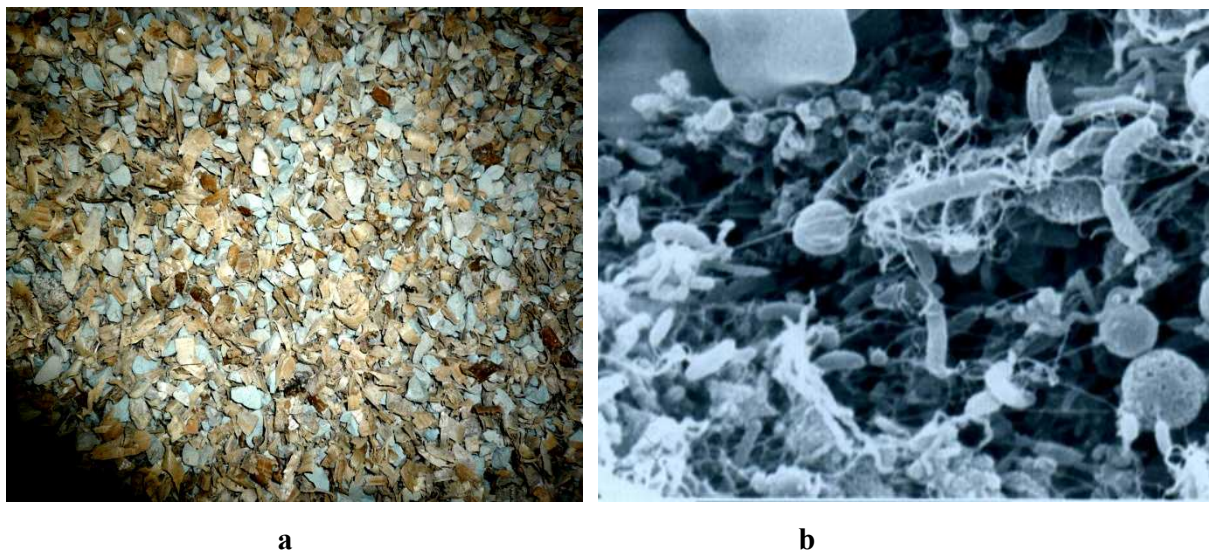
Bioįkrovų charakteristikos ir jų panaudojimas

Bioįkrova yra vienas svarbiausių biofiltrų elementų, užtikrinančių aukštą oro valymo proceso efektyvumą.

Mikroorganizmams įkrova yra kaip substratas, lemiantis jų populiacijos gausėjimą; taip pat įkrova sorbuoja teršalus; užtikrina nuolatinį teršalų kontaktą su biologiškai suaktyvintu jos plotu; aprūpina mikroorganizmus biogeniniais elementais; palaiko pastovius drėgmės, temperatūrinius, pH režimus ir kt. (Gallastegui 2010). Biofiltro įkrovos esmė – sudaryti didelį paviršių teršalų adsorbcijai ir absorbcijai. Įkrova taip pat naudojama kaip mikroorganizmų populiacijos maisto šaltinis. Kai kurioms įkrovoms trūksta reikalingų maisto medžiagų, todėl jas būtina laistyti biogeninių elementų (mineralinių druskų) prisotintu vandeniu, siekiant užtikrinti aukštą mikroorganizmų aktyvumą (Chan 2006).

Biologiniuose oro valymo įrenginiuose naudojama bioįkrova gali būti sudaryta iš sintetinių ir organinių medžiagų. Sintetinę bioįkrovą gali sudaryti šios medžiagos: stiklo šukės, polistireno rutuliukai, molinių plytų šukės, molio žiedai ir kt. Natūralią bioįkrovą sudaro organinės medžiagos (bioatliekos ar biokompostas) iš pavienių ar iš kelių, tarpusavyje suderintų medžiagų mišinių (žievių, lapų, dumblo, šiaudų, nendrių, viršių, durpių, žagarų, augalų šaknų ir kt.) (1.9 pav.).

Pavyzdžiui, bioįkrova gali būti sudaryta iš 80 % organinių (žievių, lapų, šiaudų, šaknų) ir 20 %, kaip struktūrinio elemento, neorganinių medžiagų (polistireno rutuliukų ir kt.).



1.9 pav. Bendras bioįkrovos vaizdas: a – gamtinio ceolito ir medienos skiedrų mišinys; b – įkrovos bioplėvelė (Ardjmand 2005)

Įkrovos tinkamumą ir jos pasirinkimą biologinio oro valymo procesui lemia šie kriterijai:

- palyginti nemažas (nuo 40 iki 60 %) poringumas, užtikrinantis gerą teršalų sorbciją;
- didelis naudingo paviršiaus plotas (gausus mikroorganizmų skaičius, lemiantis efektyvų teršalų skaidymą);
- frakcijos homogeniškumas, užtikrinantis nedidelį jos aerodinaminį pasipriešinimą;
- geras drėgmės sulaikymas (iki 70 – 85 %), lemiantis teršalų tirpumą ir mikroorganizmų augimą bei jų vystymąsi;
- gera technologija (netrumpas tarnavimo laikas (3 – 7 m.), stabilumas ir pan.);
- prieinama kaina.

Prieš pradėdant biologinių oro valymo įrenginių eksploatavimą, (2 – 3 savaites) jų įkrova, leidžiant per ją teršalus, biologiškai aktyvinama. Biologiškai suaktyvinta bioįkrova laikoma tuomet, kai ją padengia plonas (5 – 30 μm storio) bioplėvelės sluoksnis, kuriame gyvena mikroorganizmai (Vaiškūnaitė 2004).

Biologiškai suaktyvinti įkrovą galima ir kitu būdu. Šiuo būdu mikroorganizmai pirmiausia išauginami tam tikroje terpėje, vėliau jų kultūras užsėjant į dar nesuaktyvintą bioterpę. Oro valymo įrenginyje taikoma įkrova, kaip porėta medžiaga, sulaiko per ją leidžiamus teršalus, kuriuos vėliau

suskaido ten gyvenantys mikroorganizmai. Geriausias kontakto laikas tarp teršalo ir suaktyvintos bioįkrovos dalies – biosluoksnio yra 1 – 4 s (Vaiškūnaitė 2004; Stegmann *et al* 2001).

Praktikoje bioįkrovos pasirinkimą lemia valomų teršalų cheminė prigimtis. Tai yra, valant orą nuo etilacetato, vinilchlorido dažniau naudojamos sintetinės bioterpės, nuo formaldehido – natūralios (iš šiaudų ir kt.); nuo fenolių ir kitų LOJ – aktyvusis dumblas; nuo tetrahidrofuranų – durpių kompostas ir pan. Vadinas, norint užtikrinti efektyvų įkrovos pritaikymą oro valymo procese, reikia įvertinti aptartas pagrindines jų charakteristikas (Vaiškūnaitė 2004).

1.6. ĮKROVŲ SAVYBIŲ VERTINIMAS

Pasaulyje sukurta daugybė skirtingų technologijų, kurias pritaikius įvairiose pramonės šakose galima sumažinti oro taršą. Viena efektyviausių, paprasčiausių ir pigiausių, kurią naudojant išvalomas oras nuo lakiųjų organinių ir neorganinių junginių, tai oro srauto valymas naudojant biofiltrą (Žarnauskas, Zigmontienė 2008; Boswell 2010; Chou, Li 2009).

Bioįkrovos prigimtis, poringumas, drėgnumas, pH, temperatūra, adsorbcinės bei absorbcinės savybės lemia mikroorganizmų populiacijos augimą ir vystymąsi. Tai užtikrina efektyvų (80–99 %) oro srauto išvalymą biofiltre (Baltrėnas ir Zagorskis 2007).

Bioįkrovos pasirinkimas yra labai svarbi dalis projektuojant biologinius oro valymo įrenginius. Norint, kad biofiltras veiktų efektyviai, įkrova turi užtikrinti tinkamą aplinką mikroorganizmų augimui, būti labai poringa, kad užterštas oras galėtų praeiti lengvai. Pagrindinės įkrovų savybės yra poringumas, drėgmė, maistinių medžiagų kiekis bei lėtas skaidymas (Baltrėnas *et al* 2004).

Vienas iš bioįkrovos parinkimo kriterijų – tai geras drėgmės sugėrimas, kuris yra reikalingas tinkamam bioplėvelės mikroorganizmų vystymuisi.

Labai svarbi savybė yra bioįkrovos poringumas – kuo jis didesnis, tuo sąveikaujančio su užterštu oru didesnis paviršiaus plotas ir geresnė teršalų adsorbcija bei biocheminių procesų greitis.

Geras aprūpinimas maistinėmis medžiagomis mikroorganizmų gyvybinėms funkcijoms palaikyti (maistinių medžiagų kiekis) ypatingai svarbus kontaktuojant bioplėvelei su teršalais. Trukstant maistingų medžiagų, naudojamos azoto ir fosforo mineralinės druskos, reikalingos mikroorganizmų augimui (Govind 1999).

Bioįkrova turėtų pasižymėti geromis fizinėmis charakteristikomis. Ji turėtų būti stabili, t.y. jos savybės neturėtų kisti laikui bėgant, o taip pat būti patvari ir tarnauti kuo ilgesnį laiką.

Bioįkrovos elementai turi būti išdėstyti taip, kad susidarytų kuo mažesni hidraulinio pasipriešinimo koeficientai praeinančiam oro srautui.

Parenkant bioįkrovą svarbu atsižvelgti ir į ekonominius kaštus. Bioįkrovos iš organinių medžiagų yra pigesnės nei dirbtinės, tačiau sintetinės dažnai esti patvaresnės ir jas galima naudoti ilgesnį laiką.

Bioįkrovų panaudojimas labai priklauso nuo valomų teršalų cheminės prigimties, todėl kiekvienai pramonės šakai būtina parinkti labiausiai jai tinkančią bioįkrovą (Delhomenie and Heitz 2005).

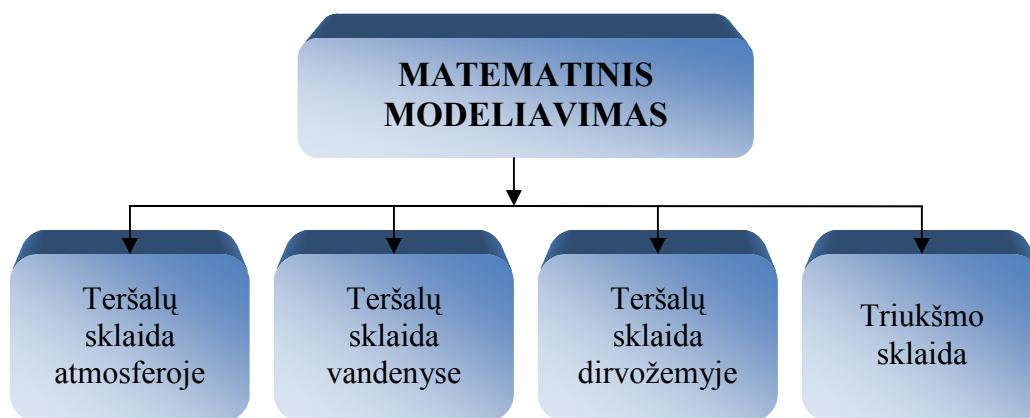
1.7. MATEMATINIŲ MODELIŲ TAIKYMAS BIOFILTRACINIAMS PROCESAMS MODELIUOTI

Matematinis modeliavimas – tiriamojo proceso ar reiškinio, aprašyto diferencialinėmis lygtimis ir apriboto vienareikšmiškumo sąlygomis, skaitinis ar analizinis sprendimas, t.y. matematinio modelio sudarymas ir jo realizavimas, uždavinio sprendinio radimas (Baltrėnas ir kt. 2008).

Matematinio modeliavimo metodologijos esmė yra tiriamo realaus objekto (proceso, reiškinio, sistemos) pakeitimas matematiniu modeliu, o vėliau – virtualiuoju objektu (matematinio modelio kompiuterine realizacija). Tokiu būdu žymi dalis realaus objekto savybių tyrimo atliekama eksperimentuojant su virtualiuoju objektu. Šis trečiasis pažinimo (prognozavimo, projektavimo) metodas turi savyje daugelį gerų pirmųjų dviejų mokslinio tyrimo metodų – teorijos ir eksperimento savybių. Darbas ne su pačiu realiuoju objektu, o su jo modeliu leidžia be didelių išlaidų ir pakankamai greitai atlikti jo savybių ir elgesio tyrimą įvairiausiose įmanomose situacijose. Tuo pat metu skaitiniai eksperimentai su objektų modeliais leidžia remiantis šiuolaikinių skaitinių metodų ir informatikos techninių priemonių galia detaliai, giliai ir pakankamai pilnai ištirti objektus, ką ne visada leidžia grynai teoriniai metodai (eksperimento privalumai).

Matematinis modeliavimas – taikomosios matematikos dalis, skirta įvairių sričių uždavinių sprendimui naudojant virtualiojo eksperimento metodiką. Ji remiasi matematinių modelių sudarymu ir pirmine analize, skaitinių algoritmų sudarymu ir analize, natūrinių stebėjimų ir eksperimentinių rezultatų apdorojimu, bei naujos informacijos apie modeliuojamus procesus, sistemas bei reiškinius gavimu ir analize.

Matematinio modeliavimo skirstymas pateiktas 1.10 pav.



1.10 pav. Matematinio modeliavimo skirstymas (Baltrėnas ir kt. 2008)

Modeliavimo teorijoje visi uždaviniai sprendžiami realius objektus paverčiant modeliais. Tai dažniausiai atliekama identifikuojant tų objektų būdingiausius parametrus (ir fizinius, ir fizikinius), turinčius įtakos sprendimo rezultatui, ir modelyje apibrėžiant tik juos, eliminuojant bet kurią perteklinę, balastinę, informaciją, kuri uždavinio sprendiniui neturi jokios įtakos (Petraitis 2010).

Analizuojant aplinkos oro kokybę, ypač svarbu įvertinti oro teršalų sklaidą ir numatyti jų pasiskirstymą. Didelę reikšmę turi poveikio aplinkos orui vertinimas iš pramonės objektų, tokių kaip katilinės, termofikacinės elektrinės, chemijos industrijos sektoriai ir pan.

Oro taršai modeliuoti dažniausiai taikomi modeliai (Gauso dispersijos) yra:

- CALINE;
- PRIME;
- SCREEN3;
- ISC3;
- SLAB;
- VARSA;
- COPERT.

Bendrųjų pernašos lygčių skaitiniu sprendimu pagrįsta kita grupė – PHOENICS, FLUENT. Šios programos nėra specializuotos aplinkos taršai modeliuoti. PHOENICS programa galima modeliuoti dujinių teršalų pernašą ore skystuoju pavidalu – vandenyje ir dirvoje (Baltrėnas ir kt. 2008).

Biofiltracijos procesus aprašantys matematiniai modeliai ir programos

Modeliuojant mažo našumo biofiltruose vykstančius teršalų biodestrukcijos procesus naudojamos įvairiausios diferencialinės lygtys, įvertinančios teršalų masės pernašos procesus, bioplėvelėje vykstančias reakcijas, teršalų adsorbciją, absorbciją, įkrovos savitojo paviršiaus plotą ir daugelį kitų veiksnių. Todėl matematiniai modeliai sudaro visumą masės pusiausvyros lygčių, aprašančių biofiltre vykstančius biofiltracijos procesus (Zagorskis 2009).

Biofiltracinių procesų metu mikroorganizmų fermentacijos reakcijos greičiui nustatyti taikomas *Monodo kinetikos modelis* (Ramirez *et al.* 2009).

Monodo kinetikos modelis aprašo mikroorganizmų augimo greičio nuo teršalo koncentracijos priklausomybę. Iš pradžių buvo manyta, kad eksponentinis mikroorganizmų augimas galimas tik tuomet, kai substrate yra didelis maistingųjų medžiagų kiekis. Tačiau vėliau buvo įrodyta, kad mikroorganizmų skaičius proporcingai auga didėjant maistingųjų medžiagų kiekiui substrate (Zagorskis 2009). Pradėjus naudoti pataisos koeficientą K_p pagrindinėje Monodo lygtyje, gaunama biomasės augimo greitį aprašanti lygtis (Wu 2003):

$$\mu = \mu_m \frac{c}{K_s + c + c^2/K_p}, \quad h^{-1} \quad (1.1)$$

čia: μ – biomasės augimo greitis, h^{-1} ;

K_s – Monodo konstanta, mg/l;

c – teršalo koncentracija, mg/l;

K_p – pataisos koeficientas, mg/l.

Masės balanso modelis naudojamas teršalų pernašos bioplėvelėje aprašymui. Organinio junginio molekulių pernaša iš dujinės fazės į skystąją gali būti išreikšta teršalo difuzijos koeficientu.

Teršalo pernašos lygtis išreiškiama tokia formule:

$$r_{v,c} = D \frac{d^2 c}{dx^2}, \quad g/m^3 \quad (1.2)$$

čia: $r_{v,c}$ – substrato apkrova, g/m^3 ;

D – difuzijos koeficientas;

x – teršalo pernašos atstumas, m.

Substrato apkrova yra proporcinga jo koncentracijos pasiskirstymo bioplėvelėje netolygumui. Naudodami masės balanso lygtis, italų mokslininkai sumodeliavo fenolio pernašą bioplėvelėje, kurioje buvo kultivuojamos *Pseudomonas putida* mikroorganizmų kultūros. Masės pernašos bioplėvelėje gali būti aprašytos Fiko dėsnio.

Naudojant *pirmojo ir nulinio laipsnio kinetikos modelį*, žinoma, kad didėjant teršalo koncentracijai fermentacijos reakcijos greitis taip pat didėja. Kai substrato koncentracija yra gerokai mažesnė už Michaelio-Menteno konstantą, tuomet reakcija yra pirmojo laipsnio. Šis procesas gali būti aprašytas pirmojo laipsnio kinetikos lygtimi. Metodus leidžia įvertinti teršalo koncentracijos pokyčio priklausomybes nuo biofiltracijos laiko.

Skysčio ar dujų judėjimą matematiškai aprašo Navjė ir Stokso lygtys. Šios lygtys išreiškia Niutono dinamikos dėsnius, įskaitant jėgas, atsirandančias dėl slėgio gradiento ir terpės klampio. Lygtys sprendžiamos baigtinių tūrių metodu.

Teršalų sklaidimą dujinėse ir skystosiose terpėse galima modeliuoti naudojant MATHCAD programinį paketą. Toks teršalų sklaidimas aprašomas diferencialinėmis lygtimis su dalinėmis bei pilnomis išvestinėmis. Lygčių sprendimas gana sudėtingas, todėl taikomi supaprastinti modeliai. Yra svarbūs trys procesai: difuzija (sklaida), pernešimas (oro srautas sukelia sroves) ir nusėdimas (teršalai nusėda bioterpės paviršiuje) (Wu 2003).

Biofiltre vykstantiems aerodinaminiams ir sorbciniams procesams modeliuoti naudojama programa FLUINT. Šios programos veikimo principas panašus į PHOENICS programinių paketų. Pasirenkamos diferencialinės lygtys, pradinės ir kraštinės sąlygos, nustatomi galutiniai parametrai, išvedami rezultatai (Chan and Chang 2006).

Naudojant DATAFIT 6.1.10, Maple 7 arba MATLAB 7 programinius paketus, modeliuojami filtre vykstantys biologinės filtracijos procesai. Naudojantis duomenimis, gautais eksperimentinių tyrimų metu, modeliuojant biologinę filtraciją, randamos teršalų jų mišinių absorbcijos gebos ir biologinės degradacijos konstantų analitinės išraiškos bei nustatomos jų priklausomybės nuo teršalų prigimtės bei filtro techninių parametrų (įkrovos aukščio, leidžiamo oro srauto ir kt.)

Naudojantis PHOENICS programiniu paketu, galima įvertinti filtre vykstančius aerodinامينius procesus – leidžiamo oro srauto greitį ir aerodinaminį biofiltro įkrovos pasipriešinimą. Modeliuojant remiamasi fizikinius dėsnius atitinkančiomis matematinėmis lygtimis (Ramirez 2009). PHOENICS sprendžia visos diferencialinių lygčių sistemos diskretizuotą versiją, kurią galima užrašyti apibendrinta forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i \Phi_i) + \operatorname{div}(r_i \vec{v}_i \Phi_i - r_i \Gamma_i \operatorname{grad} \Phi_i) = r_i S_{\Phi_i} \quad (1.3)$$

čia: t – laikas;

r_i – fazės i tūrinė dalis;

ρ_i – fazės i tankis;

Φ_i – fazės i priklausomas kintamasis;

$\vec{v}_i$ – fazės i greičio vektorius;

Γ_{Φ_i} – kintamojo Φ_i mainų koeficientas;

S_{Φ_i} – srauto narys kintamajam Φ_i .

„COMSOL Multiphysics“ – interaktyvi aplinka, skirta visų rūšių mokslinių bei inžinerinių uždavinių modeliavimui ir sprendimui. Šios programinės įrangos dėka tradicinius vieno fizikos tipo modelius galima paversti multifizikos modeliais, kurie vienu metu nagrinėja kelis reiškinius. Naudojant integruotas fizikos sąsajas ir pažangią medžiagų savybių palaikymo funkciją, modelius galima kurti, apibrėžiant atitinkamas fizikines savybes, pvz., medžiagos ypatybes, apkrovas, apribojimus, šaltinius ir srautus, tam nereikia apibrėžti lygčių. „COMSOL Multiphysics“ programos multifizikinių funkcijų dėka galima susieti ir tuo pačiu modeliuoti fluidų srautą, masę ir šilumos pernašą bei chemines reakcijas.

Programinis paketas STATISTICA leidžia rinkti duomenis ir juos apdoroti. Dažnai naudojamos sklaidos diagramos, padedančios rasti ryšį tarp dviejų kintamųjų. Jos leidžia sudaryti teršalų sklaidos priklausomybę nuo techninių biofiltro duomenų, įkrovos tipo ir kt.

1.8 PIRMOJO SKYRIAUS IŠVADOS

1. Lakiųjų organinių junginių emisijoms mažinti pasaulyje vis plačiau taikomas biologinis oro valymo metodas. Metodo pasirinkimą lemia aukštas organinių junginių valymo efektyvumas, pigumas. Biologinio oro valymo įranga yra paprasta, aptarnavimas nesudėtingas.
2. Bioįkrovos pasirinkimas yra labai svarbi dalis, projektuojant biologinius oro valymo įrenginius. Norint, kad biofiltras veiktų efektyviai, įkrova turi užtikrinti tinkamą aplinką mikroorganizmų augimui. Šiuo metu dažnai taikomų sintetinių įkrovų paviršiaus plotas yra

didelis, tačiau maža sorbcinė geba, dėl to padidėja įkrovai drėkinti suvartoto vandens kiekis, o gamtinės kilmės įkrovos naudojamos neilgai, iki 3 – 5 metų.

3. Gautų tyrimų rezultatų prognozei ir patikimumui įvertinti būtina naudoti matematinius modelius, aprašančius biofiltre vykstančius aerodinaminius ir biofiltracinius procesus. Pagrindinės programos, kuriomis gali būti modeliuojami biofiltracijos metu vykstantys procesai – FLUENT, PHOENICS, DATAFIT, MAPLE, COMSOL Multiphysics.

