

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Alvydas ZAGORSKIS

MAŽO NAŠUMO ORO VALYMO BIOFILTRŲ TYRIMAI IR KŪRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA IR KRAŠTOTVARKA (04T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Disertacija rengta 2005–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Pranas BALTRĖNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T).

Konsultantai:

prof. habil. dr. Irena EITMINAVIČIŪTĖ (Vilniaus universitetas, biomedicinos mokslai, ekologija ir aplinkotyra – 03B),

prof. habil. dr. Petras VAITIEKŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTU leidyklos TECHNIKA 1599-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-412-3

© Zagorskis, A., 2009

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2009

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Alvydas ZAGORSKIS

RESEARCH AND DESIGN OF LOW CAPACITY AIR TREATMENT BIOFILTERS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (04T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2009.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Pranas BALTRĖNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Consultants:

Prof Dr Habil Irena EITMINAVIČIŪTĖ (Vilnius University, Biomedical Sciences, Ecology and Environmental – 03B),

Prof Dr Habil Petras VAITIEKŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Santrauka

Disertacijoje nagrinėjama aplinkos taršos lakiaisiais organiniais junginiais (LOJ) problema. Pagrindinis tyrimo objektas – mažo našumo biologiniai oro valymo nuo LOJ įrenginiai. Disertacijos tikslas yra sukurti skirtingų konstrukcijų efektyvius, ekonomiškus biofiltrus smulkioms ir vidutinio stambumo įmonėms.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: ištirti biofiltruose naudojamų įkrovų sorbcines, aerodinaminio pasipriešinimo savybes ir mikrobiologinį aktyvumą; nustatyti skirtingų konstrukcijų biofiltrų valymo efektyvumą; taikant matematinius modelius pavaizduoti tyrimų metu nagrinėtus procesus.

Disertaciją sudaro įvadas, 6 skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, literatūros, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, mokslinis darbo naujumas, praktinė darbo rezultatų reikšmė, ginamieji teiginiai. Pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje analizuota literatūra, išnagrinėta oro tarša LOJ, pasaulyje naudojamų biofiltrų konstrukcijos, įkrovos, LOJ oksiduojantys mikroorganizmai. Aprašyti biodestrukcijos proceso matematiniai modeliai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrame skyriuje pateiktos biologiniam oro valymui naudojamų aktyvintų skirtingos kilmės įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų metodikos. Taip pat pateikti atliktų tyrimų rezultatai ir jų analizė.

Trečiame skyriuje pateikta bakterijų ir mikromicetų kiekybinių tyrimų gamtinio ceolito ir porolono įkrovose metodika, rezultatai ir jų analizė.

Ketvirtame skyriuje pateikta pasiūlytų skirtingų konstrukcijų biofiltrų valymo efektyvumo tyrimo metodika. Pristatyti tyrimų rezultatai ir atlikta jų analizė.

Penktame skyriuje pateikti biofiltro įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo, biomasės augimo ir teršalų degradacijos procesų matematiniai modeliai. Gauti rezultatai pavaizduoti, aprašyti ir palyginti su eksperimentiniais duomenimis.

Šeštame skyriuje aprašyti penki sukurti skirtingos konstrukcijos biofiltrai ir jų naudojimo sritys, aprašyta patobulinta įkrovos drėgnio tyrimo metodika.

Disertacijos tema paskelbta 16 straipsnių: keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI* sąrašą, penki – recenzuojamuose žurnaluose, du – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų straipsnių rinkiniuose, įtrauktuose į *ISI Proceedings* sąrašą, penki – respublikinės konferencijos straipsnių rinkiniuose. Disertacijos tema perskaityti 8 pranešimai Lietuvos bei tarptautinėse konferencijose. Gautas Lietuvos patentas „*Biofiltras – adsorberis*“.

Abstract

The dissertation analyses the problem of environment pollution with volatile organic compounds (VOC). The main research object is low capacity biologic air treatment devices used to remove VOC. The dissertation is aimed at designing efficient and cost-effective biofilters for small and medium-sized enterprises.

The work deals with main tasks: to analyse the sorption and aerodynamic resistance properties of charges used in the filters as well as their microbiological activity; to determine treatment efficiency of filters having different structures; to represent the analysed processes through the application of mathematical models.

The dissertation consists of an introduction, 6 chapters, general conclusions and recommendations, lists of references, the author's publications.

The introduction discusses the problem addressed, topicality of the work, describes the object of research, formulates the aim and tasks of the work, scientific novelty of the work, practical value of the research results and defended propositions. It presents the author's publications and conference reports on the topic of the dissertation and the structure of the dissertation.

The first chapter is intended for literature review. It investigates air pollution with VOC, biofilter structures and charges applied worldwide, and VOC-oxidising microorganisms. It also describes the mathematical models of a bio-destruction process. The chapter ends with formulated conclusions and tasks.

The second chapter presents the methodologies of research into humidity and aerodynamic resistance of activated charges of different origins applied for biological air treatment. It also presents the research results and their analysis.

The third chapter presents the methodology of quantitative research into bacteria and micromycetes in the charges of natural zeolite and foam, its results.

The forth chapter covers the methodology and results of research into treatment efficiency of the proposed biofilters of different structures.

The fifth chapter presents the mathematical models of biocharge aerodynamic resistance, biomass growth and pollutant degradation processes. The obtained results are represented, described and compared to the experimental data.

The sixth chapter describes five designed biofilters of different structures, areas of their application, the methodology of research into charge's humidity.

16 articles have been published on the dissertation topic: four of them are in journals included in *Thomson ISI* list, five – in refereed journals, two – reviewed international conference proceedings on the list of *ISI Proceedings*, and another five ones – national conference proceedings. 8 reports on the topic of the dissertation were delivered at Lithuanian and international conferences. The Lithuanian patent “*Biofilter – Adsorber*” has been obtained.

Žymėjimai

Simboliai

- b – teršalo skilimo greitis, h^{-1} ;
 c – substrato koncentracija, mg/m^3 ;
 D – difuzijos koeficientas, m^2/s ;
 d_e – kapiliarų vidutinis skersmuo, m ;
 k – teršalo pernašos greičio konstanta, h^{-1} ;
 K_M – Michaelio – Menteno konstanta, mg/m^3 ;
 K_S – Monodo konstanta, mg/m^3 ;
 L – teršalo pernašos atstumas, m ;
 M – teršalo molinė masė, g/mol ;
 D_{ik} – įkrovos drėgnis, %;
 m_f – bioplėvelės masė ant įkrovos paviršiaus, kg/m^2 ;
 n – matavimų skaičius;
 r – fermentacijos reakcijos greitis, $mg/m^3 \cdot s$;
 R – oro srauto tėkmės skersmuo kapiliare, m ;
 Re – Reinoldso skaičius;
 S_{Φ_i} – oro srauto narys kintamajam Φ_i ;
 T – temperatūra, $^{\circ}C$;
 t – teršalo pernašos laikas, h ;
 u – oro srauto greitis kapiliaro skerspjūvio taške, m/s ;
 $\vec{v}_i$ – fazės i greičio vektorius;
 v – variacijos koeficientas, %;
 w_0 – vidutinis srauto greitis, m/s ;
 x_i – vieno matavimo rezultatas;
 ΔX – sausos biomasės prieaugis, kg/m^2 ;
 $Y_{x/s}$ – substrato išėigos koeficientas;
 a – dujų sąlyčio su įkrova paviršiaus plotas, cm^2 ;
 μ – biomasės augimo greitis, h^{-1} ;
 ε – įkrovos porėtumas, %;

- γ – temperatūrinis koeficientas;
 ν – kinematinė dujų klampa, m^2/s ;
 δ – bioplėvelės sluoksnio storis, μm ;
 ρ_i – fazės i tankis, kg/m^3 ;
 ζ – hidraulinio pasipriešinimo koeficientas;
 Φ_i – fazės i priklausomasis kintamasis;
 Γ_{Φ_i} – kintamojo Φ_i mainų koeficientas.

Santrumpos

- E – fermentas;
ES – Europos Sąjunga;
JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos;
JT – Jungtinės Tautos;
ksv – kolonijas sudarantys vienetai;
LOJ – lakieji organiniai junginiai;
P – produktas;
pH – rodiklis nusakantis vandenilio jonų koncentraciją;
PVC – polivinilchloridas;
S – substratas;
sp – rūšis (lot. *specius*).

Turinys

IVADAS	1
Tiriamoji problema.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
 1. ORO VALYMO BIOTECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ	7
1.1. Oro tarša lakiaisiais organiniais junginiais Lietuvoje ir kitose šalyse	7
1.2. Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai ir jų analizė	12
1.3. Biologinio oro valymo metodo principai ir taikymas orui valyti	14
1.4. Biologinių oro valymo įrenginių konstrukcijų analizė	19
1.5. Biologiniam oro valymui naudojamos įkrovos ir jų savybės	29
1.6. Biofiltruose lakiuosius organinius junginius oksiduojančių mikroorganizmų vertinimas.....	31
1.7. Oro valymo biofiltruose mikroorganizmų gyvybinę veiklą lemiančių veiksmų ypatumai.....	33
1.8. Biofiltracijos procesus aprašantys matematiniai modeliai ir šių procesų modeliavimo programos	36
1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	39

2. AKTYVINTŲ SKIRTINGOS KILMĖS ĮKROVŲ DRĖGNIO IR AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO TYRIMAI.....	41
2.1. Skirtingos kilmės įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimo metodika.....	42
2.2. Įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų rezultatai ir jų analizė.....	50
2.3. Antrojo skyriaus išvados	58
3. KIEKYBINIAI MIKROORGANIZMŲ TYRIMAI AKTYVINTOSE ZEOVIT SORBENTO GRANULĖSE IR POROLONE	59
3.1. Bakterijų ir mikromicetų kiekybinių tyrimų ZeoVit sorbento ir porolono ėminiuose metodika	60
3.2. Mikroorganizmų kiekybinių tyrimų skirtingos kilmės įkrovose rezultatai	64
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	73
4. BIOFILTRŲ, UŽKRAUTŲ ORGANINĖS IR NEORGANINĖS KILMĖS ĮKROVOMIS, VALYMO EFEKTYVUMO TYRIMAI.....	74
4.1. Skirtingos konstrukcijos biofiltrų valymo efektyvumo tyrimų metodika	75
4.2. Statistinio duomenų apdorojimo aprašymas.....	Error! Bookmark not defined.
4.3. Biofiltrų, užkraudų organinės ir neorganinės kilmės įkrovomis, valymo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė.....	85
4.4. Ketvirtinio skyriaus išvados	94
5. ĮKROVOS AERODINAMINIO PASIPRIEŠINIMO, TEMPERATŪRINIŲ-MIKROBIOLOGINIŲ IR TERŠALŲ DEGRADACIJOS PROCESŲ MODELIAVIMAS	95
5.1. Biofiltro įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo modeliavimo metodika	96
5.2. Įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo modeliavimo rezultatai ir jų aptarimas.....	100
5.3. Biomasės augimą įvertinančio temperatūrinio koeficiento nustatymas ir kreivės lygties aprašymas.....	101
5.4. Gautos temperatūrinio koeficiento ir kreivės diferencialinės lygties reikšmės ir jų aptarimas.....	104
5.5. Teršalų degradacijos matematinio modeliavimo metodika	107
5.6. Teršalų degradacijos modeliavimo rezultatų analizė.....	111
5.7. Penktojo skyriaus išvados.....	117

6. SUKURTŲ ĮRENGINIŲ IR PATOBULINTOS ĮKROVOS DRĖGNIO TYRIMO METODIKOS APRAŠYMAS	118
6.1. Sukurtų biofiltrų taikymo sritys ir konstrukciniai sprendimai	119
6.2. Patobulinta įkrovos drėgnio biofiltre tyrimo metodika	130
6.3. Šeštojo skyriaus išvados	131
BENDROSIOS IŠVADOS	132
REKOMENDACIJOS	134
LITERATŪROS SĄRAŠAS	135
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	144

Contents

INTRODUCTION	1
Problem of the work	1
Topicality of the work	2
Object of research.....	3
Aim of the work	3
Tasks of the work	3
Methodology of research.....	4
Scientific novelty of the work and its value	4
Practical value of the work results.....	4
Defended propositions.....	5
Approbation of the work results	5
The scope of the dissertation	6
 1. ANALYSIS OF AIR TREATMENT BIOTECHNOLOGIES.....	 7
1.1. Air pollution with volatile organic compounds in Lithuania and other countries	7
1.2. The methods of treating air polluted with volatile organic compound and their analysis	12
1.3. The principles of a biological air treatment method and its application for air treatment	14
1.4. Analysis of structures of the biological air treatment devices.....	19
1.5. Charges used for biological air treatment and their properties.....	29
1.6. Evaluation of the microorganisms oxidising volatile organic compounds in biofilters	31
1.7. Peculiarity of the factors predetermining microorganism vital activity in air treatment biofilters	33
1.8. Mathematical models describing biofiltration processes and modelling programmes of these processes	36
1.9. The first chapter conclusions and formulation of the dissertation tasks	39

2. RESEARCH INTO HUMIDITY AND AERODYNAMIC RESISTANCE OF ACTIVATED DIFFERENT ORIGIN CHARGES.....	41
2.1. The methodology of research into humidity and aerodynamic resistance of different-origin charges.....	42
2.2. The results of research into humidity and aerodynamic resistance of charges and their analysis.....	50
2.3. The second chapter conclusions.....	58
3. MICROORGANISMS QUANTITATIVE ANALYSIS IN ACTIVATED ZEOVIT SORBENT GRANULES AND FOAM	59
3.1. The methodology of bacteria and micromycetes quantitative research in ZeoVit sorbent and foam samples.....	60
3.2. The results of microorganizms quantitative research in different origin charges.....	64
3.3. The third chapter conclusions.....	73
4. RESEARCH INTO TREATMENT EFFICIENCY OF BIOFILTERS CHARGED WITH ORGANIC AND INORGANIC ORIGIN CHARGES	74
4.1. The methodology of research into treatment efficiency of biofilters of different structures.....	75
4.2. Description of statistical data processing.....	Error! Bookmark not defined.
4.3. The results of research into treatment efficiency of biofilters charged with organic and inorganc origin charges.....	85
4.4. The fourth chapter conclusions.....	94
5. MODELLING OF THE CHARGE'S AERODYNAMIC RESISTANCE, TEMPERATURE-MICROBIOLOGICAL AND POLLUTANT DEGRADATION PROCESSES	95
5.1. The methodology of modelling the aerodynamic resistance of a biofilter charge.....	96
5.2. Modelling results of charge's aerodynamic resistance and their duscussion.....	100
5.3. The determination of the temperature coefficient evaluating biomass growth and the description of the differential equation.....	101
5.4. The obtained values of the temperature coefficient and the curve's differential equation and their consideration.....	104
5.5. The methodology of a pollutant biodegradation mathematical model	107
5.6. The analysis of pollutant biodegradation mathematical model results	111
5.7. The fifth chapter conclusions.....	117

6. THE DESIGNED DEVICES AND IMPROVED METHODOLOGY OF CHARGE HUMIDITY DETERMINATION 118

6.1. Application areas and structural considerations of the designed biofilters..... 119

6.2. The improved methodology of research into charge’s humidity in the biofilter 130

6.3. The sixth chapter conclusions..... 131

GENERAL CONCLUSIONS 132

RECOMMENDATIONS 134

REFERENCES 135

LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE DISSERATION TOPIC 144

Ivadas

Tiriamoji problema

Vystantis pramonei vis labiau didėja aplinkos tarša. Į atmosferą išmetami teršalai tebėra viena didžiausių visuotinių aplinkosaugos problemų. Tai lemia įvairios priežastys – augant pasaulinei ekonomikai, nepakankamai diegiama aplinkai palankių technologijų. Ypač pastebimas aplinkos užterštumas lakiaisiais organiniais junginiais (LOJ). Pagrindiniai aplinkos teršėjai šiais teršalais yra transportas, pramonė ir energetikos sektorius. Vien tik Lietuvoje iš stacionarių taršos šaltinių 2007 m. išmesta 16,9 tūkst. t organinių junginių, Europoje – 703,7 tūkst. t (2006 m.), Jungtinėse Amerikos Valstijose – 6,96 mln. t (2002 m.).

Dėl oro taršos lakiaisiais organiniais junginiais prastėja miestų oro kokybė. Tai neigiamai veikia žmonių sveikatą, gyvenimo kokybę ir biologinę įvairovę. Lakiųjų organinių teršalų koncentracijos gali sukelti plaučių ligas, jutimo organų, odos bei kitus žmogaus gyvybingumą palaikančių organų sutrikimus. LOJ turi tiesioginę įtaką klimato kaitai, ozono kiekio ore mažėjimui, šiltnamio efekto susidarymui.

Didžioji dalis organinių junginių į aplinkos orą išmetama baldų gamybos pramonėje, visose pramonės įmonėse vykstančių dažymo procesų metu, paslaugų sektoriuose, chemijos, statybinių medžiagų, maisto pramonėje bei žemės ūkyje.

Kadangi Lietuvos pramonė yra smulki, todėl lakiųjų organinių junginių kiekiai iš atskirų šaltinių nėra dideli, tačiau jų yra gana daug.

1997 m. Japonijoje, Kioto mieste, vykusioje Tarptautinės klimato kaitos konferencijoje buvo pasirašytas Protokolas, kuriuo susitarta 2008–2012 m. į atmosferą išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį pasauliniu mastu sumažinti 5 %. Lietuva, 2002 m. ratifikuodama Kioto protokolą, kaip ir Europos Sąjunga įsipareigojo šį dujų kiekį sumažinti 8 %, palyginti su 1990 m. Augant ekonomikai ir gyventojų poreikiams vis daugiau sunaudojama įvairiausių tirpiklių bei skiediklių, nuo kurių į darbo aplinkos orą išsiskiria vis daugiau organinių junginių. Todėl būtina ieškoti būdų ir priemonių, kuriomis būtų įgyvendinti šalies įsipareigojimai.

Lakiesiems organiniams junginiams, turintiems aštrų, nemalonų kvapą, šalinti taikomi įvairūs oro valymo metodai, tačiau visiškai pašalinti kvapų jie negali, todėl kvapų problema įvairiose pramonės įmonėse bei objektuose yra labai opi.

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad efektyviam oro valymui nuo lakiųjų organinių junginių stambiose pramonės įmonėse dažnai naudojami biofiltrai. Smulkiuose ir vidutinio stambumo įmonėse jie taikomi retai, nes dėl ilgo teršalo filtracijos laiko užima daug vietos. Dideli įrenginių gabaritai apsunkina mikroorganizmų aktyvumą lemiančių aplinkos veiksnių, tokių kaip drėgnis, temperatūra efektyvią kontrolę. Daugelyje pramonės šakų technologiniai procesai, kurių metu į aplinką išskiriami LOJ, yra nutrūkstami ir nepastovūs. Todėl sustojus technologiniam procesui biofiltro įkrovoje neužtikrinamas mikroorganizmų, kuriems organinis junginys yra energijos šaltinis, aktyvumas. Nustatyta, kad oro valymui naudojamos organinės kilmės įkrovos, tokios kaip kompostas, durpės, medienos drožlės tarnauja tik apie tris metus, todėl imta biologiniam oro valymui taikyti sintetines įkrovas. Tačiau šiuo metu ypač plačiai taikomų sintetinių įkrovų sudarytų iš polivinilchlorido, poliuretano, propileno ir panašių medžiagų gamybos kaštai yra dideli. Be to, dėl prastų sorbcinių savybių jos turi būti nuolat drėkinamos aktyvuotu tirpalu, kas padidina biofiltrų eksploatacines išlaidas.

Darbo aktualumas

Aplinkos apsauga ir gyventojų sveikata ypač glaudžiai susijusios, tai labai aktuali šiuolaikinių miestų problema. Miestuose yra labai daug smulkių ir stambių pramoninių, energetinių ir buitinių šaltinių, teršiančių aplinką lakiaisiais organiniais junginiais (LOJ).

Daugelyje pasaulio šalių didėja oro tarša įvairiausiais organiniais teršalais. Augant stambiajai ir smulkiajai pramonei (tekstilės, metalurgijos, dažymo pramonei, plečiantis spaustuvių tinklui ir t. t.) nuolat didėja į atmosferą išmetamų

organinių junginių apimtis. Kaip jau žinome, lakieji organiniai junginiai išsiskiria garuojant skiedikliams, dažams, tirpikliams bei kitiems cheminiams reagentams. Vis plačiau dažai naudojami pramonėje, plečiasi perdirbamoji pramonė, statybinių medžiagų gamyba, buitinių paslaugų sektorius bei žemės ūkis, todėl didėja LOJ emisijos į atmosferą.

Dėl nuolat didėjančios atmosferos oro taršos ir kylančių higienos bei technologijos reikalavimų biologinis oro valymo filtras tapo neatsiejamu oro tiekimo ir recirkuliacijos sistemų kondicionierių, ventiliacijos sistemų elementu. Todėl labai svarbu ieškoti naujų medžiagų, kurias būtų galima naudoti orui valyti.

Šiuo metu pasaulyje vis dažniau pradedama taikyti biologinį oro valymo metodą naudojant pigesnes, veiksmingesnes, atliekų nesudarančias, ekologiškas biotechnologijas, padedančias efektyviau išvalyti orą nuo LOJ ir panaikinti nemalonus kvapus. Lietuvos pramonė, žemės ūkis, buitinis sektorius yra gana smulkūs, todėl ekonominiu bei praktiniu požiūriu tikslinga naudoti mažo našumo biologinius oro valymo filtrus.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – mažo našumo oro valymo biofiltra.

Darbo tikslas

Pagrindinis šio darbo tikslas – panaudojant pigius užpildus sukurti skirtingų konstrukcijų mažo našumo efektyvius oro valymo biofiltrus skirtus orui valyti nuo gana plataus spektro lakiųjų organinių junginių.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybes nuo į įrenginį tiekiamo oro srauto greičio, laiko bei įrenginyje palaikomos temperatūros.
2. Gauti su medienos skiedromis ir žievėmis sumaišytose ZeoVit sorbento granulėse ir porolone esančių mikroorganizmų skaičiaus priklausomybes nuo biofiltre palaikomos temperatūros.

3. Sukurti mažo našumo biologinius oro valymo įrenginius ir nustatyti skirtingų konstrukcijų biofiltrų valymo efektyvumo priklausomybes nuo teršalo prigimties, į įrenginį leidžiamo oro srauto greičio ir teršalo koncentracijos naudojant organinės ir neorganinės kilmės įkrovas.
4. Taikant matematinius modelius pavaizduoti biofiltre vykstančius aerodinaminio pasipriešinimo procesus, apskaičiuoti biomasės augimo greitį įvertinantį temperatūros koeficientą, nustatyti teršalų degradacijos laipsnio priklausomybes nuo įkrovos sluoksnio aukščio.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti analitiniai ir matematinės statistikos analizės metodai. Taikyta disertacijos autoriaus patobulinta įkrovos drėgnio ir jos aerodinaminio pasipriešinimo tyrimo metodika. Mikroorganizmų skaičiaus priklausomybės nuo biofiltre palaikomos temperatūros gauti ir sukurtų skirtingos konstrukcijos mažo našumo biofiltrų valymo efektyvumui nustatyti taikytos mikroorganizmų aktyvinimo bei įrenginių oro valymo efektyvumo tyrimo metodikos. Aerodinaminiam įkrovų pasipriešinimui modeliuoti naudotas PHOENICS 3.5 programinės įrangos paketas, temperatūriniam koeficientui rasti taikyta Arenijaus lygtis. Biofiltre vykstančių teršalų degradacijos procesams modeliuoti panaudotas Hodžo ir Devinio modelis.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Biotechnologijų su skirtingos kilmės įkrovomis kompleksiniai teoriniai, eksperimentiniai tyrimai, aerodinaminių ir biofiltracinių procesų modeliavimas bei mažo našumo skirtingų konstrukcijų biofiltrų kūrimas, siekiant nustatyti jų naudojimo sritį.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Mažo našumo biofiltrų tyrimai leis nustatyti tinkamiausią oro valymui įkrovą bei įrenginio konstrukciją. Naudojant pigius užpildus ir tam tikrai panaudojimo sričiai pasiūlytas konstrukcijas biologiniai oro valymo įrenginiai bus ekologiški, ekonomiški, saugūs ir efektyvūs. Orui valyti panaudojant natūralios kilmės įkrovas bus racionaliai panaudojami gamtiniai ištekliai. Taikant gamtinį ceolitą sumaišytą su medienos skiedromis, žievėmis ir porolonu bus padidintas įkrovos

naudojimo laikas ir pagerintos drėgmės sorbcinės savybės. Dėl metodo ekonomiško, sukurti mažo našumo biofiltrai ypač plačiai galės būti pritaikomi smulkiose ir vidutinio stambumo įmonėse, nes jose taršos šaltiniai nėra dideli, tačiau jų gana daug. Todėl biofiltrų panaudojimas šiose įmonėse ženkliai leis sumažinti LOJ emisijas į aplinkos orą.

Ginamieji teiginiai

1. Įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas priklauso nuo jos drėgnio ir poringumo. Medienos skiedras ir žievės maišant su ZeoVit sorbento granulėmis pagerėja įkrovos adsorbcinės savybės, o porolono kubeliai padidina jos drėgnį.
2. Savaiminiai mikroorganizmai gali vystytis neorganinės kilmės įkrovose, tokiose kaip ceolitas ir porolonas, sumaišytose su medienos ir žievių skiedromis.
3. Padidinus į biofiltrus tiekiamo oro drėgnį ir įdiegus bioterpės temperatūros kontrolę, įrenginio valymo efektyvumas padidėja.
4. Sukurti mažo našumo biofiltrai leidžia efektyviai valyti orą nuo LOJ ir šalinti nemalonius kvapus smulkiose ir vidutinio stambumo pramonės įmonėse.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra atspausdinta 16 mokslinių straipsnių: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* sąrašą (Baltrėnas and Zagorskis 2007a, 2008a, 2009a), vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į *Thomson ISI Master Journal List* sąrašą (Baltrėnas and Zagorskis 2007b), du – tarptautinių konferencijų leidiniuose, įtrauktuose į *Thomson ISI Proceedings* sąrašą (Baltrėnas et al. 2005a; Baltrėnas and Zagorskis 2008b), du – mokslo žurnaluose, cituojamuose *Springer Link* duomenų bazėje (Baltrėnas and Zagorskis 2005b, 2006a), trys – recenzuojamuose užsienio mokslo žurnaluose (Балтрėнас и Загорскис 2005, 2006a, 2006b), penki – Lietuvos mokslo konferencijų medžiagoje (Zagorskis ir Baltrėnas 2004, 2005c, 2006b, 2007c, 2008c). Gautas patentas „*Biofiltras – adsorberis*“, patento Nr. 5528 (Baltrėnas ir Zagorskis 2008d).

Disertacijos tema skaityti pranešimai 3-jose tarptautinėse ir 5-iose Lietuvos mokslo konferencijose:

- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“, 2005, 2008 m., Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje COST 859 „*Phytotechnologies to promote sustainable land use and improve food safety*“, 2007 m., Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*“, 2004, 2005 m., Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, 2006–2008 m., Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 6 skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, cituojamos literatūros, autoriaus publikacijų bei skaitytų pranešimų disertacijos tema sąrašai.

Darbo apimtis – 160 puslapių, tekste pateikta 60 numeruotų formulių, 76 paveikslai ir 15 lentelių. Rašant disertaciją naudotasi 121 literatūros šaltiniu ir 16 autoriaus publikacijų.

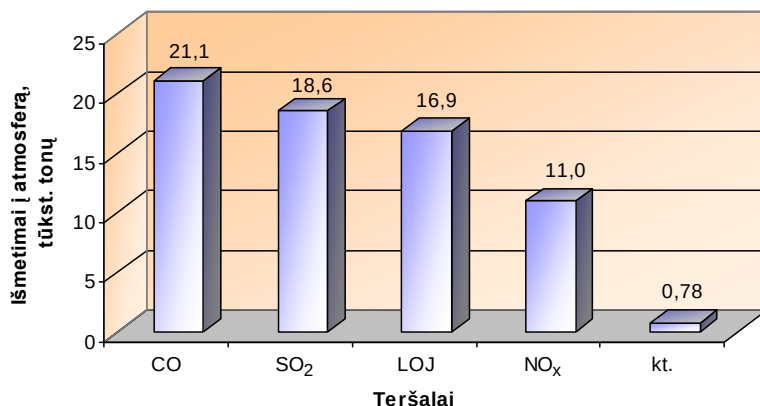
Oro valymo biotechnologijų analizė

Skyriuje analizuojami mažo našumo oro valymo biofiltrų konstrukcijos, veikimo principai ir taikymo galimybės. Aprašytos biologiniam oro valymui naudojamos įkrovos ir jų savybės, lakiuosius organinius junginius oksiduojantys mikroorganizmai ir jų gyvybinę veiklą lemiantys aplinkos veiksniai. Pateikti biofiltracijos procesus aprašantys modeliai ir modeliavimo programos.

1.1. Oro tarša lakiaisiais organiniais junginiais Lietuvoje ir kitose šalyse

Daugiausia atmosferą teršia dujos: sieros, azoto ir anglies oksidai, amoniakas, dujiniai freonai, taip pat lakieji organiniai junginiai. Išmetamos į atmosferą šiltnamio efektą sukeliančios dujos ir teršalai tebėra viena didžiausių visuotinių aplinkosaugos problemų. Jos gajumą lemia įvairios priežastys, didėjant gyventojų poreikiams nepakankamai diegiama aplinkai palankių technologijų. Daugeliui oro teršalų būdinga tai, kad jie gali išlikti aplinkos ore gana ilgą laiką, o oro masės juos perneša toli nuo kilmės šaltinių. Dėl oro taršos dujiniais teršalais, taip pat ir lakiaisiais organiniais junginiais, keičiasi klimatas, prastėja miestų oro kokybė. Tai neigiamai veikia žmonių sveikatą, biologinę įvairovę ir gyvenimo kokybę.

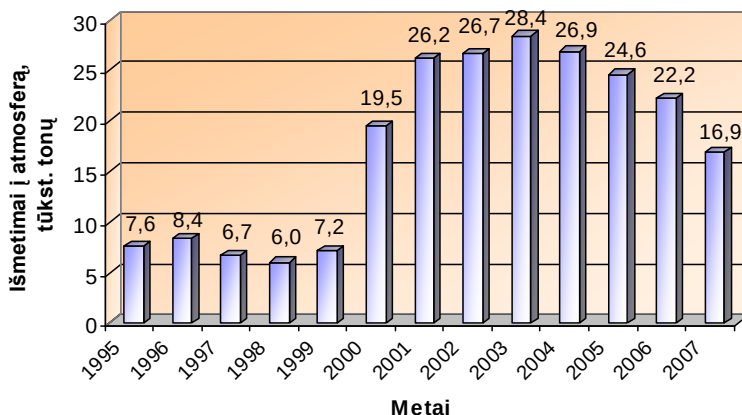
1.1 paveiksle pateikta dujų teršalų emisija iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvoje per 2007 m. Lietuvos statistikos departamento duomenimis, daugiausia iš stacionarių taršos šaltinių buvo išmesta anglies monoksido, sieros dioksido ir lakiųjų organinių junginių. Pagal išmetimų kiekius iš stacionarių taršos šaltinių lakiųjų organiniai junginiai užima trečiąją vietą po anglies monoksido ir sieros dioksido. Per 2007 metus į aplinkos orą buvo išmesta 16,9 tūkst. t lakiųjų organinių junginių. Dideli išmetamų lakiųjų organinių junginių kiekiai parodo, kad nepakankamai diegiamos aplinkosauginės technologijos jiems mažinti.



1.1 pav. Dujinių teršalų emisija iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvoje 2007 m.

Fig. 1.1. Gaseous pollutant emissions from stationary pollution sources in Lithuania (2007) (Teršalų išmetimas... 2009)

Palyginus 1997 ir 2007 metų duomenis, išmetamų lakiųjų organinių junginių kiekis padidėjo 2,5 karto (1.2 pav.). Prognozuojama, kad 2008 m. Lietuvoje sparčiai išaugus ekonomikai, aplinkos tarša lakiisiais organiniais junginiais vėl padidės. Todėl mažinti išmetamų teršalų koncentraciją miestų aplinkos ore – vieni svarbiausių uždavinių sprendžiant su aplinkos oro tarša susijusias problemas. Pažymėtina tai, kad Lietuva yra prisijungusi prie atmosferos taršai mažinti skirtų Jungtinių Tautų konvencijų ir yra perkėlus į nacionalinę teisę Europos Sąjungos aplinkos sektoriaus direktyvų nuostatas. Pagal JT Bendrosios klimato kaitos konvencijos protokolo reikalavimus Lietuva įsipareigojo sumažinti į atmosferą išmetamų šiltnamio dujų kiekį 8 proc., palyginti su 1990 metais. Be to, turime užtikrinti, kad 2010-aisiais ir kiekvienais vėlesniais metais į atmosferą išmetamų lakiųjų organinių junginių kiekiai nevirsytų 92 tūkst. t. 2003 m. įskaičiavus ir transporto keliamą taršą, į aplinkos orą buvo išmesta apie 75 tūkst. t lakiųjų organinių junginių (Aplinkos būklė... 2005).