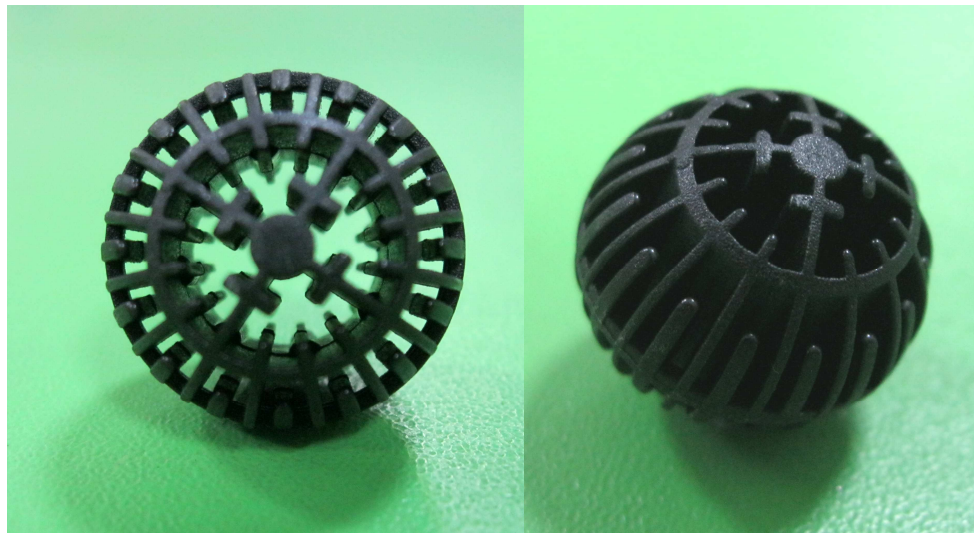
2. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO TYRIMAS

2.1. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO TYRIMO METODIKA

Vienas pagrindinių reikalavimų, keliamų biologiniams oro valymo įrenginiams, yra mažas aerodinaminis įkrovos pasipriešinimas. Aerodinaminis pasipriešinimas priklauso nuo daugelio faktorių: įkrovos poringumo, formos, frakcijos, drėgnumo. Nuo įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo priklauso ir biofiltro valymo efektyvumas (Eldon *et al.* 2010). Mažesnis įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas lemia geresnį deguonies, kuris dalyvauja maistinių medžiagų apykaitos procesuose, pasiskirstymą įkrovoje. Nuolat ieškoma būdų, kaip pagerinti įkrovoje vykstančius aerodinaminius procesus, nemažinant valymo efektyvumo (Baltrėnas and Zagorskis 2008).

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos katedros Aplinkos apsaugos technologijų laboratorijoje. Tyrimams atlikti buvo sukonstruotas biologinis oro valymo įrenginys – biofiltras su polimerine įkrova. Įrenginio aukštis – 1 m, skersmuo – 14 cm.

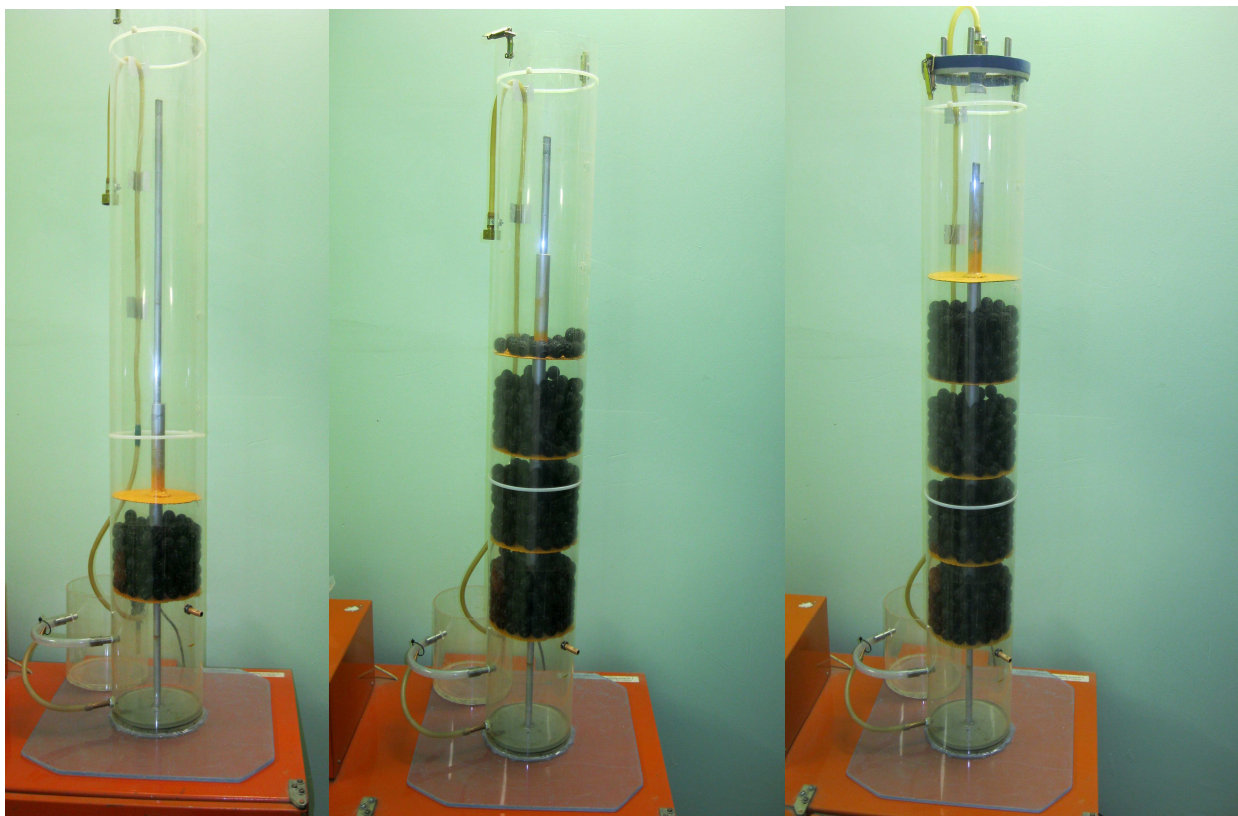
Pagrindinis uždaros konstrukcijos filtro elementas – filtruojančioji aktyvuota įkrova, sudaryta iš didelį paviršiaus plotą turinčių polimerinių rutuliukų (2.1 pav.). Vieno rutuliuko skersmuo – 23 mm, o filtruojančio paviršiaus plotas – 62 cm².



2.1 pav. Didelį filtruojančio paviršiaus plotą turintys polimeriniai rutuliukai (Autoriaus nuotrauka)

Siekiant išlaikyti tolygų oro srauto ir drėgmės pasiskirstymą per visą įkrovos sluoksnį bei sumažinti įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą, filtre įrengtos penkios sekcijos, viena nuo kitos atskirtos metaliniais sieteliais.

Kiekviena biofiltro sekcija užpildyta 10 cm storio dirbtinės kilmės įkrovos sluoksniu (2.2 pav). Po kiekvienos sekcijos fizinių parametrų matavimui ir mėginių paėmimui įrengtos angos, užsandarintos ištraukiamais guminiiais kamščiais.



2.2 pav. Oro valymo biofiltras, užpildytas dirbtinės kilmės įkrova (Autoriaus nuotrauka)

Atlikus biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo matavimus, įrenginio efektyvumo tyrimų metu mikroorganizmų aktyvumui palaikyti įkrovą numatoma nuolat drėkinti, užpurškiant ją aktyviaisiais vandens lašeliais. Aktyvųjų tirpalą į įrenginį tieks cirkuliacinis siurblys. Lakieji organiniai junginiai absorbuosis ant įkrovos paviršiaus susidariusioje bioplėvelėje, kur bus suskaidomi mikroorganizmų. Pratekėjęs įkrovą išvalytas oras bus pašalinamas iš biofiltro.

Leidžiant oro srautą per biofiltrą, jo įkrovai esant sausai ir drėgnai, aerodinaminis įrenginio pasipriešinimas skiriasi. Todėl matavimai atliekami dviem atvejais:

- pirmuoju atveju įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas matuojamas orą traukiant per sausą įkrovą;
- antruoju atveju filtro įkrova sudrėkinama ir matavimai pakartojami.

Eksperimentinių tyrimų metu matuojant biofiltro aerodinaminį pasipriešinimą, oras traukiamas dviem prie įrenginio prijungtais aspiratoriais „M 822“. Per įkrovą traukiamo oro srauto greitis matuojamas multifunkciniu fizinių parametrų analizatoriumi „Testo 400“, slėgis matuojamas, naudojant diferencinį slėgio matuoklį „DSM-1“ (matavimo ribos 0 – 20000 kPa, paklaida ± 5 Pa).

Skirtingais greičiais – 0,04; 0,06 ir 0,08 m/s – traukiant orą per biofiltro įkrovą, siekiant įvertinti aerodinaminį įkrovos pasipriešinimą, prieš kiekvieną sluoksnį diferenciniu slėgio matuokliu „DSM-1“ atliekami dinaminio slėgio matavimai, kurių kiekvienas kartojamas 3 kartus. Iš gautų rezultatų, atsižvelgiant į per įrenginį traukiamo oro srauto greičius, išvedamos biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo įrenginio sekcijų skaičiaus.

Statistinis duomenų vertinimas

Biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo nustatymui gauti duomenys sisteminami ir vertinami statistiniais metodais. Kiekvienas matavimas atliekamas po 3 kartus. Gavus tam tikro parametro (dinaminio slėgio; oro srauto greičio) tyrimų rezultatus, apskaičiuojamas jo įvertis, t.y. atskirų matavimų aritmetinis vidurkis $\bar{x}$.

Žinant parametro aritmetinį vidurkį, apskaičiuojama atskirų matavimų x_i tikimybių pasiskirstymą atitinkanti eksperimentinė dispersija $s^2(x_i)$:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \bar{x} \right)^2, \quad (2.1)$$

čia: n – matavimų skaičius;

x_i – vieno matavimo rezultatas;

$\bar{x}$ – atskirų matavimų aritmetinis vidurkis.

Apskaičiavus $s^2(x_i)$, randamas geriausias aritmetinio vidurkio $\bar{x}$ sklaidos įvertis, kuris yra vidurkio eksperimentinė aritmetinė dispersija $s^2(\bar{x})$, lygi (normaliam pasiskirstymui):

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n}, \quad (2.2)$$

čia:

$s^2(x_i)$ – atskirų matavimų x_i tikimybių pasiskirstymą atitinkanti eksperimentinė dispersija;

n – matavimų skaičius.

Gavus aritmetinio vidurkio sklaidos įvertį, skaičiuojamas eksperimentinis standartinis aritmetinio vidurkio nuokrypis:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}, \quad (2.3)$$

čia: $s(x_i)$ – eksperimentinis standartinis nuokrypis;

n – matavimų skaičius.

Statistiniams skaičiavimams naudojama Microsoft Office Excel 2003 programa. Matavimų aritmetiniai vidurkiai, eksperimentinės aritmetinės dispersijos, standartiniai aritmetinio vidurkio nuokrypiai apskaičiuojami naudojant Microsoft Office Excel 2003 statistikos (Statistical) funkcijas (Vakrina 2007):

- AVERAGE (vidurkis);
- VARP (dispersija);
- STDEV (standartinis nuokrypis).

Rezultatų sklaidai patikrinti apskaičiuojamas variacijos koeficientas v :

$$v = \frac{s(x_i)}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

čia: $s(x_i)$ – eksperimentinis standartinis nuokrypis;

$\bar{x}$ – atskirų matavimų aritmetinis vidurkis.

Jei gauta variacijos koeficiento reikšmė mažesnė už 5 – 10 %, tokiu atveju laikoma, kad rezultatų sklaida yra nedidelė, rezultatai patikimi, todėl nereikia matavimų kartoti. Tuomet

apskaičiuojamos atsitiktinės matavimo rezultatų paklaidos, taip pat santykinė atsitiktinė ir sisteminė paklaidos.

Apskaičiavus santykinės atsitiktinę ir sisteminę paklaidas, randama bendroji matavimo rezultato santykinė paklaida δ_b :

$$\delta_b = \sqrt{\delta_{ats}^2 + \delta}, \quad (2.5)$$

čia: δ_{ats} – santykinė atsitiktinė paklaida;

δ – santykinė sisteminė paklaida.

Jei nustatytos santykinės paklaidos mažesnės už 5 %, galima teigti, kad eksperimento rezultatai yra patikimi.

Tyrimų metu naudojami prietaisai

Eksperimentinių tyrimų metu siekiant nustatyti biofiltro su polimerine įkrova aerodinaminį pasipriešinimą, buvo naudojami šie prietaisai:

• Aspiratoriai „M 822“ ir „APV 4-12“

Aspiratoriai – įrenginiai, skirti oro mėginių paėmimui. Mėginiai imami, norint nustatyti, ar ore yra priemaišų.

Aspiratoriaus „M 822“ techniniai duomenys

Vienu metu imamų oro mėginių kiekis:

kai oro debitas nuo 0,2 iki 1 l/min – 2;

kai oro debitas nuo 1 iki 20 l/min – 2.

Rotametrų gradavimas:

kai oro debitas nuo 0,2 iki 1 l/min – 0,1;

kai oro debitas nuo 1 iki 20 l/min – 1.

Darbo santykinė oro drėgmė: 0 – 80%.

Tinklo galia: ne daugiau kaip 130 W.

Aspiratoriaus gabaritiniai matmenys: $(250 \pm 25) \times (220 \pm 25) \times (210 \pm 25)$ mm.

Masė: ne daugiau kaip 8,5 kg.

Tarnavimo laikas: 500 valandų.

Vidutinis tarnavimo laikas: ne mažiau 5 metų.



2.3 pav. Aspiratoriai „M 822“ ir „APV 4-12“

- **Diferencinis slėgio matuoklis „DSM-1“**

Eksperimentinių tyrimų metu per biofiltro įkrovą traukiamo oro srauto greitis reguliuojamas aspiratoriaus pagalba, o slėgis matuojamas, naudojant diferencinį slėgio matuoklį „DSM-1“ (2.4 pav.). Prietaiso „DSM-1“ matavimo ribos 0 – 20000 kPa, paklaida ± 5 Pa.



2.4 pav. Diferencinis slėgio matuoklis „DSM-1“

- **Multifunkcinis fizinių parametrų analizatorius „Testo 400“**

„Testo 400“ yra dviejų kanalų matavimo įrenginys skirtas daugelio parametrų – oro kokybės matavimams atlikti: įskaitant temperatūrą, drėgmę, oro greitį, slėgį, anglies dioksidą ir anglies monoksidą (2.5 pav.).

Įrenginys gali būti naudojamas kaip nešiojama priemonė arba kaip stacionari registravimo – monitoringo sistema. Šis įrenginys gali saugoti 500000 rodmenį, kuriuos galima parsisiųsti tiesiai į kompiuterį arba panaudojant infraraudonaisiais spinduliais valdomu spausdintuvu išvesti į popierių.



2.5 pav. Multifunkcinis fizinių parametrų analizatorius „Testo 400“ .

Multifunkcinio įrenginio „Testo 400“ privalumai:

- Prieinama daugiau kaip 200 įvairių zondu;
- 2 lengvai prieinami zondu lizdai prietaiso apačioje;
- Didelis ekranas ir patogus valdymas;
- 3 vartotojui pritaikyti „greitieji“ mygtukai;
- Maitinimas / greito įkrovimo baterijos;
- Nereikia atskiro spausdintuvo, modulis turi vidinę atmintį.

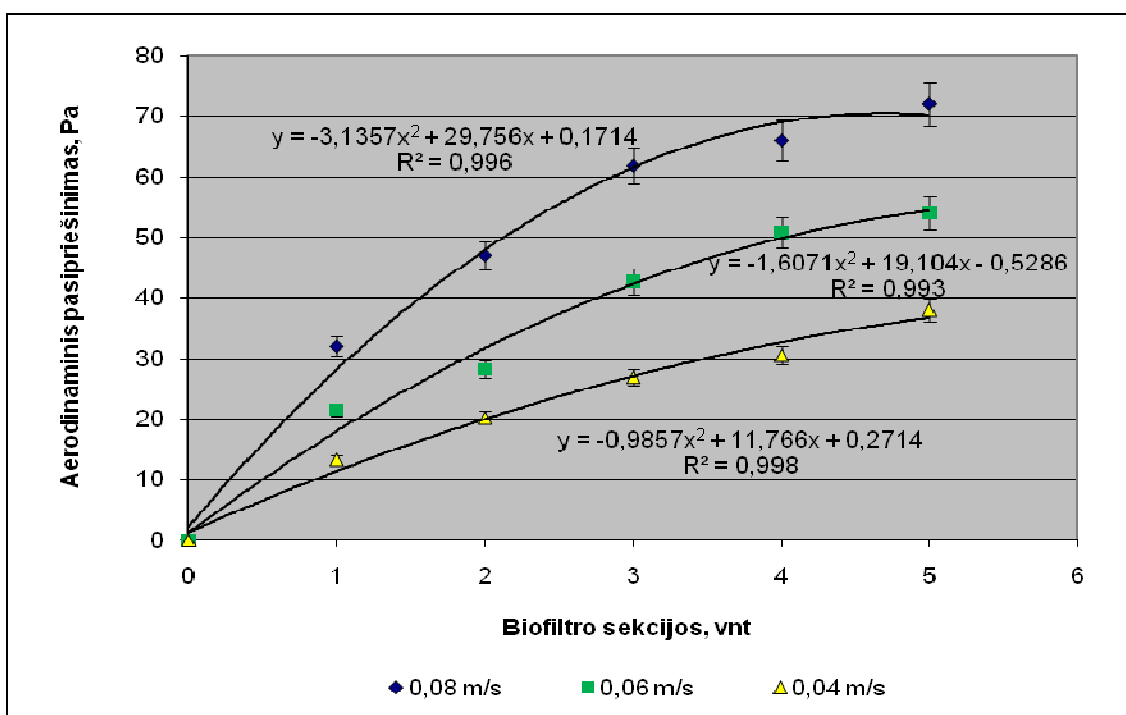
„Testo 400“ daugelio parametrų matuoklis leidžia vartotojui atlikti visų tipų greičio matavimus naudojant papildomus zondus: termoporinį ar sparnelinį zondą, taip pat Pito vamzdelius (slėgio vamzdelius). Naudojant šį įrenginį įmanoma atlikti oro srauto matavimus kanaluose.

Biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų metu šiuo prietaisu buvo matuojamas oro srauto greitis biofiltre.

2.2. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS

Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta viena svarbiausių biofilto charakteristikų – įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo kaita oro valymo procese. Išvestos filto aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo tiekiamo oro srauto greičio ir įrenginio sekcijų skaičiaus.

Atlikti tyrimai, naudojant dirbtinės kilmės įkrovą – polimerinius rutuliukus – parodė, jog sausos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas pasiskirsto 13,3 ir 72,0 Pa intervale (2.6 pav.), o drėgnos – 17,5 ir 95,0 Pa intervale (2.7 pav.), priklausomai nuo oro srauto greičio įrenginyje. Didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas tenka pirmajam biofilto įkrovos sluoksniui.



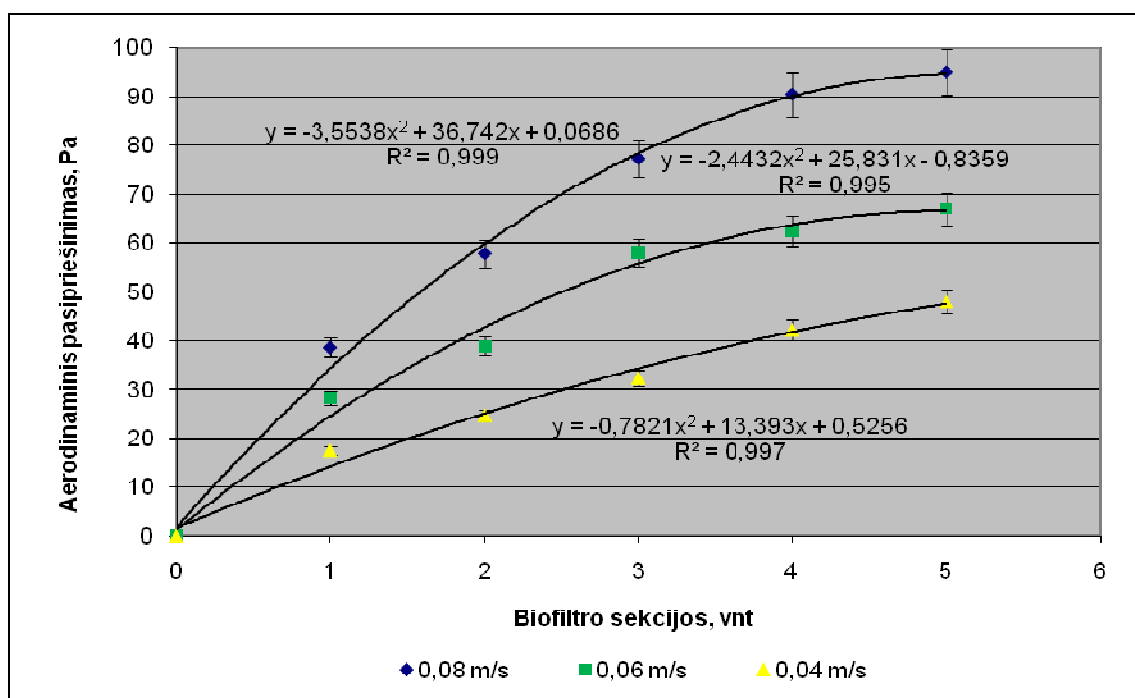
2.6 pav. Biofilto aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, įkrovai esant sausai

Užpildžius kiekvieną filto sekciją 10 cm storio polimerinių rutuliukų sluoksniu, pirmuoju atveju įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas matuotas, įkrovai esant sausai. Matuota ties kiekviena sekcija po 3 kartus. Matavimai atlikti prie trijų skirtingų oro srauto greičių.

Kai oro srauto greitis biofiltre buvo lygus 0,04 m/s, po pirmosios biofilto sekcijos aerodinaminis pasipriešinimas siekė 13,3 Pa, po penkių įkrovos sluoksnių padidėjo iki 39,0 Pa. Taigi, didžiausia apkrova tenka pirmajam įkrovos sluoksniui. Didėjant polimeriniais rutuliukais užkrautų sekcijų skaičiui, biofilto aerodinaminis pasipriešinimas auga palaipsniui.

Per biofiltrą traukiamo oro srauto greitį padidinus iki 0,06 m/s, matavimai vėl atlikti ties kiekviena biofilto sekcija. Po pirmojo įkrovos sluoksnio aerodinaminis pasipriešinimas siekė 21,5 Pa, o po penkių sluoksnių – 54,0 Pa. Toliau didinant oro srauto greitį, biofilto aerodinaminis pasipriešinimas didėja. Kai srauto greitis lygus 0,08 m/s, po penkių įkrovos sluoksnių filtro aerodinaminis pasipriešinimas išaugo iki 72,0 Pa.

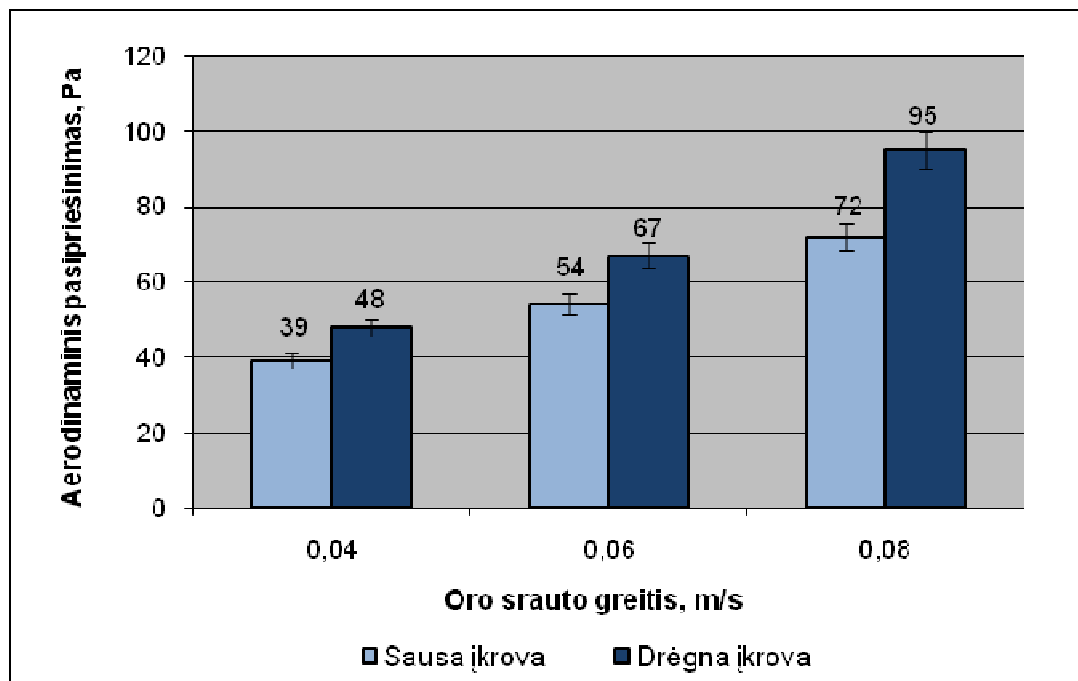
Pirmuoju atveju matavimai atlikti biofilto įkrovai esant sausai. Antruoju atveju matavimai pakartoti, įkrovą sudrėkinus. Matuota ties kiekviena įrenginio sekcija po 3 kartus. Gauti rezultatai rodo, kad drėgnas užpildas lemia iki 30 % didesnę biofilto aerodinaminį pasipriešinimą. Didžiausia apkrova tenka pirmajam įrenginio įkrovos sluoksniui. Kai oro srauto greitis buvo lygus 0,04 m/s, po pirmosios sekcijos biofilto aerodinaminis pasipriešinimas siekė 17,5 Pa, o po penkių įkrovos sluoksnių – padidėjo iki 48,0 Pa (2.7 pav.). Toliau oro srauto greitis vėl buvo didinamas.



2.7 pav. Biofilto aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo įkrovos sekcijų skaičiaus, įkrovai esant drėgnai

Oro srauto greitį padidinus nuo 0,04 m/s iki 0,06 m/s, po pirmosios ir penktosios įrenginio sekcijų aerodinaminis pasipriešinimas siekia atitinkamai 28,2 ir 67,0 Pa. Didžiausias biofilto aerodinaminis pasipriešinimas – 38,6 Pa po vieno ir 95,0 Pa po penkių įkrovos sluoksnių – pasiektas oro srauto greitį padidinus iki 0,08 m/s.

Eksperimentinių tyrimų metu biofilto aerodinaminis pasipriešinimas buvo matuotas dviem atvejais. Pirmuoju atveju – dviem aspiratoriais traukiant orą per biofiltrą, kai penkiose įrenginio sekcijose esantis dirbtinės kilmės užpildas buvo sausas, antruoju atveju – kai užpildas buvo sudrėkintas vandeniu.



2.8 pav. Sausos ir drėgnos įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo palyginimas, esant skirtingam oro srauto greičiui

Gauti rezultatai rodo, kad sudrėkinus užpildą, įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas žymiai padidėja. Matavimai atlikti per įrenginį traukiant skirtingus oro kiekius. Pirmuoju atveju oro srauto greitis buvo 0,04 m/s, antruoju – 0,06 m/s, trečiuoju – 0,08 m/s.

Oro srauto greičiui esant 0,04 m/s, sausos ir drėgnos įkrovų aerodinaminis pasipriešinimas skiriasi 18,7 %. Oro srauto greitį padidinus iki 0,06 m/s, aerodinaminio pasipriešinimo skirtumas tarp sausos ir sudrėkintos įkrovos lygus 19,4 %. Esant 0,08 m/s oro srauto greičiui biofiltre, drėgnos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas 24,2 % didesnis negu sausos.

2.3 ANTROJO SKYRIAUS IŠVADOS

1. Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatytas biofiltro, užkrauto dirbtinės kilmės įkrova, aerodinaminis pasipriešinimas. Tuo atveju, kai įkrova drėgna, įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas 15 – 25 % didesnis negu sausos įkrovos atveju.
2. Kai per sausą įkrovą leidžiamo oro srauto greitis lygus 0,04 m/s, po penkių sekcijų biofiltro aerodinaminis pasipriešinimas siekia 39,0 Pa. Kai oro srauto greitis padidinamas iki 0,08 m/s, įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas padidėja iki 72,0 Pa.
3. Per drėgną įkrovą traukiamo oro srauto greičiui esant 0,04 m/s, biofiltro aerodinaminis pasipriešinimas po penkių sekcijų lygus 48,0 Pa. Padidinus oro srauto greitį iki 0,08 m/s, aerodinaminis filtro pasipriešinimas padidėja iki 95,0 Pa.
4. Įkrovos drėgmė turi didelės įtakos įrenginio aerodinaminiam pasipriešinimui – sudrėkinus įkrovą, biofiltro aerodinaminis pasipriešinimas žymiai padidėja. Oro srauto greičiui esant 0,04 m/s, sausos ir drėgnos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas skiriasi 18,7 %. Srauto greitį padidinus iki 0,08 m/s, drėgnos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas 24,2 % didesnis negu sausos.

3. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA EFEKTYVUMO TYRIMAS

3.1. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA EFEKTYVUMO TYRIMO METODIKA

Dauguma lakiųjų organinių junginių (LOJ), išmetamų į atmosferą, gali būti kenksmingi žmogaus sveikatai. Jie daro žalą faunai florai, turi toksinį poveikį, ir tiesioginę įtaką klimato kaitai bei šiltnamio efekto susidarymui (Delhomenie and Heitz 2005).

Viena efektyviausių, paprasčiausių ir pigiausių technologijų, kurią naudojant išvalomas oras nuo lakiųjų organinių junginių – oro srauto valymas naudojant biofiltrą (Žarnauskas 2008).

Biofiltrai naudojami oro valymui nuo butanolio, acetono, ksileno, tolueno ir kitų LOJ (Delhomenie, Heitz 2005; Jeong *et al.* 2010; Gallastegui *et al.* 2010). Prietaisai gali būti efektyviai naudojami, kai teršalo koncentracija neviršija 500 mg/m^3 (Ramirez *et al.* 2009; Baltrėnas and Zagorskis 2010).

Eksperimentiniai tyrimai atlikti, naudojant sukonstruotą eksperimentinį oro valymo biofiltrą, užkrautą dirbtinės kilmės įkrova.

Prieš mikroorganizmų introdukavimą ant įkrovos, atlikti tyrimai, kurių metu nustatytas biofiltro efektyvumas, vykstant teršalų adsorbcijai bei absorbcijai. Toliau tyrimai buvo tęsiami, suaktyvinus įkrovą lakiuosius organinius junginius skaidančiais mikroorganizmais, siekiant nustatyti biofiltro valymo efektyvumo kaitą oro valymo procese.

3.1.1. Acetono adsorbcija ir absorbcija

Tyrimų metu naudotas teršalas – acetonas. Acetono ir vandens tirpalas (5 : 400) buvo patalpintas biofiltro teršalų tiekimo kameroje. Oras, užterštas acetono garais buvo traukiamas per įrenginį dviem aspiratoriais.

Biofiltro efektyvumas tirtas dviem atvejais:

- pirmuoju atveju – traukiant acetono garais užterštą orą per biofiltrą, kai penkiose įrenginio sekcijose esantis dirbtinės kilmės užpildas buvo sausas (adsorbcija);
- antruoju atveju – kai užpildas buvo sudrėkintas vandeniu (absorbcija).

Kiekvienu atveju oro srauto greičiai įrenginyje buvo 0,04; 0,06 ir 0,08 m/s, o teršalo koncentracija valomame ore buvo matuota prietaisu „MiniRAE 2000“ ties kiekviena įrenginio sekcija po 3 kartus.

3.1.2. Biofiltro su aktyvuota įkrova oro valymo efektyvumo nustatymo metodika

Nustačius biofiltro efektyvumą įkrovai esant sausai ir sudrėkintai vandeniui, toliau tyrimai buvo tęsiami įkrovą suaktyvinus. Tyrimų metu nustatant biofiltro oro valymo efektyvumą, buvo panaudoti trys teršalai:

- Acetonas;
- Butanolis;
- Ksilenas.

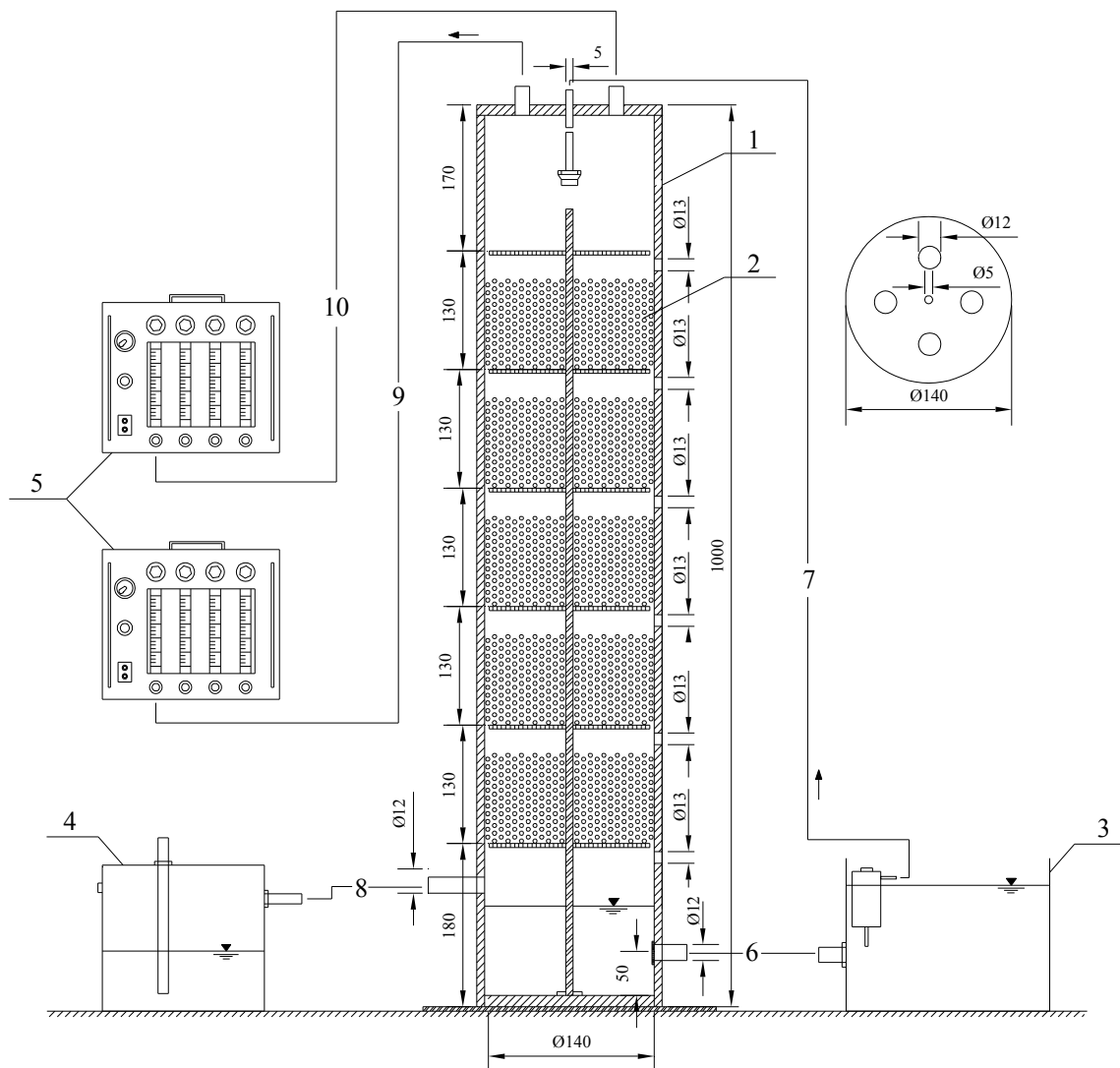
Šių teršalų pasirinkimą lėmė pramonėje sunaudojami dideli jų kiekiai. Be to, šie teršalai priklauso skirtingoms organinių junginių grupėms. Biofiltro efektyvumo tyrimai buvo atlikti su kiekvienu teršalu atskirai.

Svarbiausias biofiltro elementas, užtikrinantis biologinį oro valymo procesą, yra bioįkrova. Jos prigimtis, poringumas, drėgnis, pH, temperatūra, adsorbcinės bei absorbcinės savybės lemia mikroorganizmų populiacijos augimą ir vystymąsi, o tai užtikrina efektyvų oro srauto išvalymą biofiltre (Žarnauskas 2008). Tyrimams pasirinkta dirbtinės kilmės įkrova – polimeriniai rutuliukai, turintys didelį paviršiaus plotą (3.2 pav.). Įkrova suaktyvinta *Pseudomonas*, *Rhodococcus* bei *Aquaspirillum* genčių mikroorganizmais.

Visą tyrimo stendą sudaro biofiltro korpusas, kurio skersmuo 0,14 m, o aukštis 1,0 m, biofiltro įkrova, sudaryta iš polimerinių rutuliukų. Vieno rutuliuko skersmuo yra 23 mm, o filtruojančio paviršiaus plotas – 62 cm². Be to, prie biofiltro yra prijungtas cirkuliacinio vandens rezervuaras, teršalų tiekimo kamera, aspiratorių sistema bei guminės sujungimo žarnelės.

Biofiltro korpusas padalytas į penkias 0,13 m aukščio sekcijas, naudojant 0,14 m skersmens metalinius sietelius, siekiant išlaikyti tolygų drėgmės ir oro srauto pasiskirstymą per visą įkrovos sluoksnį bei sumažinti įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą. Kiekviena biofiltro sekcija užpildyta 0,10 m storio polimerinės įkrovos sluoksniu. Po kiekvienos sekcijos įrengtos 0,013 m skersmens teršalų koncentracijų, greičio ir kitų tyrimams reikalingų parametrų matavimo angos, užsandarintos guminiiais kamščiais.

Cirkuliacinio vandens rezervuarą užpildžius vandeniui ir mikroorganizmais, jis cirkuliacinio siurblio pagalba yra pumpuojamas į filtro viršutinę dalį, kur purkštuku yra išpurškiamas ir tolygiai paskirstomas visame filtro korpuso diametre. Išpurkšti suaktyvinti vandens lašeliai liečiasi su polimerine įkrova ir per metalinių sietelių angas patenka į žemiau esančias sekcijas. Mikroorganizmai, esantys vandenyje, adsorbuojasi ant rutuliukų paviršiaus, sudarydami biologinę plėvelę.



3.1 pav. Principinė biofilto schema: 1 – biofilto korpusas; 2 – polimerinė biofilto įkrova; 3 – cirkuliacinio vandens rezervuaras; 4 – teršalų tiekimo kamera; 5 – aspiratorius; 6,7,8,9,10 – guminės sujungimo žarnelės

Susidarius tolygiai bioplėvelei ant įkrovos visose penkiose sekcijose, į teršalų tiekimo kamerą yra įpilamas vanduo su atitinkamu acetono/butanolio/ksileno tirpalo kiekiu, kad būtų pasiekta norima acetono/butanolio/ksileno garų koncentracija. Reguluojant oro traukimo greitį aspiratoriais, nustatomi norimi dujų srauto greičiai. Tuomet acetono/butanolio/ksileno garai iš teršalų tiekimo kameros yra traukiami vertikaliai aukštyn per visas penkias biofilto sekcijas, kuriose ant įkrovos esantys mikroorganizmai pirmiausiai absorbuoja su oru patekčius organinius teršalus, kurie vėliau, mikroorganizmams sintetinant fermentus, t. y. vykstant teršalų biodegradacijai, suskaidomi vandens fazėje (Zagorskis 2009).



3.2 pav. Dirbtinės kilmės biofilto įkrova – didelį filtruojančio paviršiaus plotą turintys polimeriniai rutuliukai (Autoriaus nuotrauka)

Acetono/butanolio/ksileno garais užterštas oras per biofiltrą buvo traukiamas dviem prie įrenginio prijungtais aspiratoriais: „MIGUNOV 822“ ir „APV 4-12“, kuriais buvo reguliuojamas ir per įkrovą traukiamo oro srauto greitis.

Nustatant biologinio oro valymo filtro efektyvumą, buvo naudoti keturi dujų srauto greičiai: 0,15; 0,08; 0,06 ir 0,04 m/s. Esant tokiems greičiams, filtracijos laikas buvo atitinkamai lygus 7 s; 13 s; 17 s ir 25 s.

Be to, biofilto efektyvumas valant orą nuo acetono/butanolio/ksileno garų buvo nustatomas esant 3 skirtingoms pradinėms kiekvieno teršalo koncentracijoms: $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Šios koncentracijos gautos, parinkus atitinkamai:

- acetono ir vandens santykį 1:300, 1:325, 1:350;
- butanolio ir vandens santykį 1:32, 1:36, 1:40;
- ksileno ir vandens santykį 1:500, 1:575, 1:650.

Pirmuoju atveju, pradinei acetono/butanolio/ksileno koncentracijai valomame ore esant $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, matavimai atlikti prie keturių skirtingų oro srauto greičių. Teršalų koncentracija valomame ore, kai oro srauto greitis lygus 0,15 m/s, matuojama ties kiekviena biofilto sekcija. Tuomet užteršto oro srauto greitis mažinamas iki 0,08 m/s ir matavimai kartojami. Sumažinus oro srauto greitį iki 0,06 m/s, vėliau iki 0,04 m/s koncentracijos vėl išmatuojamos ties kiekviena įrenginio sekcija.

Antruoju atveju pradinė acetono/butanolio/ksileno garų koncentracija valomame ore buvo $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, trečiuoju atveju – $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Atlikti analogiški matavimai. Kiekvienas matavimas kartotas po 3 kartus.



3.3 pav. Biofiltras su polimerine įkrova (Autoriaus nuotrauka)

Eksperimentiniuose tyrimuose acetono, butanolio ir ksileno garų koncentracijoms valomame ore matuoti naudotas lakiųjų organinių junginių koncentracijų nustatymo prietaisas „*MiniRAE - 2000*“. Šiame prietaise naudojama naujos kartos beelektrodė UV iškrovos lempa. Kai organiniai junginiai pernešami šalia lempos, jie yra fotojonizuojami ir laisvieji elektronai yra fiksuojami kaip srovė. PID jutiklis su standartine 10,6 eV lempa gali registruoti platų organinių garų spektrą. Prietaiso matavimų ribos siekia nuo 0 iki 7000 mg/m³. Matavimo tikslumas teršalų koncentracijai esant 0 – 2000 ppm yra ± 2 ppm arba 10% skaitymo. Teršalų koncentracijai esant > 2000 ppm, tikslumas $\pm 20\%$ skaitymo. Įrenginio teršalų traukimo greitis: 450 – 550 cm³/min.

Mikroorganizmai

Mikroorganizmai, bakterijos, mielės, grybai ir kt. vykdo organinių junginių biodegradaciją. Skaidant organinius junginius, auga mikroorganizmų masė. Teršalai oksiduojasi iki anglies dioksido ir vandens. Biodegradacija – eilės organinių junginių skilimas iki CO₂ ir H₂O.

Didžiausią praktinę reikšmę skaidant sintetinius organinius junginius turi šios bakterijos: *Pseudomonadaceae*, *Bacillaceae*, *Bacteriaceae*, *Chlamydobacteriaceae* ir kt. Pagrindė praktinė reikšmė turi *Pseudomonas* genties bakterijos. Šios bakterijos sugeba skaidyti ir transformuoti chlororganinius pesticidus ir dehalogenizuoti kitus halogenorganinius junginius. *Pseudomonas* bakterijos redukuoja nitroaromatinių junginių nitrogrupes, skaidydamos benzeno žiedą ir naudodamos jį kaip anglies ir azoto šaltinį.

Bendradarbiaujant su VŠĮ „Grunto valymo technologijos“, eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo panaudoti *Pseudomonas*, *Rhodococcus* ir *Aquaspirillum* genčių mikroorganizmai.

Siekiant pagerinti savaiminių mikroorganizmų adaptavimąsi bioterpėje, į įrenginį dvi dienas tiekiamas lakiaisiais organiniais junginiais užterštas oras. Taip mikroorganizmai gauna reikalingo deguonies ir anglies.

Prieš paleidžiant biofiltrą, įkrova drėkinama įrenginio viršuje įrengtu vandens purkštuku. Į purkštuką vandenį, prisotintą biogeniniais elementais, tiekia perteklinio vandens rezervuare įrengtas siurblys. Įkrovos drėgnumas turi būti apie 75 %.

Tam, kad būtų išlaikytas tolygus oro srautas ir perteklinis vanduo nutekėtų į filtro apatinėje dalyje įrengtą perteklinio vandens rezervuarą, bioterpės sluoksniai atskirti vienas nuo kito metaliniais tinkleliais.

Statistinis duomenų vertinimas

Biofiltro efektyvumo nustatymui gauti duomenys sisteminami ir vertinami statistiniais metodais, kaip aprašyta antrajame skyriuje (žr. 2.1 poskyrį).

Tyrimų metu naudojami prietaisai

Eksperimentinių tyrimų metu siekiant nustatyti biofiltro efektyvumą, buvo naudojami šie prietaisai:

- **„MiniRAE 2000“**

„MiniRAE 2000“ – nešiojamas lakiųjų organinių junginių kontrolės prietaisas (PGM 7600 modelis) – kompaktiškas kontrolės prietaisas, suprojektuotas kaip plačiajuostis LOJ dujų kontrolės

prietaisas ir duomenų registratorius, skirtas dirbti pavojingose aplinkose (3.4 pav). Jis kontroliuoja greit garuojančius organinius junginius, naudodamasis fotojonizacijos detektoriumi su 9,8 eV, 10,6 eV arba 11,7 eV dujų išlydžio lempa.

Prietaisas pateikia realaus laiko matavimus ir aktyvina pavojaus signalus, kai tik išeiga viršija nustatytas ribas.

Prieš gamyklinį transportavimą „MiniRAE 2000“ yra iš anksto nustatomos numatytos pavojaus ribos ir naudojant standartines dujas, sukalibruojamas daviklis. Vis dėl to, vartotojas turėtų patikrinti prietaisą ir prieš pirmą naudojimą atlikti kalibravimą. Kai kontrolės prietaisas pilnai pakraunamas ir sukalibruojamas, jis yra pasiruošęs artimiausiam veikimui.



3.4 pav. Nešiojamas LOJ kontrolės prietaisas „MiniRAE 2000“

Prietaiso „MiniRAE 2000“ ypatybės:

- Kompaktiškas, lengvo svorio ir nelygaus dizaino – įmontuota bandinių ėmimo pompa;
- Patikimas ir tikslus – iki 10 valandų nuolatinės kontrolės su pakraunamų baterijų paketu – suprojektuotas nuolatos kontroliuoti LOJ garus ppm lygiuose;
- Palankus vartotojui – iš anksto nustatytos STEL, TWA, žemo ir aukšto pikų verčių pavojaus ribos. Kai ribos viršijamos, aktyvinami garsinis skambutis ir šviesos diodo ekrano mirksėjimas;
- Duomenų įregistravimo galimybės – 15000 taškų duomenų įregistravimo saugojimo talpa, skirta duomenų nusiuntimui į personalinį kompiuterį;

- „MiniRAE 2000“ yra sudarytas iš fotojonizacijos detektoriaus su pririštu mikrokompiuteriu ir elektronine grandine. Prietaisas yra patalpintas nelygiame ABS + PK korpuse su 8 simbolių ir 1 linija taškinės matricos skystųjų kristalų ekranu ir su 3 mygtukais, užtikrinančiais lengvą vartotojo sąsają.

„MiniRAE 2000“ techninės sąlygos

Dydis: 8,2"ilgis x 3,0"plotis x 2,0"aukštis.

Svoris: 19,5 uncijų su baterijų paketu.

Detektorius: Fotojonizacijos daviklis su 9,8, 10,6, arba 11,7 eV ultravioleto lempa.

Baterijos: A 4,8V /1250 mAH pakraunamos nikelio metalo hidrido baterijų paketas (įspaudžiamos, galimas lauko pakeitimas).

Baterijų krovimas: 10 valandų per įmontuotą pakrovėją.

Veikimo valandos: Iki 10 valandų nuolatinio veikimo.

Ekranas: 1 linijos 8 simbolių 5x7 taškinės matricos skystųjų kristalų ekranas (0,4" simbolių aukštis) su automatiškai nublankstančiu šviesos diodo apšvietimu.

Diapazonas, rezoliucija ir atsako laikas (t90):

Izobutilenas (kalibravimo dujos)

0-99 ppm 0.1 ppm 2 sekundes;

100-1,999 ppm 1.0 ppm 2 sekundes;

2000-10,000 ppm 1.0 ppm 2 sekundes.

Matavimo tikslumas (Izobutilenas):

0 - 2000 ppm: ± 2 ppm arba 10% skaitymo.

> 2000 ppm: $\pm 20\%$ skaitymo.