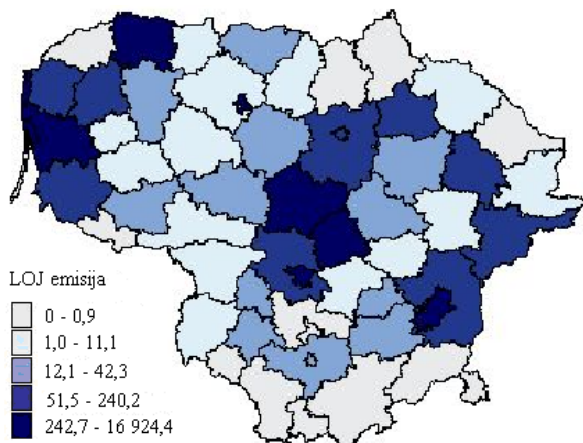


1.2 pav. LOJ emisijos iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvoje

Fig. 1.2. VOC emissions from stationary pollution sources in Lithuania (Teršalų išmetimas... 2009)

Nors per pastaruosius metus sumažėjo energetikos ir pramonės įmonių išmetamų oro teršalų, tačiau transporto sukeliama tarša beveik nepasikeitė ir jau vylauja kelerius metus. Pradėjus didėti pramonės energijos gamybos apimtims, neišvengiamai didės ir atmosferos tarša, jeigu nebus taikomos priemonės išmetamų teršalų kiekiui mažinti (Laškova *et al.* 2007).

Iš 1.3 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad pagrindiniai teršalų išmetimo į atmosferą šaltiniai išlieka tuose rajonuose, kur yra išsikūrę didieji Lietuvos miestai ir pramonės centrai (Vilnius, Kaunas, Telšiai, Mažeikiai, Klaipėda, Kėdainiai, Jonava). 2007 m. daugiausia lakiųjų organinių junginių iš stacionarių taršos šaltinių į aplinkos orą buvo išmesta Telšių apskrityje (9,28 tūkst. t) ir Mažeikių rajone (9,17 tūkst. t). Lietuvos statistikos departamento duomenimis, 2007 m. į aplinkos orą Vilniaus mieste buvo išmesta 314,4 t lakiųjų organinių junginių. Kauno mieste oro tarša LOJ padidėjo nuo 1,840 (2002 m.) iki 2,077 tūkst. t (2007 m.). Klaipėdos apskrityje į aplinkos orą 2007 m. buvo išmesta 3,089 tūkst. t LOJ. Oro tarša LOJ padidėjo ir mažesniuose Lietuvos rajonuose. Trakų rajone LOJ emisijos padidėjo nuo 6,5 t (2006 m.) iki 13,3 t (2007 m.), Utenos rajone – nuo 28,6 t (2004 m.) iki 60,4 t (2007 m.), Anykščių rajone oro tarša LOJ nuo 2005 m. iki 2007 m. padidėjo 9 kartus – nuo 2,0 t iki 18,1 t. Lakiųjų organinių junginių emisijos augimo tendencijos pastebimos ir kituose mažesniuose Lietuvos rajonuose (Teršalų išmetimas... 2009). Mažesniuose rajonuose taršos šaltiniai nėra dideli, tačiau jų yra gana daug, todėl įmonėms diegti brangias oro valymo technologijas neapsimoka.



1.3 pav. Stacionarių taršos šaltinių išmestų teršalų teritorinis pasiskirstymas Lietuvoje, 2007 m.

Fig. 1.3. Distribution of pollutant emissions from stationary pollution sources over the territory of Lithuania (2007) (Teršalų išmetimas... 2009)

Daugelyje pramonės šakų, tokių kaip chemijos, lakų bei dažų, naftos perdirbimo, maisto, naudojama daug organinių medžiagų, kurios įvairiais keliais patenka į atmosferą (Baltrėnas and Vaiškūnaitė 2003). Tarp labiausiai paplitusių organinių junginių yra: acetonas, ksilenas, butilacetatas, butanolis, etanolis, fenolis, benzenas, toluenas, aminorai, tiolai, formaldehidai ir kitos lakiosios organinės medžiagos bei neorganiniai junginiai. (Baltrėnas ir kt. 2004).

Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis, 2007 m. daugiausia į aplinkos orą iš stacionarių taršos šaltinių buvo išmesta acetono – 1633 t (iš 167 įmonių), ksileno – 417,2 t (iš 171 įmonės), butilacetato – 255,1 t (iš 151 įmonės), etanolio – 244,7 t (iš 161 įmonės), tolueno – 193,2 t (iš 154 įmonių) ir butanolio – 69,8 t (iš 143 įmonių) garų (Oro antropogeninė... 2008).

Su didelėmis lakiųjų organinių junginių emisijomis į aplinkos orą susiduria ne tik Lietuva, bet ir kitos Europos Sąjungos valstybės.

Iš 1.1 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad daugelis Europos šalių yra išsipareigojusios gerokai sumažinti į aplinkos orą išmetamų lakiųjų organinių junginių kiekį. 14-oje Europos Sąjungos (ES) valstybių nacionaliniai limitai vis dar yra viršijami. 2006 m. daugiausia LOJ buvo išmesta didžiosiose Europos valstybėse, tokiose kaip Vokietija, Prancūzija, Ispanija, kuriose labiau išsivysčiusi pramonė. Europos Sąjungoje pramonės įmonės į aplinkos orą 2006 m. išmetė 703,7 tūkst. t nemetaninių lakiųjų organinių junginių (Air pollutant... 2009).

1.1 lentelė. Lakiųjų organinių junginių išmetami kiekiai ir nacionaliniai limitai Europos valstybėse, tūkst. t/metus

Table 1.1. Volatile organic compound emissions and national limiting values in the European states, thou t/year
(Air pollutant... 2009; 1979 metų... 2003)

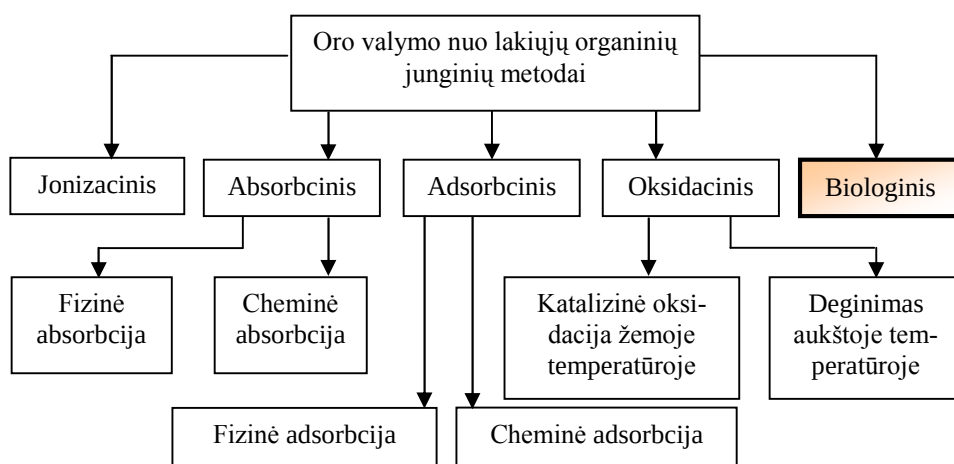
Šalis	Išmeta- mas kiekis 2006 m.	Nacio- naliniai limitai 2010 m.	Teršalų mažini- mo procen- tas	Šalis	Išmeta- mas kiekis 2006 m.	Nacio- naliniai limitai 2010 m.	Teršalų mažini- mo procen- tas
Austrija	172	159	7,6	Čekija	178	220	–
Belgija	149	144	3,4	Danija	110	85	22,7
Bulgarija	159	185	–	Suomija	133	130	2,3
Graikija	291	261	10,3	Prancūzija	1336	1100	17,7
Vengrija	177	137	22,6	Vokietija	1349	995	26,2
Airija	60	55	8,3	Norvegija	196	195	0,5
Italija	1174	1159	1,3	Lenkija	916	800	12,7
Latvija	65	136	–	Rumunija	266	523	–
Liuksem- burgas	3	9	–	Slovakija	78	140	–
Olandija	164	191	–	Slovėnija	41	40	2,4
Ispanija	965	669	30,7	Šveicarija	101	144	–
Švedija	195	241	–	Didžioji Britanija	910	1200	–

Su aplinkos taršos lakiaisiais organiniais junginiais problemomis susiduria ir didžiausios pasaulio valstybės, tokios kaip Jungtinės Amerikos Valstijos (JAV). Remiantis JAV Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis, LOJ emisija į aplinkos orą iš pramonės įmonių 2002 m. siekė 6,96 mln. t (Estimated National... 2006).

Daugelio valstybių nacionalinių strategijų vienas iš tikslų – siekti, kad į atmosferą išmetamų teršalų ir šiltnamio dujų kiekis didėtų dvigubai lėčiau, negu auga gamyba ir paslaugos. Tačiau šiam tikslui įgyvendinti energetikos ir pramonės sektoriuje reikės nemažai pastangų, nes čia nepakankamai sparčiai diegiamos efektyvios aplinkosaugos technologijos (Aplinkos būklė... 2005).

1.2. Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai ir jų analizė

Oro valymo metodas parenkamas atsižvelgiant į teršalų kilmę ir chemines savybes, koncentraciją, kiekį, technines sąlygas, ekonominius rodiklius (Engesser and Plaggemeier 2000; Butz 1997). Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai pateikti 1.4 paveiksle.



1.4 pav. Oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių metodai

Fig. 1.4. Methods of removing volatile organic compounds from the air
(Using bioreactors... 2003; Jantschak *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 vienvalečiu 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 esti vanduo, organiniai tirpalai, nereaguojantys su absorbuojamomis dujomis. Vykstant cheminei absorbcijai, dujų molekulės reaguoja su absorbentais – vandeniniais druskų tirpalais, organinėmis medžiago-

mis ir įvairių medžiagų vandeninėmis dispersijomis. Ištirpę organiniai junginiai absorbate mažina jo efektyvumą, todėl būtina jį nuolat keisti arba iš jo pašalinti ištirpusius junginius (Chang and Lu 2003).

Adsorbcinis oro valymo metodas sukurtas remiantis kai kurių kūnų su ultramikroskopine struktūra fizinėmis savybėmis, leidžiančiomis pasirinktinai sugauti atskirus valomo dujų mišinio komponentus ir kaupti juos savo paviršiuje. Plačiausiai adsorbentais naudojami aktyvintoji anglis, silikagelis, ceolitai, jonitai.

Adsorbciniu būdu dujos išvalomos 90–98 %. Tačiau smulkios kai kurių medžiagų dalelės adsorbuojamos kur kas prasčiau. Be nuolatinės filtro įkrovos regeneracijos, didesnam adsorbento hidrauliniam pasipriešinimui įveikti reikia daug energijos sąnaudų (Baltrėnas ir Paliulis 2002; Hashisho *et al.* 2007).

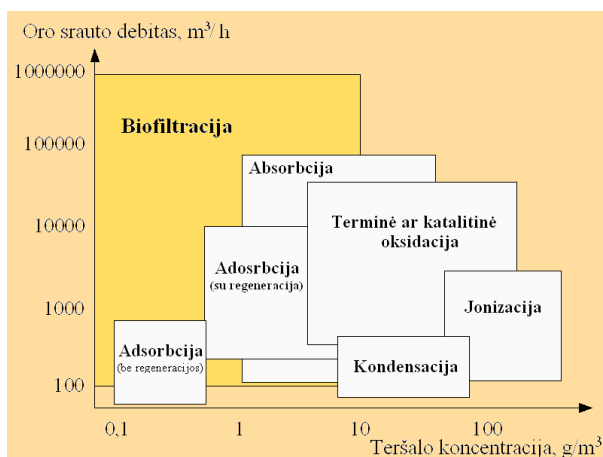
Oksidacinio oro valymo metodo esmė yra ta, kad, valant orą, teršalai pavėrčiami nekenksmingais arba ne tokiais kenksmingais junginiais. Yra du oro valymo būdai: katalizinė oksidacija žemoje temperatūroje ir teršalų deginimas aukštoje temperatūroje (Using bioreactors... 2003).

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. Tačiau turinčios 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 (Chang and Lu 2003, Using bioreactors... 2003).

Teršalų deginimas aukštoje temperatūroje yra veiksmingas būdas orui valyti nuo tirpiklių. Taikant šį metodą lakieji organiniai junginiai (LOJ) oksiduojami aukštoje – 870 °C – 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 (Chang and Lu 2003; Using bioreactors... 2003). Taikant šį metodą į aplinkos orą išskiriami anteriniai klimato kaitą veikiantys produktai, tokie kaip anglies dvideginis (Shareefdeen *et al.* 2003).

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 (Deshusses and Cox 1999).

Iš 1.5 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad teršalų biofiltracijos metodas gali būti taikomas įvairioms teršalų koncentracijoms šalinti (0,01–10 g/m³). 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 (Leethochawalit *et al.* 2001).



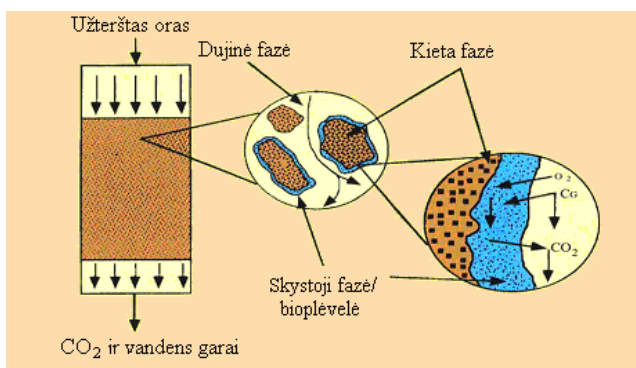
1.5 pav. Lakiųjų organinių junginių valymo metodų lyginimas pagal tiekiamo teršalo koncentraciją ir oro srauto debitą

Fig. 1.5. The comparison of volatile organic compound removal methods according to supplied pollutant concentration and airflow debit
(Deshusses and Cox 1999)

Metodas nesudėtingas ir gali būti taikomas daugelyje pramonės šakų. Biologinis valymo procesas vyksta keliais etapais: 1) su oru patekusios organinės medžiagos tirpsta vandens fazėje; 2) filtruojančioje terpėje esantys mikroorganizmai absorbuoja organinius junginius; 3) vandens fazėje mikroorganizmai lengvai suskaido absorbuotas medžiagas, kartu didėja biomasė. Galutinis biologinės degradacijos produktas – mikroorganizmai – paverčia sintetines chemines medžiagas nekenksmingais mineralais ir ląstelių mase (Deshusses and Cox, 1999; Yamamoto *et al.* 2005).

1.3. Biologinio oro valymo metodo principai ir taikymas orui valyti

Biologinis oro valymo metodas pagrįstas organinius junginius oksiduojančių mikroorganizmų naudojimu. Biofiltracijos metu biofiltro įkrovoje esantys aerobiniai heterotrofai oksiduoja per įkrovą leidžiamus organinius junginius. Ant įkrovos užaugintos ar užneštos mikrobų populiacijos formuoja aktyvuotą bioplėvelę (1.6 pav.). Dėl teršalo koncentracijos gradiento tarp dviejų fazių organinis junginys iš dujinės fazės pernešamas į skystąją fazę – bioplėvelę, kur yra biodegraduojamas mikroorganizmų (Elmrini *et al.* 2004; Malhautier *et al.* 2005).



1.6 pav. Teršalų biofiltracijos proceso schema

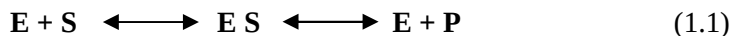
Fig. 1.6. Scheme of a pollutant biofiltration process (Ardjmand *et al.* 2005)

Biofiltruose bakterijos, mielės ir mikromicetai yra svarbiausi vykstant organinių junginių, patekusių į aplinką dėl natūralių ar pramoninių procesų, biodegradacijai. Skaidant organines medžiagas, auga nauji mikroorganizmai (katabolizmas), komponentai oksiduojasi iki anglies dioksido ir vandens (Baltrėnas ir kt. 2004). Visų gyvų organizmų gyvybiniai procesai vyksta vandenyje: plonoje vandens plėvelėje, susidariusioje ant įkrovos paviršiaus (Malhautier *et al.* 2005).

Pagrindinis mažo našumo biofiltro elementas yra įkrova. Tam, kad vyktų biologinis organinių junginių skaidymas, įkrova turi būti drėkinama biogeniniais elementais ir buferiniais tirpalais prisotintu vandeniu. Po tam tikro laiko ant įkrovos paviršiaus susiformuoja bioplėvelė. Milijardai čia esančių mikroorganizmų paverčia organinius junginius angliavandeniliu ir vandeniu (Chan 2006).

Organinės medžiagos tiekimas į biofiltrą padidina įkrovos aktyvumą. Tačiau sumažinus leidžiamo teršalo koncentraciją, įkrovos aktyvumas mažėja, kartu plonėja ant įkrovos susidaręs biomasės sluoksnis. Tam, kad bioplėvelėje vyktų organinių junginių sintezė, substratas (teršalas) turi būti perneštas iš dujinės fazės į skystąją. Dujų tirpumas bioterpėje priklauso nuo slėgio ir skysčio temperatūros. Dujų tirpumo bioterpėje priklausomybė nuo slėgio nusako Henrio dėsnis (Miller and Allen 2005), kuris formuluojamas taip: pastovioje temperatūroje dujų tirpumas terpėje yra tiesiogiai proporcingas dujų slėgiui. Keliant temperatūrą, dujų tirpumas terpėje mažėja, o mažinant – didėja (Miller and Allen 2004).

Biologinio proceso metu fermentai (E) suskaido substratą (S) iki produkto (P). Šiuo atveju fermentų vaidmenį atlieka mikroorganizmai, substratas – lakusis organinis junginys, o galutinis produktas – vanduo ir anglies dioksidas (Li and Moe 2005).



Michaelis ir Mentenas pirmieji suformulavo fermentinės kinetikos teoriją. Jie teigė, kad fermentas E kontaktuodamas su substratu S, sudaro fermento ir substrato junginį, kuris vėliau skyla į fermentą E ir produktą P. Tai leido išreikšti skaitinę priklausomybę tarp substrato koncentracijos ir fermentacijos reakcijos greičio.

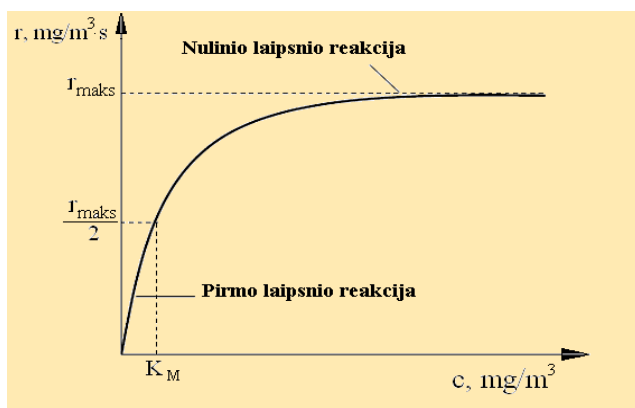
Fermentacijos reakcijos greitis išreiškiamas formule:

$$r = r_{\text{maks}} \frac{c}{K_M + c}, \text{ mg/m}^3 \cdot \text{s} \quad (1.2)$$

čia r – reakcijos greitis, $\text{mg/m}^3 \cdot \text{s}$; r_{maks} – maksimalus reakcijos greitis, kai fermentas visiškai prisotintas substrato, $\text{mg/m}^3 \cdot \text{s}$; c – substrato koncentracija, mg/m^3 ; K_M – Michaelio – Menteno konstanta, mg/m^3 .

Priklausomybė tarp fermentacijos reakcijos greičio ir substrato koncentracijos pateikta 1.7 paveiksle.

Kai substrato koncentracija žymiai didesnė už Michaelio – Menteno konstantą ($c \gg K_M$), tuomet fermentacijos reakcijos greitis yra maksimalus ($r \cong r_{\text{maks}}$) ir reakcija yra nulinio laipsnio. Reakcijos greitis nepriklauso nuo substrato koncentracijos. Kai substrato koncentracija žymiai mažesnė už Michaelio – Menteno konstantą, tuomet fermentacijos reakcijos greitis yra proporcingas substrato koncentracijai ir reakcija yra 1-ojo laipsnio $r \cong (r_{\text{maks}} \cdot c) / K_M$ (Chan and Chang 2006).



1.7 pav. Reakcijos greičio priklausomybė nuo substrato koncentracijos

Fig. 1.7. The dependence of reaction speed on substrate concentration
(Piyaprasit 2005)

Mažo našumo biofiltruose mikroorganizmų skaičius priklauso nuo sorbuojamo teršalo prigimties. Šiuo atveju substratas – tai mikroorganizmų anglies ir energijos šaltinis. Biomasės prieaugis priklauso nuo substrato koncentracijos (Wu 2003):

$$\mu = \mu_{\text{maks}} \cdot c / (K_s + c), \text{ h}^{-1} \quad (1.3)$$

čia μ – biomasės augimo greitis, h^{-1} ; μ_{maks} – maksimalus biomasės augimo greitis, h^{-1} ; c – substrato koncentracija, mg/m^3 ; K_s – Monodo konstanta, mg/m^3 .

Biomasės prieaugį ir substrato pokytį (sumažėjimą) po fermentacijos reakcijų galima išreikšti vienu parametru – substrato išeigos koeficientu $Y_{x/s}$. Jis parodo sausos biomasės ΔX prieaugį, suskaidžius tam tikrą kiekį substrato masės (S_m):

$$Y_{x/s} = \Delta X / \Delta S_m. \quad (1.4)$$

Žinant substrato išeigos koeficientą, galima rasti šalinamo substrato kiekį r_A :

$$r_A = \mu \cdot m_f / Y_{x/s}, \quad (1.5)$$

čia m_f – bioplėvelės masė ant aktyvaus sluoksnio paviršiaus (storai bioplėvelei) arba nešiklio masė (plonai bioplėvelei) (kg/m^2).

Bioplėvelės masė laikui einant kinta. Šiuos pokyčius lemia du skirtingi parametrai. Tai mikroorganizmų masė bioplėvelėje ir aerodinaminių procesų įtaka biomasės skaidymui. Kitaip tariant, dalis biomasės prarandama dėl filtrė vykstančių aerodinaminių procesų. Tuomet biomasės augimo greitis yra išreiškiamas formule:

$$dm_f / dt = (\mu - b) \cdot m_f, \quad (1.6)$$

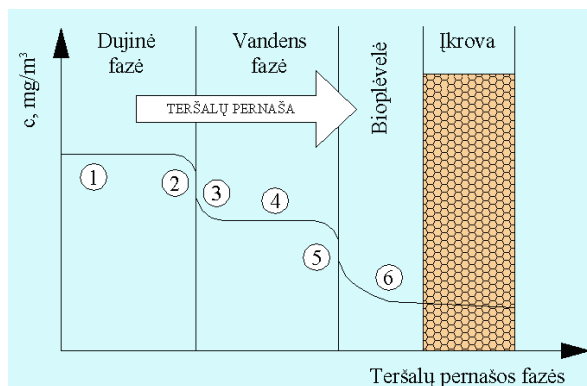
čia b – teršalo skaidymo greitis, h^{-1} ; t – teršalo pernašos laikas, h .

Medžiagos (substrato) pernaša gali būti išreikšta difuzijos koeficientu ir užrašoma taip:

$$j = -D \cdot dc / dl, \quad (1.7)$$

čia j – masės pernaša, $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$; D – difuzijos koeficientas, m^2/s ; c – substrato koncentracija, mg/m^3 ; l – pernašos atstumas, m .

1.8 paveiksle pateiktos teršalų pernašos fazės. Teršalo difuzijai iš dujinės į skystąją fazę užtenka 6 pernašos žingsnių (Piyaprasit 2005):



1.8 pav. Teršalų pernašos fazės: 1 – pernaša dujinėje fazėje; 2 – pernaša nuo ribinės dujinės iki skystosios fazės; 3 – pernaša nuo pradinės skystosios fazės iki skystosios fazės; 4 – pernaša skystojoje fazėje; 5 – pernaša nuo ribinės skystosios fazės iki pradinės bioplėvelės fazės; 6 – teršalo pernaša ir reakcija bioplėvelėje

Fig. 1.8. Pollutant transport phases: 1 – transport in a gaseous phase;
2 – transport from the limiting gaseous to the fluid phase; 3 – transport from the initial fluid phase to the fluid phase; 4 – transport in the fluid phase;
5 – transport from the limiting fluid phase to the initial biofilm phase;
6 – pollutant transport and reaction in the biofilm
(Piyaprasit 2005)

Įvertinant įkrovos poringumą ir frakciją, substrato pernašos koeficientas gali būti labai mažas arba iš vis neįvertintas. Tačiau šis koeficientas bioplėvelėje yra mažesnis už pernašos koeficientą skystojoje fazėje (Piyaprasit 2005).

Mažo našumo biofiltrai naudojami tiek hidrofiliniams, gerai vandenyje tirpstantiems, tiek hidrofobiniams, blogai vandenyje tirpstantiems, organiniams junginiams skaidyti. Hidrofiliniams organiniams junginiams priklauso tokios LOJ grupės, kaip alkoholiai, eteriai ir ketonai (Deshusses and Johnson 2000). Dujų tirpumą skystyje įvertinantis Henrio koeficientas šios rūšies junginiams yra žemas ($<0,01$) (Cai *et al.* 2006). Hidrofiliniams organiniams junginiams priklauso ir tokie teršalai kaip acetonas ir butanolis, kurių emisijos į aplinkos orą yra vienos didžiausių (Alonso *et al.* 1998). Hidrofobiniams organiniams junginiams, kurių Henrio koeficientas yra aukštas, priklauso alkanai aromatiniai junginiai, tokie kaip toluenas (Cai *et al.* 2006; Canet *et al.* 2007).

Biologinio valymo įrenginiai visų pirma Vokietijoje sulaukė didelio pasisekimo ir buvo pripažinti kaip perspektyvūs ir nedidelių ekonominių sąnaudų reikalaujantys įrenginiai (Malthautier *et al.* 2005).

Biofiltracija turi daug privalumų valant orą nuo lakiųjų organinių junginių, palyginti su kitais valymo metodais (Devinny *et al.* 1999; Jeong *et al.* 2008):

- valymo metodas yra ekonomiškai;
- žematemperatūre oksidacija ir didelis įkrovos drėgnis sumažina gaisro pavojų, šiuo požiūriu užtikrinama saugi įrenginio eksploatacija;
- palyginti nedidelis įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas. Jis yra gerokai mažesnis už naudojamų katalitinių ar regeneracinių šiluminių oksidatorių pasipriešinimą;
- aukštas valymo efektyvumas;
- tai yra ekologiškas valymo įrenginys, oksidacijos procesų metu į aplinką išskiriantis nekenksmingus produktus, tokius kaip CO₂ ir vanduo;
- palyginti mažos eksploatacinės išlaidos bei paprasta ir pigi įrenginio priežiūra. Jame yra mažai judančių dalių, todėl gana ilgą laiką tarpą nereikia jų keisti. Taip sutaupoma nemažai lėšų, supaprastinama valymo įrenginio priežiūra.

Biologinis oro valymas iš visų organinių junginių valymo metodų yra pigiausias, todėl jį ekonomiškai naudinga taikyti lakiųjų organinių junginių ir odorantų šalinimui įmonėse, kur į aplinkos orą išsiskiria nedidelės šių teršalų koncentracijos (Schwarz *et al.* 2001).

Atsižvelgus į biofiltrų privalumus, šis metodas gali būti taikomas dažų, tekstilės, naftos perdirbimo, baldų pramonės ir kitose įmonėse, kur į aplinkos orą išmetama lakiųjų organinių junginių (Hornos *et al.* 2007). Be to, biofiltracijos metodas gali būti taikomas ne tik organiniams junginiams skaidyti, bet ir rūgimo, puvimo ir kitų procesų metu išsiskiriantiems nemaloniems kvapams šalinti. Naudojant atitinkamas įkrovas ir mikroorganizmų kultūras, biofiltrus galima taikyti nuotekų valyklose, gyvulininkystės kompleksuose, skerdyklose susidarantiems kvapams šalinti (Reza *et al.* 2005). Skaidant sieros vandeniliu užterštą orą, pasiekiamas 90–99,9 % biofiltro valymo efektyvumas (Goncalves and Govind 2009; Xiaobing *et al.* 2003).

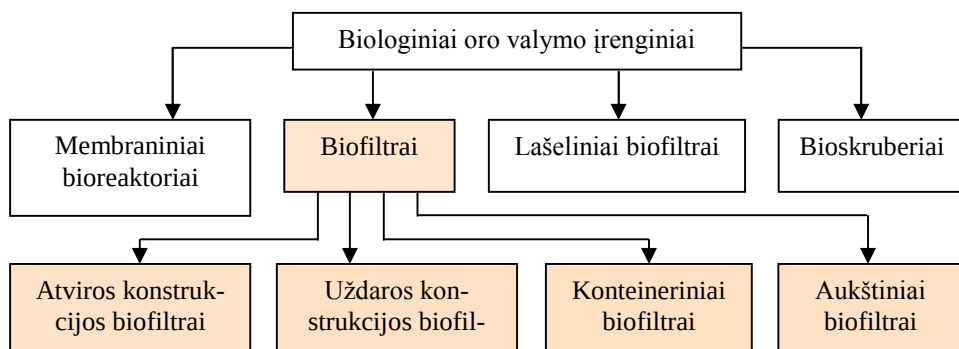
1.4. Biologinių oro valymo įrenginių konstrukcijų analizė

Pagrindinis mažo našumo biologinių oro valymo įrenginių elementas yra filtruojančioji terpė – įkrova, kurią gali sudaryti organinės ar neorganinės medžiagos. Įkrova aktyvinama, kai drėkinama biogeninių elementų prisotintu vandeniu.

Oro valymo metu leidžiamo teršalo molekulės lėtai slenka per įkrovą. Perneštos iš dujinės į skystąją fazę ant įkrovos susidariusioje bioplėvelėje vykstančių fermentacijos procesų metu yra suskaidomos mikroorganizmų (Engesser and Plagemeier 2000).

Skirtingos konstrukcijos biologinius oro valymo įrenginius gana plačiai tyrinėjo vokiečių mokslininkai Hubner, Maier ir Sabo (Chen *et al.* 2004).

Biologiniai oro valymo įrenginiai klasifikuojami į keturias pagrindines klases: membraninius bioreaktorių, lašelinį biofiltrą, biofiltrą ir bioskruberį (Angerer 1999; Neves *et al.* 2006). Biologinių oro valymo įrenginių konstrukcijos gali skirtis dėl naudojamos įkrovos rūšies. Literatūroje aprašomuose įrenginiuose naudojama įkrova gali būti klasifikuojama į stacionarią, kai mikroorganizmai auga ant kietos įkrovos, ir judrią – aktyvųjį dumblą (Neves *et al.* 2006).



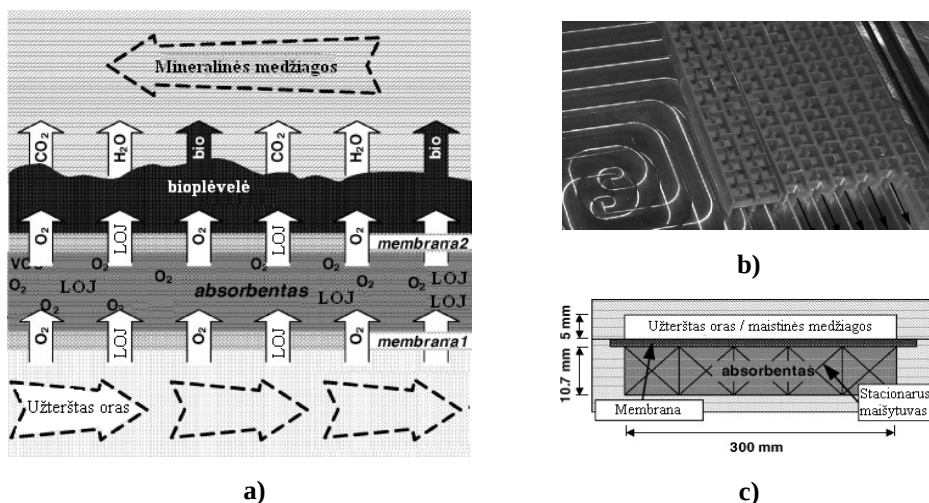
1.9 pav. Biologiniai oro valymo įrenginiai

Fig. 1.9. Biological air treatment devices (Sercu *et al.* 2006)

Membrana – pagrindinis membraninių bioreaktorių elementas. Membrana gali būti pagaminta iš poringų organinių (polimerai) ir neorganinių (keramikos, metalo, polietileno) medžiagų (Chen *et al.* 2004; Zein *et al.* 2004). Į įrenginį tiekiami organiniai junginiai tolygiai išsklaidomi membranoje, skiriančioje dujinę fazę nuo absorbento (Syron and Casey 2008).