Korekcijos rodikliai: Įmontuotos 102 LOJ dujos.

Kalibravimas: Dviejų taškų lauko nulio ir standartinių dujų kalibravimas.

Kalibravimo atmintis: Išsaugo iki 8 kalibravimų, pavojaus ribas ir gyvavimo vertę.

Įėjimo liestukas: Lankstus 5" vamzdelis.

Klaviatūra: 1 veikimo mygtukas ir 2 programavimo mygtukai.

Pavojaus signalo nustatymas: Atskiri pavojaus ribos nustatymai žemam, aukštam, taip pat STEL ir TWA pavojaus signalui.

Darbo režimas: Apžiūros arba higienos režimas.

Pavojaus signalas: 90 dB skambutis ir mirksintys raudoni šviesos diodai, rodantys, kad viršytos iš anksto nustatytos ribos, žema baterijos įtampa, arba daviklio gedimas.

Realaus laiko laikrodis: Įregistruotų duomenų automatiniai datos ir laiko ženkliai.

Duomenų įregistravimas: 15000 taškų su laiko ženkliuku, serijiniu numeriu, vartotojo atpažinimu, vietos atpažinimu ir panašiai.

Bandinių ėmimo pompa: Įmontuota iš vidaus. Tėkmės greitis: 450 – 550 cm³/min.

Temperatūra: Nuo 0° iki 45°C (nuo 32° iki 113°F).

Drėgnumas: Nuo 0 % iki 95 % santykinio drėgnumo (nekondensuojantis).

Naudojant prietaisą „MiniRAE 2000“ , buvo atlikti lakiųjų organinių junginių koncentracijų matavimai.

- ***Aspiratoriai „M 822“ ir „APV 412“***

Aspiratoriai „M 822“ ir „APV 4-12“ – įrenginiai, skirti oro mėginių paėmimui. Mėginiai imami, norint nustatyti, ar ore yra priemaišų.

Eksperimentinių tyrimų metu užterštas oras per biofiltrą buvo traukiamas dviem aspiratoriais. Papildomas trečias aspiratorius „M 822“ prijungtas atlikti matavimams prie didžiausio - 0,15 m/s oro srauto greičio.

3.2. BIOFILTRO SU POLIMERINE ĮKROVA EFEKTYVUMO TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS

3.2.1. Biofilto efektyvumo tyrimų adsorbcijos ir absorbcijos atvejais rezultatai

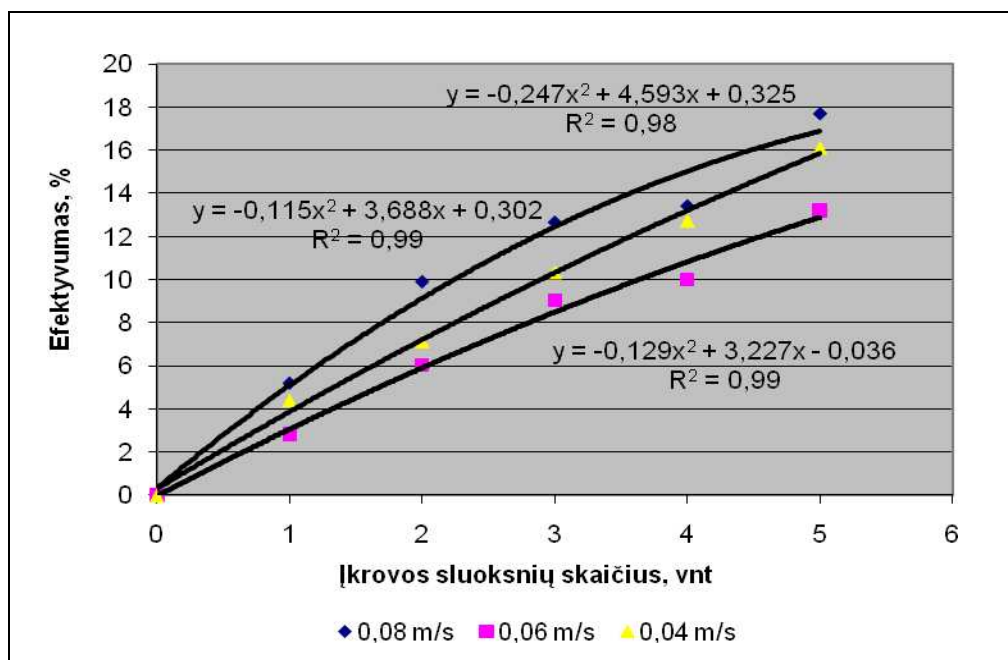
Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta biofilto valymo efektyvumo kaita oro valymo procese. Išvestos filto efektyvumo priklausomybės nuo tiekiamo užteršto oro srauto greičio ir įrenginio įkrovos sluoksnių skaičiaus. Tyrimams naudotas teršalas – acetonas.

Tyrimų metu biofilto efektyvumas buvo nustatomas dviem atvejais:

- aspiratoriais traukiant acetono garais užterštą orą per biofiltrą, kai penkiose įrenginio sekcijose esantis dirbtinės kilmės užpildas buvo sausas (adsorbcija);
- kai užpildas buvo sudrėkintas vandeniu (absorbcija).

Skirtingais greičiais traukiant orą per biofilto įkrovą, siekiant įvertinti filto efektyvumą, prieš kiekvieną sluoksnį prietaisu „MiniRAE 2000“ buvo atliekami acetono garų koncentracijų matavimai. Iš gautų rezultatų, atsižvelgiant į per įrenginį traukiamo oro srauto greičius, išvestos biofilto aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo įrenginio sekcijų skaičiaus (3.5, 3.6 pav.)

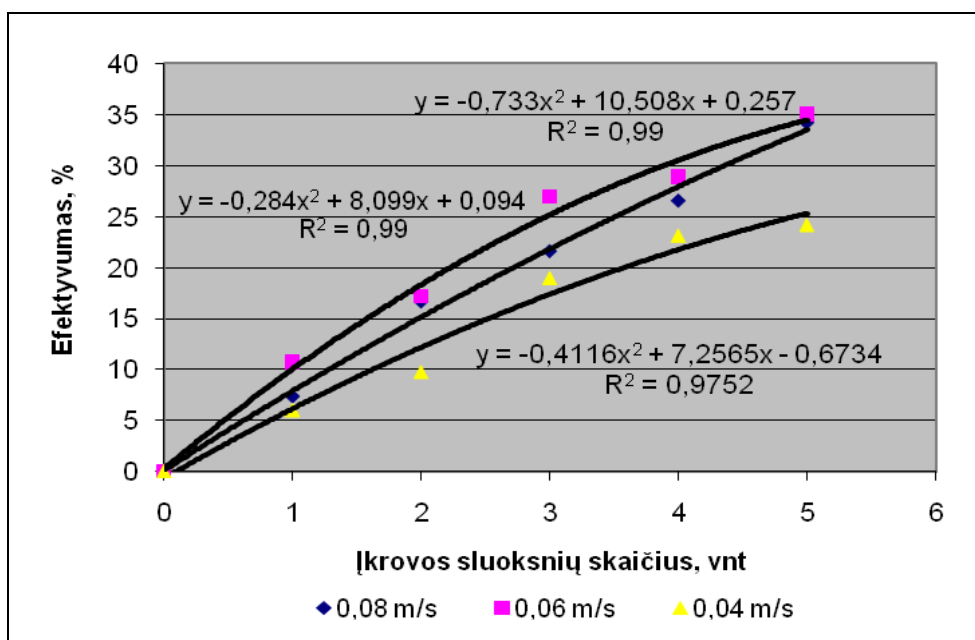
▪ Acetono adsorbcija



3.5 pav. Biofilto efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus

Biofiltro įkrovos esmė – sudaryti didelį paviršių teršalų adsorbcijai ir absorbcijai. Polimeriniai rutuliukai yra poringos struktūros, turi didelį valomojo paviršiaus plotą, todėl dalis teršalo adsorbuojasi ant įkrovos paviršiaus. Acetono garams adsorbuojantis ant įkrovos, filtro efektyvumas siekia 13 – 18 %, priklausomai nuo filtracijos laiko. Keičiant oro srauto greitį įrenginyje nuo 0,08 m/s iki 0,04 m/s, filtracijos laikas atitinkamai kinta nuo 13 s iki 25 s. Kuo ilgesnis filtracijos laikas, tuo didesnis oro išvalymo efektyvumas pasiekiamas.

▪ Acetono absorbcija



3.6 pav. Biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus

Gauti rezultatai rodo, kad absorbcijos atveju biofiltro oro valymo efektyvumas pasiskirsto 24 – 35 % intervale, priklausomai nuo per įrenginį traukiamo oro srauto greičio.

Lyginant su acetono adsorbcija, šiuo atveju išvalymo efektyvumas iki 17 % didesnis. Sudrėkinus įkrovą, biofiltro efektyvumas padidėja, nes vyksta teršalo absorbcija – acetono garai ištirpsta vandenyje. Iš grafiko (3.6 pav.) matyti, jog mažinant užteršto oro srauto greitį, filtro efektyvumas didėja.

3.2.2. Biofiltro su aktyvuota įkrova efektyvumo tyrimų rezultatai

Eksperimentinių tyrimų metu nustatytos biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybės nuo tiekiamo užteršto oro srauto greičio ir įrenginio įkrovos sluoksnių skaičiaus, įkrovai esant sausai ir ją sudrėkinus vandeniu. Toliau tyrimai buvo tęsiami ant biofiltro įkrovos introdukavus lakiuosius organinius junginius skaidančius mikroorganizmus.

Nustatytos filtro efektyvumo priklausomybės nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir per įrenginį traukiamo oro srauto greičio, esant skirtingoms pradinėms teršalų koncentracijoms valomame ore bei teršalų tipui.

Tyrimams atlikti naudoti trys teršalai: *acetonas*, *butanolis* ir *ksilenas*. Pradinės šių teršalų koncentracijos valomame ore: $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ir $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Oro srauto greičiai kiekvienu atveju: 0,15 m/s; 0,08 m/s; 0,06 m/s; 0,04 m/s, o filtracijos laikas atitinkamai lygus 7 s; 13 s; 17 s ir 25 s.

▪ ACETONAS

Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir tiekiamo oro srauto greičio.

Matavimai atlikti esant trimis skirtingoms organinio tirpiklio – acetono – pradinėms koncentracijoms: 400 ± 5 , 250 ± 5 , $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, siekiant išsiaiškinti, kokią įtaką oro valymo efektyvumui turi pradinė teršalo koncentracija. Kiekvienu atveju oro srauto, traukiamo per biofiltrą, greitis buvo keičiamas nuo 0,15 iki 0,04 m/s.

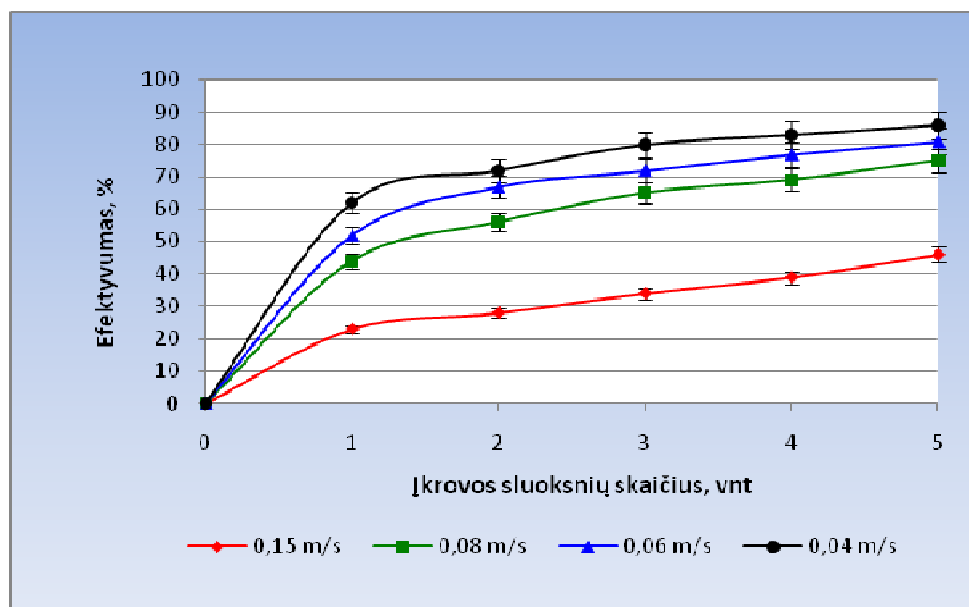
Matuojant teršalo koncentraciją prie skirtingų oro srauto greičių, didžiausias efektyvumas pasiektas tuomet, kai oro srautas per biofiltrą buvo traukiamas mažiausiu – 0,04 m/s – greičiu, pradinei teršalo koncentracijai esant $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Pradinė acetono garų koncentracija valomame ore – $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Acetono garų koncentracija prietaisu „MiniRae 2000“ matuota ties kiekvienu biofiltro įkrovos sluoksniu. Kiekvienas matavimas kartotas po 3 kartus.

Kai pradinė acetono garų koncentracija valomame ore yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, biofiltro efektyvumas, priklausomai nuo per įrenginį traukiamo oro srauto greičio, pasiskirsto 46 – 86 % intervale (3.7 pav.).

Matuojant teršalo koncentraciją prie skirtingų oro srauto greičių, geriausias rezultatas gautas tuo atveju, kai oro srautas per biofiltrą traukiamas mažiausiu greičiu – 0,04 m/s.



3.7 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Žymus efektyvumo padidėjimas stebimas po pirmojo įkrovos sluoksnio – polimeriniai rutuliukai turi poringą struktūrą ir didelį valomojo paviršiaus plotą, todėl dalis teršalo adsorbuojasi ant įkrovos paviršiaus. Šiame sluoksnyje suskaidoma iki 40 % teršalų (Zagorskis 2009). Toliau ties kiekvienu sluoksniu oro išvalymo efektyvumas didėja palaipsniui.

Oro srauto greičiui esant 0,15 m/s, biofiltro efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 23 %, po antrojo – 26 %, po penktojo – 46 %. Sumažinus oro srauto greitį beveik du kartus – iki 0,08 m/s, po pirmojo įkrovos sluoksnio filtro efektyvumas siekė 44 %, po antrojo sluoksnio – 56 %, o po penktojo – 75 %.

Keičiant oro srauto greitį nuo 0,08 m/s iki 0,06 m/s, įrenginio efektyvumas padidėjo. Po pirmojo įkrovos sluoksnio jis siekė 52 %, po antrojo – 67 %, o po penktojo išaugo iki 81 %. Matavimai kartoti srauto greitį sumažinus iki 0,04 m/s. Šiuo atveju gauti rezultatai pasiskirstė taip: 62 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 72 % – po antrojo, 86 % – po penktojo.

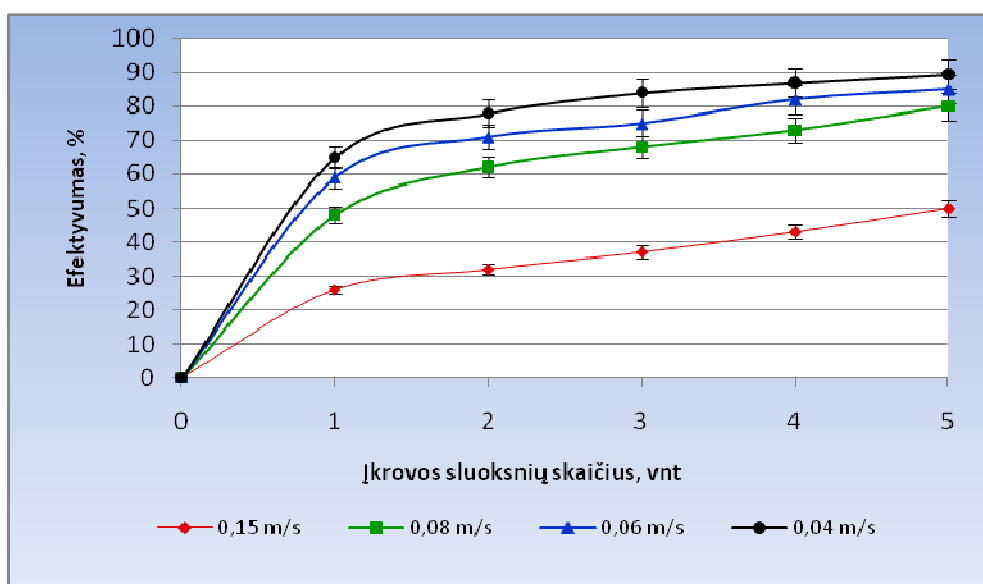
Oro valymo efektyvumas priklauso nuo teršalo sąlyčio su įkrova laiko (Boswell 2010). Filtracijos laikas yra tiesiogiai proporcingas biofiltro valymo efektyvumui – kuo ilgesnis acetono sąlyčio su įkrova laikas, tuo aukštesnis filtro valymo efektyvumas pasiekiamas. Užteršto oro filtracijos laikas priklauso nuo oro, traukiamo per įrenginį, srauto greičio. Iš gautų rezultatų matyti, kad biofiltras efektyviausiai dirba tuomet, kai per jį traukiamo oro srauto greitis yra mažiausias – 0,04 m/s.

Pradinė acetono garų koncentracija valomame ore – $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Toliau acetono garų koncentracijos matavimai ties kiekviena biofiltro sekcija atliekami sumažinus pradinę koncentraciją nuo $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ iki $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Tyrimų metu visų nagrinėtų teršalų pradinės koncentracijos buvo keičiamos, siekiant išsiaiškinti, kokią įtaką oro valymo efektyvumui turi pradinė teršalo koncentracija.

Acetono garų koncentracija vėl buvo matuojama ties kiekvienu biofiltro įkrovos sluoksniu po 3 kartus. Biofiltro efektyvumas pasiskirsto 50 – 89 % intervale (3.8 pav.).

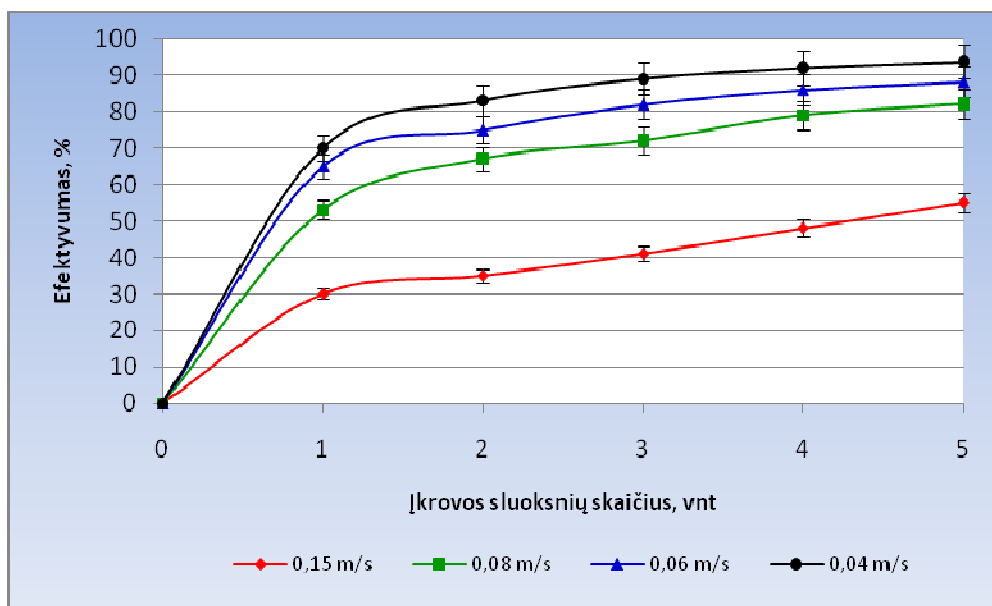


3.8 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Per biofiltrą traukiant acetono garais užterštą orą $0,15 \text{ m/s}$ greičiu, jo efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 26 %, po antrojo sluoksnio padidėjo iki 32 %, po penktojo – iki 50 %. Oro srauto greitį sumažinus iki $0,08 \text{ m/s}$, po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 48 % efektyvumas, po antrojo sluoksnio jis padidėjo iki 62 %, po penktojo – iki 80 %. Srauto greitį sumažinus iki $0,06 \text{ m/s}$, po pirmojo įkrovos sluoksnio įrenginio efektyvumas siekė 59 %, po antrojo – 71 %, po penktojo – 85 %. Lyginant su duomenimis, gautais prie didesnės pradinės acetono garų koncentracijos, šiuo atveju gauti geresni rezultatai – esant mažesnei teršalo koncentracijai valomame ore, mikroorganizmai lengviau jį suskaido. Oro srauto greitį sumažinus iki $0,04 \text{ m/s}$, 65 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 78 % – po antrojo, 89 % – po penktojo. Galima daryti išvadą, kad filtro valymo efektyvumas didėja tuomet, kai jame vykstančių biocheminių reakcijų laikas yra ilgesnis, t.y., kai užteršto oro, tiekiamo į įrenginį, srauto greitis mažesnis.

Pradinė acetono garų koncentracija valomame ore – $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Sumažinus pradinę acetono garų koncentraciją valomame ore nuo $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ iki $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ir išmatavus teršalo koncentracijas ties kiekvienu įkrovos sluoksniu, nustatyta, kad biofilto efektyvumas siekia 55 – 94 %, priklausomai nuo oro srauto greičio.



3.9 pav. Biofilto oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Oro, traukiamo per biofiltrą, srauto greičiui esant 0,15 m/s, biofilto efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio buvo 30 %, po antrojo – 35 %, po penkių sluoksnių – 55%. Oro srauto greičiui įrenginyje esant 0,08 m/s, jo efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 53 %, po antrojo sluoksnio padidėjo iki 67 %, o po penktojo siekė 82 %. Lyginant su duomenimis, gautais pradinei teršalo koncentracijai esant 400 ± 5 ir $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, po pirmojo ir po penktojo įkrovos sluoksnio biofilto efektyvumas šiuo atveju iki 5 % didesnis.

Sumažinus oro srauto greitį iki 0,06 m/s, įrenginio efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio buvo 65 %, po antrojo padidėjo iki 75 %, o po penkių sluoksnių pasiekė 88 % reikšmę. Sumažinus srauto greitį iki 0,04 m/s, gauti tokie rezultatai: po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 70 % efektyvumas, po antrojo – 83 %, po penktojo sluoksnio – 94 % efektyvumas. Iš gautų rezultatų matyti, kad, norint užtikrinti efektyvų biofilto veikimą, reikia mažinti į jį tiekiamo užteršto oro srauto greitį.

Japonijos mokslininkai acetono garais užterštam orui valyti panaudodami biofiltrą su keramine įkrova, pasiekė 90 % efektyvumą, Irano mokslininkai, panaudodami graikinių riešutų

kevalais užkrautą biofiltrą, pasiekė 81 % efektyvumą. Lyginant duomenis, gautus atlikus eksperimentinius tyrimus, su užsienio autorių rezultatais, biofiltro su polimerine įkrova efektyvumas yra didesnis – siekia 94 %.