Pratekėję membraną teršalai sorbuojami absorbente. Pernešti į skystąją fazę teršalai skaidomi mikroorganizmų. Kita membrana (1.10a pav.) skiria absorbentą nuo mineralinės terpės. Mineralinėje terpėje augantys aerobiniai mikroorganizmai kaupiasi ant membranos ir formuoja bioplėvelę, kurioje teršalai yra degraduojami. Organiniai junginiai ir deguonis didina ant membranos susidariusios bioplėvelės aktyvumą. Kita vertus, bioplėvelė aktyvinama maistinėmis medžiagomis. Membraniniai bioreaktoriai taikomi gerai vandenyje tirpiems organiniams

junginiams šalinti. Membraninių bioreaktorių aerodinaminis pasipriešinimas priklauso nuo membranų sekcijų skaičiaus. Kai membranų sekcijų aukštis yra 0,6 m, įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas siekia 1200 Pa. Membraniniai bioreaktoriai naudojami didelėms teršalų koncentracijoms ($5,0\text{--}10\text{ g/m}^3$) šalinti (Studer and Rudolf von Rohr 2008).



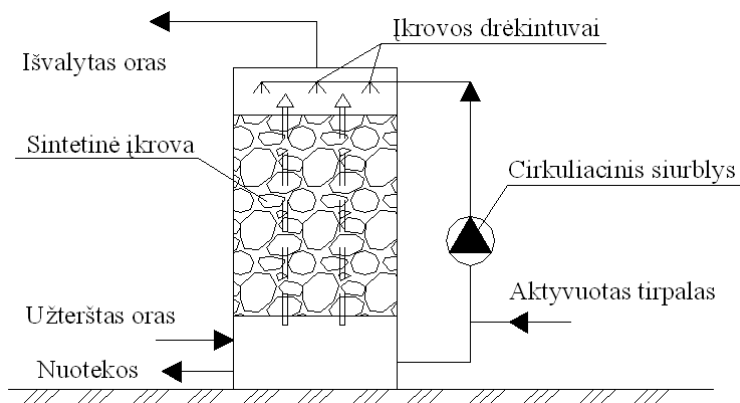
1.10 pav. Membraninio bioreaktoriaus elementai: a) LOJ šalinimo principinė schema, b) oro srauto tekėjimo membrana kanalai, c) membranų sekcijos schema

Fig. 1.10. Elements of a membrane bioreactor: a) principle scheme of VOC removal, b) channels of airflow running along a membrane, c) scheme of a membrane section (Studer and Rudolf von Rohr 2008)

Pastaraisiais metais lakiųjų organinių junginių emisijų į aplinkos orą mažinimui pradėti naudoti lašeliniai biofiltrai (Lu *et al.* 2000; Lu *et al.* 2002; Cox and Deshusses 2002). Siekiant padidinti įkrovos paviršiaus plotą ir ilgaamžiškumą lašeliniai biofiltrai užkrauti sintetinė, neorganinės kilmės įkrova, kuri drėkinama aktyvuotu, maistinių medžiagų prisotintu tirpalu (Chang and Lu 2003; Liu *et al.* 2007).

Mikroorganizmų aktyvumui palaikyti įkrova yra nuolat drėkinama užpurškiant ją aktyvintais vandens lašeliais. Aktyvintą tirpalą į įrenginį tiekia cirkuliacinis siurblys (1.11 pav.). Lokieji organiniai junginiai absorbuojami ant įkrovos paviršiaus susidariusioje bioplėvelėje, kur yra suskaidomi mikroorganizmų. Pratekėjęs įkrovą išvalytas oras pašalinamas iš biofiltro (Jantschak *et al.* 2004). La-

šeliniai biofiltrai taikomi orui valyti nuo didelių (daugiau nei 2000 mg/m^3) teršalų koncentracijų (Sercu *et al.* 2006, Liu *et al.* 2007).



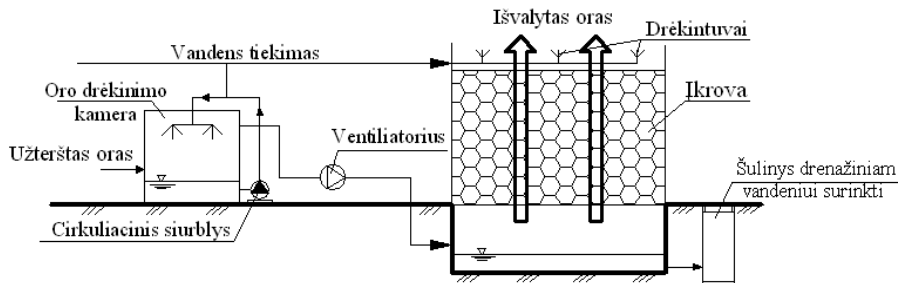
1.11 pav. Lašelinio biofiltro schema

Fig. 1.11. Scheme of a biotrickling filter (Jantschak *et al.* 2004)

Jungtinėse Amerikos Valstijose paplitę atviros konstrukcijos biofiltrai. Dėl mažo – $0,05 \text{ m/s}$ – oro srauto greičio šie biofiltrai užima daug vietos, todėl dažniausiai įrenginėjami lauke. Jų konstrukcija yra paprasta. Tai natūraliame grunte iškasta tranšėja, kurios dugne ant $0,3\text{--}0,8 \text{ m}$ storio žvirgždo ar skaldos sluoksnio dedami perforuoti dujas praleidžiantys vamzdžiai. Ant viršaus pilama filtravimo medžiaga (Piyaprasit 2005).

Atviros konstrukcijos biofiltrai (1.12 pav.) dažniausiai būna užkrauti organinės kilmės įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, medžių žievės, komposto, durpių. Oro srautas, prieš patenkant į įkrovą, sudrėkinamas iki $80\text{--}90 \%$ drėkinimo kameroje ir tik paskui tiekiamas į filtruojantį sluoksnį. Mikrobiologiniam aktyvumui palaikyti pati įkrova drėkinama buferiniu tirpalu ir biogeniniais elementais prisotintu vandeniu. Ant įkrovos susidariusioje bioplėvelėje esantys mikroorganizmai pasisavina ne tik į įrenginį tiekiamus absorbuotus organinius junginius, bet ir ardo įkrovą, iš jos pasisavindami anglies molekules. Sintezės metu įkrova praranda savo fizines savybes: mažėja jos poringumas, didėja aerodinaminis pasipriešinimas. Siekiant pagerinti įrenginio valymo efektyvumą būtina dažnai keisti įkrovą. Šios konstrukcijos biofiltruose įkrova keičiama kartą per $2\text{--}5$ metus (Whalen *et al.* 1990). Siekiant sutaupyti vietos, biofiltrai gali būti įrengti ant įmonių plokščios konstrukcijos stogų. Prieš tai būtina sutvirtinti stogą laikančias konstrukcijas, nes biofiltro įkrovos apkrova gali siekti $500\text{--}1000 \text{ kg/m}^2$.

Oras per filtruojantį sluoksnį gali judėti iš apačios į viršų, ir atvirkščiai. Oras turi tekėti per visą įkrovos sluoksnį, todėl būtina atsižvelgti į sluoksnio storį bei drėgnį.



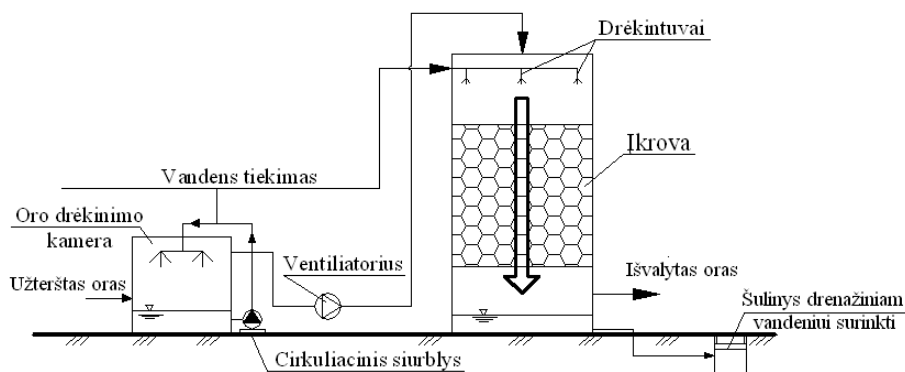
1.12 pav. Atviros konstrukcijos biofiltras

Fig. 1.12. An open-structure biofilter (Piyaprasit 2005)

Optimalus įkrovos drėgnis yra 40–60 %. Kai drėgnis nepakankamas, įkrova pradeda trūkinėti, perdžiūva, o tai pasunkina oro tekėjimą ir sumažina mikroorganizmų aktyvumą. Todėl įkrova gali prarasti filtravimo savybes. Siekiant išvengti perdžiūvimo įkrova drėkinama – ji apipurškiama biogeninių elementų prisotintu vandeniu. Kai yra didelis drėgnis filtruojančio sluoksnio viduje atsiranda anaerobinių sričių, kurios padidina įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą. Tai sumažina teršalų sąveikos su mikroorganizmais laiką, o kartu ir įrenginio valymo efektyvumą (Piyaprasit 2005).

Mažo našumo uždaros konstrukcijos biofiltrai yra pranašesni už atviros konstrukcijos filtrus. Visų pirma jie yra mažesni, užima mažiau vietos. Meteorologinės ar aplinkos sąlygos daro mažesnę įtaką įrenginio darbui ir jame vykstantiems biofiltracijos procesams. Uždaros konstrukcijos biofiltruose patiriama mažesnių drėgmės nuostolių. 1.13 paveiksle pateiktame biofiltre įrengta užteršto oro drėkinimo kamera, kurioje oras sudrėkinamas iki 95 % santykinės drėgmės. Paskui sudrėkintas oras nukreipiamas į aktyvintą įkrovą. Papildomai įkrova drėkinama biogeninių elementų prisotintu vandeniu ir buferiniais tirpalais. 1.12 ir 1.13 paveiksluose pateiktų biofiltrų konstrukcijos nėra sudėtingos. Taip užtikrinama paprasta ir mažai ekonominių sąnaudų reikalaujanti įrenginio eksploatacija. Tačiau šių konstrukcijų filtruose yra gana storas 0,8 m aukščio įkrovos sluoksnis, kuriame dažnai susidaro „suspaustų“ zonų. Taip sumažinamas filtruojančio paviršiaus plotas, bioterpėje pradeda vystytis anaerobiniai mikroorganizmai.

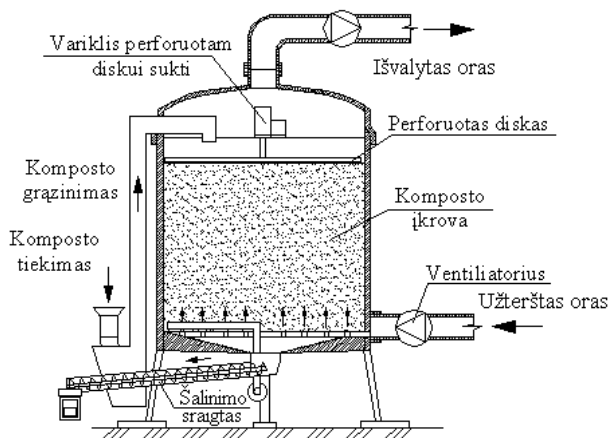
Vokietijoje įsikūrusi firma „Gerburg Weis“ sukonstravo biofiltrą, kur priešais įrenginyje tekančią oro srautą, kuris teka iš apačios į viršų, priešpriešiais tiekiamas susmulkintų perdirbtų atliekų ir šlamo kompostas (1.14 pav.).



1.13 pav. Uždaros konstrukcijos biofiltras

Fig. 1.13. A close-structure biofilter (Piyaprasit 2005)

Kompostas kaupiasi filtro dugne, iš kurio konvejeriu vėl tiekiamas į viršutinę įrenginio dalį. Toks judantis biologiškai aktyvus kompostas užtikrina tolygų oro srauto tekėjimą per filtruojančią terpę, be to, išvengiama didelio įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo. Oro valymo nuo alkanų, tolueno, angliavandenilio efektyvumas įrenginyje siekia 96,7–99,9 %. Tačiau tokio tipo biofiltrų gana didelės energetinės sąnaudos (Sercu *et al.* 2005).

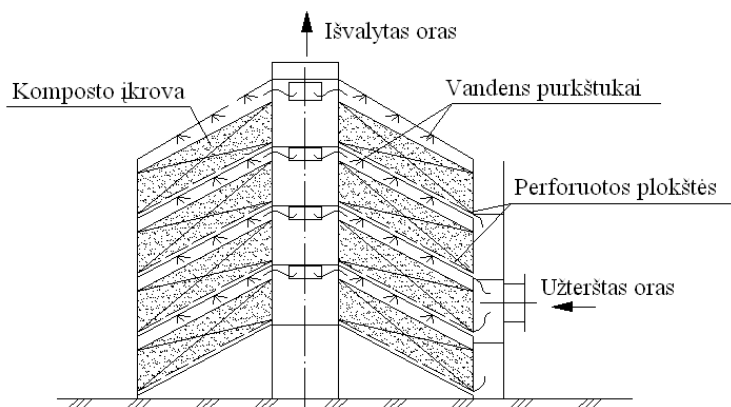


1.14 pav. Biofiltras su judančia įkrova

Fig. 1.14. A biofilter with a moving charge (Piyaprasit 2005)

Panašūs biofiltrai naudojami orui valyti nuo alifatinių rūgščių, spirito, aldehydų ir angliavandenilių. Filtrų mitybinę terpę sudaro aktyvusis dumblas. Cianido detoksikacijai pramonės įmonėse gali būti taikomas biologinis valymo metodas naudojant įvairius agentus: nuo aktyviojo dumblo iki specifinių fermentų, gebančių skaidyti cianidus. *Bacillus stearothermophilus* rūšies bakterijos katalizuoja cianidą į tiocianidą, o vėliau jis hidrolizės metu gali suskilti iki formamido (Ruokojavari *et al.* 2001).

Tam, kad teršalai ir juos skaidantys mikroorganizmai tolygiai pasiskirstytų visame įkrovos paviršiuje projektuojami kelių aukštų (aukštiniai) arba neaukšti, tačiau didesnę plotą užimantys biofiltrai. Tokiuose įrenginiuose oras valomas keliomis pakopomis (Li *et al.* 2003; Ruokojavari *et al.* 2001; Sercu *et al.* 2005). Aukštinių biofiltrų kasetės įrengtos viena virš kitos ir atskirtos metaliniais sieteliais. Jie užima mažiau vietos ir gali būti įrengiami aukštesnėse patalpose (1.15, 1.16 pav.).

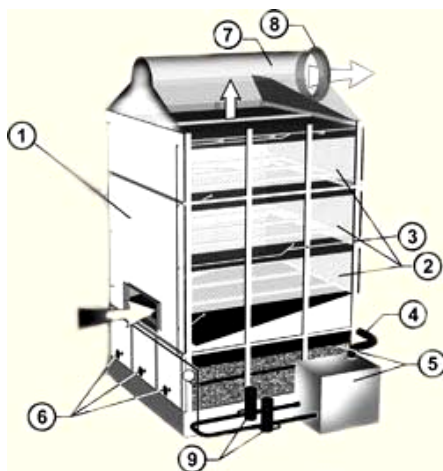


1.15 pav. Biofiltras su keliais aukštais užkrauta įkrova

Fig. 1.15. A biofilter with a charge charged in several heights
(Piyaprasit 2005)

1.15 paveiksle pateiktos konstrukcijos biofiltrą sudaro 4 vienas virš kito išsidėstę ir vienas nuo kito metalinėmis plokštelėmis atskirti įkrovos sluoksniai. Įkrovą, sudarytą iš komposto, laiko po ja įrengti diskiniai sietai. Užterštas oro srautas nukreipiamas atskirai po kiekvienu įkrovos sluoksniu, kuris drėkinamas filtre įrengtais vandens purkštukais. Pratekėjęs filtruojantį sluoksnį išvalytas oras nukreipiamas į centrinę filtro dalį, kur per šalinimo ortakį yra pašalinamas iš įrenginio. Uždaros konstrukcijos biofiltruose didinant tiekiamo teršalo garų koncentraciją, valymo efektyvumas mažėja (Zigmontiene and Vaiskunaite 2005).

1.16 paveiksle pateiktas aukštinis trijų kasečių mažo našumo biofiltras. Filtras užkrautas dirbtinės kilmės įkrova ant kurios užnešami mikroorganizmai. Mikroorganizmų ir bioterpės parinkimas priklauso nuo į įrenginį tiekiamo teršalo prigimties bei koncentracijos.



1.16 pav. Aukštinis biofiltras: 1 — įrenginio korpusas; 2 — įkrovos kasetės; 3 — įkrovos drėkinimo sistema; 4 — užteršto vandens šalinimo vamzdis; 5 — biogeninių elementų prisotinto vandens rezervuaras; 6 — biogeninių elementų paskirstymo vamzdžiai; 7 — biofiltro dangtis; 8 — oro šalinimo anga; 9 — siurbliukai įkrovai drėkinti

Fig. 1.16. High-scale biofilter: 1 — device's body; 2 — cassettes for a charge; 3 — charge humidification system; 4 — polluted water discharge pipe; 5 — water reservoir saturated with biogenic elements; 6 — biogenic element distribution pipes; 7 — biofilter cover; 8 — air discharge vent; 9 — pumps for charge humidification (Установка биологической... 2006)

Suminė angliavandenilių koncentracija ore turi siekti nuo 400 iki 7000 mg/m³. Jei į įrenginį tiekiamas oras papildomai užterštas kietosiomis dalelėmis, kurių koncentracija viršija 5 mg/m³, prieš biofiltrą būtina įrengti dulkių gaudytuvą. Biofiltre nėra oro ar bioterpės šildymo sistemos, todėl jis gali būti eksploatuojamas patalpose, kuriose oro temperatūra gali svyruoti nuo 18 iki 35 °C. Optimali darbinės dalies temperatūra yra 28 °C. Ant įkrovos, kurios aerodinaminis pasipriešinimas siekia 1200 Pa, užneštų mikroorganizmų gyvybingumui užtikrinti biofiltre įrengta drėkinimo sistema, palaikanti iki 60 % įkrovos drėgnį. Išvalytas oras iš įrenginio pašalinamas per oro šalinimo angą. Biofiltro našumas nėra didelis, jis siekia 7500 m³/h.

Kai per įkrovą leidžiamo oro srauto greitis yra 0,5 m/s, įrenginio valymo veiksmingumas, priklausomai nuo teršalo prigimties ir koncentracijos, gali siekti 70–85 %. Biofiltras gali būti taikomas chemijos, dažymo ir lakavimo, baldų, medienos apdirbimo, maisto pramonės įmonėse į aplinkos orą išsiskiriantiems organiniams junginiams šalinti (Установка биологической... 2006). Orui valyti nuo benzeno, tolueno, ksileno biofiltrai gali būti naudojami naftos perdirbimo įmonėse (Shim *et al.* 2006).



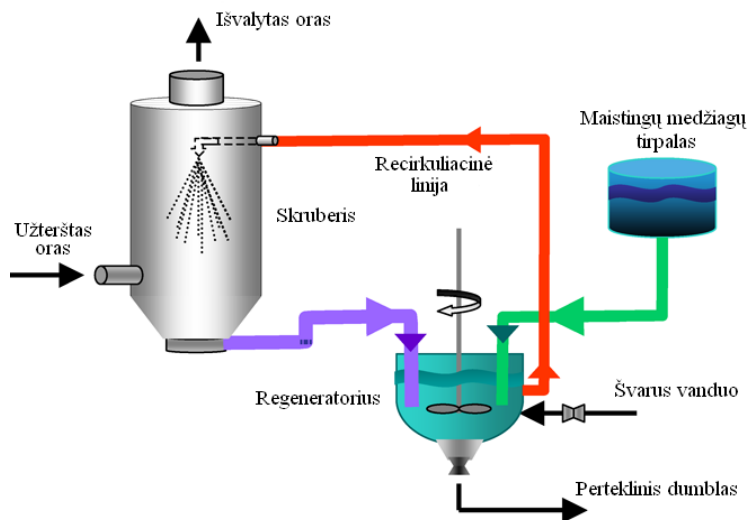
1.17 pav. Konteinerinio tipo biofiltras

Fig. 1.17. Container-type biofilter (Biofilter for... 2006)

Didesniems oro srautams valyti nuo lakiųjų organinių junginių dažniausiai taikomi konteinerinio tipo biofiltrai. Apatinėje konteinerio dalyje įrengti oro srauto skirstytuvai, kurie užtikrina tolygų oro srauto pasiskirstymą per visą biofiltro plotą. Konteinerinio tipo biofiltrai yra patogūs, tarpusavyje galima sujungti kelis biofiltrus. Siekiant sutaupyti ploto, juos galima krauti vieną ant kito. Konteineriniai biofiltrai gali būti naudojami nuotekų valyklose, kompostuojant, maisto, popieriaus pramonėje išsiskiriantiems deodorantams šalinti. Taip pat biofiltrai plačiai naudojami metalo apdirbimo, liejimo, tekstilės, chemijos pramonėje technologinių procesų metu išsiskiriantiems organiniams junginiams skaidyti. Orui filtruoti nuo lakiųjų organinių junginių dažniausiai naudojamos įkrovos, sudarytos iš komposto, medžio žievių, medienos skiedrų, durpių.

Gera vandenyje tirpiems organiniams junginiams, tokiems kaip benzenas, skaidyti naudojami bioskruberiai (Nielsen *et al.* 2005). Bioskruberiai, palyginti su biofiltrais, užima mažiau vietos, tačiau jų yra gana didelis aukštis, kuris gali siekti iki kelių metrų. Bioskruberių energijos sąnaudos yra gerokai didesnės už biofiltrų, nes jų valymo principas pagrįstas aktyvinto vandens, aktyviojo dumblo naudojimu (1.18 pav.). Mikroorganizmų skaičiui skystoje terpėje palaikyti dalis

aktyvinto vandens filtre įrengtu cirkuliaciniu siurbliu grąžinama atgal į įrenginį (Neves *et al.* 2006). Bioskruberiai dažniausiai naudojami orui valyti nuo gerai vandenyje tirpstančių organinių junginių. Bioskruberių našumas yra didesnis už biofiltrų, be to, jų gana aukštas valymo efektyvumas. Pavyzdžiui, metalurgijos pramonėje įrengto bioskruberio našumas siekia 120 000 m³/h, o valymo efektyvumas – nuo 75 iki 85 % (Neves *et al.* 2006). 99 % valymo efektyvumas gautas aktyviuoju dumbly skaidant etilacetatą (Zigmontienė 2007). Į įrenginį ventiliatoriumi pučiamas užterštas oro srautas, kuris drėkinamas aktyvintais vandens lašeliais. Į vandenį mikrobiologiniam aktyvumui palaikyti tolydžio įterpiamas biologinis preparatas. Taip užtikrinamas veiksmingesnis organinių junginių skaidymas. Tačiau šių įrenginių palyginus su biofiltrais, yra didesnės eksploatacinės sąnaudos, nes nuolat veikia vandens cirkuliacinis siurblys, orapūtės ir susidariusio šlako šalintuvai (Neves *et al.* 2006).



1.18 pav. Bioskruberio schema

Fig. 1.18. Bioscrubber scheme (Neves *et al.* 2006)

Gana perspektyviais biologinio oro valymo metodo įrenginiais laikomi bioreaktoriai su plaunamuoju sluoksniu. Šie įrenginiai taip turi aukštą išvalymo laipsnį, yra našūs (apie 5000 m³/h). Šio tipo valymo įrenginiai yra labai efektyvūs orui valyti gyvulininkystės įmonėse. Kai bioreaktoriaus našumas – 10 000 m³/h, įrenginio valymo efektyvumas su aktyvintąja anglimi nuo acetono, butanolio, aldehido, etilacetato gali siekti apie 90 % (Nielsen *et al.* 2005).

1.5. Biologiniam oro valymui naudojamos įkrovos ir jų savybės

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, jas būtina laistyti biogeninių elementų (mineralinių druskų) prisotintu vandeniu, siekiant užtikrinti aukštą mikroorganizmų aktyvumą (Chan 2006).

Mažo našumo biofiltro įkrovą sudaro kompostas, dirva, samanų, plastiko ar medienos skiedros (Mohseni and Allen 2000). Taip pat biologiniam oro valymui gali būti taikomos aktyvintos pušų žievės (Vaiškūnaitė 2004). Biofiltruose gali būti naudojamos įvairios kilmės įkrovos. Bet kokia organinė medžiaga, turinti reikiamą struktūrą ir kitų reikalingų savybių, gali būti naudojama biologiniam oro valymui. Svarbiausios fizinės savybės, kurias turi turėti įkrova, yra: didelis paviršiaus plotas ir poringa struktūra, reikalingi mikroorganizmams vystytis, mažos kapitalinės išlaidos, mažas mechaninis krūvis siekiant išvengti didelio slėgio, geros drėgmės sorbcinės savybės, išlaikytas įkrovos homogeniškumas, kad drėgmė tolygiai pasiskirstytų per visą įkrovos paviršiaus plotą, užtikrintas kuo ilgesnis įkrovos naudojimo laikas (Wani *et al.* 1998; Shareefdeen *et al.* 2002).

Dažniausiai biologiniam oro valymui nuo organinių ir neorganinių cheminių teršalų naudojamos durpės (Oh and Choi 2000; Zilli *et al.* 2001), dirvožemis, kompostas ar jų mišiniai (Delhomenie *et al.* 2002). Pavyzdžiui, durpes naudojant orui valyti nuo sieros vandenilio, gautas 97–99 % biofiltro valymo efektyvumas (Hartikainen *et al.* 2002). Orui valyti gali būti naudojamos ir tokios įkrovos, kaip celiuliozės granulės ar kokoso drožlės (Günther 2005). Taip pat pasaulyje plačiai naudojamos medienos pjuvenos, žievės, įvairios smulkintos atliekos, džiovintas nuotekų dumblas (Shareefdeen *et al.* 2003). Tačiau šios įkrovos naudojamos neilgai ir turi būti keičiamos jau po kelių metų. Dauguma bioįkrovų naudojamos 3–5 metus (Tymczyna *et al.* 2004). Pastaruoju dešimtmečiu aktyviai ieškoma būdų, naudojant neorganinės kilmės įkrovas, ilginti biofiltro įkrovos naudojimo laiką. Siekiant užtikrinti didelį įrenginio valymo efektyvumą ir ilgaamžiškumą, organinės kilmės įkrovos maišomos su neorganinės kilmės įkrovomis, tokiomis kaip perlitas, poliuretanai, aktyvintoji anglis ir kt. (Yamamoto *et al.* 2005; Aizpuru *et al.* 2003). JAV mokslininkai orui valyti nuo etilacetato ir tolueno naudojo medienos skiedrų ir komposto mišinius. Taip pat siekdami sumažinti aerodinaminę įkrovos pasipriešinimą ir pailginti jos naudojimo laiką, medienos skiedras maišė su polistireno rutuliukais (Deshusses and Johnson 1999; Sheridan *et al.* 2002). Šiuo metu biologiniam oro valymui plačiai naudojamos neorganinės kilmės įkrovos (1.19 pav.).

Lakiesiems organiniams junginiams skaidyti amerikiečių mokslininkai pasiūlė taikyti susmulkintas sukietėjusios lavos granules (Chitwood and Devinny 2001).

Vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių įkrovos parinkimą, yra jos aerodinaminis pasipriešinimas, kuris tiesiogiai susijęs su įkrovos poringumu ir drėgniu. Padidinus įkrovos drėgnį ir sumažinus frakciją, gaunamas didesnis įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas. Taigi galima teigti, kad filtro įkrovos parinkimas ir jos drėkinimas yra lemiami veiksniai, turintys įtakos filtro valymo efektyvumui ir suvartojamos energijos kiekiui. Įprastiniam biofiltrui slėgio nuostoliai gali siekti nuo 1 iki 10 hPa.



1.19 pav. Biologiniam oro valymui naudojamos dirbtinės kilmės įkrovos

Fig. 1.19. Artificial-origin charges used for biological air treatment (Chitwood and Devinny 2001; Park 2003; Biofilters medium... 2005)

Ceolito taikymas orui valyti nuo lakiųjų organinių junginių. Ceolitai priskiriami karkasinės struktūros kristalinių aliumosilikatų struktūrai su atvira gardele, sudaryta iš $(Al, Si)O_4$ tetraedrų, ir klasifikuojami atsižvelgiant į $SiO_2:Al_2O_3$ san-

tykį. Kuo šis santykis yra didesnis, tuo ceolitas atsparesnis rūgštims (Baltrėnas ir Paliulis 2002; Cheng and Reinhard 2006).

Struktūriniai ceolitų tipai žymimi lotyniškosiomis raidėmis A, X, Y, K, L, P ir kt. (pirma dalis parodo vyraujančią katijoną, o antra dalis – kristalinės gardelės tipą). Atsižvelgiant į molinį santykį, t. y. n ($n = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), ceolitai skirstomi į tris tipus (Baltrėnas ir Paliulis 2002):

A tipas $n = 1,8\text{--}2,0$ įėjimo kanalų angų skersmuo iki 0,5 nm,

X tipas $n = 2,2\text{--}3,0$ įėjimo kanalų angų skersmuo iki 1,0 nm,

Y tipas $n = 3,0\text{--}6,0$ įėjimo kanalų angų skersmuo iki 1,0 nm.

Idealizuota ceolitų formulė išreikšta moliniais oksidų santykiais:

$$X \cdot \text{M}_2\text{O}(1 - X)\text{MOAl}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}, \quad (1.8)$$

čia X – koeficientas; M – vienvaleintis metalas; n – SiO_2 molekulių skaičius, m – apytikris vandens molekulių skaičius (n kinta nuo 2 iki 12).

Gamtinių ceolitų savybių tyrimai parodė, kad jie, kaip ir sintetiniai, turi molekulių sietų savybių, didelę sorbcijos, esant mažiems slėgiams, galią, be to, ji mažai priklauso nuo temperatūros 10–150 °C (Luo and Lindsey 2006). Būtent šios savybės leido panaudoti gamtinius ceolitus gamybinėms išlakoms, išsiskiriančioms į atmosferą, valyti. Ceolitai, kaip selektyvūs adsorbentai, gali būti naudojami kenksmingų išlakų kenksmingumui šalinti, dujiniams mišiniams perskirti. Gamtiniai ceolitai, kaip ir sintetiniai, pasižymi didele sorbcijos galia.

Ceolitų privalumas yra taisyklinga jo struktūra, didelis vidinis savitasis paviršius (apie 600–800 m²/g), vienodo dydžio poros, geras terminis stabilumas (Jorio *et al.* 2006).

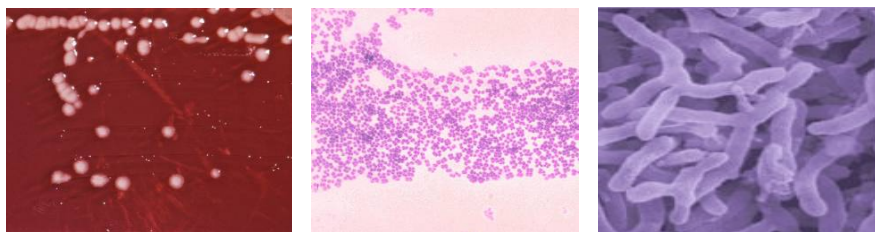
1.6. Biofiltruose lakiuosius organinius junginius oksiduojančių mikroorganizmų vertinimas

Lakiuosius organinius junginius (LOJ) asimiliuojantys mikroorganizmai aplinkoje itin paplitę, nes ir organiniai junginiai čia aptinkami dažnai. Jų šaltinis gamtoje yra ne vien į aplinką patekę angliavandenilių produktai ar sintetinės medžiagos (pesticidai, herbicidai, tirpikliai). Angliavandeniliai įeina į gyvųjų organizmų sudėtį, juos augalai ir mikroorganizmai nuolat sintetina kaip antrinius metabolitus.

LOJ atsparumas cheminiam ir biologiniam poveikiui skiriasi. Parafinai atsparūs cheminiam poveikiui, tačiau labilūs fermentinei oksidacijai. Cikloparafinai ir aromatiniai angliavandeniliai greitai oksiduojasi ir neatsparūs organinius junginius oksiduojančių mikroorganizmų fermentiniam poveikiui.

Geba naudoti organinių junginių komponentus kaip energijos ir anglies šaltinius būdinga ne kurioms nors siauros specializacijos formoms, o daugelio mikroorganizmų grupių atstovams. Angliavandenilius oksiduojantys mikroorganizmai yra svarbi anglies apytakos cikle dalyvaujanti organizmų grupė. Reikšmingiausi šioje grupėje yra bakterijos ir mikromicetai. Tarp jų didžiausią dalį sudaro bakterijos (1.20 pav.). Jos geba paimti iš aplinkos įvairius angliavandenilius, jų trumpas gyvenimo ciklas. Dažnai aptinkamose gentyse *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, *Rhodococcus*, *Streptococcus* yra bakterijų, gebančių oksiduoti angliavandenilius (Malthautier et al. 2005; Tymczyna et al. 2004; Kiared et al. 1997). Angliavandenilius skaldo daugiau nei 70 genčių mikroorganizmai (Jankevičius ir Liužinas 2003).

Pseudomonas genties bakterijų yra ant įvairių augalų, jų žiedadulkėse, augalinės kilmės substratuose (šakose, kelmuose). Šios genties bakterijos ardo organinės kilmės medžiagas, išskirdamos fermentus (antrinius metabolitus) – arginindehidrolazę (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*), dekarboksilazę (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*) (Tekorienė ir Lugauskas 2001). *Pseudomonas* genties bakterijos gali būti kultivuojamos organinės ir neorganinės kilmės įkrovoje (Jang et al. 2004).



Pseudomonas aeruginosa *Micrococcus mucilaginosus* *Rhodococcus sp.*

1.20 pav. Organinius junginius skaidančių bakterijų mikroskopinis vaizdas

Fig. 1.20. Microscopic view of the bacteria degrading organic compounds (*Pseudomonas aeruginosa*... 2006; *Micrococcus mucilaginosus*... 2006; *Rhodococcus sp.*... 2006)

Rhodococcus bakterijos ląstelės sienelės hidrofobizuoja sintetindamos specialius junginius. Angliavandeniliai į ląstelę patenka pasyvios difuzijos būdu. Jie drėkina ląstelės sienelę ir pasiekia membranos fermentus.

Rhodococcus bakterijos atsparios nepalankiems aplinkos veiksniams – žemai temperatūrai, maisto medžiagų stygiui, ultravioletinių spindulių poveikiui. Angliavandeniliais užterštoje terpėje jos yra pranašesnės, palyginti su kitais organi-

nus junginius oksiduojančiais mikroorganizmais, pvz., *Pseudomonas* (Amanullah *et al.* 2000; Jankevičius ir Liužinas 2003).

Tarp mikromicetų taip pat identifikuota nemažai organinius junginius skaidančių rūšių. Organiniuose junginiuose dažniausiai aptinkamos *Fusarium* (Arriaga *et al.* 2006), *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Botrytis*, *Mucor* genčių mikromicetų rūšys (Jankevičius ir Liužinas 2003).

Iš angliavandenilius asimiliuojančių mielių dažnai pabrėžiamas *Rhodotorula*, *Candida*, *Trichosporium*, *Pichia*, *Debaryomyces* genčių vaidmuo. Biologinio skaidymo galimybėmis išsiskiria gausi *Candida* gentis. Šiuo atžvilgiu gerai išnagrinėtos *C. Maltosa*, *C. Intermedia*, *C. Rugosa*, *C. Tropicalis*, *C. Parapsilosis* rūšys.

Organinių junginių biodegradavimą sudaro daug stadijų, ir vienos rūšies mikroorganizmų turimų fermentų rinkinio nepakanka visiškai suardyti organiniams junginiams. Todėl biologiniam oro valymui naudojamos terpės, pvz., Nutrient Agaras (Delhomnie *et al.* 2001), kuriose gerai vystosi mišrios organinius junginius oksiduojančių mikroorganizmų kultūros – mikroorganizmų konsorciumai. Tokius konsorciumus sudaro kelios ar keliolika mikroorganizmų rūšių (Jankevičius ir Liužinas 2003).

1.7. Oro valymo biofiltruose mikroorganizmų gyvybinę veiklą lemiančių veiksnių ypatumai

Mažo našumo biofiltruose mikroorganizmų gyvybinę veiklą lemiantys aplinkos veiksniai skirstomi į fizikinius, cheminius ir biologinius (Devanny *et al.* 1999; Iliuta *et al.* 2005).

Fizikiniai veiksniai, dažniausiai veikiantys mikroorganizmų augimą ir dauginimąsi, yra drėgmė, temperatūra, osmosinis slėgis (Baltrėnas *et al.* 2004).

Drėgmė. Vanduo – svarbiausia terpė, kurioje vyksta organizmų medžiagų apykaita, be to, visoms cheminėms reakcijoms, kurios vyksta gyvuose mikroorganizmuose, reikia vandens. Vanduo sudaro apie 75 % ir daugiau mikroorganizmų biomasės.

Daugelis bakterijų ir mikromicetų gali daugintis, kai santykinis oro drėgnis siekia 80–100 %. Todėl užterštas oro srautas, prieš patenkant į biofiltrą, drėkinamas drėkinimo kameroje. Biofiltre svarbu užtikrinti įkrovos drėkinimo sistemos kontrolę, nes vykstant oro valymui nuo LOJ įkrovos drėgnis kinta. Tekėdamas per įkrovą, oras, prisisotindamas garų, pašalina drėgmę ir mažina įkrovos drėgnį. Tačiau tuo pat metu biologinis skilimo procesas organinius junginius pavėrčia anglies dvideginiu (CO₂) ir vandeniu, iš dalies atstatydamas drėgmės kiekį. Skylant 1 kg angliavandenilio, susidaro 1,5 kg vandens. Dažnai šio susida-

riusio vandens nepakanka, todėl tenka įkrovą papildomai laistyti. Efektyviam teršalų biodegradacijos procesui užtikrinti įkrovos drėgnis turi siekti 40–70 % (Jankevičius ir Liužinas 2003; Yamamoto *et al.* 2005; Ottengraf and Konings 1991). Įkrovos drėgnis priklauso nuo jos rūšies ir biofiltre įdiegtos drėkinimo sistemos (1.3 lentelė).

1.3 lentelė. Įkrovos drėgnio priklausomybė nuo jos rūšies ir drėkinimo sistemos

Table 1.3. The dependence of charge's humidity on its type and a humidification system (Kennes and Thalasso 1998)

Įkrova	Drėgnis, %	Drėgmės kontrolė	Įkrova	Drėgnis, %	Drėgmės kontrolė
Kompostas	25–50	Pertraukiamas purškimas	Pjuvenų ir durpių mišinys	55	Nepurškiant
Kompostas	20–40	Nepurškiant	Medžių žievės	53–73	Drėkinant dujas
Durpės	–	Drėkinant dujas	Durpių ir stiklo granuliu mišinys	65–70	Drėkinant dujas ir įkrovą
Durpės	60–70	Pertraukiamas purškimas	Durpių ir komposto mišinys	25–50	Drėkinant dujas
Dirvožemis	40–70	Purškiant	Komposto ir perlito mišinys	50–55	Drėkinant dujas
Dirvožemis	10–20	Nepurškiant	Komposto ir atliekų mišinys	45	Drėkinant dujas ir įkrovą

Kuo mažiau įkrovoje drėgmės, tuo lėčiau dauginasi mikroorganizmai, silpnėja jų gyvybinė veikla, o vandens kiekiui sumažėjus žemiau minimumo – visai nutrūksta. Bakterijos liaujasi daugintis, kai substrate laisvo vandens kiekis sumažėja iki 20–30 %, o mikromicetai – 11–17 %.

Temperatūra – tai svarbiausias veiksnys, nuo kurio priklauso mikroorganizmų dauginimosi greitis ir biocheminių reakcijų intensyvumas. Įvairios mikroorganizmų grupės prisitaikiusios gyventi skirtingoje temperatūroje. Teršalų biodegradacijos procesuose dalyvaujantys mikroorganizmai skirstomi į psichrofilinius,

mezofilinius ir termofilinius. Psichrofiliniai mikroorganizmai gali dauginis 7–30 °C temperatūroje. Psichrofilinių mikroorganizmų membranos turi daug nesočiųjų riebalų rūgščių, todėl išlieka pusiau skystos ir šaltyje. Šie mikroorganizmai geriausiai dauginasi 10–20 °C temperatūroje. Mažo našumo biofiltruose lakiesiems organiniams junginiams (LOJ) skaidyti dažniausiai naudojami mezofiliniai mikroorganizmai, kurių optimali dauginimosi temperatūra siekia 20–45 °C (Darlington *et al.* 2001; Yamamoto *et al.* 2005). Termofiliniams mikroorganizmams optimali temperatūra 45–75 °C (Dhamwichukorn *et al.* 2001; Kong *et al.* 2001; Van Lieke and Van Groenestijn 2003). JAV ir Kanados mokslininkai nustatė aukštą 99 % lašelinio biofiltro efektyvumą valant orą nuo etanolio bei metanolio naudojant termofilines bakterijas. Geriausių rezultatų gauta biofiltre palaikant 53 (skaidant etanolį) ir 60 °C (skaidant metanolį) temperatūrą (Cox *et al.* 2001; Kong *et al.* 2001).

Osmosinis slėgis. Daugelis mikroorganizmų mažai jautrūs osmosiniams 0,5–3 % druskų koncentracijos pokyčiams. Bakterijų jautrumas natrio chloridui įvairus – jos žūva 6 % tirpale, mielės – 14 % (Cox *et al.* 2001).

Svarbiausi cheminiai veiksniai, turintys įtakos mikroorganizmų gyvybinei veiklai, yra mitybinio substrato sudėtis ir jo komponentų koncentracija, vandenilio jonų koncentracija (pH), oksidacijos-redukcijos sąlygos, nuodingosios medžiagos. Mikroorganizmai egzistuoja ten, kur vyksta anglies apykaita, nes visi cheminiai junginiai, esantys ląstelėje, yra anglies junginiai. Mikroorganizmai, kurių pagrindinis anglies šaltinis yra organiniai junginiai, vadinami heterotrofais. Heterotrofai sugeba prisitaikyti prie anglies šaltinio, todėl nėra organinių junginių, kurių mikroorganizmai negali pasisavinti. Tokios bakterijos, kaip *Pseudomonas cepacia*, gali skaidyti daugiau kaip 100 skirtingų anglies junginių.

Įvairūs mikroorganizmai gali dauginis, skaidyti maistines medžiagas, sintetinti naujus junginius esant tik tam tikram pH. Keičiantis terpės reakcijai, kinta heterotrofų fermentų aktyvumas. Biologiniam oro valymui naudojamos neutralios arba silpnai šarminės ar rūgštinės terpės, kurių vandenilio jonų koncentracija pH gali svyruoti 6–8 (MacNevin and Barford 2001). Dauguma terpių, naudojamų lakiesiems organiniams junginiams skaidyti, turi neutralią vandenilio jonų koncentraciją (pH = 7).

Prie lakiųjų organinių junginių skaidymo prisideda aerobiniai mikroorganizmai. Aerobiniai heterotrofai gerai auga, jeigu terpėje pakanka deguonies. Be to, terpės prisotinimo laipsnis priklauso ne tik nuo to, kiek deguonies patenka iš oro, bet ir nuo to, ar joje yra deguonį prijungiančių ar išskiriančių į aplinką medžiagų.

Biologiniai veiksniai. Įkrovoje skirtingų organizmų sugyvenimo būdas, dažniausiai teikias abipusę naudą. Toks sugyvenimo būdas vadinamas simbioze. Būdas, kai vienas mikroorganizmas savo medžiagų apykaita paruošia substratą kitam, vadinamas metabioze. Mikroorganizmus gali sieti ir kiti biologiniai

veiksniai, tokie kaip komensalizmas, sinergizmas, parazitizmas (MacNevin and Barford 2001).

1.8. Biofiltracijos procesus aprašantys matematiniai modeliai ir šių procesų modeliavimo 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 biofiltru vykstančius biofiltracijos procesus (Lu *et al.* 2004; Amanullah *et al.* 1999).

Biofiltracinių procesų metu mikroorganizmų fermentacijos reakcijos greičiui nustatyti taikomas **Monodo kinetikos modelis** (Alonso *et al.* 1998). 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. Pagrindinėje Monodo lygtyje ėmus naudoti pataisos koeficientą K_p gaunama lygtis, aprašanti biomasės augimo greitį (Wu 2003):

$$\mu = \mu_m \frac{c}{K_s + c + c^2 / K_p}, h^{-1} \quad (1.9)$$

čia μ – biomasės augimo greitis, h^{-1} ; K_s – Monodo konstanta, mg/l ; c – teršalo koncentracija, mg/l ; K_p – pataisos koeficientas, mg/l .

Pateikta lygtis (1.9) plačiai naudojama biomasės augimo greičiui nustatyti (Wu 2003).

Teršalų pernašai bioplėvelėje aprašyti taikomas **masės balanso modelis**. Organinio junginio molekulių pernaša iš dujinės fazės į skystąją gali būti išreikšta teršalo difuzijos koeficientu D . Iš bioterpės šalinamų dujų molekulinė masė išreiškiama lygtimi:

$$M_{\text{g t}} = M_{\text{it}} - \frac{dc \cdot v}{dt} - r_{v,c} dx, \quad (1.10)$$

čia M_{ist} – iš bioplėvelės ištekančių dujų molekulinė masė, g/m^3 para; M_{it} – į bioplėvelę patenkančių dujų molekulinė masė, g/m^3 para; dc/dt – substrato koncentra-

cijos pokytis laiko atžvilgiu; $r_{v,c}$ – substrato apkrova, g/m^3 parą; x – teršalo pernašos atstumas, m.

Tuomet teršalo pernašos lygtis bus išreikšta šia formule:

$$r_{v,c} = D \frac{d^2 c}{dx^2}, \text{ g/m}^3. \quad (1.11)$$

Substrato apkrova yra proporcinga jo koncentracijos pasiskirstymo bioplėvelėje netolygumui (Wu 2003). Naudodami masės balanso lygtis italų mokslininkai sumodeliavo fenolio pernašą bioplėvelėje, kurioje buvo kultivuojamos *Pseudomonas putida* mikroorganizmų kultūros (Converti *et al.* 1997). Masės pernašos bioplėvelėje gali būti aprašytos Fiko dėsnio (Wu 2003).

Pirmojo ir nulinio laipsnio kinetikos modelis. 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 (Chan and Peng 2008):

$$\ln(c / c_0) = -\mu t, \quad (1.12)$$

čia c_0 – šalinamo teršalo koncentracija, mg/m^3 ; t – teršalo pernašos laikas, s.

Kai substrato koncentracija yra žymiai didesnė už Michaelio-Menteno konstantą, tuomet fermentacijos reakcijos greitis yra nulinio laipsnio ir yra aprašomas tokia lygtimi (Chan and Chang 2006):

$$c_0 - c = k_0 t, \quad (1.13)$$

čia k_0 – nulinio laipsnio reakcijos koeficientas.

Į lygtį įrašius teršalo pernašos koeficientą gaunama:

$$c = c_0 (1 - t(a k_0 D_e / 2 m c_0 \delta)^{1/2})^2, \quad (1.14)$$

čia a – dujų sąlyčio su įkrova paviršiaus plotas, cm^2 ; D_e – teršalo pernašos koeficientas, cm^2/s ; m – koeficientas, įvertinantis teršalo pasiskirstymą bioterpėje; δ – bioplėvelės sluoksnio storis, μm .

Metodas leidžia įvertinti teršalo koncentracijos pokyčio ($c_0 - c$) priklausomybes nuo biofiltracijos laiko (t) (Chan and Chang 2006).

Naudojantis PHOENICS 3.2 ir 3.5 versijų programiniu paketu, galima įvertinti filtre vykstančius aerodinaminius procesus – leidžiamo oro srauto greitį ir aerodinaminį įkrovos pasipriešinimą. Modeliuojant remiamasi fizikinius dėsnius atitinkančiomis matematinėmis lygtimis (Vaitiekūnas 2007; Taylor *et al.* 1999). Anglų mokslininkai PHOENICS programą naudojo teršalo sugerčiai ceolite įvertinti (Taylor *et al.* 1999).

Visos diferencialinių lygčių sistemos, kurios diskretizuotą versiją sprendžia PHOENICS, apibendrinta forma yra tokia (Baltrėnas ir kt. 2001):

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i \Phi_i) + \text{div}(r_i \vec{v}_i \Phi_i - r_i \Gamma_i \text{grad} \Phi_i) = r_i S_{\Phi_i}, \quad (1.15)$$

čia t – laikas; r_i – fazės i tūrinė dalis; ρ_i – fazės i tankis; Φ_i – fazės i priklausomasis kintamasis (koncentracija, entalpija, momentas masės vienetui, cheminio reagento masės dalis ir kt.); $\vec{v}_i$ – fazės i greičio vektorius; Γ_{Φ_i} – kintamojo Φ_i mainų koeficientas; S_{Φ_i} – srauto narys kintamajam Φ_i .

Įvertinus tyrimų metu vykstančius fizikinius, cheminius ir biologinius procesus, naudojant MAPLE 7 ir DATAFIT 6.1.10 programas, modeliuojami filtre vykstantys biofiltracijos procesai. Naudojantis eksperimentiniais duomenimis, modeliuojant biofiltraciją, randamos teršalų, jų mišinių absorbcijos gebos β ir biodegradacijos α konstantų analitinės išraiškos bei nustatomos jų priklausomybės nuo teršalų prigimties bei filtro techninių parametrų (įkrovos aukščio, leidžiamo oro srauto ir kt.) (Taylor *et al.* 1999).

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

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 ir išvedami rezultatai (Chan and Chang 2006).

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

Programinis paketas STATISTICA leidžia rinkti ir apdoroti duomenis. Dažnai naudojamos sklaidos diagramos, kurios padeda rasti ryšį tarp dviejų kintamų-

jų. Teršalų sklaidos diagrama leidžia sudaryti teršalų sklaidos priklausomybę nuo techninių biofiltro duomenų, įkrovos tipo ir kt. (Converti *et al.* 1997).

1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Lakiųjų organinių junginių emisijoms mažinti pasaulyje vis plačiau pradedama taikyti biologinį oro valymo metodą. Metodo pasirinkimą lemia aukštas organinių junginių valymo efektyvumas, pigumas. Tačiau dėl savo didelių gabaritų jie dažniau naudojami stambiose pramonės įmonėse.
2. Mažo našumo oro valymo įrenginiai šiuo metu yra tik tyrinėjami. Šiuo metu sukurti efektyvūs biofiltrai turi ilgą teršalo sąlyčio su bioterpe trukmę, o tai sumažina įrenginio našumą.
3. Biologinį oro valymo procesą lemia fizikiniai, cheminiai ir biologiniai aplinkos veiksniai. Šiuo metu biologiniam oro valymui taikomuose įrenginiuose nepakankamai užtikrinama jų kontrolė.
4. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad 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.
5. Nustatyta, kad ceolitui būdinga didelė sorbcijos galia, kuri mažai priklauso nuo temperatūros, didelis savitasis paviršiaus plotas, vienodo dydžio poros, o porolonas yra pigus ir gerai palaiko drėgmę. Todėl siekiant įvertinti šių įkrovų panaudojimo galimybes būtina atlikti išsamesnius jų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo, nuo kurių priklauso įrenginio valymo efektyvumas, tyrimus.
6. Įkrovos mikrobiologinis aktyvumas priklauso nuo įkrovos rūšies ir biofiltre palaikomos temperatūros, todėl siekiant padidinti mažo našumo biofiltrų valymo efektyvumą būtina išvesti mikroorganizmų skaičiaus priklausomybes nuo temperatūros.
7. Iki šiol vienu metu biologiniam oro valymui naudojamų įkrovų tokių kaip medienos skiedros, žievės, ZeoVit sorbentas ir porolonas efektyvumo tyrimai nebuvo atlikinėjami, todėl būtina nustatyti biofiltrų valymo efektyvumo priklausomybes nuo teršalo prigimties, koncentracijos, filtrų konstrukcijos ir leidžiamo oro srauto greičio.

8. Gautų tyrimo rezultatų prognozei ir patikimumui įvertinti būtina naudoti matematinius modelius aprašančius biofiltre vykstančius aerodinامينius ir biofiltracinius procesus.

Aktyvintų skirtingos kilmės įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai

Mikroorganizmai gali daugintis tik tokiuose substratuose, kuriuose yra tam tikras kiekis vandens ir ištirpusių maisto medžiagų. Mikroorganizmams reikalinga drėgmė biogeniniams elementams pernešti, medžiagų apykaitos procesams vykti ir ląstelių struktūrai palaikyti. Tačiau drėgmės perteklius nepageidautinas, nes kai vanduo užima didelę įkrovos porų dalį, mažėja oro laidumas ir aeracijos veiksmingumas, be to, perteklinė drėgmė didina teršalų ir biogeninių elementų išplovimą iš įkrovos. Dar vienas įkrovai keliamų reikalavimų – mažas aerodinaminis jos pasipriešinimas, kuris priklauso nuo įkrovos drėgnio, frakcijos, poringumo ir kitų fizinių įkrovos savybių. Todėl šiuo metu aktyviai ieškoma būdų, kaip pagerinti įkrovoje vykstančius sorbcinius ir aerodinaminius procesus, nemažinant biofiltro valymo efektyvumo.

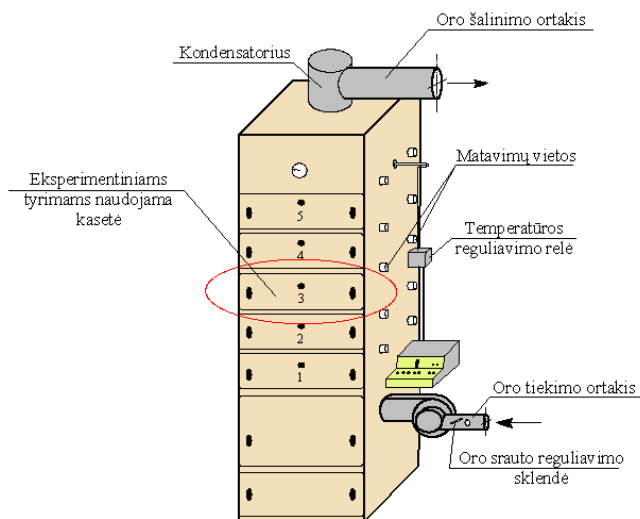
Siekiant nustatyti skirtingos kilmės įkrovų sorbcines ir oro pralaidumo savybes, šiame skyriuje pateikiami įkrovų, sudarytų iš medienos skiedrų su žievėmis, ZeoVit sorbento granulių ir porolono kubelių bei jų mišinių drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai. Įkrovos oro laidumo savybėms nustatyti išvestos aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo įkrovų frakcijos dydžio, per įrenginį leidžiamo oro srauto greičio, įkrovos sluoksniu aukščio. Įkrovos sorbci-

nėmis savybėms nustatyti išvestos tyrimams pasirinktų medžiagų drėgnio priklausomybės nuo per įrenginį leidžiamo oro srauto greičio, laiko, biofiltre palaikomos oro temperatūros.

Biologiniam oro valymui naudojamų aktyvintų skirtingos kilmės įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų metodikos bei rezultatai paskelbti mokslinėse publikacijose (Baltrėnas and Zagorskis 2006a, 2007a; Baltrėnas *et al.* 2005a; Zagorskis ir Baltrėnas 2004, 2007c, 2008c).

2.1. Skirtingos kilmės įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimo metodika

Eksperimentiniai tyrimai atliekami naudojant biologinį oro valymo įrenginį – biofiltrą. Jį sudaro penkios viena virš kitos išdėstytos kasetės, skirtos įkrovai užpildyti, įkrovos drėgnio ir temperatūros palaikymo filtre sistema, ortakiai, kuriais oras tiekiamas ir šalinamas iš įrenginio, oro srauto reguliavimo sklendė, kondensatorius, skirtas vandens garams sulaikyti. Nors biofiltre įrengtos penkios kasetės, tačiau įkrovų drėgnio nustatymo tyrimams naudota viena – vidurinė kasetė. Taip tyrimų metu užtikrinamos visoms įkrovoms vienodos sąlygos: per įkrovą leidžiamo oro srauto greitis, temperatūra, pradinė leidžiamo teršalo koncentracija (2.1 pav.).



2.1 pav. Eksperimentinio biofilto stendas

Fig. 2.1. Experimental biofilter stand

Atsižvelgiant į biofiltrų įkrovoms keliamus reikalavimus ir fizines savybes (kainą, tankį, porėtumą, masę, paviršiaus plotą), aerodinaminį pasipriešinimą eksperimentiniams tyrimams pasirinktos skirtingos – organinės, neorganinės ir dirbtinės kilmės įkrovos.

Organinės kilmės įkrovą sudarė plačiai pasaulyje biologiniam oro valymui naudojamos medienos skiedros su žievėmis. Šios įkrovos pasirinkimą lėmė jos pigumas, medienos apdorojimo įmonėse susidarantys dideli kiekiai, poringa vidinė struktūra ir didelis sąlyginis paviršiaus plotas. Be to, medienos skiedros naudojamos kaip anglies šaltinis mikroorganizmams (Miao *et al.* 2005).

Neorganinės kilmės įkrovos ZeoVit sorbento (gamtinio ceolito) pasirinkimą lėmė taisyklinga jo struktūra, didelis savitasis paviršiaus plotas, vienodo dydžio poros, ilgaamžiškumas, savybė sulaikyti organinius junginius (ZeoVit ekologiškai... 2006).

Dirbtinės kilmės įkrovą sudarė porolono kubeliai, turintys mažą tankį ir mechaninį krūvį, didelį savitojo paviršiaus plotą ir geras sorbcines savybes (Kan and Deshusses 2003). Tyrimams naudotų įkrovų fizinės savybės pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Įkrovų fizinės savybės

Table 2.1. Physical properties of charges

(ZeoVit ekologiškai... 2006; Porolono techniniai... 2006; Miao *et al.* 2005)

Įkrova	Tankis, kg/m ³	Poringumas, %	Sąlyginis paviršiaus plotas, m ² /g	Atsparumas gniuždant, kg/m ²
Medienos skiedros su žievėmis	400	20	355	–
ZeoVit sorbentas	2370	4,0	144	150
Porolonas	20	90	375	–

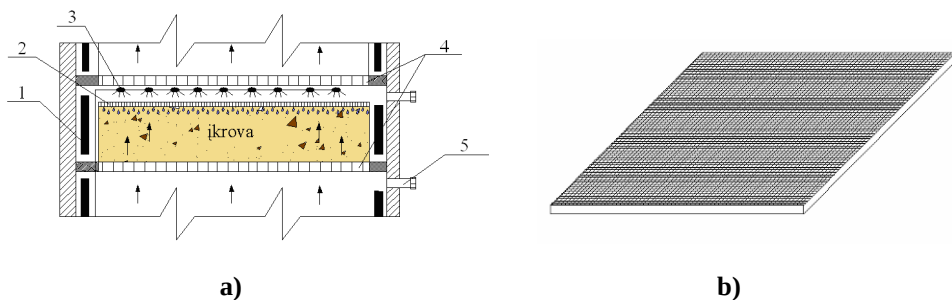
Vienas pagrindinių įkrovai keliamų reikalavimų – mažas jos aerodinaminis pasipriešinimas, kuris labiausiai priklauso nuo įkrovos frakcijos dydžio, poringumo ir drėgnio (Shareefdeen *et al.* 2002). Pasirinkus įkrovas, atliekami drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai.

Tyrimams naudojami laboratoriniai indai, matavimo priemonės ir įranga: stikliniai biuksai (Ų 50 mm, $h = 30$ mm), pincetas, grūstuvėlis, pjaustytuvas, sieteliai (Ų4, Ų6, Ų8, Ų10, Ų12, Ų14), temperatūros ir oro srauto matuoklis „Testo 400“ (temperatūros matavimo ribos: 20–70 °C, paklaida $\pm 0,2$ °C, greičio matavimo ribos: 0–10 m/s, paklaida $\pm 0,02$ m/s), diferencialinis slėgio matuoklis DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ± 5 Pa), džiovinimo

spinta (temperatūros palaikymo ribos: 0–150 °C, paklaida ± 2 °C), analitinės svarstyklės (matavimo ribos 0–320 g, matavimo tikslumas: $\pm 0,00005$ g), eksikatorius.

Siekiant parinkti tinkamiausią tyrimams naudojamos įkrovos frakciją, buvo rastos aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo įkrovų frakcijos dydžio. Tyrimams naudotos 4; 6; 8; 10; 12; 14 mm ZeoVit sorbento frakcijos, gautos sorbento granules sijojant per skirtingo akučių dydžio sietus.

Atliekant tyrimus biofiltro kasetė, kurios matmenys 0,50×0,48×0,15 m (2.2a pav.), užpildoma 4 mm dydžio ZeoVit sorbento frakcija. Ceolito tankis yra gana didelis, todėl kasetė užpildoma nedideliu 100 mm aukščio ceolito granulių sluoksniu. Įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas priklauso nuo jos drėgnio. Todėl ZeoVit sorbento granulės drėkinamos virš filtro įrengtais purkštukais vandeniui iki pastovaus drėgnio. Tam, kad vandens lašeliai tolygiai pasiskirstytų per visą įkrovos paviršiaus plotą, ji iš viršaus uždengiama iš polivinilchlorido (PVC) pagamintu sieteliu (2.2b pav.). Pastovus ceolito granulių drėgnis gautas ant įkrovos užpurškus 2 l vandens. Įkrovos drėgnis nustatomas svoriniu metodu (metodas aprašytas įkrovos drėgnio nustatymo metodinėje dalyje). Per įkrovą leidžiant oro srautą vidutiniu 0,3 m/s greičiu, matuotas įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas. Oro srauto greičio ir dinaminio slėgio matavimo vietos pateiktos 2.4 paveiksle.



2.2 pav. Biofiltro elementai: a) kasetė, užpildyta įkrova: 1 – šildymo tenai; 2 – sietelis; 3 – vandens purkštukai; 4 – perskyrimo tinkleliai; 5 – matavimų vietos, b) sietelis, skirtas tolygiam įkrovos drėgniui užtikrinti

Fig. 2.2. A biofilter detail: a) a cassette filled with a charge (1 – heating elements; 2 – sieve; 3 – waster sprayers; 4 – separation meshes; 5 – measurement locations, b) a sieve intended for a uniform humidity distribution in a charge

Atlikus tyrimus su 4 mm frakcijos įkrova, toliau tyrimai kartojami su 6, 8, 10, 12, 14 mm frakcijos ZeoVit sorbento granulėmis.

Išanalizavus rezultatus gautos aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo ceolito frakcijos dydžio ir nustatyta tinkamiausia frakcija tolesniems eksperimentiniams tyrimams.

Baigus tyrimus su ceolito granulėmis, toliau tyrimai kartojami biofiltro kasetę užpildžius dirbtinės kilmės įkrova, sudaryta iš porolono kubelių. Didžiausią įtaką aerodinaminiam pasipriešinimui turi porolono drėgnis, kuris priklauso nuo kubelių frakcijos dydžių, todėl tyrimams buvo pasirinktos šešių skirtingų dydžių kubelių frakcijos: 5, 10, 20, 30, 40 ir 50 mm. Iš pradžių tyrimai atliekami su 5×5×5 mm dydžio kubeliais. Įkrovos sluoksnio aukštis kasetėje pasirenkamas pagal ZeoVit sorbento sluoksnio aukštį ir siekia 100 mm. Įkrova laistoma vandeniui iki pastovaus drėgnio. Pastoviam įkrovos drėgniui pasiekus 100 %, per ją leidžiant oro srautą vidutiniu – 0,3 m/s greičiu, slėgio matuokliu DSM-1 nustatomas porolono kubelių sluoksnio aerodinaminis pasipriešinimas.

Baigus tyrimus su 5 mm dydžio frakcija, jie kartojami su kitomis porolono kubelių frakcijomis. Remiantis gautais duomenimis, išvedamos įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo kubelių frakcijos.

Išanalizavus gautus rezultatus (2.6 ir 2.7 pav.) tolesniems tyrimams pasirinktos 10–15 mm ceolito grūdelių ir 20 mm porolono kubelių frakcijos. Žinant, kad savaiminiai mikroorganizmai gali daugintis tik organinės kilmės įkrovoje, ZeoVit sorbento granulės ir porolono kubeliai maišomi su medienos skiedromis ir žievėmis. Siekiant išlaikyti įkrovos homogeniškumą (vientisumą), tam, kad oro srautas, drėgmė, mikroorganizmai tolygiai pasiskirstytų, per visą įkrovos sluoksnį (Ardjmand *et al.* 2005) parenkama artima ceolito granulėmis 10–15 mm medienos skiedrų su žievėmis frakcija.



a)



b)



c)

2.3 pav. Biologiniam oro valymui naudojama įkrova:

a) medienos skiedros su žievėmis, b) ZeoVit sorbento granulės, c) porolono kubeliai

Fig. 2.3. Charge used for biological air treatment: a) wood chips and barks, b) ZeoVit sorbent granules, c) foam cubes

Tolesni aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai atliekami su trimis skirtingomis įkrovomis, turinčiomis anglies ir kitų maistinių medžiagų, reikalingų savaiminių mikroorganizmų aktyvumui palaikyti.

Įkrovas sudaro:

- medienos skiedrų, žievių ir ZeoVit sorbento granulių mišinys;
- medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių mišinys;
- medienos skiedrų, žievių, porolono kubelių ir ceolito granulių mišinys.