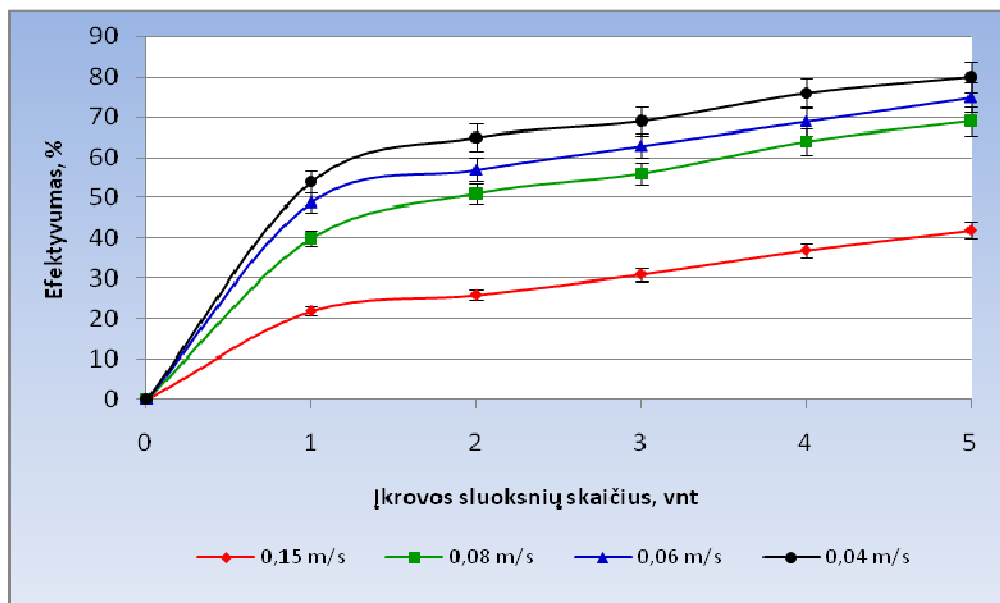
▪ BUTANOLIS

Butanolio garų koncentracija matuota ties kiekvienu biofiltro įkrovos sluoksniu, kiekvieną matavimą kartojant po 3 kartus. Gauti rezultatai rodo, kad šiuo atveju biofiltro oro valymo efektyvumas pasiskirsto 42 – 85 % intervale, priklausomai nuo per įrenginį traukiamo oro srauto greičio ir pradinės teršalo koncentracijos valomame ore (3.10 pav.). Lyginant su acetono garų išvalymu, šiuo atveju išvalymo efektyvumas apie 10 % mažesnis, nes tyrimams naudojami lakiuosius organinius junginius skaidantys mikroorganizmai butanolį skaido sunkiau.

Išmatavus teršalo koncentracijas prie skirtingų oro srauto greičių, geriausias rezultatas buvo gautas tuo atveju, kai oro srauto greitis buvo mažiausias.

Pradinė butanolio garų koncentracija valomame ore – $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Kai pradinė butanolio garų koncentracija valomame ore yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, biofiltro efektyvumas siekia 42 – 80 %.



3.10 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Oro srauto greičiui esant 0,15 m/s, biofiltro efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 22 %, po antrojo – 26 %, po penktojo – 42 %. Sumažinus srauto greitį iki 0,08 m/s, įrenginio

efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 40 %, po antrojo sluoksnio padidėjo iki 51 %, o po penktojo – iki 69 %.

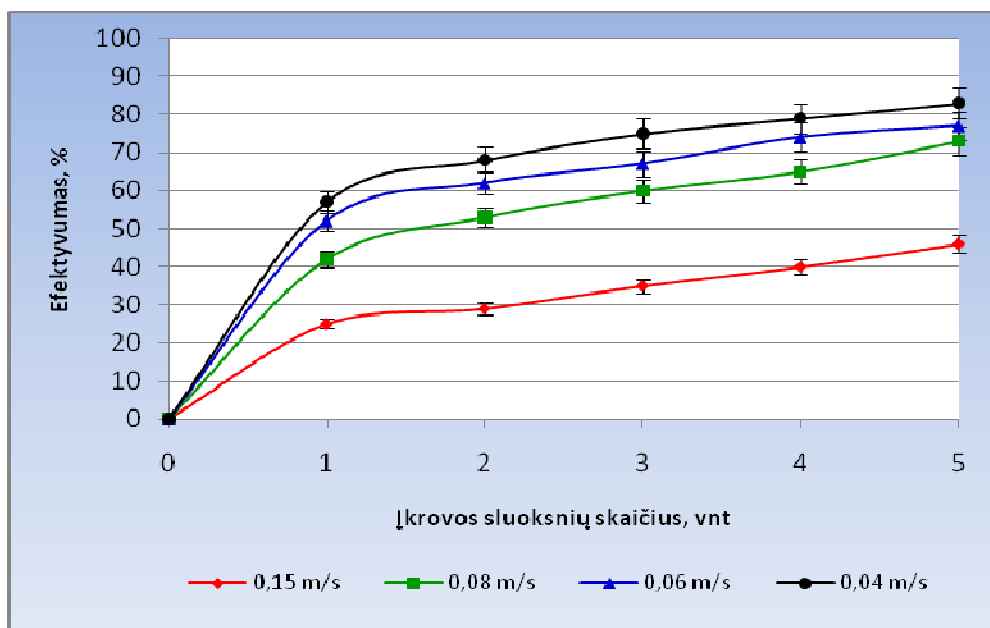
Sumažinus oro srauto greitį iki 0,06 m/s, įrenginio efektyvumas padidėjo. Po pirmojo įkrovos sluoksnio jis siekė 49 %, po antrojo – 57 %, o po penktojo padidėjo iki 75 %.

Matavimai kartoti srauto greitį sumažinus iki 0,04 m/s. Šiuo atveju gauti rezultatai pasiskirstė taip: 54 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 65 % – po antrojo, 80 % – po penktojo.

Pradinė butanolio garų koncentracija valomame ore – $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Butanolio garų koncentracijos matavimai ties kiekvienu filtro sluoksniu atliekami sumažinus pradinę koncentraciją nuo $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ iki $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Gauti rezultatai rodo, kad sumažinus pradinę butanolio koncentraciją valomame ore, valymo efektyvumas padidėja iki 46 – 83 % (3.11 pav.).



3.11 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

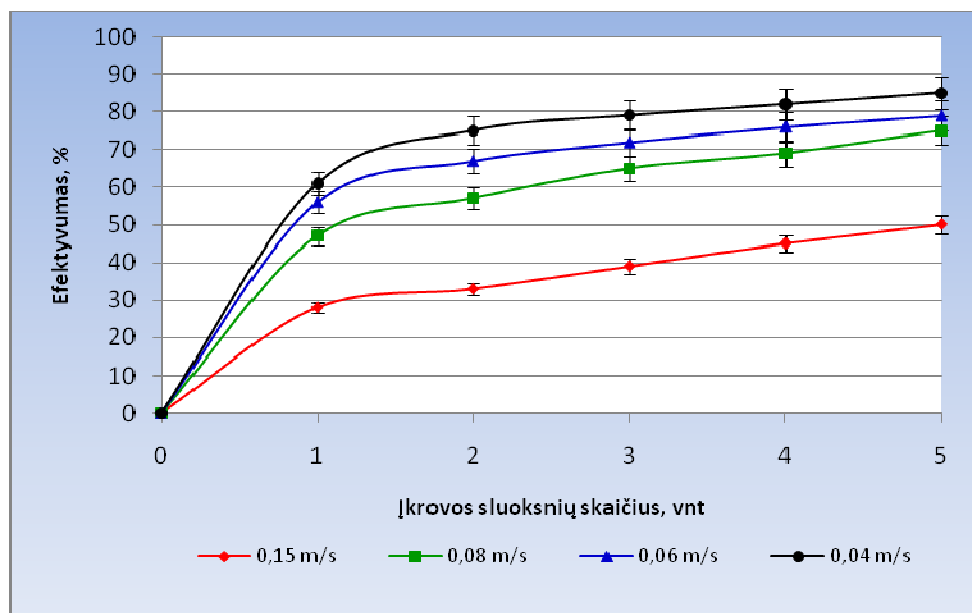
Traukiant per biofiltrą butanolio garais užterštą orą 0,15 m/s greičiu, įrenginio efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 25 %, po antrojo sluoksnio padidėjo iki 29 %, po penktojo – iki 46 %. Oro srauto greitį sumažinus iki 0,08 m/s greičiu, įrenginio efektyvumas siekė 42 % po pirmojo įkrovos sluoksnio, po antrojo sluoksnio padidėjo iki 53 %, po penktojo siekė 73 %.

Kai oro srauto greitis buvo sumažintas iki 0,06 m/s, po pirmojo biofiltro įkrovos sluoksnio įrenginio efektyvumas siekė 52 %, po antrojo – 62 %, po penkių įkrovos sluoksnių pasiektas 77 % efektyvumas.

Sumažinus srauto greitį iki 0,04 m/s, 57 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 68 % – po antrojo, 83 % – po penkių sluoksnių.

Pradinė butanolio garų koncentracija valomame ore – $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Matavimai ties kiekviena biofiltro sekcija buvo atliekami sumažinus pradinę butanolio garų koncentraciją valomame ore nuo $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ iki $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Nustatyta, kad biofiltro efektyvumas pasiskirsto 50 – 85 % intervale (3.12 pav.).



3.12 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Per biofiltrą traukiamo oro srauto greičiui esant 0,15 m/s, jo efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio buvo 28 %, po antrojo – 33 %, po penkių sluoksnių – 50%. Oro srauto greičiui įrenginyje esant 0,08 m/s, įrenginio efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 47 %, po antrojo sluoksnio – 57 %, po penkių įkrovos sluoksnių – 75 %.

Sumažinus oro srauto greitį iki 0,06 m/s, po pirmojo įkrovos sluoksnio efektyvumas buvo 56 %, po antrojo – 67 %, po penktojo siekė 79 %.

Matavimus atliekant prie 0,04 m/s oro srauto greičio, gauti tokie rezultatai: po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 61 % efektyvumas, po antrojo – 75 %, po penkių įkrovos sluoksnių – 85 %.

Tyrimų duomenys rodo, kad didžiausias efektyvumas pasiekiamas esant mažesniems per įrenginį traukiamo oro srauto greičiams ir pradinėms teršalų koncentracijoms.

▪ KSILENAS

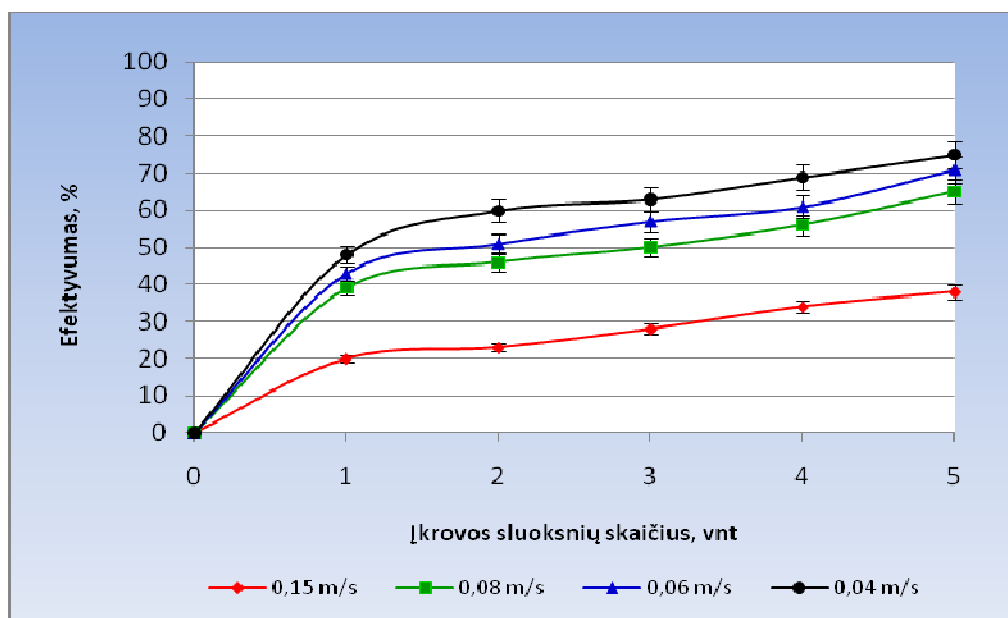
Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir tiekiamo oro srauto greičio. Matavimai atlikti esant trims skirtingoms ksileno pradinėms koncentracijoms: 400 ± 5 , 250 ± 5 , 180 ± 5 mg/m³, siekiant išsiaiškinti, kokią įtaką oro valymo efektyvumui turi pradinė teršalo koncentracija. Per biofiltrą traukiamo oro srauto greitis kiekvienu atveju buvo keičiamas nuo 0,15 iki 0,04 m/s. Matuojant teršalo koncentraciją prie skirtingų oro srauto greičių, didžiausias efektyvumas pasiektas tuomet, kai oro srautas per biofiltrą buvo traukiamas mažiausiu – 0,04 m/s – greičiu, pradinei teršalo koncentracijai esant 180 ± 5 mg/m³.

Pradinė ksileno garų koncentracija valomame ore – 400 ± 5 mg/m³.

Kai pradinė ksileno garų koncentracija valomame ore yra 400 ± 5 mg/m³, biofiltro efektyvumas, priklausomai nuo per įrenginį traukiamo oro srauto greičio, pasiskirsto 38 – 75 % intervale (3.13 pav.).

Po pirmojo įkrovos sluoksnio stebimas žymus efektyvumo padidėjimas. Šiame sluoksnyje suskaidoma iki 40 % teršalų (Zagorskis 2009). Įkrova sudaryta iš poringą struktūrą ir didelį valomojo paviršiaus plotą turinčių polimerinių rutuliukų, todėl dalis teršalo adsorbuojasi ant įkrovos paviršiaus. Toliau oro išvalymo efektyvumas ties kiekvienu sluoksniu didėja palaipsniui.

Kai į biofiltrą tiekiamo oro srauto greitis buvo 0,15 m/s, įrenginio efektyvumas siekė 20, 23 ir 38 % atitinkamai po vieno, dviejų ir po penkių įkrovos sluoksnių. Oro srauto greičiui esant 0,08 m/s, biofiltro efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 39 %, po antrojo sluoksnio – 46 %, o po penktojo padidėjo iki 65 %.



3.13 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Oro srauto greitį sumažinus nuo 0,08 m/s iki 0,06 m/s, įrenginio efektyvumas padidėjo. Po pirmojo įkrovos sluoksnio jis siekė 43 %, po antrojo – 51 %, o po penktojo išaugo iki 71 %. Matavimai kartoti srauto greitį sumažinus iki 0,04 m/s. Šiuo atveju gauti rezultatai pasiskirstė taip: 48 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 60 % – po antrojo, 75 % – po penktojo.

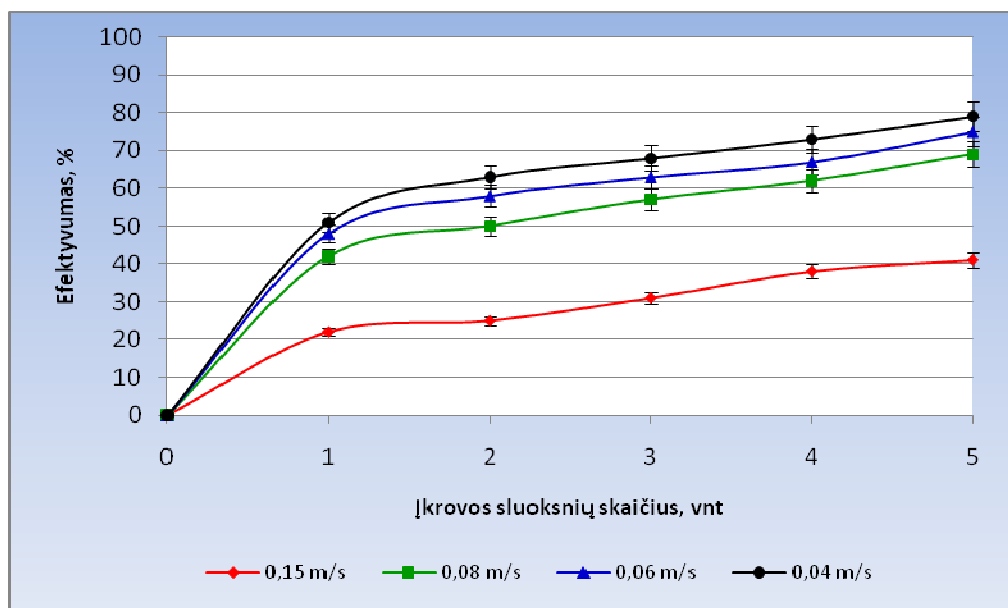
Kuo ilgesnis ksileno sąlyčio su įkrova laikas, tuo aukštesnis filtro valymo efektyvumas pasiekiamas. Iš gautų rezultatų matyti, kad biofiltras efektyviausiai dirba tuomet, kai per jį traukiamo oro srauto greitis yra mažiausias – 0,04 m/s, t.y. filtracijos laikas siekia 25s.

Pradinė ksileno garų koncentracija valomame ore – $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Toliau teršalo koncentracijos matavimai ties kiekviena biofiltro sekcija buvo atliekami sumažinus pradinę koncentraciją nuo $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ iki $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Gauti rezultatai rodo, kad sumažinus pradinę ksileno koncentraciją valomame ore, valymo efektyvumas siekia 41 – 79 % (3.14 pav.).

Per biofiltrą traukiant ksileno garais užterštą orą 0,15 m/s greičiu, po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 22 % efektyvumas, po antrojo – 25 %, po penkių sluoksnių – 41 %. Sumažinus srauto greitį iki 0,08 m/s, filtro efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 42 %, po antrojo sluoksnio padidėjo iki 50 %, po penktojo – iki 69 %.



3.14 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

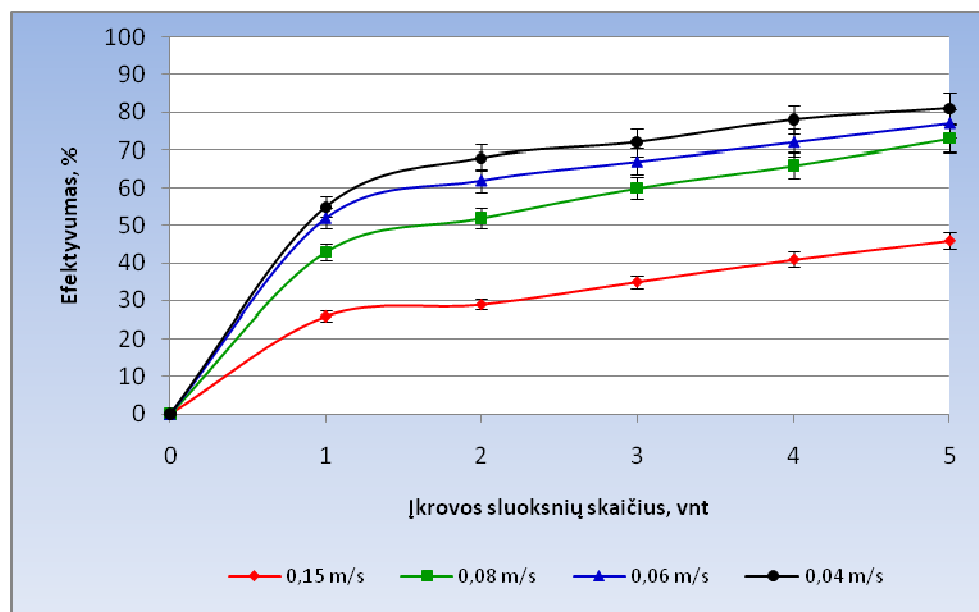
Kai oro srauto greitis buvo sumažintas iki 0,06 m/s, įrenginio efektyvumas po pirmojo biofiltro įkrovos sluoksnio siekė 48 %, po antrojo – 58 %, o po penkių sluoksnių pasiektas 75 % efektyvumas. Lyginant su duomenimis, gautais prie didesnės pradinės ksileno garų koncentracijos, šiuo atveju gauti geresni rezultatai – esant mažesnei teršalo koncentracijai valomame ore, mikroorganizmai lengviau jį suskaido. Oro srauto greitį sumažinus iki 0,04 m/s, 51 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 63 % – po antrojo, 79 % – po penktojo. Galima daryti išvadą, kad biofiltro valymo efektyvumas didėja tuomet, kai jame vykstančių biocheminių reakcijų laikas yra ilgesnis. Tai yra, kai užteršto oro, tiekiamo į įrenginį, srauto greitis mažesnis.

Pradinė ksileno garų koncentracija valomame ore – $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Sumažinus pradinę ksileno garų koncentraciją valomame ore nuo $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ iki $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ir išmatavus teršalo koncentracijas ties kiekvienu įkrovos sluoksniu, nustatyta, kad biofiltro efektyvumas siekia 46 – 81 %, priklausomai nuo oro srauto greičio (3.15 pav.).

Oro, traukiamo per biofiltrą, srauto greičiui esant 0,15 m/s, įrenginio efektyvumas siekė 26 % po pirmojo, 29 % po antrojo ir 46 % po penkių įkrovos sluoksnių. Oro srauto greičiui esant 0,08 m/s, įrenginio efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 43 %, po antrojo sluoksnio padidėjo iki 52 %, o po penktojo siekė 73 %. Lyginant su duomenimis, gautais pradinei teršalo koncentracijai

esant 400 ± 5 ir $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, šiuo atveju po pirmojo ir po penktojo įkrovos sluoksnio biofiltro efektyvumas 2 – 5 % didesnis.



3.15 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.

Sumažinus oro srauto greitį iki 0,06 m/s, įrenginio efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio buvo 52 %, po antrojo padidėjo iki 62 %, o po penkių sluoksnių pasiekė 77 % reikšmę. Matavimus atlikus oro srauto greičiui esant 0,04 m/s, gauti tokie rezultatai: po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 55 % efektyvumas, po antrojo – 68 %, po penktojo sluoksnio – 81 % efektyvumas. Iš gautų rezultatų matyti, kad, norint užtikrinti efektyvų biofiltro veikimą, reikia mažinti į jį tiekiamo užteršto oro srauto greitį. Mažesnės pradinės teršalo koncentracijos bei mažesni oro srauto greičiai įtakoja geresnį oro išvalymą biofiltre.

Lyginant su acetono garų išvalymu biofiltre, naudojant ksileną, įrenginio valymo efektyvumas yra iki 13 % mažesnis, nes ksileno pernašos koeficientas mažesnis už acetono, o tai lemia prastesnį jo skaidymą.

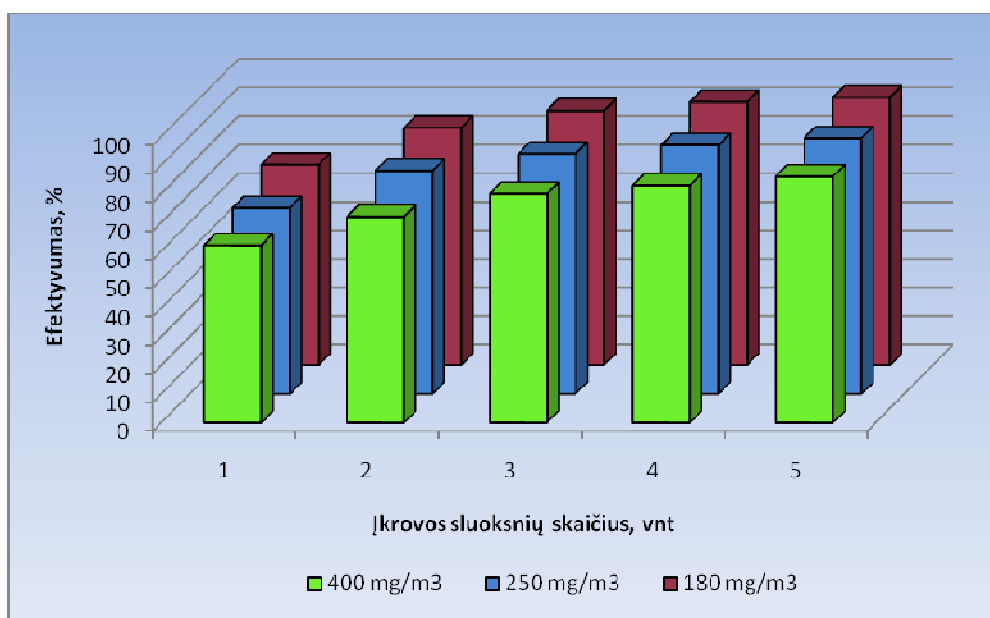
Ispanijos mokslininkai ksileno garais užterštam orui valyti panaudodami biofiltrą, užkrautą keraminiais rutuliukais, pasiekė 75 % efektyvumą. Lyginant duomenis, gautus atlikus eksperimentinius tyrimus, su užsienio autorių rezultatais, biofiltro su polimerine įkrova efektyvumas, valant orą nuo ksileno, yra didesnis – siekia 84 %.

▪ Biofilto efektyvumo priklausomybė nuo teršalų pradinės koncentracijos

Eksperimentinių tyrimų metu gauti duomenys rodo, kad biofilto efektyvumas priklauso nuo to, kokia yra pradinė teršalo koncentracija valomame ore.

Matavimai buvo atliekami, esant trimis skirtingoms kiekvieno teršalo pradinėms koncentracijoms: 400 ± 5 , 250 ± 5 ir 180 ± 5 mg/m³. Rezultatai pateikti 3.16, 3.17, 3.18 pav. Kiekvienu atveju oro srauto greitis įrenginyje – 0,04m/s.

3.16 pav. iliustruoja įrenginio efektyvumo didėjimą, mažinant pradinę acetono garų koncentraciją valomame ore.



3.16 pav. Biofilto oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, esant skirtingai pradinei acetono garų koncentracijai, kai oro srauto greitis lygus 0,04 m/s

Geriausiai acetonas biofiltre buvo skaidomas, esant mažesnei pradinei jo koncentracijai. Nuo pradinės teršalo koncentracijos priklauso efektyvus biofilto veikimas (Eldon 2009). Kuo didesnė teršalų koncentracija, tuo sunkiau mikroorganizmai juos skaido – efektyviam biofilto darbui turi būti parinkta optimali teršalo koncentracija bei tinkamas oro srauto greitis.

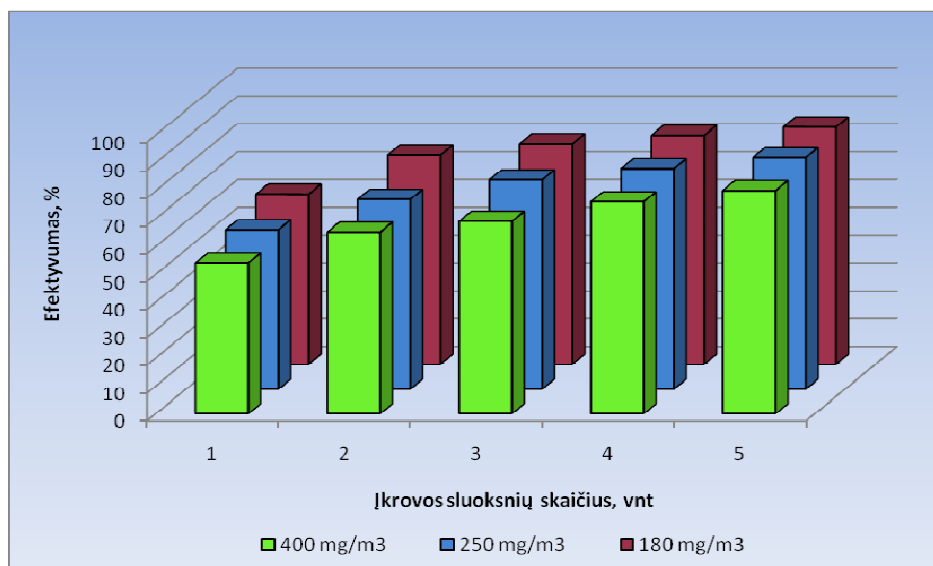
Kai pradinė acetono garų koncentracija valomame ore buvo lygi 180 ± 5 mg/m³ ir oro srauto greitis 0,04 m/s, įrenginio efektyvumas po 5 įkrovos sluoksnių siekė 94 %. Padidinus acetono garų koncentraciją iki 400 ± 5 mg/m³, filtro efektyvumas sumažėjo iki 86 %.

Norint pagerinti biofilto valymo efektyvumą, esant aukštoms teršalo koncentracijoms, reikia didinti kasečių skaičių įrenginyje arba mažinti į įrenginį tiekiamo oro srauto greitį. Didinant acetono

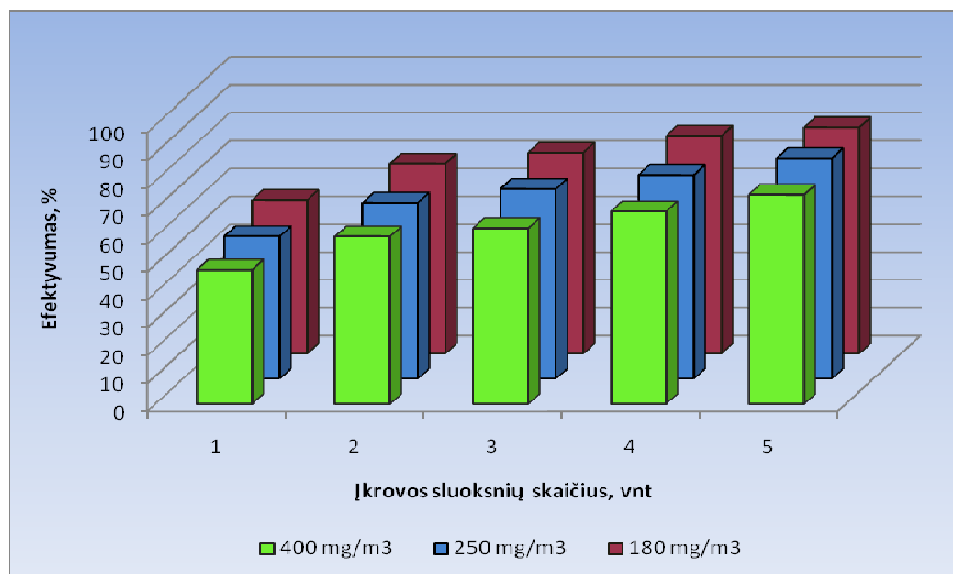
garų koncentraciją valomame ore, įrenginio efektyvumas mažėja, nes mikroorganizmai nespėja pilnai suskaidyti didelio kiekio teršalų.

3.17 ir 3.18 paveiksluose pateiktos biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybės nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, esant skirtingoms pradinėms butanolio ir ksileno garų koncentracijoms.

Geriausi rezultatai gauti tais atvejais, kai butanolio ir ksileno pradinės koncentracijos yra mažiausios, t.y. $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$.



3.17 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, esant skirtingai pradinei butanolio garų koncentracijai, kai oro srauto greitis lygus 0,04 m/s



3.18 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, esant skirtingai pradinei ksileno garų koncentracijai, kai oro srauto greitis lygus 0,04 m/s

Esant mažesnėms pradinėms teršalų koncentracijoms valomame ore, biofilto įkrovoje esantys mikroorganizmai efektyviau juos suskaido.

Kai pradinė butanolio garų koncentracija valomame ore buvo lygi $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ ir oro srauto greitis $0,04 \text{ m/s}$, biofilto efektyvumas po 5 įkrovos sluoksnių siekė 85 %. Padidinus butanolio garų koncentraciją iki $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, filtro efektyvumas sumažėjo iki 80 %.

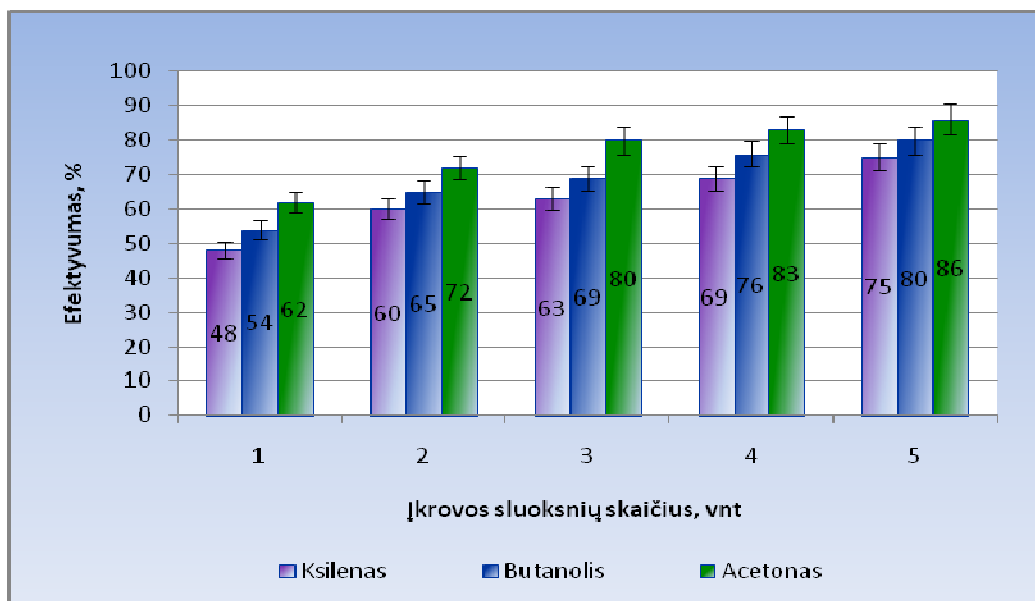
Pradinei ksileno garų koncentracijai esant $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, įrenginio efektyvumas siekė 81 %. Padidinus pradinę teršalo koncentraciją iki $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, oro išvalymo efektyvumas sumažėjo iki 75 %.

Kai į biofiltrą tiekiamas oras su didelėmis lakiųjų organinių junginių koncentracijomis, nepasiekiamas aukštas išvalymo efektyvumas. Tokiu atveju turi būti didinamas įrenginio įkrovos sluoksnio aukštis arba mažinama pradinė teršalų koncentracija valomame ore.

▪ Biofilto efektyvumo priklausomybė nuo teršalo prigimties

3.19, 3.20 ir 3.21 paveiksluose pateiktos biofilto oro valymo efektyvumo priklausomybės nuo polimerinės įkrovos sluoksnių skaičiaus ir valomo teršalo prigimties. Oro srauto greitis visais atvejais – $0,04 \text{ m/s}$.

Pradinė acetono/butanolio/ksileno koncentracija – $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$



3.19 pav. Biofilto oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir valomo teršalo prigimties, kai kiekvieno teršalo pradinė koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

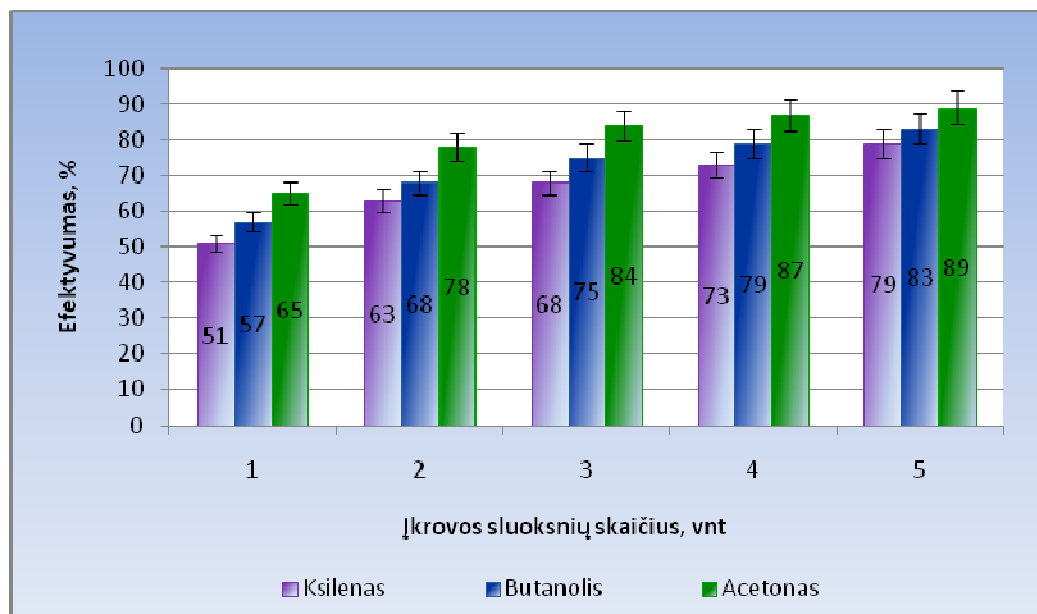
Eksperimentinių tyrimų metu atliekant matavimus, kai kiekvieno teršalo – acetono, butanolio ir ksileno – pradinė koncentracija valomame ore buvo $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, aukščiausias išvalymo laipsnis pasiektas, valant orą nuo acetono garų. Blogiausiai biofiltre buvo skaidomas ksilenas.

Po pirmojo įkrovos sluoksnio, kuriame suskaidomas didžiausias kiekis teršalų, acetono išvalymo efektyvumas siekė 62 %, butanolio – 54 %, o ksileno – 48 %. Po antrojo sluoksnio teršalų išvalymo efektyvumas padidėjo atitinkamai 12 %, 11%, 10 % ir siekė 60 %, 65% ir 72%.

Galima teigti, kad biofiltro įkrovoje esantys mikroorganizmai acetoną skaido lengviausiai – po penkių įkrovos sluoksnių efektyvumas siekia 86 %. Butanolis ir ksilenas skaidomi sunkiau – efektyvumas siekia atitinkamai 80 ir 75 %. Mažesnę šių teršalų skaidymo efektyvumą lemia jų hidrofobinės savybės.

Pradinė acetono/butanolio/ksileno koncentracija – $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Esant mažesnei pradinei teršalų koncentracijai – $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ – buvo gauti geresni rezultatai: didžiausias efektyvumas pasiektas valant orą nuo acetono garų – 89 %. Butanolio suskaidymas biofiltre šiuo atveju siekė 83 %, ksileno – 79 % (3.20 pav.). Tendencija išliko ta pati – geriausiai skaidomas teršalas ir šiuo atveju buvo acetonas, blogiausiai – ksilenas.



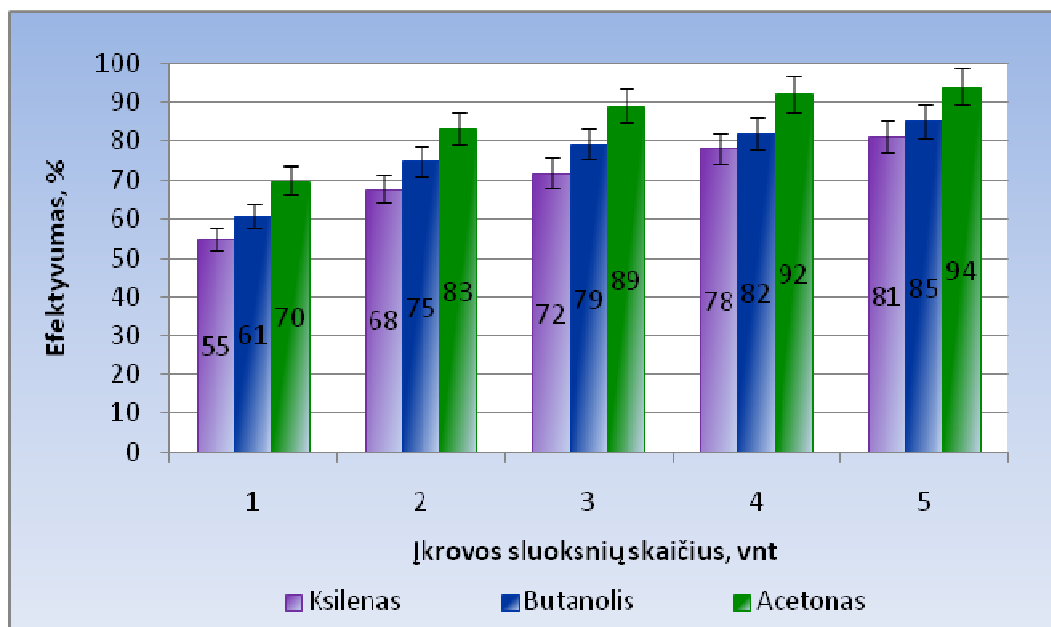
3.20 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir valomo teršalo prigimties, kai kiekvieno teršalo pradinė koncentracija yra $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Esant pradinei kiekvieno teršalo koncentracijai $250 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, kai užteršto oro sąlyčio su įkrova laikas – 25 s, po pirmojo įkrovos sluoksnio acetono išvalymo efektyvumas siekė 65 %, po penkių įkrovos sluoksnių efektyvumas siekia 89 %.

butanolio – 57 %, o ksileno – 51 %. Po penkių įkrovos sluoksnių teršalų išvalymo efektyvumas padidėjo atitinkamai iki 89 %, 83 % ir 79 %.

Pradinė acetono/butanolio/ksileno koncentracija – $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Pradinę teršalų koncentraciją sumažinus iki $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, geriausiai oras išvalomas buvo nuo acetono garų, prasčiausiai – nuo ksileno (3.21 pav.).



3.21 pav. Biofiltro oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus ir valomo teršalo prigimties, kai kiekvieno teršalo pradinė koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Po pirmojo įkrovos sluoksnio acetono išvalymo efektyvumas siekė 70 %, butanolio – 61 %, o ksileno – 55 %, po antrojo įkrovos sluoksnio – 83 %, 75 % 68%. Po penkių įkrovos sluoksnių teršalų išvalymo efektyvumas padidėjo atitinkamai iki 94 %, 85 % ir 81 %.

Lyginant 180 ± 5 , 250 ± 5 ir $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ koncentracijas, geriausi biofiltro efektyvumo rezultatai gauti, esant mažiausiai kiekvieno teršalo koncentracijai, t.y. $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Esant tokiai pradinei koncentracijai ir 25 s filtracijos laikui, pasiektas 81 % biofiltro efektyvumas, valant orą nuo ksileno garų, 85 % – nuo butanolio ir 94 % – nuo acetono. Aukštą acetono išvalymo laipsnį lemia geras šio teršalo tirpumas vandenyje.

Iš gautų rezultatų galima daryti išvadą, kad eksperimentiniams tyrimams naudoti mikroorganizmai yra tinkami tokių teršalų kaip acetonas, butanolis, ksilenas skaidymui. Pasiektas 75 – 94 % efektyvumas, valant orą nuo šių teršalų. Geriausiai mikroorganizmai skaidė acetono garus – efektyvumas 94 %.

3.3. TREČIOJO SKYRIAUS IŠVADOS

1. Eksperimentinių tyrimų metu valant orą nuo acetono garų, adsorbcijos atveju (įkrovai esant sausai) pasiektas 18 % efektyvumas. Sudrėkinus įkrovą, vyksta teršalo absorbcija – acetono garai ištirpsta vandenyje ir įrenginio efektyvumas padidėja iki 35 %.
2. Biofilto efektyvumo tyrimai buvo atliekami, esant 3 skirtingoms acetono, butanolio ir ksileno koncentracijoms: 400 ± 5 , 250 ± 5 ir $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Didžiausias biofilto efektyvumas pasiektas, esant mažiausiai kiekvieno teršalo koncentracijai, t.y. $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Šiuo atveju, valant orą nuo acetono garų, pasiektas 94 % efektyvumas, butanolio – 85 %, ksileno – 81 %.
3. Nustatant biofilto efektyvumą, oro srauto greitis buvo keičiamas nuo 0,15 iki 0,04 m/s. Esant tokiems greičiams, filtracijos laikas siekė 7 – 25 s. Didžiausias įrenginio efektyvumas gautas, užterštą orą per įkrovą leidžiant 0,04 m/s greičiu, t.y. filtracijos laikui esant 25 s. Kuo mažesnis oro srauto greitis biofiltre, tuo ilgesnis užteršto oro sąlyčio su įkrova laikas. Ilginant filtracijos laiką, biofilto efektyvumas didėja.
4. Biofiltru valant orą nuo acetono, butanolio ir ksileno garų, valymo efektyvumas priklauso ir nuo teršalo prigimties. Esant vienodoms visų teršalų pradinėms koncentracijoms ir pastoviam oro srauto greičiui, didžiausias efektyvumas pasiektas, valant orą nuo acetono garų – 94 %. Valant orą nuo butanolio garų, įrenginio efektyvumas siekė 85 %, o nuo ksileno – 81 %. Aukštą acetono išvalymo laipsnį lemia geras tirpumas vandenyje, o butanolio ir ksileno hidrofobinės savybės nulemia mažesnę išvalymo efektyvumą.

4. BIOFILTRACINIŲ PROCESŲ MATEMATINIS MODELIAVIMAS

4.1. BIOFILTRE VYKSTANČIOS TERŠALŲ DEGRADACIJOS MODELIAVIMO METODIKA

Biofiltre vykstančios teršalų degradacijos matematinio modeliavimo tikslas – nustatyti teršalų koncentracijos pokyčius nuo įkrovos sluoksnio aukščio, per kurį leidžiamas lakiaisiais organiniais junginiais – acetonu/butanoliu/ksilenu – užterštas oras.

Teršalų skaidymas biofiltre aprašomas masės pernašos bei biologinio oksidavimo procesų. Modeliuojant buvo priimta, kad biofiltro įkrova yra sudaryta iš poringos medžiagos, kuri yra vienodai sudrėkusi ir jos drėgmė nesikeičia. Per įrenginį tekant oro srautui, teršalas (acetonas/butanolis/ksilenas) bei deguonis yra perduodami pastoviu greičiu į biologinę plėvelę, susidariusią ant įkrovos.

Pagrindinės prielaidos:

- Mikroorganizmų augimas priklauso tik nuo acetono/butanolio/ksileno kiekio. Deguonies kiekis mikroorganizmų augimo neriboja.
- Bioplėvelė susidaro tik ant biologinės įkrovos išorinės dalies, reakcijos, vykstančios bioįkrovos porose, nevertinamos.
- Patekimas iš vandens fazės į bioplėvelę skaičiuojamas, atsižvelgiant į jos poringumą.
- Bioplėvelės savybės (tankis, poringumas, drėgmė, specifinis paviršiaus plotas) per visą bioįkrovą yra vienodos.

Modeliavimui taikomas Hodžo ir Devinio modelis. Šis modelis aprašo teršalų pernašos ir biodegradacijos procesus, vykstančius biofiltre (Ardjmand et al. 2005; Hodge and Devinny 1995). Teršalai – acetonas, butanolis ir ksilenas – filtruojasi per aktyvintą įkrovą, sudarytą iš polimerinių rutuliukų. Teršalų degradacijos procesai vyksta dviejose fazėse: dujinėje ir skystojoje.

Siekiant gauti tikslesnius rezultatus, modeliuojant būtina išlaikyti tokias sąlygas (Ardjmand et al. 2005):

1. Laminarinis dujų tekėjimas biofiltre;
2. Biofiltro įkrovos homogeniškumas (vienodas poringumas, drėgnis, bioplėvelės storis per visą įkrovos sluoksnį);
3. Tolygus mikroorganizmų pasiskirstymas per visą įkrovos paviršiaus plotą;
4. Nedidelė adsorbento advekcija ar difuzija skystojoje fazėje.

Biofilitre vykstantys teršalų degradacijos procesai gali būti aprašomi tokia formule (Ardjmand *et al.* 2005):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \left(\frac{1-\theta}{\theta} \right) [k(k_h C - C_{ads})] \quad (4.1)$$

čia:

C – teršalo koncentracija, mg/m³;

t – teršalo pernašos laikas, h;

D – teršalo dispersijos koeficientas dujinėje fazėje, mg/cm³;

x – teršalo tekėjimo atstumas biofilitre, cm;

v – oro srauto greitis įkrovos porose, cm/h;

θ – įkrovos poringumas, %;

k – teršalo pernašos greičio konstanta, h⁻¹;

k_h – teršalo filtruojančioje medžiagoje skilimo koeficientas;

C_{ads} – teršalo koncentracija skystojoje fazėje, mg/cm³.

Procesui nusistovėjus, teršalo koncentracijos dujinėje ir skystojoje fazėse kinta proporcingai:

$$C_{ads} = k_h C. \quad (4.2)$$

Tuomet:

$$\frac{\partial C_{ads}}{\partial t} = k_h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4.3)$$

Lygtyje (4.3) gautą išraišką įstačius į (4.1) formulę, gaunama:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \left(\frac{1-\theta}{\theta} \right) (k_h \frac{\partial C}{\partial t} + b k_h C) \quad (4.4)$$

Teršalo pernašos koeficientas dujinėje ir skystoje fazėse išreiškiamas tokia formule:

$$k_m = \frac{M_{ads}}{M_{air}} = \frac{C_{ads}(1-\theta)}{C\theta} = k_h \left(\frac{1-\theta}{\theta} \right) \quad (4.5)$$

čia:

M_{ads} – teršalo masė skystoje fazėje, mg;

M_{oro} – teršalo masė dujinėje fazėje, mg.