Šie mišiniai parinkti atsižvelgiant į įkrovos ilgaamžiškumą, drėgmės sugertį, didelį sorbcinio paviršiaus plotą. Siekiant užtikrinti įkrovos homogeniškumą skirtingų medžiagų sumaišymo santykis pagal tūrį yra vienodas. Trijų medžiagų sumaišymo santykis pagal tūrį siekė 1:1:1, keturių – 1:1:1:1.

Žinant medžiagų tankius (2.1 lentelė), pagal (2.1) formulę apskaičiuojamas įkrovų poringumas ε :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{pilt}}}{\rho_{\text{medž}}} \cdot 100, \% \quad (2.1)$$

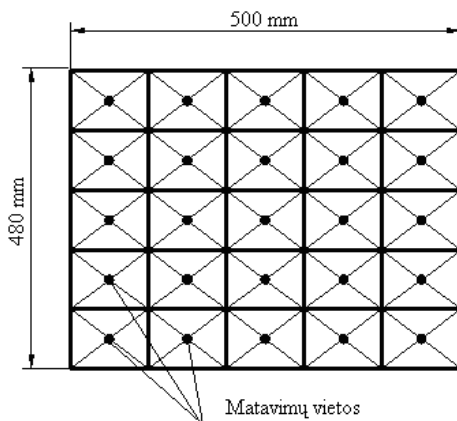
čia ε – įkrovos porėtumas, %; ρ_{pilt} – įkrovos piltinis tankis, g/cm³; $\rho_{\text{medž}}$ – įkrovą sudarančių medžiagų tankis, g/cm³.

Įkrovų piltiniai tankiai gauti jas sudrėkinus iki pastovaus svorio, įpylus į 1000 cm³ talpos indą ir pasvėrus. Žinant į indą supiltos įkrovos svorį ir tūrį, gaunamas jos piltinis tankis.

Prieš įjungiant biofiltrą, vidurinė kasetė (2.1 pav.) įkraunama 100 mm storio sluoksniu, sudarytu iš medienos skiedrų, žievių ir ZeoVit sorbento mišinio. Mišinys drėkinamas virš jo sluoksnio įrengtais vandens purkštukais, kurie, purkšdami biogeniniais elementais prisotintą vandenį, įkrovą drėkina iki pastovaus drėgnio. Drėgmė įkrovoje kontroliuojama svoriniu metodu (Jin *et al.* 2007). Kai įkrovos drėgnis pastovus, per ją 0,1 m/s greičiu leidžiamas oro srautas ir matuojamas įkrovos sluoksnio aerodinaminis pasipriešinimas. Tolydžio didinant oro srauto greitį iki 0,5 m/s gaunamos įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo per įkrovą leidžiamo oro srauto greičio. Paskui tyrimai kartojami su likusiais dviem mišiniais.

Atsižvelgiant į įkrovos ilgaamžiškumą, sorbcines savybes, visos biofiltro kasetės užkraunamos medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišiniu. Per įrenginį leidžiant oro srautą 0,1 m/s greičiu, matuojamas kiekvieno įkrovos sluoksnio, kurio storis siekia 150 mm, pasipriešinimas. Atlikus matavimus gaunamas bendras įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas. Paskui tyrimai kartojami pamažu didinant oro srauto greitį iki 0,5 m/s. Atlikus tyrimus išveda-

mos įkrovos, sudarytos iš medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento granulių ir porolono kubelių mišinio, aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybės nuo biofiltro kasečių skaičiaus ir per įkrovą leidžiamo oro srauto greičio.



2.4 pav. Oro srauto greičių ir įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo matavimo vietos

Fig. 2.4. Measurement locations of airflow rates and charge's aerodynamic resistance

Biofiltre prieš ir po kiekvienos kasetės oro srauto greičiui ir aerodinaminiam pasipriešinimui nustatyti įrengti mėginių paėmimo atvamzdžiai su užsukamomis aklėmis. Oro srauto greičių ir įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo tyrimo vietos stačiakampio formos ortakyje parenkamos tinklėlio principu (2.4 pav.).

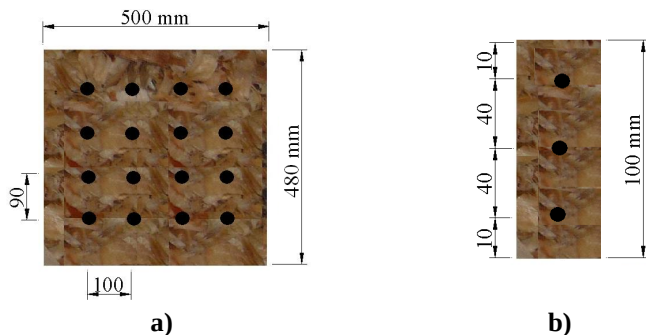
Srauto greitis reguliuojamas tiekimo ortakyje įrengta oro srauto reguliavimo sklende ir matuojamas vokiečių firmos anemometru „Testo 400“. Slėgis matuojamas naudojant dinaminį slėgio matuoklį „DSM-1“.

Skirtingos kilmės įkrovų drėgnio tyrimai pirmiausia atliekami naudojant medienos skiedras ir žieves. Skiedros su žievėmis įkraunamos į vidurinę $0,50 \times 0,48 \times 0,15$ mm dydžio biofiltro kasetę (2.1 pav.). Medienos skiedrų su žievėmis sluoksnio aukštis kasetėje siekia 100 mm. Įkrovos sluoksnio standumui užtikrinti ir tolygiai drėgniui pasiskirstyti per visą skerspjūvio plotą įkrova iš viršaus uždengiama standžiu PVC sieteliu, kurio akučių skersmuo siekia 2 mm (2.2b pav.).

Žinoma, kad didelę įtaką įkrovos drėgniui turi mikroorganizmai, kurie organinius junginius paverčia anglies dvideginiu ir vandeniu (Li and Moe 2005). Todėl biofiltre turi būti užtikrintos mikroorganizmams dauginantis palankios sąlygos.

Biofiltro šonuose įrengtais oro šildymo tenais įrenginyje palaikoma 30 °C oro temperatūra. Užpildžius kasetę medienos skiedromis ir žievėmis įkrova laistoma mineralinių druskų prisotintu vandeniu. 2 l vandens išpurškiama virš įkrovos sluoksnio įrengtais purkštukais. Į purkštukus siurbliukais vanduo tiekiamas iš biofiltro apatinėje dalyje įrengto rezervuaro. Išpurškus 2 l vandens, 20 min laukiama, kol vanduo nusistovės ir įsigers į įkrovą. Perteklinis vandens kiekis per kasetės dugne įrengtą metalinį sietelį grįžta į vandens rezervuarą.

Po 20 minučių tiekimo ortakyje įrengtu ventiliatoriumi 0,1 m/s greičiu į įrenginį tiekiamas oro srautas. Ortakyje įrengta oro srauto reguliavimo sklendė, kuria galima reguliuoti oro srauto greitį nuo 0,1 iki 0,5 m/s. Oras per įkrovą teka 3 valandas. Po 3 valandų išjungus ventiliatorių imami mėginiai įkrovos drėgniui nustatyti. Siekiant detaliau įvertinti įkrovos drėgmės sulaikymo savybes mėginiai imami iš skirtingų įkrovos sluoksnio vietų ir gylių (2.5 pav.).



2.5 pav. Mėginių paėmimo vietos: a) taškų išdėstymas horizontaliojoje plokštumoje, b) taškų išdėstymas vertikaliojoje plokštumoje

Fig. 2.5. Sampling places: a) sampling points distribution over a horizontal plane, b) sampling points distribution over a vertical plane

Įkrovų drėgnis nustatomas svoriniu metodu. Šis metodas leidžia sumažinti kitų garuojančių medžiagų oksidavimąsi, skaidymąsi arba kitokį praradimą, garantuojant veiksmingesnį drėgmės pašalinimą iš džiovinamo bandinio.

Prieš paimant mėginius biuksai kartu su dangteliu, pažymėtu tuo pačiu numeriu, džiovinimo spintoje džiovinami 1 valandą 105 ± 2 °C temperatūroje, paskui atvėsunami eksikatoriuje. Tirti naudojami biuksai pagaminti iš stiklo (apytikriai 0,5 mm storio), turi sandarius dangtelius, saugančius nuo drėgmės padidėjimo ar sumažėjimo, plokščią dugną, lygius kraštus. Išdžiovinti biuksai su dangteliais pasveriami analitinėmis svarstyklėmis. Sveriami 0,001 g tikslumu.

Pincetu paimti po 1 g sveriantys mėginiai ir, įdėti į biuksus, užkemšami kamštukais. Darbinis bandinys vienodai paskleidžiamas ant biukso dugno ($0,2 \text{ g/cm}^2$). Pasveriamas tuščias biuksas su dangteliu prieš užpildant įkrovą ir po to. Siekiant padidinti metodo tikslumą, įkrova kuo smulkiau sutrinama grūstuvėliu ar supjaustoma aštriu pjaustytuvu. Paskui biuksas greitai dedamas ant dangtelio į džiovinimo spintą ir, palaikant temperatūrą apie $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, džiovinama 3 valandas.

Medienos skiedros su žievėmis džiovinamos nuolat aukštoje temperatūroje. Džiovinimo laikas pradedamas skaičiuoti, kai džiovinimo spintoje pasiekama reikiama temperatūra. Tyrimams naudota elektra kaitinama džiovinimo spinta su termoregulatoriumi, gerai izoliuota ir galinti palaikyti pastovią temperatūrą visoje kameroje ir nustatytą temperatūrą ant lentynos, ant kurios džiovinami bandiniai. Temperatūra kameroje palaikoma $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ tikslumu.

Baigiantis džiovinimo laikui biuksas uždengiamas ir 45 minutėms dedamas į eksikatorių atvėsti. Atvėsintas biuksas su visu jo turiniu ir dangteliu pasveriamas. Nustatant bandinių drėgmę, laboratorijos oro santykinė drėgmė siekė 60 %.

Atvėsinti biuksai pasveriami ir drėgmės kiekis, kaip bandinio masės procentinė išraiška, skaičiuojamas iki sveikojo skaičiaus ir nustatomas pagal (2.2) formulę:

$$M_{\text{įkrovos}} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100, \quad (2.2)$$

čia $M_{\text{įkrovos}}$ – įkrovos drėgnis, %; m_1 – biukso su dangteliu masė, g; m_2 – biukso su dangteliu ir įkrovos bandiniu prieš džiovinimą masė, g; m_3 – biukso su dangteliu ir įkrovos bandiniu po džiovinimo masė, g.

Gautas analizės rezultatas – tai trijų bandinių drėgmės kiekio aritmetinis vidurkis, kai skirtumas tarp jų neviršija 0,2 %. Priešingu atveju bandinių drėgmė yra nustatoma kartotinai.

Padidinus į biofiltrą tiekiamo oro srauto greitį iki 0,2 m/s įkrovos drėgnio nustatymo tyrimai kartojami iš naujo. Taip gaunamos medienos skiedrų su žievėmis priklausomybės prie tiekiamo skirtingo oro srauto greičio, pamažu jį didinant iki 0,5 m/s.

Medienos skiedras su žievėmis pakeitus gamtinės (neorganinės) kilmės ceolitu, paskui porolonu, tyrimai kartojami iš naujo. Siekiant biofiltre kuo ilgiau išlaikyti mikroorganizmams reikiamą drėgmę, tyrimai atlikti su skirtingos kilmės įkrovų mišiniais: medienos skiedrų, žievių ir ZeoVit sorbento mišiniu, medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių mišiniu bei medienos skiedrų, žievių, ceolito grūdelių ir porolono kubelių mišiniu.

Norint išvengti didelio įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo ir didelių oro smūgių, filtruojančios įkrovos, sudarytos iš ceolito granulių ir porolono, sluoksnis siekia 100 mm.

Įkrovų drėgnio priklausomybei nuo laiko nustatyti per įkrovą leidžiamo oro srauto greitis siekė 0,2 m/s, o temperatūra – 30 °C. Mėginiai imami prieš įjungiant biofiltrą, paskui kas dvi valandas išlaikant biofiltre pastovų greitį ir temperatūrą.

Gavus įkrovų drėgnio priklausomybes nuo laiko, toliau tyrimai tęsiami siekiant nustatyti įkrovų drėgnio priklausomybes nuo įrenginyje palaikomos temperatūros. Biofiltre palaikant 15 °C (esama patalpos oro temperatūra) temperatūrą į įrenginį 3 valandas 0,2 m/s greičiu tiekiamas oro srautas. Po 3 valandų imami mėginiai įkrovų drėgniui nustatyti. Biofiltre padidinus oro temperatūrą iki 20 °C tyrimai kartojami iš naujo. Temperatūra įrenginyje keičiama įrengtu temperatūros davikliu. Tyrimams atlikti biofiltre buvo palaikomos 15, 20, 25, 30, 35 °C temperatūros. Paėmus mėginius ir gavus tyrimų rezultatus gaunamos įkrovų drėgnio priklausomybės nuo įrenginyje palaikomos temperatūros kreivės.

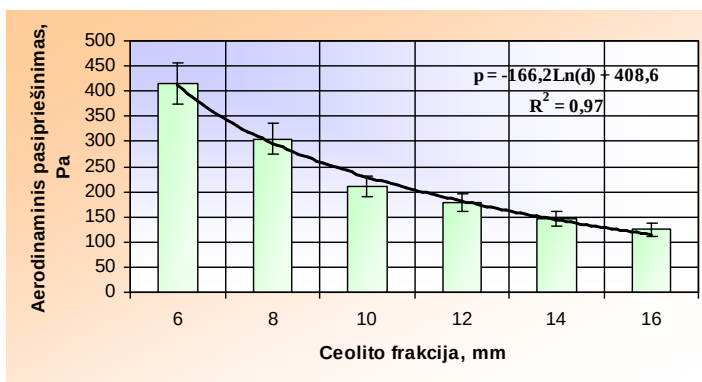
2.2. Įkrovų drėgnio ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų rezultatai ir jų analizė

Išvedus ZeoVit sorbento aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybes nuo frakcijos dydžio, nustatyta, kad didžiausias sluoksnio, sudaryto iš 6 mm frakcijos ceolito granulių, pasipriešinimas siekė 415 Pa. Padidinus sorbento frakciją iki 10 mm įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas sumažėjo beveik du kartus ir siekė 210 Pa. Tolydžio didinant įkrovos frakciją ceolito granulių sluoksnio aerodinaminis pasipriešinimas kito nedaug. Padidinus ZeoVit sorbento frakciją iki 12 mm aerodinaminis pasipriešinimas pakito tik 32 Pa. Mažiausias, 125 Pa, įkrovos sluoksnio pasipriešinimas gautas sorbento granulių frakciją padidinus iki 16 mm.

Iš 2.6 paveikslė pateiktų duomenų matyti, kad įkrovos pasipriešinimas labiausiai kinta frakcijai mažėjant nuo 6 iki 10 mm. Padidinus sorbento granulių frakciją iki 16 mm aerodinaminis pasipriešinimas kinta nedaug.

Kai yra mažesnė ceolito granulių frakcija, pasiekiamas didesnis įkrovos paviršiaus plotas. Todėl tolesniems tyrimams siūloma naudoti 10 mm ceolito frakciją, kurią didinant sorbento sluoksnio aerodinaminis pasipriešinimas kinta mažai.

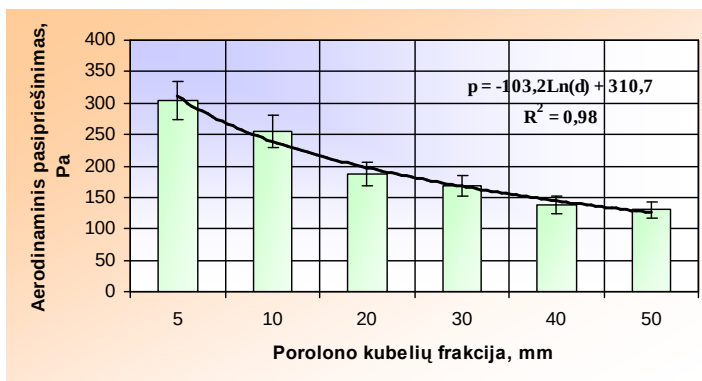
Aukštas detergencijos koeficientas (R^2) parodo stiprų ryšį tarp įkrovos pasipriešinimo ir frakcijos dydžio. Išvesta logaritminės kreivės lygtis (2.6 pav.) yra patikima ir gali būti taikoma aerodinaminiam įkrovos pasipriešinimui prognozuoti prie didesnių ceolito frakcijų.



2.6 pav. Įkrovos, sudarytos iš ceolito granulių, aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo jos frakcijos

Fig. 2.6. The dependence of aerodynamic resistance a charge composed of zeolite granules on the size of its fraction

Išvedus aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybes nuo porolono kubelių frakcijos, didžiausias įkrovos pasipriešinimas (305 Pa) nustatytas, kai kubelių dydis siekia 5 mm. Įkrovos frakciją padidinus iki 20 mm, sluoksnio aerodinaminis pasipriešinimas mažėja iki 188 Pa. Įkrovos frakciją pamažu didinant iki 50 mm sluoksnio, pasipriešinimas kinta lėčiau.



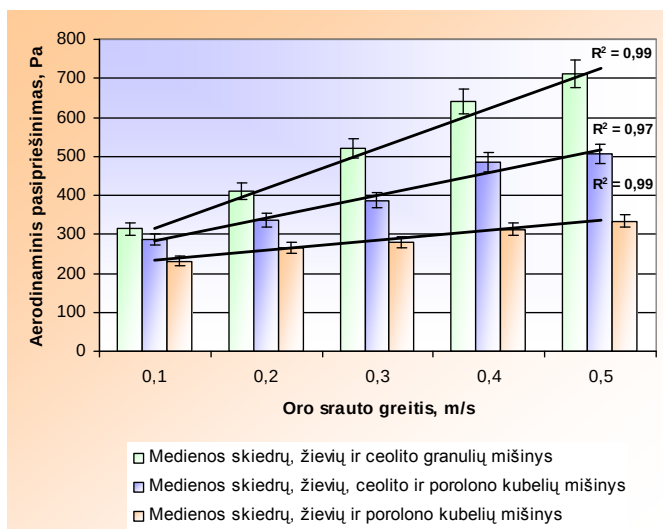
2.7 pav. Įkrovos, sudarytos iš porolono kubelių, aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo kubelių frakcijos

Fig. 2.7. The dependence of aerodynamic resistance of a foam cube charge on the size of cube fraction

Įkrovos homogeniškumui ir dideliui sorbcinio paviršiaus plotui išlaikyti tolesniems tyrimams bus naudojami 20 mm frakcijos porolono kubeliai.

Parinkus tinkamą ceolito granulių ir porolono kubelių frakciją šios medžiagos buvo maišomos su medienos skiedromis bei žievėmis ir atliekami tolesni aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai. Skirtingos rūšies įkrovų oro pralaidumui įvertinti buvo atlikti tyrimai esant skirtingiems į biofiltrą tiekiamo oro srauto greičiams (2.8 pav.).

Didžiausias pasipriešinimas gautas oro srautui tekant per kasetes užkrautas skirtingos kilmės įkrovomis. 100 mm sluoksnio įkrova sudaryta iš medienos skiedrų, žievių ir 10–15 mm frakcijos ceolito granulių, kai leidžiamo oro srauto greitis – 0,1 m/s, sukėlė 314 Pa aerodinaminį pasipriešinimą. Kasetę užpildžius porolono kubelių, medienos skiedrų ir žievių mišiniu kasetės aerodinaminis pasipriešinimas sumažėjo iki 287 Pa. Didesnį medienos skiedrų, žievių ir ceolito pasipriešinimą lėmė didesnis ceolito tankis, o kartu ir mažesnis jo poringumas. Tačiau ceolitas dėl savo fizinės struktūros yra geras adsorbentas (Cheng and Reinhard 2006).



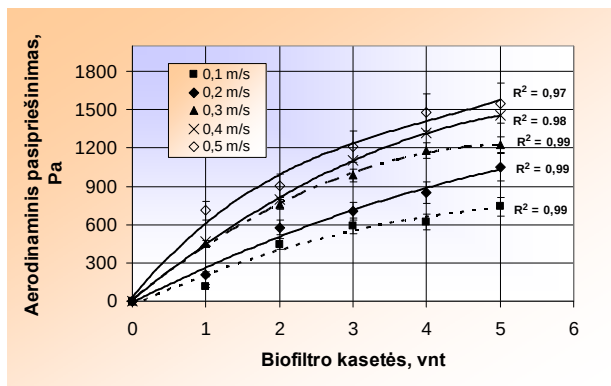
2.8 pav. Biofiltro kasetės, užkrautos skirtinga įkrova, aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo leidžiamo oro srauto greičio

Fig. 2.8. The aerodynamic resistance dependence on the supplied airflow rate of the biofilter cassette filled with different charges

Derinant biologinį valymo metodą su adsorbciniu, pasiekiamas aukštas lakiųjų organinių junginių išvalymo laipsnis, o sustojus technologiniam procesui,

mikroorganizmai suskaidys iš ceolito regeneracijos metu išsiskyrusius organinius junginius. Mišinio, sudaryto iš medienos skiedrų, žievių ir ZeoVit sorbento, aerodinaminį pasipriešinimą galima sumažinti į jį įmaišius porolono kubelių. Porolonas turi didelį sorbcinį paviršiaus plotą – $375 \text{ m}^2/\text{g}$, todėl pagerina įkrovos sorbcines savybes. Palaipsniui didinant oro srauto greitį įkrovų aerodinaminis pasipriešinimas tolygiai didėja. Į įrenginį tiekiamo oro srauto greičiui pasiekus $0,5 \text{ m/s}$ ceolito granulių, medienos skiedrų ir žievių aerodinaminis pasipriešinimas padidėja iki 710 Pa . Įkrovos, sudarytos iš medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių pasipriešinimas padidėja iki 334 Pa , o medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišinio – 505 Pa . Tyrimai parodė, kad siekiant užtikrinti mažesnę įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą, būtina mažinti į biofiltrą leidžiamo oro srauto greitį.

Atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas tenka pirmam įkrovos sluoksniui (2.9 pav.).



2.9 pav. Biofilto, užkrauto skirtingos kilmės įkrovų mišiniu, aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo įrenginio kasečių skaičiaus

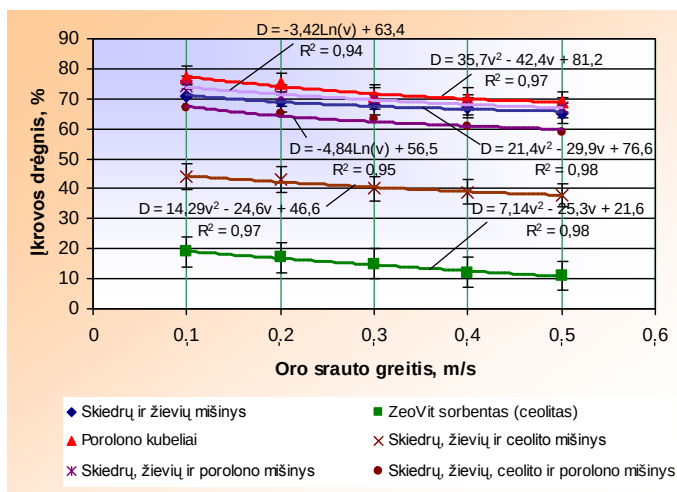
Fig. 2.9. The aerodynamic resistance dependence of a biofilter charged with a mixture of different-origin charges on the number of cassettes in the device

Per įrenginį oro srautui tekant $0,1 \text{ m/s}$ greičiu pirmos biofilto kasetės aerodinaminis pasipriešinimas siekė 118 Pa . Padidinus oro srauto greitį iki $0,5 \text{ m/s}$, įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas padidėja iki 710 Pa . Didėjant biofilto kasečių, užkrautų medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento granulių ir porolono kubelių užpildams, biofilto aerodinaminis pasipriešinimas didėja lėčiau. Po penkių įkrovos sluoksnių biofilto aerodinaminis pasipriešinimas, kai tiekiamo oro srauto greitis $0,1 \text{ m/s}$, siekė 741 Pa . Į įrenginį tiekiamo oro srauto greitį padidinus iki $0,3 \text{ m/s}$, įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas po penkių įkrovos sluoksnių

siekia 1226 Pa. Mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad sintetinės kilmės įkrovų aerodinaminis pasipriešinimas priklauso nuo laiko. Įkrovos, sudarytos iš keraminių žiedų, pasipriešinimas siekė 1500 Pa (Liu *et al.* 2006). Įkrovai naudojant kitas medžiagas, tokias kaip durpių ir žievių mišinys, pasiekiamas 1700 Pa/m biofiltro aerodinaminis pasipriešinimas. Mažiausias – 200 Pa/m – aerodinaminis pasipriešinimas gautas biologiniam valymui naudojant medienos skiedras (Kenes and Thalasso 1998).

Biofiltro įkrovos pasipriešinimas, o kartu ir valymo efektyvumas priklauso nuo įkrovos drėgnio bei sorbcinių savybių. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad geriausiomis vandens sorbcinėmis savybėmis pasižymi porolonas.

Iš 2.10 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad pradinėje stadijoje, per įkrovą pučiant orą 0,1 m/s greičiu, po trijų valandų porolono kubelių drėgnis kito nedaug ir siekė apie 75 %. Padidinus oro srauto greitį iki 0,5 m/s, įkrovos drėgnis sumažėjo iki 70 %.



2.10 pav. Įkrovų drėgnio priklausomybės nuo leidžiamo oro srauto greičio

Fig. 2.10. Dependencies of charge humidity on the fed airflow rate

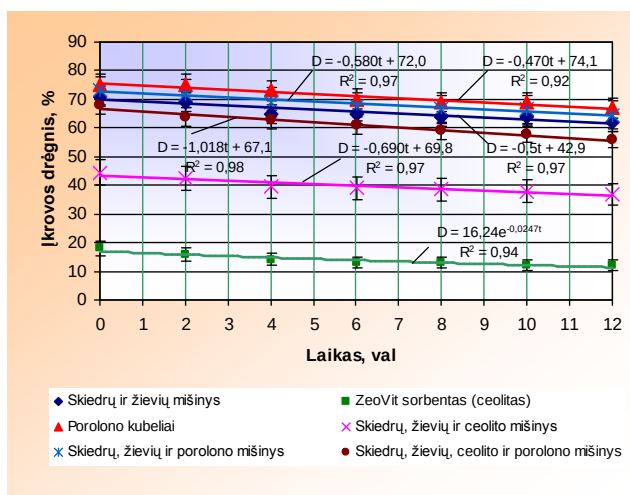
Siekiant pagerinti įkrovos sorbcines savybes, porolono kubeliai maišomi su medienos skiedromis ir žievėmis. Taip medienos skiedrose ir žievėse esantys mikroorganizmai įterpiami į sintetinę įkrovą – poroloną, turintį labai gerų hidrofobinių savybių. Tyrimų metu nustatyta, kad į biofiltrą tiekiant orą 0,1 m/s greičiu, įkrovos, sudarytos iš medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių mišinio, drėgnis siekia 73 %. Padidinus oro judėjimo greitį iki 0,5 m/s, įkrovos drėgnis

sumažėja 6 %. Tačiau, kai yra didelis įkrovos drėgnis, padidėja jos aerodinaminis pasipriešinimas. (Bridžiuvienė *et al.* 1997).

Mažiausių sorbcinių savybių turi ceolito granulės. Ant įkrovos užpylus 1 l vandens granulių, drėgnis siekė 18 %. Mažą drėgmės laipsnį lėmė mažas įkrovos poringumas, kuris kito iki 20 %. Ceolito granules sumaišius su medienos skiedromis ir žievėmis, įkrovos drėgnis padidėja. Kai į įrenginį tiekiamo oro srauto greitis yra 0,3 m/s, drėgnis siekia 40 %. Norint pagerinti įkrovos biosorbcines savybes, įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, žievių ir ceolito granulių, maišoma su porolono kubeliais. Gavus įkrovą, sudarytą iš keturių skirtingos kilmės medžiagų, jos drėgnis padidėja iki 63 %. Esant tokiam įkrovos drėgniui išlaikomos palankios sąlygos mikroorganizmams vystytis (Yamamoto *et al.* 2005).

Siekiant pailginti įkrovos naudojimo laiką siūloma įkrovą, sudarytą iš medienos skiedrų ir žievių, maišyti su ceolitu. Medienos skiedrų ir žievių drėgniui įtakos turi jų akytumas, tai porų – akučių ir tuštumų tūrio santykis su visos medžiagos tūriu. Medienos skiedros ir žievės turi susisieksiančią akytą sandarą, kuri padidina vandens mirklumą. Medienos skiedros padidintų įkrovos drėgnį iki 45 %. Ceolitui būdingas didesnis uždarytų akučių skaičius, o tai padidina šios įkrovos naudojimo laiką ir įkrovos paviršiaus plotą, o kartu ir mikroorganizmų skaičių įkrovoje (ZeoVit ekologiškai... 2006). Tyrimų metu pastebėta, kad didinant tiekiamo oro srauto greitį, įkrovos, sudarytos iš medienos skiedrų, žievių ir ceolito granulių drėgnis mažėja lėčiau nei kitų įkrovų. Padidinus oro srauto greitį nuo 0,4 iki 0,5 m/s, drėgmės nuostoliai padidėja tik 1 %. Ceolito ir medienos skiedrų ir žievių derinys padidina deguonies kiekį įkrovoje. Organinius junginius skaidančių mikroorganizmų gyvybinei veiklai būtinas deguonis kaip vienas svarbiausių medžiagų apykaitos veiksnių (Cox *et al.* 2001). Todėl įkrovoje padidinus deguonies kiekį, padaugėja ir mikroorganizmų, kurie išskiria organinių junginių skaidymo metu susidariusį vandenį. Taip biofiltre sumažinamos vandens sąnaudos.

Medžiagų vandens įgerties greitis ir laipsnis priklauso nuo aplinkos drėgnio ir buvimo drėgnoje aplinkoje trukmės. Iš 2.11 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad per įkrovą leidžiant orą 0,2 m/s greičiu įkrovos drėgnis kinta gana tolygiai. Tačiau mažiausi drėgmės nuostoliai nustatyti tiriant porolono kubelių drėgnį. Iš tyrimo rezultatų matyti, kad po 10 valandų oro tiekimo trukmės, drėgmės kiekis porolone sumažėja iki 69 %, o dar po 2 valandų drėgmė pakito iki 67 %. Pagrindinę įtaką drėgmės kiekiui įkrovoje turi 98 % jos poringumo koeficientas. Gana tolygus drėgnio mažėjimas pastebimas įkrovoje, kurios poringumas siekia 75 %, sudarytoje iš medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių. Po 12 valandų įkrovos drėgnis yra 67 %, mikroorganizmai gali gerai vystytis, nes tokio drėgnio įkrovoje dar yra pakankamai maistinių medžiagų. Iš medienos, žievių ir porolono sudaryta įkrova yra gana gera bioterpė mikroorganizmams vystytis, tačiau laikui bėgant įkrovos savybės keičiasi, todėl ją reikia dažniau keisti.



2.11 pav. Įkrovų drėgnio priklausomybės nuo laiko

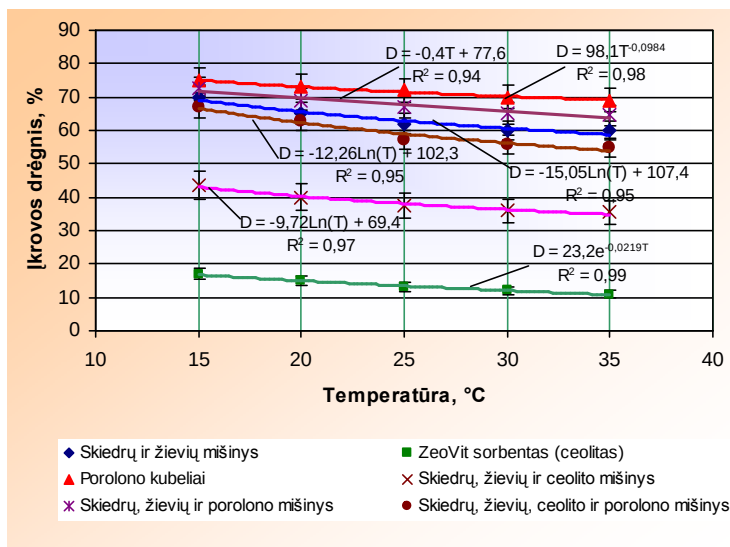
Fig. 2.11. Dependences of charge humidity on time

Didžiausi drėgmės nuostoliai nustatyti medienos skiedrų ir žievių įkrovoje. Jos drėgnis per 12 valandų sumažėja nuo 71 % iki 64 %. Medienos drėgnis laiko atžvilgiu kinta gana tolygiai, todėl galima lengviau kontroliuoti drėgmę įkrovoje, nes mikroorganizmai energijos gauna ne tik iš vandenyje ištirpusių druskų, bet ir iš medienoje ir žievėse esančios anglies. Be to, šiai įkrova naudotos medžiagos yra lengvai gaunamos iš gamtos ir sudaro atliekas kai kuriose pramonės šakose. Medienos skiedras ir žievės sumaišius su porolono kubeliais ir ceolito granulėmis po 4 valandų drėgnis sumažėja tik 5 % ir siekia 63 %. Įkrovos papildomai nedrėkinant 12 valandų, šis skirtingos kilmės medžiagų mišinys išlaiko 56 % drėgnį. Esant tokiam drėgniui įkrova, kurios poringumas siekia 55 %, gali efektyviai filtruoti LOJ užterštą orą.