Tuomet (4.5) lygtyje gautą išraišką įstačius į (4.4) formulę, gaunama:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - k_m \frac{\partial C}{\partial t} - b k_m C \quad (4.6)$$

Sulaikomo teršalo dalį adsorbcijos metu išreiškia pataisos koeficientas R , kuris priklauso nuo dujinės ir skystosios fazės teršalo masių:

$$R = \frac{M_{ads} + M_{oro}}{M_{oro}} = 1 + k_m \quad (4.7)$$

Gautą išraišką įstatę į (4.6) lygtį, gauname:

$$(1 + k_m) \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - b_1 k_m C \quad (4.8)$$

čia: b_1 – pirmojo laipsnio teršalo biodegradacijos greičio konstanta, h^{-1} .

Biodegradacijos konstanta yra dydis, atvirkščias laikui, per kurį teršalų kiekis (mg/m^3) biofiltre sumažėja e kartų ir randamas iš formulės (Vaiškūnaitė 2004):

$$C = C_0 e^{b_1 t} \quad (4.9)$$

Žinant tyrimų metu gautas teršalų garų koncentracijas prieš ir po biofiltro, įkrovą aktyvinant 48 h, b_1 reikšmės randamos pagal formulę:

$$b_1 = \frac{\ln\left(\frac{C_2}{C_1}\right)}{t} \quad (4.10)$$

Į (4.6) lygtį įstatę (4.7) lygtyje išvestą pataisos koeficientą R , gauname biofiltre vykstančių teršalų biodegradacijos procesus aprašančią lygtį (Ardjmand *et al.* 2005):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{b_1 k_m}{R} C \quad (4.11)$$

Mažo našumo biofiltruose vykstančių procesų metu teršalo dispersijos ir pataisos koeficientai nežymūs, todėl teršalų pernešimo lygtis supaprastėja (Vaiškūnaitė 2004):

$$v \frac{\partial C}{\partial x} + b_1 k_m C = 0 \quad (4.12)$$

Įvertinus biofiltre teršalų pernašą ir biodegradaciją, galutinė teršalų koncentracija nustatoma pagal formulę:

$$C = C_0 \exp \left(\frac{-b_1 k_m x}{v} \right) \quad (4.13)$$

Matematiniam modeliavimui naudojami parametrai, gauti atliekant eksperimentinius tyrimus. Modeliavimas atliekamas programa MATLAB 7.11.0.

MATLAB – aukšto lygio techninių skaičiavimo kalba, interaktyvios aplinkos algoritmo sudarymo ir šiuolaikinių priemonių duomenų analizė. MATLAB yra pritaikyta spręsti platų mokslinių ir taikomųjų problemų tokiose srityse kaip: įrenginių modeliavimas ir kontrolės sistemų projektavimas, ryšių sistemų, signalų apdorojimo, vizualizavimo, matavimo signalų ir bandymų finansinis modeliavimas, skaičiavimo biologija ir kt.

MATLAB leidžia maksimaliai dirbti su Real matricomis, sudėtingais analizės ir duomenų tipais. Sudėtyje yra built-in funkcijos Tiesinė algebra (LAPACK, BLAS), sparčioji Furjė transformacija, funkcijos dirbant su polinomais, funkcijų pagrindinių statistinių duomenų ir skaitmeninio programinio sprendimo diferencialinėmis lygtimis.

Atliekant biofiltracinių procesų modeliavimą, matematinis modelis modeliuoja procesus, vykstančius bioįkrovoje. Modelis remiasi tuo, kad įrenginio bioįkrova yra cilindro formos. Rezultatai yra pakankamai tikslūs, nėra didelių duomenų kitimų. Skaičiavimai atlikti pagal (4.13) lygtį ir gauti modeliavimo rezultatai.

Modeliavimas atliekamas, kai per biofiltrą teka oras, kuriame yra 400 mg/m³, 250 mg/m³ ir 180 mg/m³ acetono/butanolio/ksileno garų. Oro srautas per bioįkrovą teka 0,15 ir 0,04 m/s greičiais.

4.2. BIOFILTRE VYKSTANČIOS TERŠALŲ DEGRADACIJOS MODELIAVIMO REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS

Lakiųjų organinių junginių degradacijos biofiltre modeliavimo rezultatai gauti, naudojant programą MATLAB 7.11.0.

Skaičiavimus atlikus pagal (4.13) lygtį, gauti modeliavimo rezultatai pateikti 4.1 – 4.6 pav.

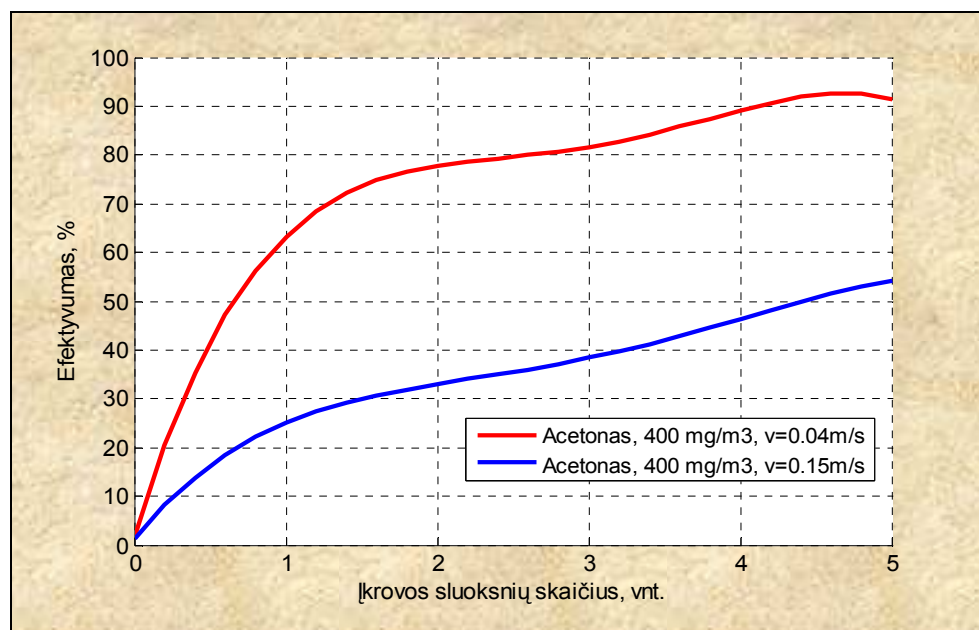
Atlikti skaičiavimai parodė kiekvieno teršalo koncentracijos pokyčių priklausomybes nuo įkrovos sekcijų skaičiaus, t. y. nuo įkrovos sluoksnio aukščio.

Modeliavimo rezultatai parodė, kad geriausiai įkrova sorbavo acetono garais užterštą orą, blogiausiai – ksileno.

▪ ACETONAS

Acetono pernašos koeficientas yra didesnis už butanolio ar ksileno - tai lemia geresnį jo skaidymą. Tyrimų rezultatai modeliuoti per įrenginį oro srautą leidžiant 0,15 m/s ir 0,04 m/s greičiais. Modeliavimo metu gauti rezultatai įrodo, kad, valant orą nuo acetono garų, didžiausias teršalų degradacijos efektyvumas yra pirmuose įkrovos sluoksniuose.

Atlikus matematinį modeliavimą su penkiais įkrovos sluoksniais, kai pradinė acetono garų koncentracija valomame ore yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, pasiektas 53 % ir 92 % efektyvumas (4.1 pav.).

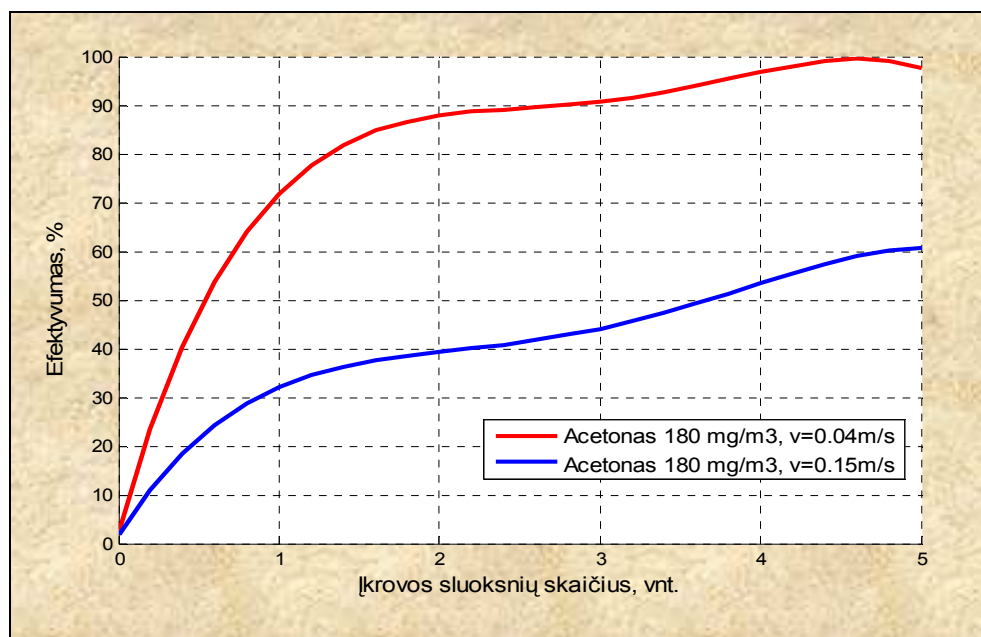


4.1 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Oro srauto greičiui esant 0,15 m/s, biofilto efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 26 %, po antrojo – 32 %, po penktojo – 53 %. Oro srauto greitį sumažinus iki 0,04 m/s, gauti rezultatai pasiskirstė taip: 64 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 78 % – po antrojo, 92 % – po penktojo.

Lyginant su eksperimentų metu gautais duomenimis, modeliavimo metu gauti rezultatai yra geresni: esant 0,15 m/s oro srauto greičiui, eksperimentiniai ir modeliavimo duomenys skiriasi 3 % po pirmosios sekcijos ir 7 % po penktosios. Kai oro srauto greitis 0,04 m/s, duomenų skirtumas po pirmosios sekcijos – 2 %, po penktosios – 6% .

4.2 paveiksle pateikti matematinio modeliavimo rezultatai, kai pradinė acetono garų koncentracija valomame ore – $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$. Po penkių įkrovos sluoksnių įrenginio efektyvumas siekė 61 % ir 97 %.



4.2 pav. Modeliavimo metu gauto biofilto efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė acetono garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

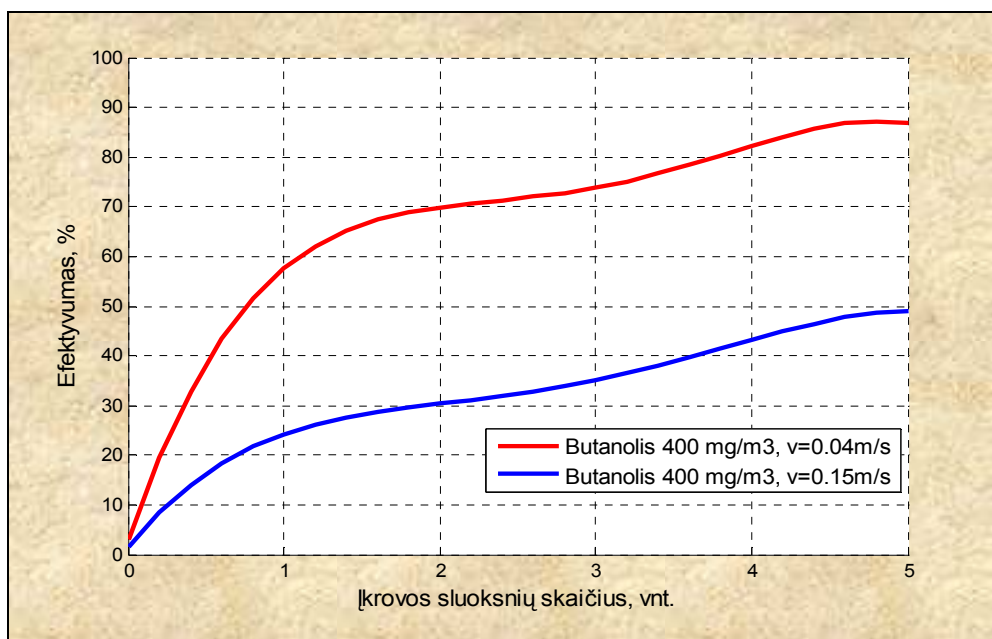
Oro, traukiamo per biofiltrą, srauto greičiui esant 0,15 m/s, biofilto efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio buvo 33%, po antrojo – 40 %, po penkių sluoksnių – 61 %. Eksperimentiniai duomenys yra atitinkamai 3 %, 5 % ir 6 % mažesni.

Sumažinus srauto greitį iki 0,04 m/s, gauti tokie modeliavimo rezultatai: po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 73 % efektyvumas, po antrojo – 88 %, po penktojo sluoksnio – 97 % efektyvumas. Tyrimų metu biofilto efektyvumas buvo atitinkamai 3 %, 5 % ir 3 % mažesnis.

Iš 4.1 ir 4.2 paveiksluose pateiktų modeliavimo duomenų matyti, kad didesnis acetono koncentracijos sumažėjimas pastebimas po pirmos ir antros filtro sekcijų. Efektyvesnį teršalų skaidymą lemia įkrovoje susiformavusi bioplėvelė. Dėl didesnės į įrenginį tiekiamų teršalų koncentracijos greitėja fermentacijos reakcijos greitis, dėl kurio įkrovoje padidėja biomasė. Padaugėjus mikroorganizmų ir padidėjus jų aktyvumui, bioplėvelė pirmuosiuose įkrovos sluoksniuose yra storesnė nei kituose sluoksniuose. Dėl šios priežasties pirmuose sluoksniuose suskaidoma daugiausiai – iki 40 % teršalų.

▪ BUTANOLIS

Modeliavimo metu gauti rezultatai rodo, kad, valant orą nuo butanolio garų, kai pradinė koncentracija buvo $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, po penkių įkrovos sluoksnių biofiltro efektyvumas siekė 49 % ir 87 %, priklausomai nuo oro srauto greičio įrenginyje (4.3 pav.).

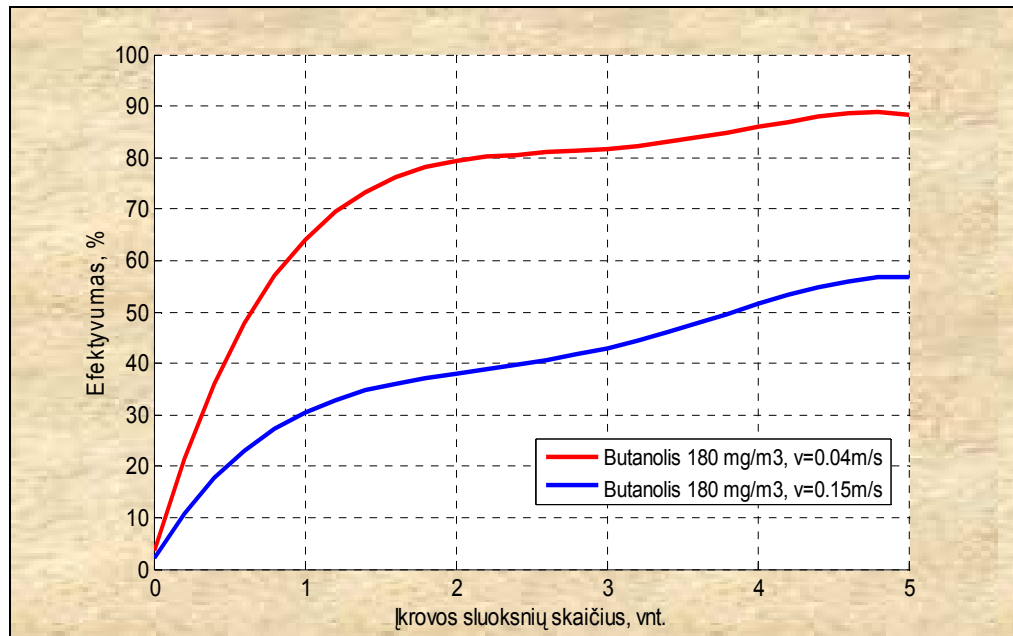


4.3 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Kai oro srauto greitis biofiltre buvo 0,15 m/s, jo efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio siekė 24 %, po antrojo – 31 %, po penktojo – 49 %. Oro srauto greitį sumažinus iki 0,04 m/s, gauti rezultatai pasiskirstė taip: 58 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 70 % – po antrojo, 87 % – po penktojo.

Tyrimų metu gauti duomenys, kai oro srauto greitis 0,15 m/s, už modeliavimo metu gautus duomenis yra 2 %, 5 % ir 7 % mažesni atitinkamai po vieno, dviejų ir penkių įkrovos sluoksnių. Oro srauto greičiui esant 0,04 m/s, eksperimento ir modeliavimo duomenys skiriasi 4 %, 2% ir 1%.

Kai pradinė butanolio garų koncentracija valomame ore buvo $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, po penkių įkrovos sluoksnių įrenginio efektyvumas siekė 57 ir 89 %, priklausomai nuo oro srauto greičio (4.4 pav).



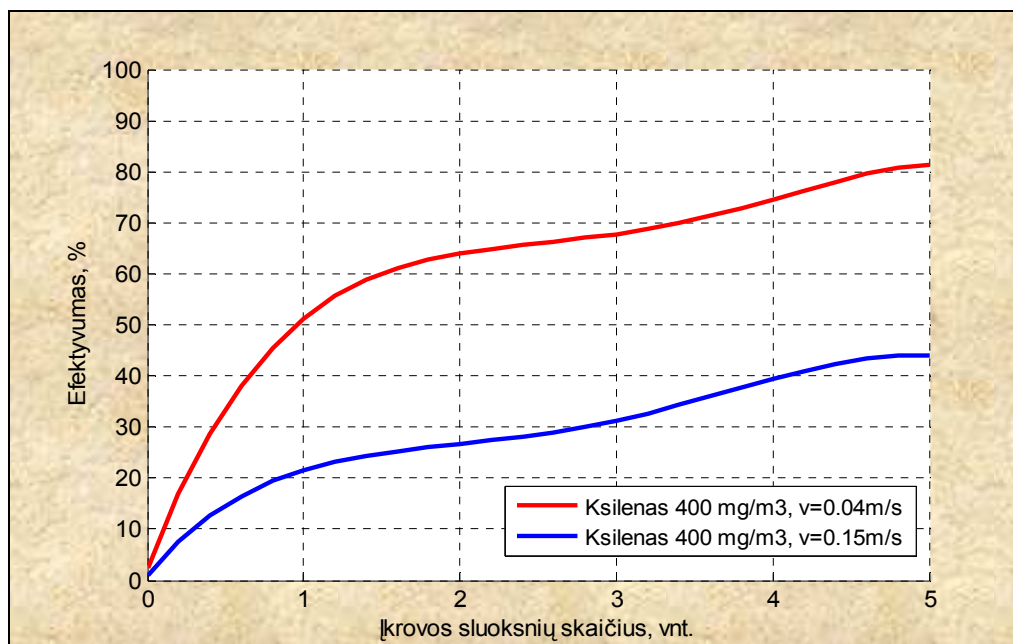
4.4 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė butanolio garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Per biofiltrą traukiamo oro srauto greičiui esant 0,15 m/s, jo efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio buvo 31 %, po antrojo – 38 %, po penkių sluoksnių – 57 %. Lyginant su eksperimentinių tyrimų metu gautais duomenimis, modeliavimo rezultatai yra atitinkamai 1 %, 3 % ir 2 % didesni.

Esant 0,04 m/s oro srauto greičiui, modeliavimo rezultatai pasiskirstė taip: po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 64 % efektyvumas, po antrojo – 79 %, po penkių įkrovos sluoksnių – 89 %. Tyrimų metu įrenginio efektyvumas buvo 5 %, 4 % ir 5 % mažesnis.

▪ KSILENAS

Atlikus matematinį modeliavimą su penkiais įkrovos sluoksniais, kai pradinė ksileno garų koncentracija valomame ore yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, pasiektas 44 % ir 81 % efektyvumas (4.1 pav.).



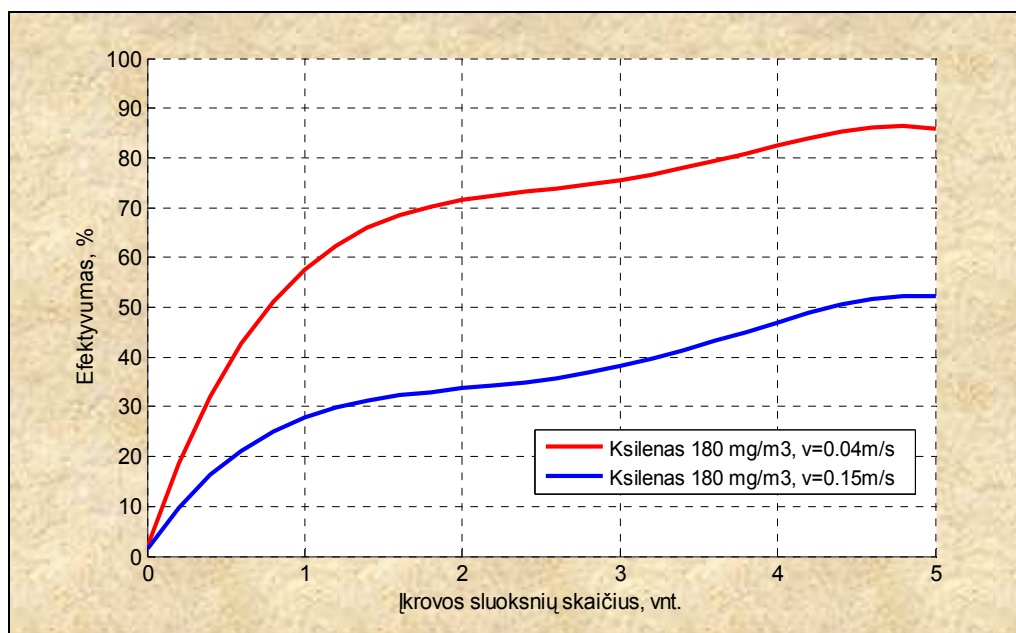
4.5 pav. Modeliavimo metu gauto biofiltro efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $400 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Kai į biofiltrą tiekiamo oro srauto greitis buvo 0,15 m/s, įrenginio efektyvumas siekė 22 %, 27 % ir 44 % atitinkamai po vieno, dviejų ir po penkių įkrovos sluoksnių. Lyginant su eksperimentų rezultatais, modeliavimo duomenų reikšmės yra atitinkamai 2 %, 4 % ir 6% didesnės.

Oro srauto greitį sumažinus iki 0,04 m/s, gauti rezultatai pasiskirstė taip: 52 % efektyvumas pasiektas po pirmojo įkrovos sluoksnio, 64 % – po antrojo, 81 % – po penktojo. Tyrimų metu nustatytas biofiltro efektyvumas po pirmojo įkrovos sluoksnio 4 % mažesnis, po antrojo – 4 %, po penkių įkrovos sluoksnių – 6 % mažesnis už modeliavimo metu gautus duomenis.

Kai pradinė ksileno garų koncentracija valomame ore buvo sumažinta iki $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$, po penkių įkrovos sluoksnių įrenginio efektyvumas siekė 52 ir 86 %, priklausomai nuo oro srauto greičio (4.4 pav). Lyginant su duomenimis, gautais modeliuojant acetono garų išvalymą biofiltre, šiuo atveju įrenginio efektyvumas 9 ir 11 % mažesnis, nes ksileno pernašos koeficientas yra mažesnis už acetono – tai lemia prastesnį jo skaidymą.

Norint padidinti efektyvumą, reikia mažinti pradinę teršalo koncentraciją arba didinti įkrovos sluoksnių skaičių biofiltre.



4.6 pav. Modeliavimo metu gauto biofilto efektyvumo priklausomybė nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, kai pradinė ksileno garų koncentracija yra $180 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Oro, traukiamo per biofiltrą, srauto greičiui esant 0,15 m/s, įrenginio efektyvumas siekė 28 % po pirmojo, 34 % po antrojo ir 52 % po penkių įkrovos sluoksnių. Oro srauto greičiui esant 0,04 m/s, gauti tokie rezultatai: po pirmojo įkrovos sluoksnio pasiektas 58 % efektyvumas, po antrojo – 72 %, po penktojo sluoksnio – 86 % efektyvumas.