Siekiant pailginti įkrovos naudojimo laiką, galima ceolitą maišyti su medienos skiedromis ir žievėmis. Nors įkrovos poringumas nėra didelis ir siekia 33 %, tačiau dėl savo fizinių ir cheminių savybių ceolitas yra gana atsparus agresyviai aplinkai, kuri biofiltre būtina mikroorganizmų energijai palaikyti. Be to, ceolitas yra pakankamai atsparus mechaniniams veiksniams, todėl net ir po kelių metų jo paviršiaus sandara nekinta, o tai turi didelę įtaką deguonies pernašai įkrovoje. Dėl savo vidinės sandaros ceolitas turi gerų sorbcinių savybių, todėl net ir labai sumažėjus tiekiamai organinių junginių koncentracijai jis gali veikti kaip adsorbentas. Tyrimų metu nustatyta, kad iš medienos skiedrų, žievių ir ceolito granuliu sudarytos įkrovos drėgnis po 4 valandų sumažėjo nuo 45 iki 40 %. Vėliau jis kito

nedaug ir po 12 valandų siekė 37 %. Tokį nedidelį įkrovos drėgnį lėmė gana didelis ceolito tankis.

Tiriant ceolito granulių drėgnį, iš pradžių pasiekiami gana dideli drėgmės nuostoliai. Tyrimai parodė, kad ceolito drėgnis po 12 valandų sumažėjo nuo 18 iki 12 %. Taip atsitinka dėl to, jog pirmiausia išgaruoja laisvoji drėgmė, t. y. vanduo greičiau išgaruoja nuo ceolito paviršiaus. Paties ceolito poringumas nėra didelis (apie 20 %), tad dalis drėgmės, susitelkusios ląstelių sienelėse, likusios jo vidinėje dalyje, garuoja lėčiau. Mikroorganizmai gali greičiau vystytis viršutinėje ceolito paviršiaus dalyje.



2.12 pav. Įkrovų drėgnio priklausomybės nuo leidžiamo oro srauto temperatūros

Fig. 2.12. Dependencies of charge humidity on the fed airflow temperature

Vienas pagrindinių veiksnių, lemiančių įkrovos drėgmės pokyčius, yra į įrenginį tiekiamo oro srauto temperatūra (2.12 pav.).

Per įkrovą leidžiant oro srautą 0,2 m/s greičiu, po 3 val. įkrovos drėgnis biofiltre palaikomoje 15 °C temperatūroje sumažėja nedaug. Didesni temperatūrų pokyčiai pastebimi palaipsniui didinant oro, o kartu ir bioterpės temperatūrą. Biofiltre temperatūrą padidinus iki 35 °C, labiausiai drėgmės kiekis sumažėja medienos skiedrose ir žievėse, kuriose drėgmė sumažėja nuo 70 iki 60 %. Mažiausiai temperatūrų svyravimai veikia porolono kubelius, kurių drėgnis po 3 valandų 35 °C temperatūroje sumažėjo iki 69 %. Iš 2.12 paveiksle pateiktų duome-

nų matyti, kad biologiniam oro valymui galima naudoti įkrovą, sudarytą iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišinio. Per biofiltrą leidžiamo oro srauto temperatūrai pakilus iki 30 °C, šios įkrovos drėgnis pakito nedaug ir siekė 56 %. Be to, orui valyti naudojant šią įkrovą bus sumažintos sąnaudos biogeninių elementų prisotintam vandeniui tiekti.

Siekiant sumažinti įkrovai drėkinti naudojamo vandens sąnaudas, siūloma medienos skiedras ir žieves maišyti su porolono kubeliais. Tuomet, palaikant mikroorganizmams palankiausią 30 °C temperatūrą filtre, įkrovos drėgnis po 3 valandų siektų 65 %. Medienos skiedras, žieves ir ceolito granules sumaišius su porolono kubeliais, įkrovos drėgnis bus padidintas iki 56 %. Be to, naudojant ceolito granules bus padidintas įkrovos naudojimo laikas ir įrenginio valymo efektyvumas, nes ceolitas dėl savo taisyklingos vidinės struktūros ir didelio sorbcinio paviršiaus yra geras organinių junginių adsorbentas (Cheng and Reinhard 2006). Mokslininkų atlikti tyrimai su skirtingomis įkrovomis parodė, kad įkrovų drėgnis priklauso nuo biofiltro įrengto drėkinimo sistemos. Komposto drėgnis gali siekti 50–70 %, durpių – 60–70 %, komposto ir perlito mišinio – 50–55 %, durpių ir stiklo šukių – 65–70 % (Kennes and Thalasso 1998).

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Mikroorganizmai gali daugintis tik tokiuose substratuose, kuriuose yra tam tikras kiekis vandens ir ištirpusių maisto medžiagų, todėl tyrimams naudojamų įkrovų pasirinkimą lėmė geros jų sorbcinės savybės, didelis paviršiaus plotas ir ilgaamžiškumas. Tarpusavyje maišant medienos skiedras, žieves, ceolitą ir poroloną pagerinamos šios įkrovos sorbcinės, aerodinaminės ir biodegradacijos savybės.
2. Atlikus aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus rastos tinkamiausios biologiniam oro valymui naudojamų ceolito ir porolono įkrovų frakcijos, siekiančios atitinkamai 10 ir 20 mm.
3. Biofiltro, užkrauto įkrova, sudaryta iš skirtingos kilmės medžiagų, aerodinaminis pasipriešinimas, esant 0,3 m/s leidžiamo oro srauto greičiui, siekia iki 1226 Pa. Norint sumažinti įkrovos pasipriešinimą būtina mažinti į įrenginį tiekiamo oro srauto greitį iki 0,1 m/s.
4. Mažiausiomis drėgmės sorbcinėmis savybėmis pasižymėjo ceolito granulės. Šios įkrovos drėgnis biofiltre siekė 18 %. Tačiau ceolitas gerai veikia kaip adsorbentas, todėl, jį sumaišius su porolono kubeliais, medienos skiedromis ir žievėmis įkrovos drėgnis padidėja iki mikroorganizmų vystymuisi optimalaus – 56 %.

Kiekybiniai mikroorganizmų tyrimai aktyvintose ZeoVit sorbento granulėse ir porolone

Siekiant pailginti įkrovos naudojimo laiką ir pagerinti biofiltro oro valymo efektyvumą, galima derinti kelis valymo metodus – biologinį su adsorbciniu. Biofiltrą užkrovus medienos skiedrų, žievių ir ceolito granulių mišiniu, ne tik bus pailgintas įkrovos naudojimo laikas, bet ir pagerintos filtruojančios terpės sorbcinės savybės. Savaiminių mikroorganizmų kultūros galės vystytis medienos skiedrų, žievių ir gamtinio ceolito porose. Ant ceolito paviršiaus susidariusioje bioplėvelėje esantys mikroorganizmai suskaidys ceolito porose susikaupusius organinius junginius, todėl nereikės jo regeneruoti. Geresnėms įkrovos sorbcinėms savybėms užtikrinti medienos skiedras ir žieves galima maišyti su didesni sorbcinį paviršių turinčiomis įkrovomis, tokiomis kaip porolonas. Tuomet įkrova turės geras drėgmės sorbcines savybes, mažesnę tankį, didelį savitojo paviršiaus plotą, bus pigi. Tyrimų metu nustatytas didelis mikroorganizmų aktyvumas ceolito ir porolono įkrovose. Taip pat nustatyta, kad savaiminių mikroorganizmų skaičių stipriai veikia bioterpės temperatūra ir per įkrovą leidžiamo teršalo prigimtis.

Skyriaus medžiaga publikuota autoriaus paskelbtose mokslinėse publikacijose (Baltrėnas and Zagorskis 2007b, 2008b).

3.1. Bakterijų ir mikromicetų kiekybinių tyrimų ZeoVit sorbento ir porolono ėminiuose metodika

Ekspperimentiniai tyrimai atlikti naudojant biologinį oro valymo įrenginį – biofiltrą. Nors įrenginys turi viena virš kitos išdėstytas penkias kasetes, tyrimams pasirinkta viena vidurinė filtro kasetė (3.1 pav.). Žinoma, ceolito granulės pagerina teršalų adsorbciją ir padidina įkrovos naudojimo laiką, o porolonas turi geras biogeninių elementų prisotinto vandens sorbcines savybes. Todėl manoma, kad šių įkrovų naudojimas biologiniam oro valymui nuo lakiųjų organinių junginių padidins įkrovos naudojimo laiką ir įrenginio valymo efektyvumą. Šio tyrimo tikslas – nustatyti mikroorganizmų skaičiaus priklausomybę nuo įrenginyje palaikomos temperatūros, leidžiamo teršalo prigimties ir pačios įkrovos rūšies. Savaiminių mikroorganizmų aktyvumas neorganinės ar dirbtinės kilmės įkrovose yra labai mažas, todėl įkrovos, sudarytos iš ZeoVit sorbento granulių ir porolono kubelių, maišomos su medienos skiedromis ir žievėmis. Atlikti įkrovų aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai parodė, kad orui valyti tinkamiausia ceolito granulių frakcija yra 10–15 mm, o porolono kubelių – 20 mm. Siekiant išlaikyti įkrovos homogeniškumą, kad į įrenginį tiekiamas oro srautas ir drėgmė tolygiai pasiskirstytų per visą įkrovos sluoksnį, ceolito granulės ir porolonas maišomas su 10–15 mm dydžio medienos skiedromis ir žievėmis. Medienos skiedrų ir žievių dydis parinktas pagal ceolito granulių frakciją. Skirtingos kilmės medžiagos sumaišomos taip, kad tolygiai pasiskirstytų per visą įkrovos sluoksnį. Į biofiltro kasetę užkrautų ceolito granulių, porolono kubelių, medienos skiedrų ir žievių santykis pagal tūrį yra vienodas (1:1:1:1). Kasetė pilnai užkraunama įkrova, kurios sluoksnis yra 0,50 m ilgio, 0,48 m pločio ir 0,15 m aukščio.

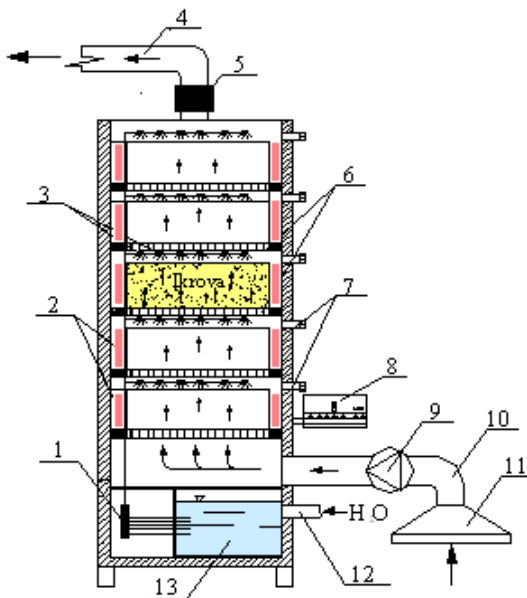
Tyrimams naudojami reagentai, laboratoriniai indai, matavimo priemonės ir įranga:

acetonas (99,9 % grynumo), butanolis (99,9 % grynumo), toluenas (99,9 % grynumo), Nutrient Agar (kilmės šalis Italija), Alaus misos terpė, Petri lėkštelės (U 50 mm, $h = 30$ mm), pipetė (10 ml); sugraduotas, karščiui atsparus indas (1000 cm^3), kratytuvas, autoklavas, mėgintuvėliai, piestelė, pipetės (300 ml), švirkštas (400 ml), dujų chromatografas SRI 8610 Nr. 942 (detektoriaus temperatūra – $200 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$), elektrinė viryklė.

Prieš paleidžiant biofiltrą, pincetu iš skirtingų sluoksnio gylių paimami kontroliniai ceolito ir porolono ėminiai mikroorganizmų skaičiui nustatyti. Paėmus mėginius įkrova ruošama aktyvinti.

Prieš paleidžiant biofiltrą, įkrova drėkinama virš jos sluoksnio įrengtais vandens purkštukais. Tam, kad būtų išlaikytas tolygus oro srautas ir perteklinis vanduo nutekėtų į filtro apatinėje dalyje įrengtą vandens rezervuarą, bioterpės sluoksniai atskirti vienas nuo kito metaliniais tinkleliais. Drėgnis įkrovoje kon-

troliuojamas svoriniu metodu (metodas aprašytas antrame skyriuje). Per parą viso įkrovos tūrio ($0,0360 \text{ m}^3$) drėgniui palaikyti ant įkrovos išpurškiama apie 5 l vandens. Ėminių paėmimo taškai drėgniui nustatyti pavaizduoti 2.5 paveiksle.



3.1 pav. Eksperimentinio biofiltro schema

Fig. 3.1. An experimental biofilter scheme

Biofiltrą (3.1 pav.) sudaro teršalų surinkimo gaubtas 11 per kurį į įrenginį tiekimo ortakiu 10 tiekiami teršalo garai. Oro srautą sukelia prieš biofiltrą įrengtas ventiliatorius 9. Filtre įrengti purkštukai 3. Į purkštukus vandeniu tiekiamas iš vandens rezervuaro 13 siurbliu 1. Temperatūrą palaiko biofiltro šonuose įrengti šildymo tenai 2. Įrenginio kasetės viena nuo kitos atskirtos metaliniais sietais 6. Biofiltre sumontuoti atvamzdžiai 7, valdymo pultas 8 bei šalinimo ortakis 4.

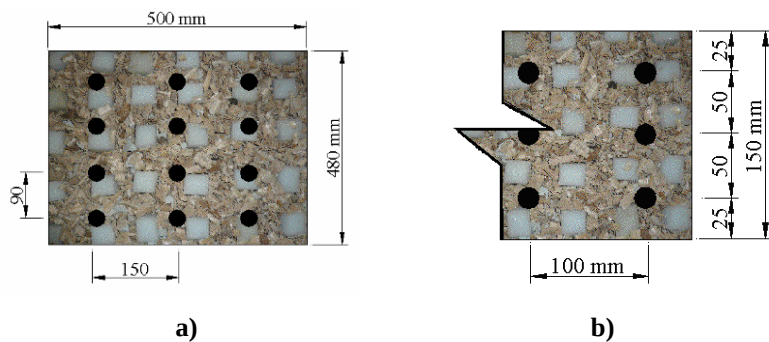
Mikroorganizmams augti ir energijai užtikrinti reikalingas mineralinių druskų tirpalas, iš kurio mikroorganizmai gauna gyvybiškai svarbių biogeninių elementų. Druskų tirpalas susideda iš: K_2HPO_4 – 1 g, KCl – 0,5 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,1 g, NaNO_3 – 0,90 g, distiliuoto vandens – 1000 g (Baltrėnas and Vaiškūnaitė 2003). Šis tirpalas pilamas į vandens rezervuarą ir išpurškiamas virš įkrovos sluoksnio. Norint, kad vyktų savaiminis mikroorganizmų egzistavimas, bioterpėje reikia palaikyti reikiamą rūgštingumą, kuris lygus $\text{pH} = 7,0$. Rūgštingumui palaikyti naudojami buferiniai tirpalai. Bioterpės rūgštingumas matuojamas pH-metru.

Reikiamai bioterpės temperatūrai palaikyti naudojami ties filtro sienelėmis įrengti oro šildytuvai, kuriais aktyvinant įkrovą biofiltre palaikoma pastovi 30 °C oro temperatūra.

Mikroorganizmų energijai palaikyti į įrenginį tiekiamos skirtingos acetono garų koncentracijos. Acetoną mikroorganizmai naudoja kaip maistą, į aplinką išskirdami CO₂ ir vandens garus. Skirtingos koncentracijos gaunamos teršalus skiedžiant vandeniu ir kaitinant ant elektrinės plytelės. Pirminiu aktyvinimo etapu, esant nedideliame mikroorganizmų kiekiui įkrovoje, į įrenginį tiekiamas nedidelė teršalo garų koncentracija, siekianti 23 mg/m³. Į įrenginį teršalo garai tiekiami 4 kartus per parą po 15 minučių. Vėliau kas dvi paras didinama organinio junginio koncentracija po 20 mg/m³ pailginant acetono garų tiekimo trukmę iki 1 valandos. Viso įkrova buvo aktyvinta 3 savaites.

Po įkrovos aktyvinimo periodiškai tris paras per įkrovą leidžiami 305±10 mg/m³ koncentracijos acetono garai. Šildymo tenais biofiltre palaikoma pastovi 20 °C temperatūra. Pastovus 0,20 m/s oro srauto greitis biofiltre palaikomas ventiliatoriumi ir oro srauto reguliavimo sklende. Prieš paimant ėminius vokečių firmos matuokliu *Testo 452* matuojami oro srauto greitis ir temperatūra.

Bakterijų ir mikromicetų skaičiui nustatyti iš skirtingų įkrovos sluoksnio vietų imami porolono ir ceolito ėminiai. Siekiant tiksliau įvertinti mikroorganizmų kolonijas sudarančių vienetų skaičių visame įkrovos sluoksnyje, ceolito granulės ir porolono kubeliai imami iš skirtingų įkrovos skerspjūvio vietų ir gylių tinklelio principu. Ėminių paėmimo vietos pavaizduotos 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Ėminių paėmimo vietos: a) horizontaliojoje įkrovos plokštumoje, b) vertikaliojoje įkrovos plokštumoje

Fig. 3.2. Sampling places: a) in charge's horizontal plane, b) in charge's vertical plane

Ėminiai imami pincetu ir dedami į pašildytus biuskus. Mikrobiologiniams tyrimams atlikti biuskai dedami į sandarią medinę dėžutę, apsaugančią ėminius

nuo ultravioletinių saulės spindulių. Tyrimai atliekami Botanikos instituto Bio-destruktorių tyrimo laboratorijoje, kurioje nustatomas mikroorganizmų kolonijas sudarančių vienetų (ksv) skaičius.

Paėmus ėminius filtre įrengtu termostatu leidžiamo oro srauto temperatūra padidinama iki 25 °C. Periodiškai per įkrovą leidžiamas acetono garais užterštas oras. Po trijų parų imami įkrovos ėminiai mikrobiologiniams tyrimams. Paskui tyrimai kartojami palaikant biofiltre 30 ir 35 °C temperatūras.

Atlikus eksperimentinius tyrimus su acetonu, tyrimai kartojami su kitais teršalais: butanolio ir toluenu.

Siekiant nustatyti įkrovos valymo efektyvumo priklausomybę nuo mikroorganizmų skaičiaus prieš įkrovą užpildytą kasetę ir po jos matuojamos teršalo koncentracijos. Teršalų koncentracijoms nustatyti oro mėginiai imami tam skirtoje mėginių paėmimo vietose, kiekvieną matavimą kartojant po 3 kartus.

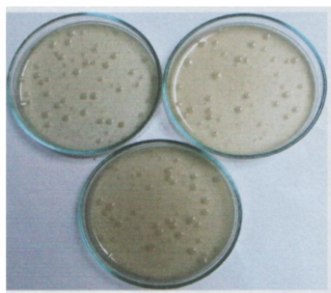
Oro ėminys iš ortakio nutraukiamas per nerūdijančiojo plieno vamzdelį ($d = 5 \text{ mm}$, $l = 30 \text{ cm}$) į švarią 0,25 l dujinę pipetę 0,25 l/min greičiu. Siurbiamo 5 minutes. Baigus nutraukimą, pipetės galai per silikonines žarnėles hermetiškai užkemšami stikliniais kamštukais ir dar žarnelės suspaudžiamos Moro spaustu-kais. Mėginiai analizuojami tą pačią dieną.

Teršalų koncentracija nustatoma dujų chromatografu SRI 8610 Nr. 942. Įjungus chromatografą nustatomi tokie analizės eigos parametrai: azoto dujų greitis – 30 ml/min, vandenilio dujų greitis – 30 ml/min, oro greitis – 200 ml/min, kolonėlės termostato temperatūra – 100 ± 2 °C, garintuvo temperatūra – 200 ± 5 °C, detektoriaus temperatūra – 200 ± 5 °C. Paskui tikrinama nulinė linija. Kai chromatografas paruoštas darbui, dujinė pipetė su mėginiu švelniai pašildoma iki 45 ± 5 °C ir išlaikoma 1 valandą. Iš jos per silikoninę žarnelę į švarų medicininį švirkštą pritraukiama 1 cm³ analizuojamo mėginio ir leidžiama į dujų chromatografo garintuvą. Užrašomos ne mažiau kaip trys chromatogramos. Pagal kurias apskaičiuojama acetono garų koncentracija.

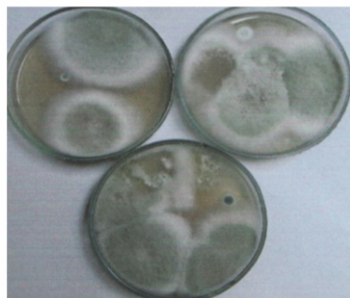
Įkrovų mikrobiologiniai tyrimai pradami atsveriant po 1 g ceolito ir porolono ėminių. Grūstuvėlių ceolitas sutrinamas sterilioje keramikinėje piestelėje. Porolonas sukarpomamas smulkesniais gabalėliais. Taip paruošti ceolito ir porolono ėminiai dedami į kolbutę su 100 ml sterilaus distiliuoto vandens ir kratoma 10 min. Gauta suspensija skiedžiama iki tinkamos sėti koncentracijos. Pirmas skiedimas atitinka 1:100, suspensija skiedžiama pernešant 1 ml suspensijos į mėgintuvėlius su 9 ml sterilaus vandens. Paruošiama keletas praskiedimų 1:1000, 1:10 000, 1:100 000, 1:1 000 000. Prieš sėjant mėgintuvėlis sukratomas. Iš pasirinkto suspensijos praskiedimo po 1 ml pilama į Petri lėkštelę ir užpilama ištirpinta praečiusia agarizuota terpe. Mikromicetams išskirti buvo naudojama alaus misos terpė su levomicetinu (100 mg/l), bakterijoms – Nutrient agaras.

Mitybinio agaro sudėtis: distiliuotas vanduo – 1000 g, agaras – 15,0 g, peptonas – 5,0 g, NaCl – 5,0 g, mielių ekstraktas – 5,0 g, mėsos ekstraktas – 1 g. Sė-

jama 3 pakartojimais. Kol terpė nesustingusi, lėkštelė kraipoma, kad terpė susimaišytų su suspensija ir vienodai pasiskleistų lėkštelės dugne. Vėliau Petri lėkštelės su mikroorganizmais yra inkubuojamos termostate. Užaugintos mikroorganizmų kultūros pateiktos 3.3 paveiksle.



a)



b)

3.3 pav. Mikroorganizmai išskirti ceolito mėginiuose per įkrovą leidžiant butanolio užterštą orą: a) bakterijos, b) mikromicetai

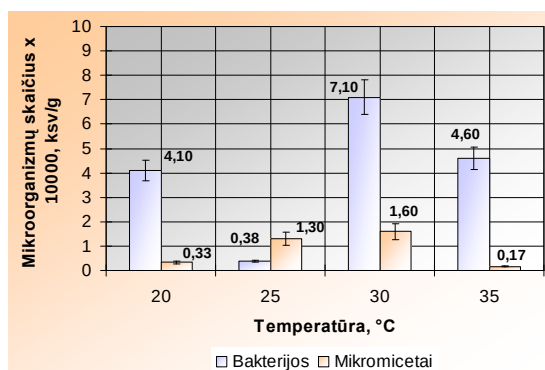
Fig. 3.3. Microorganisms obtained from zeolite samples when passing butanol-polluted air through the charge: a) bacteria, b) micromycetes

Petri lėkštelės su bakterijomis inkubuojamos termostate 2–3 paras, mikromicetai 5–7 paras 26–28 °C temperatūroje. Suskaičiuojamos mikromicetų, bakterijų kolonijos ir apskaičiuojamas jų pradų kiekis 1 g tiriamos medžiagos. Gyvų ląstelių skaičius apskaičiuojamas padauginus kolonijų skaičiaus lėkštelėse vidurkį iš skiedimo koeficiento.

3.2. Mikroorganizmų kiekybinių tyrimų skirtingos kilmės įkrovose rezultatai

Grafikuose pateiktos mikroorganizmų skaičiaus priklausomybės nuo biofiltrė palaikomos oro temperatūros ir leidžiamo teršalo prigimtės.

Iš 3.4 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad per medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišinį leidžiant acetono garais užterštą orą didžiausias mikroorganizmų kiekis pasiektas 30 °C oro srauto temperatūroje. Tioje temperatūroje bakterijų skaičius ceolite siekė $7,1 \times 10^4$ kvs/g, o mikromicetų – $1,6 \times 10^4$ kvs/g. Kylant temperatūrai mikroorganizmų skaičius mažėja. Mikroorganizmų aktyvumą mažina ir blogesnis teršalų tirpumas vandenyje biofiltre palaikant aukštesnę temperatūrą.

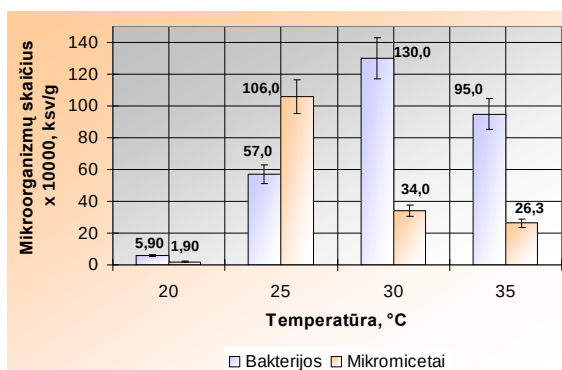


3.4 pav. Ceolito ėminiuose rastų mikroorganizmų skaičiaus priklausomybė nuo įrenginyje palaikomos temperatūros, per įkrovą leidžiant acetonu užterštą orą

Fig. 3.4. The dependence of the quantity of microorganisms in zeolite samples on temperature maintained in the device when passing acetone-polluted air through the charge

Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad naudojamoje įkrovoje, sudarytoje iš 10–15 mm stambumo ceolito granulių valant iš oro acetoną, dominavo bakterijos, kurios yra svarbiausios skaidant organinius junginius. Didžiausias bakterijų kiekis buvo gautas 30 °C bioterpės temperatūroje. Todėl esant būtent šiai temperatūrai geriausiai veikia ceolitas. Didelis bakterijų skaičius buvo aptiktas porolone – 1300×10^3 ksv/g. Didesnį bakterijų skaičių porolone lėmė mažesnis šios įkrovos tankis ir didesnis sorbcinio paviršiaus plotas.

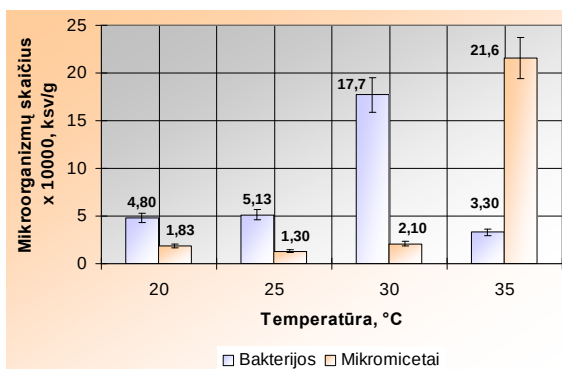
Per įrenginį leidžiant acetono garais užterštą orą geriausiai mikroorganizmai geba prisitaikyti įkrovoje, sudarytoje iš porolono (3.5 pav.). Žinoma, kad ceolitas pasižymi geresnėmis ilgaamžiškumo savybėmis, todėl norint gauti aukštą teršalų išvalymo efektyvumą, galima šias įkrovas tarpusavyje maišyti. Mikromicetai geriau linkę vystytis 25 °C temperatūroje, kurioje mikromicetų skaičius įkrovoje siekia $10,6 \times 10^5$ ksv/g. Mažiausiai mikroorganizmų aptikta porolono įkrovoje palaikant 20 °C temperatūrą. Kylant temperatūrai aktyvėja mikroorganizmų medžiagų apykaita – metabolizmas. Daugindamiesi, augdami ir kvėpuodami organizmai naudoja maisto medžiagas ir energiją. Be to, kylant temperatūrai didėja substrato fermentacijos reakcijos greitis. Optimalioje, 30 °C, temperatūroje mikroorganizmų ląstelėse vyksta labai intensyvi medžiagų apykaita. Palankiomis sąlygomis viena ląstelė maisto – substrato sunaudoja 30–40 kartų daugiau, negu pati sveria. Padidinus aplinkos temperatūrą nuo 30 °C iki 35 °C, acetoną skaidančių mikroorganizmų skaičius sumažėja nuo $8,70 \times 10^4$ iki $4,77 \times 10^4$ ksv/g.



3.5 pav. Porolono ėminiuose rastų mikroorganizmų skaičiaus priklausomybė nuo filtre palaikomos temperatūros, per įkrovą leidžiant acetonu užterštą orą

Fig. 3.5. The dependence of the quantity of microorganisms in foam samples on temperature maintained in the device when passing acetone-polluted air through the charge

Tiek ceolite, tiek porolone daugiausia bakterijų aptikta 30 °C aplinkos temperatūroje, nes organinius junginius skaidantys psichrofiliniai ir mezofiliniai mikroorganizmai dažniausia nesugeba prisitaikyti prie aukštesnės temperatūros. Biofiltre palaikant 35 °C temperatūrą ceolite bakterijų sumažėjo iki $4,6 \times 10^4$ kvs/g, o porolone – $9,5 \times 10^5$ ksv/g.

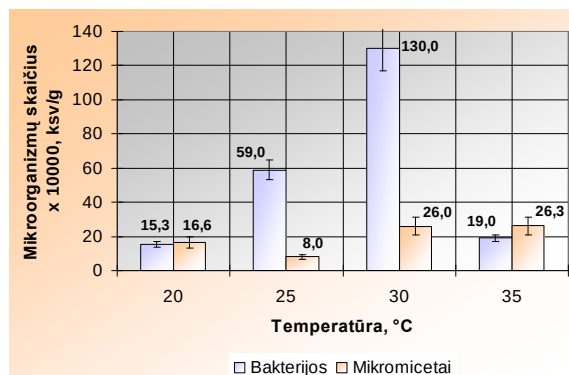


3.6 pav. Ceolito ėminiuose rastų mikroorganizmų skaičiaus priklausomybė nuo įrenginyje palaikomos temperatūros, per įkrovą leidžiant butanoliu užterštą orą

Fig. 3.6. The dependence of the quantity of microorganisms in zeolite samples on temperature maintained in the device when passing butanol-polluted air through the charge

Valant orą nuo butanolio 30 °C oro temperatūroje, įkrovoje dominavo bakterijos, tačiau 35 °C temperatūroje ceolito granulėse pradeda dominuoti mikromicetai. 30 °C temperatūroje bakterijų skaičius ceolite siekė $17,7 \times 10^4$ ksv/g.

30 °C temperatūroje porolone rasta 1300×10^3 ksv/g bakterijų (3.7 pav.). Ceolite buvo rasta 177×10^3 ksv/g bakterijų. Tačiau padidinus bioterpės temperatūrą iki 35 °C, mikromicetų skaičius porolone ir ceolite yra panašus ir siekia apie 260×10^3 ksv/g.

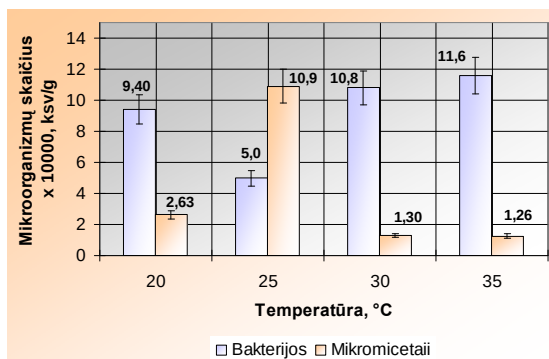


3.7 pav. Porolono ėminiuose rastų mikroorganizmų skaičiaus priklausomybė nuo įrenginyje palaikomos temperatūros, per įkrovą leidžiant butanolio užterštą orą

Fig. 3.7. The dependence of the quantity of microorganisms in foam samples on temperature maintained in the device when passing butanol-polluted air through the charge

Nors porolono geras sorbcijos koeficientas, didelis savitojo paviršiaus plotas ir poringumas, tačiau dėl savo sudėties yra mažai atsparus mikroorganizmų poveikiui. Didžiausią įtaką porolono, kuriame yra polimerinių medžiagų, kolonizavimui ir ardymui turi mikromicetai. Mikromicetai minta įkrovos paviršiuje esančiomis maistinėmis medžiagomis. Kuo tokiame paviršiuje yra daugiau medžiagų, kurias mikromicetai gali pasisavinti, tuo jis geriau auga ir vystosi. Mikromiceto micelio sąlyčio su įkrova paviršius didėja, mityba intensyvěja. Atsiranda nauja generacija. Medžiaga, ant kurios išsivystė mikromicetai, pradeda irti, jos svoris mažėja, keičiasi išvaizda ir eksploatacinės savybės. Porolonui yrant atsiranda naujų metabolitų, kurie jungiasi su mikromicetų išskirtais metabolitais.

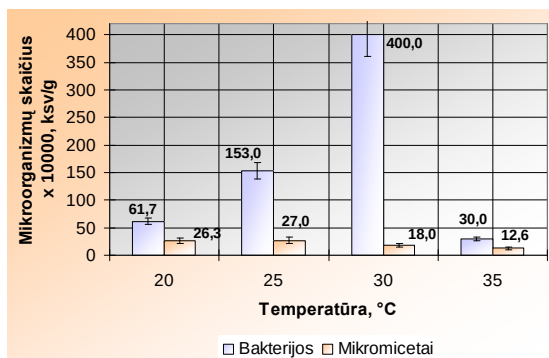
Didžiausias bakterijų skaičius valant orą nuo tolueno buvo gautas, kai bioterpės temperatūra siekė 35 °C. Taigi ceolite pradeda dominuoti bakterijos, kurios labiau prisitaikiusios prie termofilinių sąlygų (3.8 pav.).



3.8 pav. Ceolito ėminiuose rastų mikroorganizmų skaičiaus priklausomybė nuo įrenginyje palaikomos temperatūros, per įkrovą leidžiant toluenu užterštą orą

Fig. 3.8. The dependence of the quantity of microorganisms in zeolite samples on temperature maintained in the device when passing toluene-polluted air through the charge

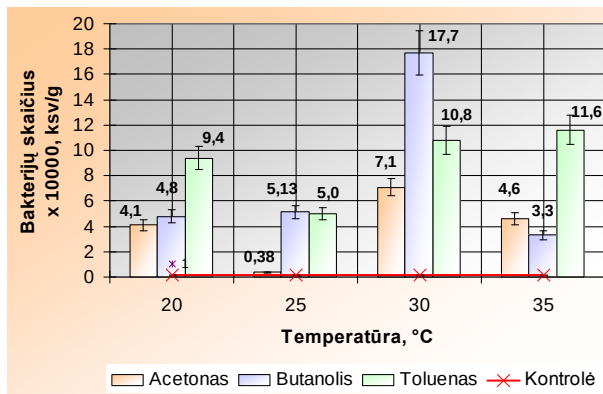
Valant orą nuo tolueno įkrovose, sudarytose iš ceolito ir porolono, dominuoja bakterijos. Lyginant porolone ir ceolito granulėse rastų bakterijų skaičių, pastebimas didelis bakterijų skaičiaus augimo lygis porolone. Didžiausias bakterijų skaičiaus skirtumas tarp ceolito ir porolono įkrovų gaunamas 25 °C temperatūroje ir siekia 1500×10^3 ksv/g.



3.9 pav. Porolono ėminiuose rastų mikroorganizmų skaičiaus priklausomybė nuo įrenginyje palaikomos temperatūros, per įkrovą leidžiant toluenu užterštą orą

Fig. 3.9. The dependence of the quantity of microorganisms in foam samples on temperature maintained in the device when passing toluene-polluted air through the charge

Daugiausia mikromicetų nustatyta įkrovoje, sudarytoje iš porolono. Didžiausias mikroskopinių grybų kiekis pasiekiamas 20 ir 25 °C temperatūroje. Taigi valant iš oro tolueną geriausiomis valomosiomis savybėmis pasireiškia porolonas.



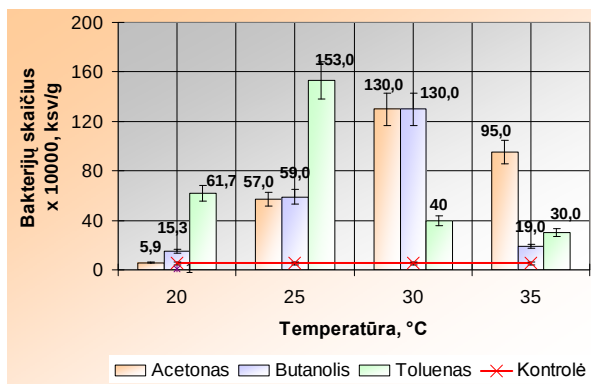
3.10 pav. Ceolite išskirtų bakterijų skaičiaus priklausomybė nuo leidžiamo teršalo prigimtės ir į įrenginį tiekiamo oro srauto temperatūros

Fig. 3.10. The dependence of the quantity of bacteria evolved in zeolite on a type of a fed pollutant and temperature of an airflow fed to the device

Mikroorganizmų gebėjimas oksiduoti pasirinktus teršalus taip pat priklauso nuo filtro įkrovos biologinio suaktyvinimo. Iš 3.10 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad mikroorganizmų skaičius po aktyvinimo labai padidėjo. Kontroliniame ceolito ėminyje prieš aktyvinimą bakterijų skaičius siekė tik $1,4 \times 10^3$ ksv/g.

Tyrimais nustatyta, kad mikroorganizmai gali vystytis ir neorganinės kilmės įkrovoje – ceolite. Didžiausias mikroorganizmų skaičius rastas valant orą nuo butanolio 30 °C oro temperatūroje. Bakterijų kiekis ceolito ėminyje siekė $17,7 \times 10^4$ ksv/g. Didžiausias bakterijų kiekis iš oro valant acetoną ir tolueną buvo gautas 30 °C temperatūroje.

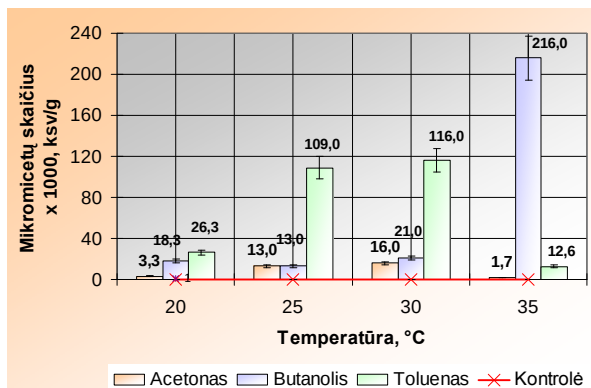
Bakterijos taip pat gali daugintis įkrovoje, sudarytoje iš porolono. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatytas didelis mikroorganizmų skaičius skaidant tokius organinius junginius, kaip acetonas, butanolis ar toluenas. Valant orą nuo acetono ar butanolio viename grame porolono, kai oro srauto temperatūra yra 30 °C, bakterijų skaičius siekė 1300×10^3 ksv/g. Valant orą nuo tolueno, didžiausias bakterijų skaičius gautas porolone. Biofiltre palaikant 25 °C temperatūrą įkrovoje rasta 1530×10^3 ksv/g bakterijų. Porolone pastebimas didesnis mikromicetų skaičius. Galima daryti prielaidą, kad įkrovoje dominuoja mezofilai.



3.11 pav. Porolone išskirtų bakterijų skaičiaus priklausomybė nuo leidžiamo teršalo prigimtės ir į įrenginį tiekiamo oro srauto temperatūros

Fig. 3.11. The dependence of the quantity of bacteria evolved in foam on a type of a fed pollutant and temperature of an airflow fed to the device

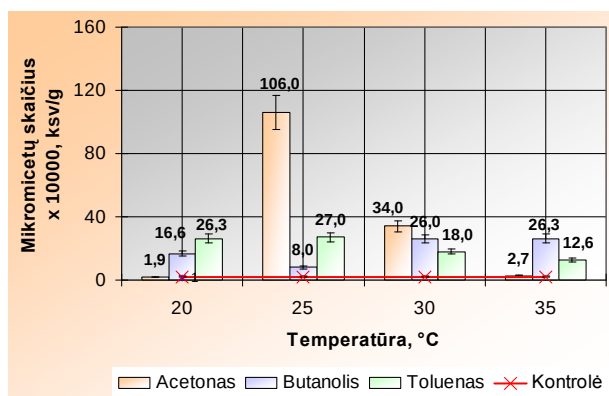
Valant orą nuo acetono 1 grame ceolito 30 °C oro temperatūroje aptikta 16×10^3 ksv/g mikromicetų. Didžiausias mikromicetų skaičius ceolite buvo aptiktas valant orą nuo butanolio. 35 °C temperatūroje grybų skaičius ceolite siekė 216×10^3 ksv/g. Valant orą nuo tolueno ceolite aptikta 109×10^3 ksv/g grybų (mikromicetų). Neaktyvuotame ceolite mikromicetų yra labai nedaug – tik 200 ksv/g. Suaktyvinus mikromicetų kiekis gerokai išaugo iki 216×10^3 ksv/g (3.12 pav.).



3.12 pav. Ceolite išskirtų mikromicetų skaičiaus priklausomybė nuo leidžiamo teršalo prigimtės ir į įrenginį tiekiamo oro srauto temperatūros

Fig. 3.12. The dependence of the quantity of micromycetes evolved in zeolite on a type of a fed pollutant and temperature of an airflow fed to the device

Mikroorganizmų aktyvumas padidėjo ceolitą ir poroloną sumaišius su medienos skiedromis ir žievėmis. Padidėjusį aktyvumą rodo gautas nedidelis mikroorganizmų kiekis prieš aktyvinimą paimtuose kontroliniuose ceolito ir porolono ėminiuose.



3.13 pav. Porolone išskirtų mikromicetų skaičiaus priklausomybė nuo leidžiamo teršalo prigimtės ir į įrenginį paduodamo oro srauto temperatūros

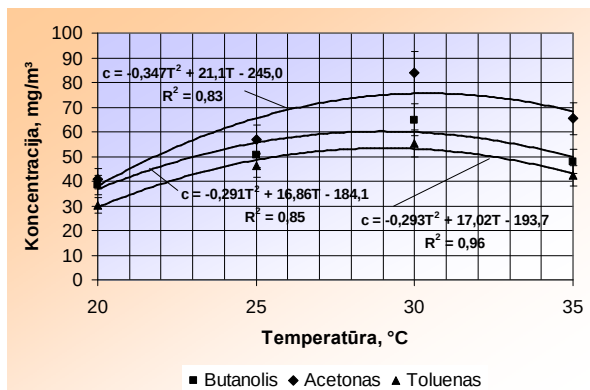
Fig. 3.13. The dependence of the quantity of micromycetes evolved in foam on a type of a fed pollutant and temperature of an airflow fed to the device

Porolone pastebimas didesnis mikromicetų skaičius. Valant orą nuo acetono 25 °C temperatūroje mikroskopinių grybų skaičius siekia 1060×10^3 ksv/g. Valant orą nuo butanolio didėjant tiekiamai oro srauto temperatūrai pastebima, kad daugėja mikromicetų. Biofiltre palaikant 35 °C temperatūrą mikromicetų skaičius porolone siekia 260×10^3 ksv/g. Valant orą nuo tolueno daugiau mikroskopinių grybų rasta žemesnėje temperatūroje. 20 °C oro temperatūroje mikromicetų skaičius siekia 263×10^3 ksv/g.

Eksperimentinių tyrimų metu buvo nustatinėjamos teršalų garų koncentracijos ir jų priklausomybės nuo biofiltre palaikomos oro temperatūros. Tyrimai parodė, kad didžiausią įtaką įkrovos valymo efektyvumui turėjo bakterijos. Nors mikroorganizmų skaičius įkrovoje, sudarytoje iš gamtinės kilmės ceolito, yra gerokai mažesnis nei porolone, tačiau valymo efektyvumas, palyginti su įkrovos, sudarytos iš porolono, medienos skiedrų ir žievių, išliko panašus. Didžiausias valymo efektyvumas pasiektas orą valant nuo acetono. 150 mm sluoksnio aktyvinta įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, žievių, ceolito ir porolono kubelių, sorbavo ir sulaukė 84 mg/m³ acetono (3.14 pav.).

Didžiausias oro valymo nuo acetono, butanolio ir tolueno efektyvumas pasiektas biofiltre palaikant 30 °C oro temperatūrą. Blogiausiai įkrova sorbavo to-

lueną. Toluenas priklauso hidrofobinių LOJ grupei ir yra mažiau tirpus už acetoną ar butanolį, todėl blogiau tirpsta vandenyje.



3.14 pav. Teršalų koncentracijų prieš ir po kasetės, užpildytos įkrova iš skirtingų medžiagų, skirtumas priklausomai nuo biofiltre palaikomų temperatūrų

Fig. 3.14. The difference in pollutant concentrations before and after a cassette filled with a charge of different materials depending on the temperature maintained in the biofilter

Gana nedideli aproksimacijos koeficientai rodo, jog įkrovos valymo efektyvumas priklauso ne tik nuo joje esančių mikroorganizmų skaičiaus, dalis teršalų sulaikoma absorbcijos ir desorbcijos metu. Didžiausias biomasės augimo greitis 30 °C temperatūroje buvo nustatytas ir užsienio mokslininkų (Jin *et al.* 2007).

Norint pasiekti aukštą įrenginio valymo efektyvumą, vieno įkrovos sluoksnio, kurio storis 150 mm, nepakanka, todėl eksperimentiniame biofiltre įrengtos 5 kasetės, kurių bendras aukštis siekia 750 mm. Aukštą mikroorganizmų aktyvumą įkrovoje, sudarytoje iš medžio skiedrų, ceolito granulių ir porolono, lemia geros jos sorbcinės savybės (drėgmės sugerties laipsnis siekia apie 54–67 %). Taip pat dalis teršalų sulaikoma ceolito porose, kurie desorbcijos metu suskaidomi mikroorganizmų. Mokslininkai, tyrinėję mikroorganizmų skaičiaus priklausomybes nuo bioterpės temperatūros, nustatė, kad didžiausias mikroorganizmų aktyvumas, skaidant tolueną, pasiekiamas 30 °C temperatūroje (Darlington *et al.* 2001). Remiantis tyrimų rezultatais galima daryti prielaidą, kad kuriant oro valymo biotechnologijas įkrovos šildymo sistemos turi užtikrinti pastovią – 30 °C bioterpės temperatūrą. Bioterpės sluoksnis yra labai plonas ir siekia apie 150 μm, todėl bioterpės temperatūrą galima prilyginti per įkrovą leidžiamo oro srauto temperatūrai.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus mikrobiologinius tyrimus nustatyta, kad organinių junginių destrukcijos procese dominavo bakterijos. Bakterijų rasta daugiau ir kontroliniuose ceolito ir porolono pavyzdžiuose. Ceolite bakterijų išskirta $1,4 \times 10^3$ ksv/g, o mikromicetų – tik 200 ksv/g.
2. Gerokai daugiau mikroorganizmų išskirta porolone. Jų skaičius – $7,3 \times 10^4$ ksv/g, o ceolite – tik $1,6 \times 10^3$ ksv/g. Didesnį mikroorganizmų skaičių porolone lėmė didesnis jo paviršiaus plotas, poringumas ir mažesnis įkrovos tankis.
3. Didžiausias bakterijų aktyvumas pasiektas skaidant organinius junginius $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje. Tokioje temperatūroje suaktyvėja psichrofiliniai ir mezofiliniai mikroorganizmai, tokie kaip *Pseudomonas*, kurie gerai sintetina teršalus.
4. Biofiltre geriausiai buvo skaidomas acetonas, kurį leidžiant per 150 mm sluoksniu ceolito ir medienos skiedrų sluoksnį, įrenginyje palaikant $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ oro temperatūrą, acetono koncentracija sumažėjo 84 mg/m^3 . Toki koncentracijos pokytį lėmė ir nustatytas didžiausias mikroorganizmų skaičius – $17,7 \times 10^4$ ksv/g.

Biofiltrų, užkrautų organinės ir neorganinės kilmės įkrovomis, valymo efektyvumo tyrimai

Vykdant Europos Sąjungos projektą „Biofiltro prototipo kūrimo taikomieji tyrimai ir technologinė plėtra“ buvo sukurti, suprojektuoti ir pagaminti penki skirtingų konstrukcijų oro valymo biofiltrai. Tyrimai atlikti siekiant nustatyti, kokią įtaką biofiltro valymo efektyvumui turi pasiūlyti įrenginių konstrukciniai sprendiniai. Siekiant padidinti įkrovos ilgaamžiškumą ir filtro valymo efektyvumą, tyrimai atliekami naudojant ne tik skirtingų konstrukcijų biofiltrus, bet ir skirtingos kilmės įkrovas, sudarytas iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišinių.

Biologiniam oro valymui naudojamų skirtingos konstrukcijos biofiltrų su organinės ir neorganinės kilmės įkrovomis valymo efektyvumo tyrimų metodikos ir rezultatai paskelbti autoriaus mokslinėse publikacijose (Baltrėnas and Zagorskis 2008a, 2009a, 2007b, 2008b; Baltrėnas *et al.* 2005a; Балтрėнас и Загорскис 2006b).

4.1. Skirtingos konstrukcijos biofiltrų valymo efektyvumo tyrimų metodika

Tyrimai pradedami naudojant vieną sukurto biofiltro prototipą. Tolygiam oro srauto ir drėgmės pasiskirstymui per visą įkrovos sluoksnį ir įkrovos aerodinaminiam pasipriešinimui sumažinti filtre įrengtos penkios kasetės, viena nuo kitos atskirtos metaliniais sieteliais. Siekiant gauti didesnę įrenginio valymo efektyvumą filtras užkrautas įkrova, sudaryta iš ceolito granulių, porolono kubelių, medienos skiedrų ir žievių. Apatinė biofiltro kasetė užkrauta medienos skiedromis ir žievėmis, sumaišytomis su 10–15 mm dydžio gamtinio ceolito granulėmis. Siekiant išlaikyti įkrovos homogeniškumą skiedrų, žievių ir grūdelių sumaišymo santykis pagal tūrį yra vienodas (1:1:1), sluoksnio aukštis siekia 100 mm. Antra nuo apačios biofiltro kasetė užkrauta 10–15 mm dydžio medienos skiedromis ir žievėmis, sumaišytomis su 20×20×20 mm dydžio porolono kubeliais. Skiedrų, žievių ir kubelių sumaišymo santykis pagal tūrį taip pat yra vienodas. Trečia, ketvirta ir penkta biofiltro kasetės užkrautos 10–15 mm dydžio medienos skiedrų ir žievių įkrova. Visose keturiose kasetėse įkrovų sluoksnio aukštis siekia 150 mm.

Tyrimams naudojami laboratoriniai indai, matavimo priemonės ir įranga:

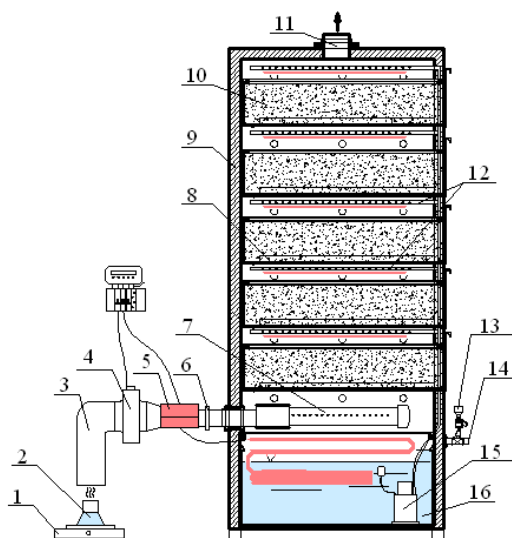
Stikliniai biuksai (Ū 50 mm, $h = 30$ mm), temperatūros ir oro srauto matuoklis „Testo 400“ (temperatūros matavimo ribos: 20–70 °C, paklaida $\pm 0,2$ °C, greičio matavimo ribos: 0–10 m/s, paklaida $\pm 0,02$ m/s), džiovavimo spinta (temperatūros palaikymo ribos: 0–150 °C, paklaida ± 2 °C), analitinės svarstyklės (matavimo ribos 0–320 g, matavimo tikslumas: $\pm 0,00005$ g), eksikatorius. Acetonas (99,9 % grynumo), butanolis (99,9 % grynumo), toluenas (99,9 % grynumo), Nutrient Agar (kilmės šalis Italija), sugraduotas, karščiui atsparus indas (1000 cm³), pipetės (300 ml), švirkštas (400 ml), dujų chromatografas SRI 8610 Nr. 942 (detektoriaus temperatūra – 200 ± 5 °C), elektrinė viryklė.

Kiekvienas įkrovos sluoksnis, išskyrus medienos, žievių ir ceolito mišinį, yra 0,85 m ilgio, 0,65 m pločio ir 0,15 m aukščio. Užpildžius kasetes, įkrova aktyvinama biofiltre palaikant 30 °C temperatūrą, bioterpės rūgštingumą (pH = 7), biogeninių elementų koncentraciją. Siekiant pagerinti savaiminių mikroorganizmų adaptavimąsi bioterpėje į įrenginį tiekiamas acetono garais užterštas oras. Taip mikroorganizmai gauna jiems reikalingų deguonies ir anglies elementų.

Prieš paleidžiant biofiltrą, įkrova drėkinama virš kiekvieno sluoksnio įrengtais vandens purkštukais. Į purkštukus vandenį, prisotintą biogeninių elementų, tiekia perteklinio vandens rezervuare įrengtas siurblys. Vandens siurblio darbą valdo biofiltro valdymo skyde sumontuota laiko relė, kuri kas valandą 8 sekundėmis įjungia vandens siurbį. Tyrimų metu siurblio veikimo laikas sureguliuotas

taip, kad įkrovoje būtų palaikomas 75 % drėgnis. Biofiltre įrengta drėkinimo sistema leidžia reguliuoti ant kiekvieno įkrovos sluoksnio išlaistomą vandens kiekį.

Per parą viso įkrovos tūrio ($0,387 \text{ m}^3$) drėgniui palaikyti ant įkrovų išpurškama apie 7 l vandens.



4.1 pav. Biofiltro stendas: 1 – elektrinė viryklė, 2 – kolba su teršalu, 3 – tiekimo ortakis, 4 – ventiliatorius, 5 – tiekiamo oro kanalinis šildytuvas, 6 – oro srauto reguliavimo sklendė, 7 – kolektorius, 8 – sietelis, 9 – biofiltro sienelė, 10 – įkrova, 11 – šalinimo ortakis, 12 – vandens purkštukai, 13 – biogeninių elementų tiekimo vamzdis, 14 – vandens tiekimo vamzdis, 15 – vandens siurblys, 16 – vandens rezervuaras

Fig. 4.1. Biofilter stand: 1 – electric stove, 2 – flask with pollutant, 3 – feeding duct, 4 – ventilator, 5 – channel heater of supplied air, 6 – airflow control valve, 7 – collector, 8 – sieve, 9 – biofilter wall, 10 – charge, 11 – discharge duct, 12 – water sprayers, 13 – biogenic element feeding pipe, 14 – water feeding pipe, 15 – water pump, 16 – water reservoir

Tam, kad būtų išlaikytas tolygus oro srautas ir perteklinis vanduo nutekėtų į apatinėje filtro dalyje įrengtą perteklinio vandens rezervuarą, bioterpės sluoksniai atskirti vienas nuo kito metaliniais tinklėliais. Drėgmė įkrovoje kontroliuojama svoriniu metodu. Prieš paimant mėginius biuksai kartu su dangteliais džiovinami 1 valandą 105°C temperatūroje džiovinimo spintoje, paskui atvėsunami eksikatoriuje. Išdžiovinti biuksai su dangteliais pasveriami analitinėmis svarstyklėmis.

Pincetu paimti po 1–2 g sveriantys ėminiai dedami į biuksus, kurie užkemšami kamštukais. Darbinis bandinys vienodai paskleidžiamas ant biukso dugno ($0,2 \text{ g/cm}^2$). Pasvertas biuksas su ėminiu dedamas į džiovinimo spintą ir 3 valandas džiovinamas $105 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ temperatūroje. Išdžiovintas ėminys pasveriamas ir apskaičiuojamas jo drėgnis.



a)



b)



c)

4.2 pav. Biofiltro įkrovos: a) gamtinio ceolito, medienos skiedrų ir žievių mišinys, b) porolono kubelių, medienos skiedrų ir žievių mišinys, c) medienos skiedrų ir žievių mišinys

Fig. 4.2. Biofilter charges: a) mixture of natural zeolite, wood chips and barks, b) a mixture of foam cubes and wood chips and barks, c) a mixture of wood chips and barks

Mechaniniam įkrovos stabilumui išlaikyti ir tolygiai drėgmei pasiskirstyti per visą įkrovos plotą virš kiekvieno sluoksnio įrengiamas sietelis, kurio akučių matmenys yra $3 \times 3 \text{ mm}$ dydžio.

Mikroorganizmų augimui ir energijai užtikrinti reikalingas mineralinių druskų tirpalas, iš kurio mikroorganizmai gauna gyvybiškai svarbių biogeninių elementų. Druskų tirpalas susideda iš: K_2HPO_4 – 1 g, KCl – 0,5 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,1 g, NaNO_3 – 0,90 g, vandens – 1000 g. Šis tirpalas pilamas į vandens rezervuarą ir išpurškiamas virš kiekvieno įkrovos sluoksnio. Mikroorganizmų metabolizmui užtikrinti bioterpėje palaikomas $\text{pH} = 7,0$ rūgštingumas (Baltrėnas and Vaiškūnaitė 2003). Rūgštingumui palaikyti naudojami buferiniai tirpalai sudaryti iš natrio ir kalio hidrofosfatų. Bioterpės rūgštingumas matuojamas pH-metru.

Reikiamai bioterpės temperatūrai palaikyti tiekimo ortakyje įrengtas kanalinis oro šildytuvas, kuris sušildo į biofiltrą tiekiamą orą iki pastovios $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ temperatūros. Pastovią temperatūrą biofiltre palaiko temperatūros jutiklis, kurį valdo filtrė įrengtas valdiklis. Temperatūrą biofiltre palaiko ne tik tiekimo ortakyje įrengtas kanalinis šildytuvas, bet ir po kiekvienu įkrovos sluoksniu išvedžiotas

šildymo kabelis. Ventilatoriui nustojus dirbti šildymo kabelis biofiltre palaiko pastovią 30 °C temperatūrą.

Mikroorganizmų energijai palaikyti per įkrovą leidžiamos skirtingos acetono garų koncentracijos. Skirtingos teršalų koncentracijos gaunamos juos skiedžiant vandeniu ir kaitinant ant elektrinės plytelės. Įkrova aktyvinama per ją leidžiant acetono garais užterštą oro srautą. Per įkrovą leidžiamo teršalo garų koncentracija siekia apie 20 mg/m³. Į įrenginį teršalo garai tiekiami 4 kartus per parą po 15 minučių. Vėliau kas dvi paras, mažinant teršalo skiedimo laipsnį, didinama organinio junginio koncentracija po 20 mg/m³ pailginant acetono tiekimo trukmę iki 1 valandos. Įkrovos aktyvinimas trunka 3 savaites. Tolygiam oro srauto ir teršalų koncentracijos pasiskirstymui per visą įkrovos plotą užtikrinti apatinėje filtro dalyje įrengtas oro srauto paskirstymo kolektorius.

Po įkrovos aktyvinimo į įrenginį tiekiamas acetono garais užterštas oras. Acetono garų koncentracija prieš penkis įkrovos sluoksnius siekia 103 mg/m³. Palaikant pastovų – 0,1 m/s – tiekiamo oro srauto greitį teršalo koncentracijai nustatyti imami oro mėginiai. Mėginiai imami per biofiltre prieš ir po kiekvienos kasetės oro srauto greičiui ir temperatūrai nustatyti įrengtus mėginių paėmimo atvamzdžius su užsakomais dangteliais. Lakiaisiais organiniais junginiais užteršto oro ėminio paėmimo metodika ir naudojama įranga aprašyta 3 skyriuje.

Paėmus mėginius į įrenginį tiekiamo oro srautas padidinamas iki 0,2 m/s, ir tyrimai kartojami iš naujo. Srautas reguliuojamas filtre įrengta reguliuojamąja oro srauto sklende. Paskui tyrimai kartojami tolydžio didinant tiekiamo oro srauto greitį iki 0,3, 0,4 ir 0,5 m/s.

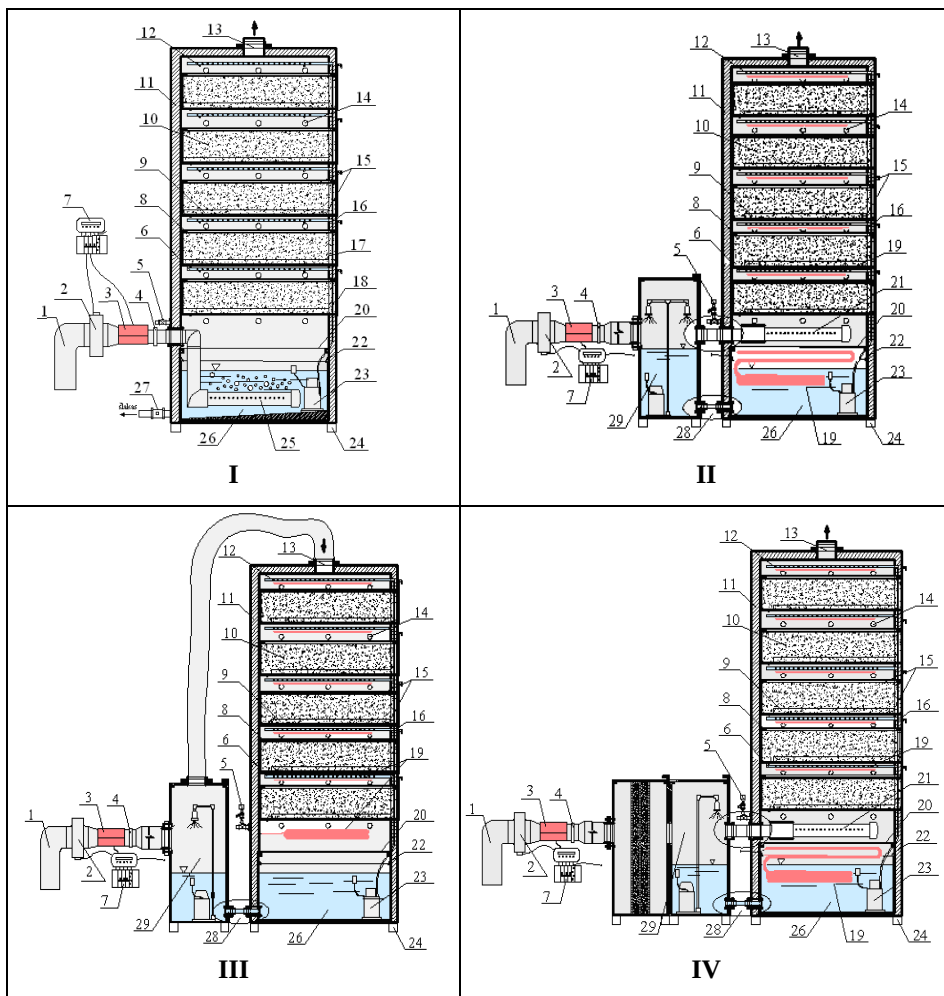
Per įkrovą leidžiamo oro srauto greitis ir temperatūra matuojami vokiečių firmos matokliu *Testo 400*. Matuojama per biofiltro šone įrengtus atvamzdžius.

Biologinio oro valymo įrenginio efektyvumo priklausomybei nuo leidžiamos teršalo koncentracijos nustatyti į įrenginį tiekiamo acetono koncentracija padidinama iki 205 mg/m³. Teršalo koncentracija didinama mažinant skiedimo su vandeniu santykį ir didinant viryklės kaitimo temperatūrą. Paskui tyrimai kartojami padidinus pradinę acetono garų koncentraciją iki 305 mg/m³.

Atlikus eksperimentinius tyrimus su acetonu, į įrenginį 3 valandas tiekiamas neužterštas, švarus oras. Taip pagreitinama acetono garų desorbcija. Paskui tyrimai kartojami su kitais teršalais: butanolio ir toluenu.

Siekiant nustatyti įkrovos valymo efektyvumo priklausomybę nuo įkrovos sluoksnio aukščio, teršalų koncentracijos matuojamos prieš ir po kiekvienos biofiltro įrengtos kasetės. Teršalų koncentracijoms nustatyti oro mėginiai imami tam skirtose mėginių paėmimo vietose, kiekvieną matavimą kartojant po 5 kartus.

Atlikus tyrimus su vienu įrenginiu, kiti tyrimai atliekami su likusiais keturiais skirtingos konstrukcijos biofiltrais (4.3 pav.).



4.3 pav. Biofiltrų stendai: I – biofiltro prototipas su aeracine kamera;
 II – biofiltro prototipas su drėkinimo kamera ir oro paskirstymo kolektoriumi;
 III – biofiltro prototipas su drėkinimo kamera, o oro tekėjimas nukreiptas iš viršaus į apačią; IV – biofiltro prototipas su trijų valymo pakopų sistema

Fig. 4.3. Biofilter stands: I – biofilter prototype to which air is fed through the fluid phase; II – biofilter prototype with a humidifying chamber and air distribution collector; III – biofilter prototype with a humidifying chamber and airflow direction from the top to the bottom; IV – biofilter prototype with a three-level treatment system

Tyrimų tikslas – nustatyti biofiltrų valymo efektyvumo priklausomybes nuo įrenginių konstrukcijų ir įkrovos rūšies.