Lyginant su eksperimentų metu gautais duomenimis, modeliavimo metu gauti rezultatai yra geresni: esant 0,15 m/s oro srauto greičiui, eksperimentiniai ir modeliavimo duomenys skiriasi 2 % po pirmosios sekcijos, 5 % – po antrosios ir 6 % – po penktosios. Kai oro srauto greitis 0,04 m/s, duomenų skirtumas po pirmosios sekcijos – 3 %, po antrosios – 4 %, po penktosios – 5%.

Modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų metu gauti rezultatai pateikiami 4.1 lentelėje. Biofilto efektyvumas buvo nustatomas, naudojant skirtingas pradines acetono/butanolio/ksileno koncentracijas, esant skirtingiems oro srauto greičiams.

Mažiausias modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatų skirtumas pastebėtas, kai į biofiltrą tiekiamas oras, kuriame yra 180 mg/m^3 acetono garų.

4.1 lentelė. Modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų duomenų palyginimas

Acetonas				
	<i>Modeliavimo duomenys (Biofiltro efektyvumas, %)</i>		<i>Eksperimentiniai duomenys (Biofiltro efektyvumas, %)</i>	
	0,15 m/s	0,04 m/s	0,15 m/s	0,04 m/s
400 mg/m ³	53	92	46	86
180 mg/m ³	61	97	55	94
Butanolis				
	<i>Modeliavimo duomenys (Biofiltro efektyvumas, %)</i>		<i>Eksperimentiniai duomenys (Biofiltro efektyvumas, %)</i>	
400 mg/m ³	49	87	42	80
180 mg/m ³	57	89	50	85
Ksilenas				
	<i>Modeliavimo duomenys (Biofiltro efektyvumas, %)</i>		<i>Eksperimentiniai duomenys (Biofiltro efektyvumas, %)</i>	
400 mg/m ³	44	81	38	75
180 mg/m ³	52	86	46	81

Palyginus eksperimentinius duomenis su matematinio modeliavimo rezultatais, matyti, kad skirtumas yra nedidelis. Modeliavimo metu gautas didesnis biofiltro efektyvumas negu eksperimentinių tyrimų metu. Lyginant efektyvumo reikšmes po pirmosios, antrosios ir penktosios biofiltro sekcijų, skirtumas yra 1 – 7 %.

Gauti modeliavimo rezultatai parodė, kad aukštas teršalų išvalymo laipsnis (iki 97%) pasiekiamas, panaudojant penkis polimerinės įkrovos sluoksnius, kurių bendras aukštis yra 0,5 m. Todėl, norint pasiekti didelį oro valymo efektyvumą, toks įkrovos sluoksnio aukštis yra pakankamas.

4.3. KETVIRTOJO SKYRIAUS IŠVADOS

1. Biofiltre vykstančių sorbcinių procesų modeliavimas atliktas MATLAB 7.11.0 programa, naudojant Hodžo-Devinio modelį.
2. Modeliavimo rezultatai parodė, kad geriausiai polimerinė įkrova sorbavo acetono garais užterštą orą (efektyvumas 97 %), blogiausiai – ksileno (efektyvumas 86 %).

3. Modeliavimo metu gauti rezultatai yra aukštesni už eksperimentinių tyrimų metu gautus duomenis. Rezultatų skirtumas – nuo 1 % iki 7 %.
4. Modeliuojant panaudojus 5 įkrovos sluoksnius, kurių bendras aukštis 0,5 m, nustatytas biofiltro efektyvumas – 97 %. Aukštas teršalų išvalymo laipsnis rodo, kad toks įkrovos sluoksnio aukštis yra pakankamas užtikrinti efektyvų biofiltro veikimą.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Tyrimais nustatyta, kad didelės įtakos biofilto aerodinaminiam pasipriešinimui turi įkrovos drėgmė: oro srauto greičiui esant 0,04 m/s, sausos ir drėgnos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas skiriasi 18,7 %, o srauto greitį padidinus iki 0,08 m/s, drėgnos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas 24,2 % didesnis negu sausos. Didžiausias įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas – 95 Pa.
2. Efektyviausiai biofiltras veikė, kai teršalų pradinė koncentracija valomame ore buvo 180 ± 5 mg/m³. Šiuo atveju valant orą nuo acetono garų, pasiektas 94 % efektyvumas, butanolio – 85 %, ksileno – 81 %.
3. Didžiausias biofilto efektyvumas – 94 % – pasiektas, užterštą orą per įkrovą leidžiant 0,04 m/s greičiu, t.y. filtracijos laikui esant 25 s.
4. Biofiltru valant orą nuo acetono, butanolio ir ksileno garų, valymo efektyvumas priklauso ir nuo teršalo prigimties. Esant vienodoms visų teršalų pradinėms koncentracijoms ir pastoviam oro srauto greičiui, didžiausias efektyvumas pasiektas valant orą nuo acetono garų – 94 %. Mažiau efektyviai oras buvo išvalomas nuo butanolio – efektyvumas siekė 85 %, o nuo ksileno – 81 %.
5. Biofiltre vykstančių sorbcinių procesų modeliavimas atliktas, remiantis masės pernašos dėsniais, naudojant Hodžo-Devinio modelį. Diferencialinės lygtys, aprašančios LOJ pernašą tarp oro – vandens – bioplėvelės spęstos MATLAB 7.11.0 programa. Eksperimentinių tyrimų metu gauti duomenys už modeliavimo rezultatus mažesni 1 – 7 %.
6. Eksperimentiniuose tyrimuose naudota dirbtinės kilmės įkrova yra didelio poringumo, užtikrinančio gerą teršalų sorbciją, pasižymi dideliu naudingo paviršiaus plotu, tinkančiu dideliu mikroorganizmų skaičiui, lemiančiam efektyvų teršalų skaidymą. Ši įkrova yra ilgaamžė – tai prailgina įrenginio tarnavimo laiką. Polimerinius rutuliukus ir Lietuvoje, ir užsienyje galima įsigyti už nedidelę kainą.

REKOMENDACIJOS

1. Lakiisiais organiniais junginiais užteršto oro valymui rekomenduoju naudoti biofiltrą, užpildytą polimeriniais rutuliukais. Ši įkrova yra patraukli dėl savo poringos struktūros, aukšto valymo efektyvumo (iki 94 %), nedidelio aerodinaminio pasipriešinimo (iki 95 Pa) bei mažos kainos.
2. Pramonės įmonėse oro valymui nuo lakiųjų organinių junginių, tokių kaip acetonas, butanolis, ksilenas rekomenduoju taikyti biofiltrą su polimerine įkrova. Naudojant šią įkrovą, pasiekiamas aukštas oro valymo efektyvumas, kuris siekia 81 – 94 %.

LITERATŪROS SARAŠAS

Air pollutants 2010. [interaktyvus]. Žiūrėta 2010 m. gruodžio 29 d. Prieiga per internetą: <www.epp.eurostat.ec.europa.eu>.

Aizpuru, A.; Malhautier, L.; Roux, J.C.; Fanlo, J.L. 2001. Biofiltration of a Mixture of Volatile Organic Emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 51(12): 1662-1670

Andersen, M. 2006 08 31. Biofilter for Treating Contaminated Gas. Denmark, Copenhagen. PCT/DK2007/050121.

Andres, Y.; Dumont, E.; Gerente, C. 2009. Characterization techniques of packing material colonization in gas biofiltration processes. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 36(12): 1895-1902.

Aplinkos oro kokybės vertinimo vadovas. 2006. Nacionalinių taršos mažinimo bei oro kokybės vertinimo programų paruošimas. 88 p. Prieiga per internetą: <<http://aaa.am.lt/VI/files/0.334220001163418589.pdf>>.

Ardjmand, M.; Safekordi, A.; Farjadfard, S. 2005. Simulation of biofilter used for removal air contaminants (ethanol). *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2(1): 69–82.

Baltrėnas, P. ir kt. 2008. *Aplinkos apsauga*. Vilnius: Technika. 576 p.

Baltrėnas, P.; Vaiškūnaitė, R. 2002. Biologinis oro valymas suaktyvinta pušų žievių įkrova. *Aplinkos inžinerija*, 10 (2): 70–76.

Baltrėnas, P.; Vaiškūnaitė, R. 2003. Biofiltro su suaktyvinta pušų žievių įkrova taikymo galimybės. *Jaunimas siekia pažangos 2003: doktorantų mokslinės konferencijos straipsnių rinkinys*. Kaunas: Akademija, 295-299.

Baltrėnas, P.; Vaiškūnaitė, R. 2007. Influence of Biofilter's Temperature Regimes on Air Cleaning. *Ekologija*. 53 (3): 80-83.

Baltrėnas, P.; Vaiškūnaitė, R.; Zagorskis, A. 2005. Experimental Studies of Air Flow Rate and Aerodynamic Resistance of Biological Air Purification Device That Contains Activated Fir Bark Charge. *Environmental Engineering*. 6th International Conference, May 26-27, Vilnius, Lithuania [elektroninis išteklius] : proceedings [CD]. Vilnius: Technika.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2010. Air treatment efficiency of biofilter with adsorbing zeolite layer. *Ekologija*. 56 (1-2): 72–78.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2007. Biologiniam oro valymui naudojamos įkrovos drėgnumo nustatymo tyrimai. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 15 (4): 193-199.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2008. Biologinio oro valymo įrenginio su aktyvuota skirtingos kilmės įkrova valymo efektyvumo tyrimai. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 16 (3): 113-120.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2010. Investigation into the Air Treatment Efficiency of Biofilters of Different Structures. *Journal Of Environmental Engineering & Landscape Management*. 18 (1): 23-31.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2009. Valymo biofiltru su aeracine kamera efektyvumo tyrimai. *Journal Of Environmental Engineering And Landscape Management* 17 (1): 12-19.

Baltrėnas, P.; Zigmontienė, A.; Vaiškunaitė, R. 2004. *Oro valymo biotechnologijos*. Vilnius: Technika. 205 p.

Biancamaria, P.; Paolo, A. 2008. Potential of Biofiltration for VOCs Emission Control and Safety Aspects. *International Journal of Environment & Pollution*. 32 (1): 57-67.

Biologinis valymas [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 m. balandžio 24d.]. Prieiga per internetą: <<http://allconstructions.com>>.

Boswell, J. 2010. Understanding Biofilters. *Pollution Engineering*. 42 (2): 14-18.

Cai, Z.; Kim, D.; Sorial, GA. A Comparative study in treating two VOC mixtures in trickle bed air biofilters. *Chemosphere*. 2007; 68(6): 1090-1097.

Chan, W. C.; Chang, L. Y. 2006. Effects of temperature and inlet concentration on acetone biofiltration in a composite bead biofilter. *Journal of Polymers and the Environment* 14: 1-8.

Chou, M.; Li, S. 2009. Treatment VOC Mixtures in Air Streams by a Biofilter Packed with Fern Chips. *Journal of Environmental Engineering & Management*. 19 (4): 203-211.

Cox, H. Nguyen, T. Deshusses, M. 2000. Toluene degradation in the recycle liquid of biotrickling filters for air pollution control. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 54:133-137.

CO2 įtaka klimato kaitai [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2010 m. gruodžio 20 d. Prieiga per internetą: <www.co2net.eu/public/brochures/CO2NET-Public-Brochure-Lithuanian.pdf>.

Delhomenie, M.; Heitz, M. 2005. Biofiltration of Air: a Review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25:53-72.

Denafas, G. 2000. *Atmosferos apsauga. I dalis. Aplinkos oro tarša ir kontrolė: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija. 129 p.

Eldon R.; Murthy, D. V. S.; Swaminathan, T. 2010. Effect of Flow Rate, Concentration and Transient-State Operations on the Performance of a Biofilter Treating Xylene Vapors. *Water, Air & Soil Pollution*. 211 (1-4): 79-93.

Gallastegui, G.; Muñoz, R.; Barona, A.; Ibarra-Berastegi, G.; Rojo, N. 2010. Evaluating the Impact of Water Supply Strategies on P-Xylene Biodegradation Performance in an Organic Media-Based Biofilter. *Journal of Hazardous Materials*. 185 (2/3): 1019-1026.

Girgždys, A. 2000. *Aplinkos monitoringas*. Vilnius: Technika. 120 p.

Govind, R. 2009. Biofiltration Odors and VOC Treatment Technology of the Future. *Pollution Equipment News*. 42 (1): 10-11.

Gracy, S.; Hort, C.; Platel, V.; Gidas, M. B. 2006. Volatile Organic Compounds Biofiltration with Two Packing Materials. *Environmental Technology*. 27 (9): 1053-1061.

Hodge, D. S.; Devinny, J. S. 1995. Modeling removal of air contaminants by biofiltration. *Environmental Engineering*. 121: 21-32.

Yang, C.; Makram, T.; Xueqing, Z.; Byung J.; Guangming, Z. 2008. Effect of Gas Empty Bed Contact Time on Performances of Various Types of Rotating Drum Biofilters for Removal of VOCs. *Water Research*. 42 (14): 3641-3650.

Jank, M. 2001 06 29. Biofilter. DE 101 32 224 A1

Jeong, D.; Jeongsik, O.; Yum, I.; Yongtaek, L. 2010. Removal of VOCs from their Aqueous Solution by Pervaporation with PDMS-zeolite Composite Membrane. *Desalination and Water Treatment*. 17: 242-247.

Kim, J.; Kam, S.; Lee, M. 2009. Characteristics of Benzene, Toluene and Xylene Gas Removal by a Biofilter Using Scoria. *International Journal of Environment & Pollution*. 39 (3/4): 264-278.

Kleinheinz, G. T.; Bagley, S. T. 2006. Biofiltration for the Removal and Detoxification of a Complex Mixture of Volatile Organic Compounds. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 20 (2): 101.

Lakieji organiniai junginiai [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2010 m. gruodžio 21 d. Prieiga per internetą: <www.infochema.lt/infochema/selectPage.do?docLocator=576D18EEDA3D11DCA66274616617373&inlanguage=lt>.

Lakieji organiniai junginiai aplinkoje [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2010 m. gruodžio 29 d. Prieiga per internetą: <<http://www.epa.gov/iaq/voc.html#Healt%20Effects>>.

Lakiųjų organinių junginių poveikis aplinkai [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2010 m. gruodžio 29 d. Prieiga per internetą: <http://www.parish-supply.com/volatile_organic_compounds.htm>.

Lietuvos Respublikos Aplinkos apsaugos įstatymas 1992. *Valstybės žinios* 5–75.

Lietuvos Respublikos Aplinkos oro apsaugos įstatymas 1999 m. lapkričio 4 d. Nr. VIII-1392, *Valstybės žinios* 98–2813.

- Liu, Q.; Liu, X.; Babajide, A. E.; An, T.; Fu, J.; Sheng, G. 2007. Comparison of air-borne xylene biodegradation between immobilized-cell biofilter and biofilm attached biofilter. *Journal of Shanghai University*. 11(5): 514-520.
- Malhautier, L.; Khammar, N.; Bayle, S.; Fanlo, J. 2005. Biofiltration of Volatile Organic Compounds. *Microbiology & Biotechnology*. 68 (1): 16-22.
- Ortiz, I.; Revah, S.; Auria, R. 2003. Effects of Packing Material on The Biofiltration of Benzene, Toluene and Xylene Vapours. *Environmental Technology*. 24 (3): 265-275.
- Paca, J.; Halecky, M.; Novak, V.; Jones, K.; Kozliak, E. 2012. Biofiltration of a styrene/acetone vapor mixture in two reactor types under conditions of acetone overloading. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 87 (6): 772-777
- Paulauskienė, T.; Zabukas, V.; Vaitiekūnas, P. 2009. Lakiųjų organinių junginių (LOJ) emisijos tyrimas naftos terminalo talpyklų parkuose. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 17 (2): 81-88.
- Petraitis, E. 2010. *Skaitinis modeliavimas aplinkos apsaugoje*. Vilnius: Technika, 162 p.
- Pielech-Przybylska, K.; Zieminski, K.; Szopa, J. St. 2006. Acetone biodegradation in a trickle-bed biofilter. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 57: 200–206.
- Pineda, R.; Alba, J.; Thalasso, F.; Ponce-Noyola, T. 2004. Microbial Characterization of Organic Carrier Colonization During a Model Biofiltration Experiment. *Letters in Applied Microbiology*, 38 (6): 522-526.
- Ramirez, A.; Deschamps, J.; Jones, P.; Heitz, M. 2009. Experimental Determination of Kinetic Parameters of Methanol Biodegradation in Biofilters Packed with Inert and Organic Materials. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 85 (3): 404-409.
- Ryu, H.; Kim, S.; Cho, K. 2010. Comparative Studies on Toluene Removal and Pressure Drop in Biofilters Using Different Packing Materials. *Journal of Environmental Biology*. 31 (3): 315-318.
- Saravanan, V.; Rajamohan, N. 2009. Treatment of xylene polluted air using press mud-based biofilter. *Journal of Hazardous Materials*. 162: 981–988.
- Shirahama, N.; Mochida, I.; Korai, Y.; Choi, K. H.; Enjoji, T.; Shimohara, T.; Yasutake, A. 2005. Reaction of NO with urea supported on activated carbons. *Applied Catalysis B: Environmental* 57 (4): 237–245.
- Singh, R. S.; Rai, B. N.; Upadhyay, S. N. 2010. Removal of Toluene Vapour From Air Stream Using a Biofilter Packed with Polyurethane Foam. *Process Safety & Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B*. 88 (5): 366-371.
- Skaistys, A.; Vaiškūnaitė, R. 2006. Biologinio oro valymo efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas - Lietuvos ateitis"*, įvykusios Vilniuje 2006 m. kovo 30 d, pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 390-397.

Song, J., Shin, S., 2007. Biodegradation of BTXs and Substrate Interaction in a Biocative Foam Reactor. Proceedings of *the 2nd International Congress Biotechniques for Air Pollution Control*, A Coruña, Spain, October 3-5, 2007.

Stegmann, R.; Doedens, H.; Hensel, A. 2001. *Biologische Abfallbehandlung-Emissionen and deren Behandlung*. Hamburg, 2001.

Tahraoui, K., Rho, D. 2002. Biodegradation of BTX Vapors in a Compost Medium Biofilter. *Compost Science and Utilization*. 6 (2): 13-21

Thakur, P. K.; Mathur, A. K.; Balomajumder, C. 2011. Biofiltration of Volatile Organic Compounds (VOCs) – An Overview. *Research Journal of Chemical Sciences*. 1(8): 83-92.

Teršalų emisijos į aplinkos orą [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2010 m. gruodžio 18 d. Prieiga per internetą: <www.oras.gamta.lt/cms/index?rubricId=91e32574-8fa1-473e-b478-2d726cff16ed>.

Teršalų išmetimas į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių 2009. Lietuvos Respublikos statistikos departamento duomenys. [interaktyvus]. Žiūrėta 2010 m. gruodžio 27 d. Prieiga per internetą: <<http://db1.stat.gov.lt/statbank/SelectVarVal/saveelections.asp>>.

Vaiškūnaitė, R. 2008. Mathematical Modelling of Biofilter's Temperature Regimes. The 7th International Conference Environmental Engineering: selected papers: May 22-23, 2008 Vilnius, Lithuania. 1: 433-441.

Vaiškūnaitė, R. 2011. Mathematical Modelling of Biofilter Effectiveness in PH Regimes. The 8th International Conference Environmental Engineering: selected papers: May 19-20, 2011 Vilnius, Lithuania. 1: 408-415.

Vaiškūnaitė, R.; Baltrėnas, P. 2004. Oro valymo procesų biofiltre matematinis modeliavimas. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Lietuva be mokslo - Lietuva be ateities"*, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25, pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 34-42.

Vaitiekūnas, P.; Špakauskas, V. 2003. *Šilumos ir masės pernašos procesų aplinkoje modeliavimo principai*. Vilnius: Technika, 135–143 p.

Vakrina, E. 2007. *Matematinės statistikos pradmenys. Statistinių duomenų analizė, naudojant MS EXCEL*, metodiniai nurodymai neakivaizdininkams. 50 p.

Venckus, Z. 2008. *Aplinkos apsaugos politika ir teisė*. Vilnius: Technika. 199 p.

Zagorskis, A. 2009. Mažo našumo oro valymo biofiltrų tyrimai ir kūrimas. Vilnius: Technika. 145 p.

Zagorskis, A.; Baltrėnas, P. 2004. Biologinio oro valymo įrenginių techninių parametrų įvertinimas. Iš *7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos, "Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities"*, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 100–105.

Zagorskis, A.; Spiečiūtė, R. 2011. Investigation of Efficiency of Cassette Biofilters, Designed for Air Cleaning from Xylene. The 8th International Conference "Environmental Engineering": May 19-20, 2011 Vilnius, Lithuania: selected papers. 1: 474–478.

Žarnauskas, L.; Zigmontienė, A. 2008. Basic Characteristics Analysis of Biocharge in Air Cleaning Biofilters. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 3 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 456–462.

Yamamoto, T.; Okubo, M.; Hung, Y. T.; Zang, R. 2005. Odor Pollution Control. *Advanced Air and Noise Pollution Control*. 2: 273-334.

Yang, C.; Makram, T.; Xueqing, Z.; Byung J.; Guangming, Z. 2008. Effect of Gas Empty Bed Contact Time on Performances of Various Types of Rotating Drum Biofilters for Removal of VOCs. *Water Research*. 42 (14): 3641-3650.

Yang, X.; Xie, J.; Zhang, L.; Ding, T. 2007. Emissions of SO₂, NO and N₂O in a Circulating Fluidized Bed Combustor during co-firing Coal and Biomass. *Journal of Environmental Sciences*. 19 (1): 109-116.

Wan, H.; Li, D.; Dai, Y.; Hu, Y.; Liu, B.; Dong, L. 2010. Catalytic behaviours of CuO supported on Mn₂O₃ modified γ – Al₂O₃ for NO reduction by CO. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 332 (1–2): 32–44.

Wu, Q. 2003. Mathematical modeling analysis of floating bead biofilter applications to domestic wastewater treatment. Department of Civil and Environmental Engineering. 51 p.

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Moksliniai straipsniai:

1. A. Zagorskis, R. Spiečiūtė. 2011. Investigation of Efficiency of Cassette Biofilters, Designed for Air Cleaning from Xylene. *The 8th International Conference Environmental Engineering*: selected papers: May 19 - 20, 2011 Vilnius, Lithuania. 1: 474 – 478.
2. A. Zagorskis, R. Spiečiūtė. 2011. Lašelinio biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas - Lietuvos ateitis"*, įvykusios Vilniuje 2011 m. balandžio 14 d, straipsnių rinkinys. Vilnius: Technika, 126 - 131.
3. A. Zagorskis, R. Spiečiūtė. 2012. Oro užterštumo nuo acetono darbo vietose mažinimas, taikant biofiltrą su polimerine įkrova. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* (Pateiktas redakcijai).
4. A. Zagorskis, R. Spiečiūtė. 2012. Oro užterštumo nuo ksileno darbo vietose mažinimas, taikant biofiltrą su polimerine įkrova. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 15-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas - Lietuvos ateitis"*, įvykusios Vilniuje 2012 m. balandžio 12 d, straipsnių rinkinys. Vilnius: Technika (Pateiktas redakcijai).

Pranešimai:

1. Stendinis pranešimas: Investigation of Efficiency of Cassette Biofilters, Designed for Air Cleaning from Xylene. *The 8th International Conference Environmental Engineering*: May 19 - 20, 2011 Vilnius, Lithuania.
2. Stendinis pranešimas: Lašelinio biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas - Lietuvos ateitis"*, įvykusios Vilniuje 2011 m. balandžio 14 d.
3. Stendinis pranešimas: Oro užterštumo nuo ksileno darbo vietose mažinimas, taikant biofiltrą su polimerine įkrova. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 15-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas - Lietuvos ateitis"*, įvykusios Vilniuje 2012 m. balandžio 12 d.

PADĖKA

Nuoširdžiai dėkoju savo darbo vadovui dr. Alvydui Zagorskiui už vertingus patarimus, kantrybę ir paramą.

Esu dėkinga baigiamojo darbo konsultantei doc. dr. Aušrai Zigmontienei už patarimus bei pastabas.

Taip pat norėčiau padėkoti VšĮ „Grunto valymo technologijos“ už bendradarbiavimą, rengiant mokslinį darbą.