Ekspperimentiniams tyrimams naudojami filtrai tarpusavyje skiriasi oro drėkinimo, bioterpės šildymo, oro tiekimo bei šalinimo sistemomis (4.3 pav.). Pagrindinis filtrų elementas – filtruojančioji aktyvinta įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių, ir porolono kubelių mišinių. Siekiant išlaikyti tolygų oro srauto ir drėgmės pasiskirstymą per visą įkrovos sluoksnį bei sumažinti įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą, filtruose įrengtos penkios kasetės, viena nuo kitos atskirtos metaliniais sieteliais.

Lakiaisiais organiniais junginiais užterštas oras į kiekvieną biofiltrą tiekiamas oro tiekimo ortakyje 1 įrengtu ventiliatoriumi 2. Mikroorganizmų aktyvumui palaikyti, visuose biofiltruose tiekiamas užterštas oras pašildomas kanaliniais šildytuvais 3, kuriais reguliuojama į įrenginius tiekiamo oro temperatūra. Oro srauto greičio reguliavimui įrengtos oro srauto reguliavimo sklendės 4. Reikiamam įkrovos drėgniui palaikyti įrengtas biogeniniais elementais prisotinto vandens tiekimo atvamzdis su vožtuvu 5. Virš kiekvieno įkrovos sluoksnio 10 išvedžioti ir laikikliais 12 pritvirtinti įkrovos drėkinimui skirti perforuoti vamzdeliai 6. Iš vandens rezervuaro 26 siurbliu 23 ir gumine žarna 16 tiekiamas į perforuotus vamzdelius 6 biogeniniais elementais prisotintas vanduo. Nuo užsiteršimo vandens rezervuaras apsaugotas sieteliu 20 ir latakais 22. Biofiltruose įrengti valdymo pultai 7, leidžiantys nustatyti reikiamą oro temperatūrą ir įkrovos drėkinimo intensyvumą. Tolygiam oro srauto pasiskirstymui per visą įkrovos sluoksnį išlaikyti kasetėse įrengti sieteliai 15 su rėmeliu 8 ir kolektoriai 25, 21. Biofiltrų kasetes 17 laiko filtrų sienelėse 11 įtvirtinti kampuočiai 9. Išvalytam orui šalinti įrengti oro šalinimo ortakiai 13. Fizikiniams parametrų matuoti ir oro mėginiams paimti filtrų šonuose įrengti atvamzdžiai 14. Biofiltruose po kasetėmis įrengti šildymo kabeliai 19, šildantys įkrovą net ir neveikiant ventiliatoriui 2. I-ame biofiltre šlakams surinkti įrengtas vamzdis su sklende 27. I-ame, II-ame ir III-ame biofiltruose įrengtos oro srauto drėkinimo kameros 29 su biofiltru sujungtos jungtimis 28. IV-ame biofiltre įrengta ZeoVit adsorbentiniu ceolito sluoksniu užpildyta kasetė 30. Biofiltrų konstrukcijos pastatytos ant filtrų apačioje įrengtų kojelių 24.

Tyrimams atlikti kiekvienas biofiltras užkrautas skirtinga įkrova. Pirmas biofiltras užkrautas 10–15 mm frakcijos medienos skiedrų ir žievių įkrova, antras – medienos skiedrų, žievių ir gamtinio ceolito 10–15 mm dydžio granulių mišiniu. Trečias užkrautas medienos skiedrų, žievių ir 20×20×20 mm dydžio porolono kubelių mišiniu, ketvirtas – medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišiniu. Visų skirtingų medžiagų sumaišymo santykis, siekiant išlaikyti įkrovos homogeniškumą, yra vienas, o kiekvieno įkrovos sluoksnio aukštis siekia po 150 mm. Kiekvienas įkrovos sluoksnis, išskyrus biofiltro su aeracine kamera

(Nr. 1), kurio ilgis ir plotis po 0,15 m didesni, yra 0,85 m ilgio, 0,65 m pločio ir 0,15 m aukščio (4.4 pav.).

Užpildžius kasetes, įkrova aktyvinama biofiltruose palaikant 30 °C temperatūrą, bioterpės rūgštingumą (pH=7), biogeninių elementų kiekį. Siekiant pagerinti savaiminių mikroorganizmų adaptavimąsi bioterpėje, į įrenginį tiekiamas lakiaisiais organiniais junginiais užterštas oras. Taip mikroorganizmai gauna reikalingo deguonies ir anglies.

Prieš paleidžiant biofiltrus, įkrova drėkinama virš kiekvieno sluoksnio įrengtais vandens purkštukais. Į purkštukus vandenį, prisotintą biogeninių elementų, tiekia perteklinio vandens rezervuare įrengtas siurblys. Vandens siurblio darbą valdo biofiltro valdymo skyde sumontuota laiko relė, kuri kas valandą 8 sekundėms įjungia vandens siurblį. Tyrimų metu siurblio veikimo laikas sureguliuotas taip, kad įkrovoje būtų palaikomas 75 % drėgnis (detalesnės įkrovos aktyvinio ir drėgmės nustatymo metodikos pateiktos 2 ir 3 skyriuose).

Įkrovos mechaniniam stabilumui išlaikyti ir tolygiai drėgmei pasiskirstyti per visą įkrovos plotą virš kiekvieno sluoksnio įrengiamas sietelis, kurio akučių matmenys – 3×3 mm.



a)



b)

4.4 pav. Biofiltro kasetė: a) be sietelio, b) su sieteliu

Fig. 4.4. Biofilter cassette: a) without a sieve, b) with a sieve

Suaktyvinus įkrovą į įrenginius tiekiamas acetono garais užterštas oras. Acetono garų koncentracija prieš penkis įkrovos sluoksnius siekia $305 \pm 15 \text{ mg/m}^3$. Palaikant pastovų 0,3 m/s tiekiamo oro srauto greitį, teršalo koncentracijai nustatyti imami oro mėginiai. Paėmus bandinius filtre įrengta reguliuojamąja oro srauto sklende padidinamas tiekiamo oro srauto greitis iki 0,5 m/s. Paskui tyrimai dar kartą pakartojami padidinus oro srauto greitį iki 0,7 m/s.

Biofiltruose prieš ir po kiekvienos kasetės oro srauto greičiui ir temperatūrai nustatyti įrengti mėginių paėmimo atvamzdžiai su užsukamais dangteliais.

Per įkrovą leidžiamo oro srauto greitis ir temperatūra matuojami vokiečių firmos matuokliu *Testo 400*.

Biologinio oro valymo įrenginio efektyvumo priklausomybei nuo tiekiamų teršalų koncentracijos nustatyti pradinę acetono garų koncentracija padidinama iki 515 mg/m^3 . Teršalo koncentracija keičiama kaitinant jį ant elektrinės viryklės. Paskui tyrimai kartojami padidinus pradinę acetono garų koncentraciją iki 712 mg/m^3 .

Atlikus eksperimentinius tyrimus su acetonu, į įrenginius 3 valandas tiekiamas neužterštas oras. Taip pagreitinama acetono garų desorbcija. Paskui tyrimai kartojami su kitais teršalais: butanolio ir toluenu.

Siekiant nustatyti įkrovos valymo efektyvumo priklausomybę nuo įkrovos sluoksnio aukščio, teršalų koncentracijos matuojamos prieš ir po kiekvienos kasetės. Teršalų koncentracijoms nustatyti oro bandiniai imami tam skirtose bandinių paėmimo vietose, kiekvieną matavimą kartojant po 3 kartus.

4.2. Statistinio duomenų apdorojimo aprašymas

Biofiltro įkrovų drėgnio, aerodinaminio pasipriešinimo, mikroorganizmų skaičiaus įvertinimui, filtrų valymo efektyvumo nustatymui gauti duomenys buvo sisteminti ir vertinti statistiniais metodais. Tyrimų metu kiekvienas mėginys buvo imtas ir tirtas 5 kartus. Matavimo taškai, tokiems parametrų kaip oro srauto greitis, temperatūra, drėgnis, aerodinaminis pasipriešinimas tirti, buvo išdėstyti tinklėlio principu per visą įkrovos skerspjūvio plotą. Kiekviename taške matuota po 5 kartus.

Gavus tam tikro parametro tyrimų rezultatus apskaičiuotas jo įvertis, kuris yra atskirų matavimų aritmetinis vidurkis $\bar{x}$. Žinant parametro aritmetinį vidurkį $\bar{x}$ apskaičiuota atskirų matavimų x_i tikimybių pasiskirstymą atitinkanti eksperimentinė dispersija $s^2(x_i)$ (Žilinskas 2003):

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (4.1)$$

čia n – matavimų skaičius; x_i – vieno matavimo rezultatas; $\bar{x}$ – atskirų matavimų aritmetinis vidurkis.

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

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} \quad (4.2)$$

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

Gavus aritmetinio vidurkio $\bar{x}$ sklaidos įvertį skaičiuotas eksperimentinis standartinis aritmetinio vidurkio nuokrypis:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}, \quad (4.3)$$

čia $s(x_i)$ – eksperimentinis standartinis nuokrypis; n – matavimų skaičius.

Darbe statistiniams skaičiavimams naudota Microsoft Office Excel 2003 programa. Matavimų aritmetiniai vidurkiai, eksperimentinės aritmetinės dispersijos, standartiniai aritmetinio vidurkio nuokrypiai apskaičiuoti naudojant Microsoft Office Excel 2003 statistikos (Statistical) funkcijas: AVERAGE (vidurkis), VARP (dispersija), STDEV (standartinis nuokrypis) (Vakrina 2007).

Rezultatų sklaidai patikrinti skaičiuotas variacijos koeficientas v :

$$v = \frac{s(x_i)}{\bar{x}} \cdot 100, \% \quad (4.4)$$

čia $s(x_i)$ – eksperimentinis standartinis nuokrypis; $\bar{x}$ – atskirų matavimų aritmetinis vidurkis.

Jei variacijos koeficientas $v \leq 5\text{--}10\%$, tai laikoma, kad rezultatų sklaida nedidelė. Esant didesnei rezultatų sklaidai laikyta, kad rezultatų sklaida yra didelė ir rezultatai nėra patikimi. Tuomet tyrimai kartoti iš naujo.

Atsitiktinė matavimo rezultato paklaida Δ apskaičiuota pagal formulę:

$$\Delta = t_\beta \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}, \quad (4.5)$$

čia t_β – Stjudento koeficientas, priklausantis nuo užsiduotos pasiklovimo tikimybės β ($\beta = 0,95$) ir nuo laisvės laipsnių skaičiaus φ ($\varphi = n - 1$); n – matavimų skaičius.

Kai $\beta = 0,95$, o $\varphi = 5 - 1 = 4$, tai $t_\beta = 2,78$ (Mokslinio tyrimo... 2007).

Bendrajai matavimo rezultato santykinei paklaidai δ_b įvertinti skaičiuotos santykinės atsitiktinės paklaidos δ_{ats} ir santykinės sisteminės paklaidos δ :

$$\delta_{ats} = \frac{\Delta}{\bar{x}} \cdot 100, \% \quad (4.6)$$

$$\delta = \frac{a}{A} \cdot 100, \% \quad (4.7)$$

čia a – prietaiso matavimo paklaida; A – prietaiso parodymas.

Apskaičiavus santykinę atsitiktinę ir sisteminę paklaidas rasta bendroji matavimo rezultato santykinė paklaida δ_b :

$$\delta_b = \sqrt{\delta_{ats}^2 + \delta^2}, \quad (4.8)$$

Rezultatų patikimumui įvertinti nustatytas koeficientas q_{sk} :

$$q_{sk} = \frac{|x^* - \hat{x}|}{R}, \quad (4.9)$$

čia x^* – įtartinos (maksimalios ar minimalios) reikšmės; $\hat{x}$ – artimiausia įtartina reikšmei vertė; R – variacinis plotis ($R = x_{maks} - x_{min}$).

Abejotiniams rezultatams patikrinti gautos koeficiento q_{sk} reikšmės lygintos su koeficiento q_R reikšmėmis. Koeficientas q_R priklauso nuo matavimų skaičiaus. Kuo matavimų skaičius yra didesnis, tuo koeficiento reikšmė yra mažesnė (kai $n = 5$, tai $q_R = 0,64$).

Nustačius, kad sąlyga $q_{sk} > q_R$ buvo tenkinama, tai su tikimybe 0,95 tos įtartinos reikšmės x^* buvo atmestos ir visi statistiniai rodikliai skaičiuoti be jų (Mokslinio tyrimo... 2007). Nustatytos ir grafikuose pateiktos santykinės paklaidos tenkino sąlygą $\delta_b \leq 5 \%$, todėl galima teigti, kad gauti rezultatai yra patikimi.

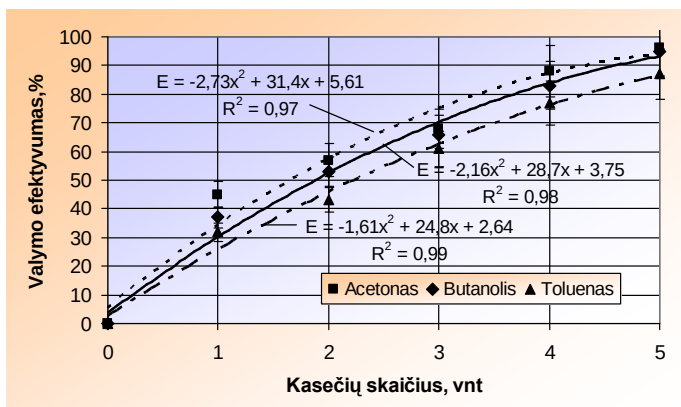
Ryšiams tarp dviejų atsitiktinių dydžių nusakyti naudotas koreliacijos koeficientas r . Naudojant Microsoft Office Excel 2003 programą matematiškai aprašytos dviejų dydžių (x, y) tarpusavio priklausomybės. Aprašymo tikslumui įvertinti grafikuose pateikti neapibrėžtumo (determinacijos) koeficientai R^2 . Kuo šio koeficiento vertė artimesnė vienetui, tuo tiksliau aprašyta lygtis įvertinanti ryšį tarp dviejų atsitiktinių dydžių (Mokslinio tyrimo... 2007).

4.3. Biofiltrų, užkraudų organinės ir neorganinės kilmės įkrovomis, valymo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė

Atlikus eksperimentinius tyrimus gautos biofilto valymo efektyvumo priklausomybės nuo įrenginį tiekiamo teršalo prigimties. Iš 4.5 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad geriausiai mikroorganizmai skaidė acetoną. Acetonas gerai maišosi su vandeniu ir visiškai tirpus jame, todėl acetono garai geriau absorbuojasi ant įkrovos paviršiaus susidariusioje bioplėvelėje.

Blogiausiai biofiltras valė toluenu užterštą orą. Toluenas yra hidrofobinis junginys, jo tirpumas siekia 0,53 g/l, todėl blogiau absorbuojamas bioplėvelėje. Didžiausias teršalų koncentracijos mažėjimas pastebimas po pirmojo nuo apačios įkrovos sluoksnio, kuris sudarytas iš medienos skiedrų, žievių ir ceolito granulių mišinio. Po šio sluoksnio acetono koncentracija sumažėjo nuo 103 iki 58 mg/m³.

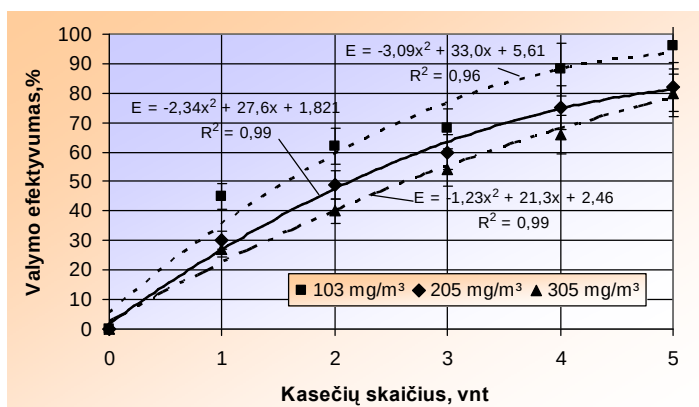
Išmatavus teršalų koncentracijas prieš ir po kiekvienos kasetės gautas biofilto užkrauto skirtingos kilmės įkrovomis valymo efektyvumas. Didžiausias valymo efektyvumas pasiektas valant acetonu užterštą orą (4.5 pav.). Įrenginio valymo efektyvumas labiausiai padidėja po pirmos kasetės, užpildytos aktyvinta ceolito ir medienos skiedrų įkrova. Ceolitas turi poringą struktūrą ir didelį valomo paviršiaus plotą, todėl dalis teršalo adsorbuojasi ant įkrovos paviršiaus (Zeo-Vit ekologiškai... 2006). Po pirmojo sluoksnio filtro valymo efektyvumas pasiekia 45 %, o po visų filtruojančių sluoksnių – 96 %.



4.5 pav. Biofilto valymo efektyvumo priklausomybė nuo kasetių skaičiaus, kai tiekiamo oro srauto greitis yra 0,1 m/s

Fig. 4.5. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes at the fed airflow rate of 0.1 m/s

Mažiausias – 87 % – biofilto valymo efektyvumas gautas į įrenginį tiekiant toluenu užterštą orą. Aukštas – 95 % – biofilto valymo efektyvumas pasiektas tiekiant butanolio užterštą orą. Galima daryti prielaidą, kad geresnį oro valymą nuo butanolio lėmė hidrofilinės teršalo savybės. Tyrimais nustatytas butanolio tirpumas vandenyje siekia 3–5 g/100 ml vandens. Be to, eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad mikroorganizmai geriau dauginasi tokiuose substratuose, kuriuose yra daugiau ištirpusių biogeninių elementų. Paskutiniai trys įkrovos sluoksniai sudaryti iš medienos skiedrų ir žievių gana tolygiai filtravo skirtingos prigimtys teršalus. Teršalų koncentracijas gerokai sumažėja antrajame įkrovos sluoksnyje, kuris sudarytas iš medienos skiedrų, žievių ir porolono mišinio. Po šio sluoksnio acetono garų koncentracija sumažėjo nuo 58 iki 46 mg/m³. Įtakos teršalo koncentracijos sumažėjimui turėjo didelis įkrovos drėgnis, kuris siekė 85 % ir vandenyje ištirpusios maistinės medžiagos, kurias mikroorganizmai pasisavina medžiagų apykaitos – metabolizmo metu.



4.6 pav. Biofilto valymo efektyvumo priklausomybė nuo kasečių skaičiaus esant skirtingai pradinei acetono garų koncentracijai

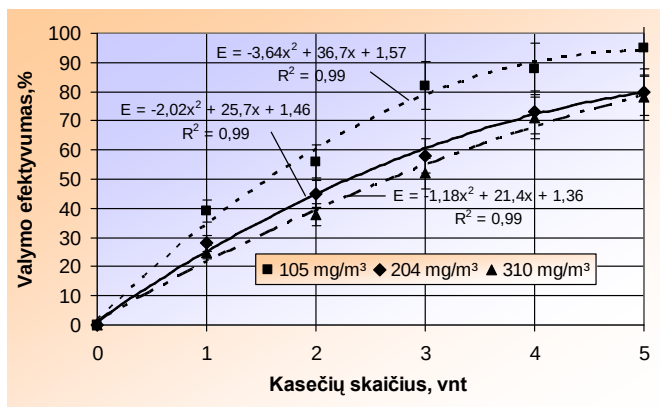
Fig. 4.6. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes at different initial concentrations of acetone

Taip pat tyrimų metu buvo gautos biofilto valymo efektyvumo priklausomybės nuo skirtingos tiekiamo teršalo garų koncentracijos. Šie tyrimai atlikti į įrenginį 0,1 m/s greičiu tiekiant lakiaisiais organiniais junginiais užterštą orą. Esant didelei substrato – acetono garų koncentracijai, fermentas yra saturuojamas, t. y. substratas arba produkto molekulės visuomet užima jo aktyvųjį centrą. Tokiomis sąlygomis tolesnio substrato koncentracijos didėjimas neveikia fermentacijos reakcijos greičio, nes visi aktyvūs fermento centrai jau užimti. Todėl didinant teršalo koncentraciją įrenginio valymo efektyvumas mažėja.

Geriausiai acetonas skaidomas esant mažesnei pradiniai teršalo garų koncentracijai. Kai pradinė acetono garų koncentracija yra 103 mg/m^3 biofilto valymo efektyvumas pasiekia 96 %. Padidinus pradinę koncentraciją iki 305 mg/m^3 biofilto valymo efektyvumas sumažėjo iki 80 % (4.7 pav.).

Norint pagerinti biofilto valymo efektyvumą, esant aukštomis (nuo 500 mg/m^3) koncentracijoms būtina didinti kasečių skaičių įrenginyje arba mažinti į įrenginį tiekiamo oro srauto greitį. Taip bus padidintas filtre vykstančių biocheminių reakcijų laikas.

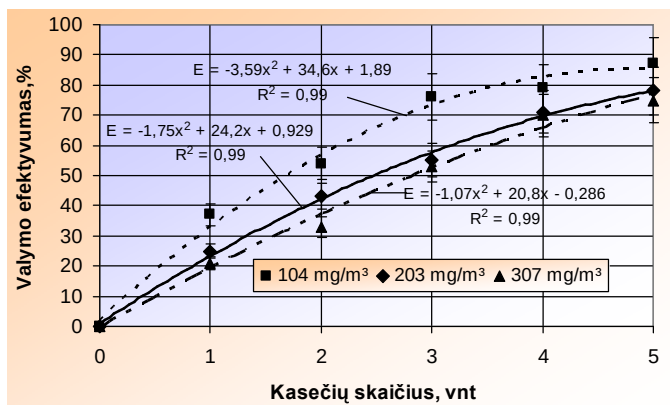
Į įrenginį tiekiant butanolį užterštą orą, esant pradinei teršalo koncentracijai 104 mg/m^3 , įrenginio valymo efektyvumas po 5 įkrovos sluoksnių siekia 95 %. Tai yra teršalo koncentracija sumažėja nuo 104 iki 10 mg/m^3 . Tiekiamo teršalo koncentraciją padidinus iki 310 mg/m^3 filtro efektyvumas sumažėja iki 78 %, o teršalo koncentracija iki 68 mg/m^3 (4.7 pav.). Mažesni butanolio valymo efektyvumą lemia mažesnis šio teršalo tirpumas vandenyje.



4.7 pav. Biofilto valymo efektyvumo priklausomybė nuo kasečių skaičiaus esant skirtingai butanolio pradinei koncentracijai

Fig. 4.7. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes at different initial concentrations of butanol

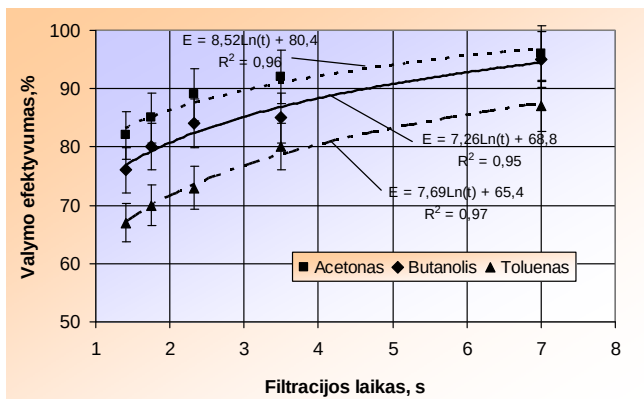
Labiausiai butanolio koncentracija sumažėjo po pirmos biofilto kasetės užpildytos aktyvuota medienos skiedrų, žievių ir gamtinio ceolito įkrova. Po šio įkrovos sluoksnio butanolio garų koncentracija, esant pradinei koncentracijai 105 mg/m^3 , sumažėjo iki 63 mg/m^3 . Taigi, mažiau tirpų vandenyje angliavandenių geriau sorbuoja iš medienos skiedrų, žievių ir ceolito granulių sudaryta įkrova. Butanolis yra surakinamas ceolito granulėse, todėl ilgiau išlieka aktyvuotoje įkrovoje. Taip padidinamas biocheminių reakcijų laikas kas pagerina butanolio sintezę, o tuo pačiu ir įrenginio valymo efektyvumą.



4.8 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo kasečių skaičiaus esant skirtingai tolueno pradinei koncentracijai

Fig. 4.8. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes at different initial concentrations of toluene

Mažiausias įrenginio valymo efektyvumas buvo gautas valant tolueno garais užterštą orą (4.8 pav.). Esant pradinei 104 mg/m³ teršalo garų koncentracijai įrenginio valymo efektyvumas kito iki 87 %. Padidinus tolueno garų koncentraciją iki 307 mg/m³ efektyvumas sumažėja iki 75 %.



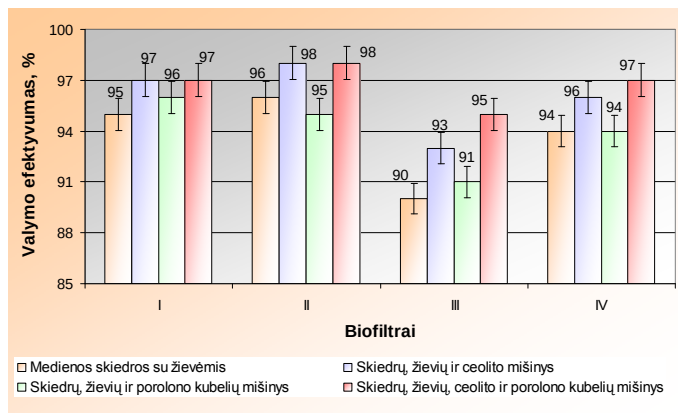
4.9 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo filtracijos laiko, kai tiekiamo teršalo koncentracija yra 104±5 mg/m³

Fig. 4.9. The dependence of biofilter treatment efficiency on filtration duration at the supplied pollutant concentration of 104±5 mg/m³

Didinant į įrenginį tiekiamo teršalo garų koncentraciją biofilto valymo efektyvumas mažėja, nes mikroorganizmai nespėja visiškai suskaidyti lakiųjų organinių junginių.

Geriausiai teršalai buvo skaidomi pirmame įkrovos sluoksnyje, kurį sudarė aktyvintas medienos skiedrų, žievių ir ceolito mišinys. Antras įkrovos sluoksnis, užpildytas medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių mišiniu, geriausiai sorbavo ir skaidė acetoną bei butanolį. Kadangi toluenas yra mažiau tirpus organinis junginys, jo koncentracija po šio įkrovos sluoksnio kito mažiau nei acetono.

Iš 4.9 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad biofilto valymo efektyvumas priklauso nuo filtracijos – teršalo sąlyčio su įkrova – laiko. Kuo didesnis filtracijos laikas, tuo didesnis įrenginio valymo efektyvumas. Užteršto oro filtracijos laikas priklauso nuo per biofiltrą leidžiamo oro srauto greičio. Didžiausias įrenginio valymo efektyvumas gautas užterštą orą per įkrovą leidžiant 0,1 m/s greičiu. Esant tokiam oro srauto greičiui teršalų filtracijos laikas siekia 7 s, kurio metu acetono garų koncentracija po biofilto sumažėja 96 %, butanolio – 95 %, o tolueno – 79 %. Mažiausias – 67 % – įrenginio valymo efektyvumas gautas per įkrovą filtruojant toluenu užterštą orą, kai filtracijos laikas siekė 1,4 s. Galima teigti, kad ilginant filtracijos laiką įrenginio valymo efektyvumas didėja.



4.10 pav. Skirtingos konstrukcijos biofiltrų valymo efektyvumo priklausomybės nuo įkrovos rūšies

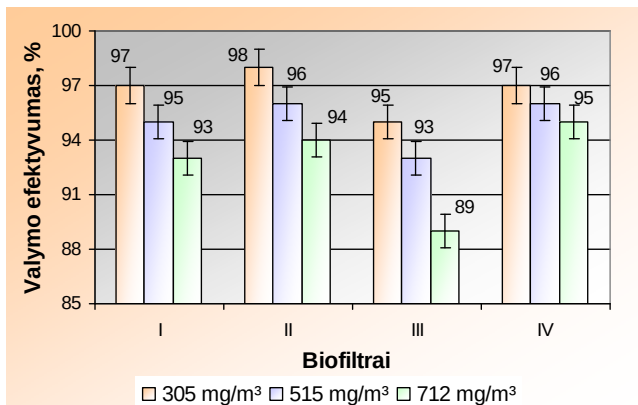
Fig. 4.10. The dependencies of treatment efficiency of biofilters of different structures on a charge type

Geriausiomis sorbcinėmis savybėmis išsiskyrė įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišinio. Naudojant šią įkro-

vą pasiektas aukštas – 98 % – biofilto su absorbcine kamera valymo efektyvumas (4.10 pav.).

Valymo efektyvumas gautas išmatavus teršalų garų koncentracijas prieš ir po kiekvienos kasetės. Ceolito struktūra poringa, didelis valomo paviršiaus plotas, todėl dalis teršalo adsorbuojasi ant įkrovos paviršiaus. Po pirmojo sluoksnio filtro valymo efektyvumas pasiekia 45 %, o po visų filtruojančių sluoksnių – 98 %. Organinių junginių skaidymas padidėja dėl įkrovoje padidėjusių drėgmės sorbcinių savybių įkrovą papildžius porolono kubeliais.

Mažiausias – 90 % – valymo efektyvumas gautas naudojant biologinį oro valymo įrenginį, kuriame oro srautas teka iš viršaus į apačią. Aukštas – 97 % – valymo efektyvumas pasiektas trijų valymo pakopų biofiltre. Čia užterštas oras pirmiausia apvalomas sorbcinėse kasetėse, įkrautose ceolito užpildu. Dalis acetono garų (apie 20 %) absorbuota drėkinimo kameroje. Galima daryti prielaidą, kad geresnę oro valymo nuo acetono kokybę lėmė geresnis teršalo tirpumas vandenyje. Apvalytas ir sudrėkintas oro srautas buvo nukreiptas į įkrovą, kurioje teršalo koncentracija buvo sumažinta iki 18 mg/m^3 . Didelis teršalų koncentracijos sumažėjimo lygis pastebimas visuose biofiltruose, kurių kasetės užpildytos aktyvinta įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono mišinio. Po šių sluoksnių acetono garų koncentracija sumažėja nuo 95 iki 98 %. Įtakos teršalo koncentracijos sumažėjimui turėjo didelis įkrovos drėgnis, kuris siekė 95 %, bei vandenyje ištirpusių maistinių medžiagų kiekis, kurias mikroorganizmai pasisavina medžiagų apykaitos metu.



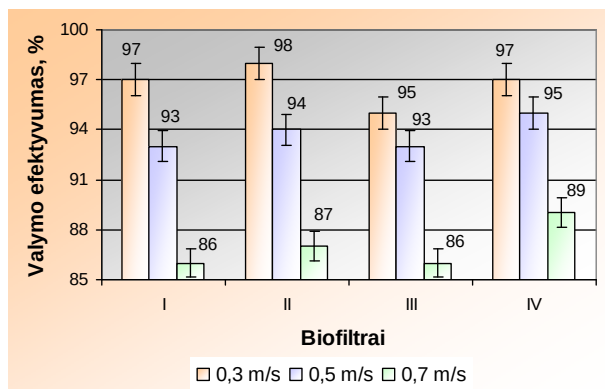
4.11 pav. Biofilto valymo efektyvumo priklausomybė nuo į įrenginį tiekiamos acetono garų koncentracijos

Fig. 4.11. The dependence of biofilter treatment efficiency on the concentration of acetone fed to the device

Tyrimų metu buvo išvestos biofiltrų valymo efektyvumo priklausomybės nuo skirtingos tiekiamo teršalo garų koncentracijos. Tyrimai atlikti į įrenginį 0,3 m/s greičiu tiekiant lakiisiais organiniais junginiais užterštą orą. Esant didelei substrato – acetono garų koncentracijai, fermentas yra saturuojamas, t. y. substratas arba produkto molekulės visuomet užima jo aktyvųjį centrą. Tokiomis sąlygomis tolesnio substrato koncentracijos didėjimas neveikia fermentacijos reakcijos greičio, nes visi aktyvūs fermento centrai jau užimti. Todėl didinant teršalo koncentraciją įrenginio valymo efektyvumas mažėja.

Geriausiai acetonas skaidomas esant mažesnei pradinėi teršalo koncentracijai. Kai pradinė acetono koncentracija yra 305 mg/m^3 , biofiltrų valymo efektyvumas pasiekia 98 %. Padidinus pradinę koncentraciją iki 712 mg/m^3 biofiltrų valymo efektyvumas sumažėjo iki 89 % (4.11 pav.).

Atlikus tyrimus nustatyta, kad didinant į įrenginį leidžiamo teršalo garų koncentraciją biofiltro valymo efektyvumas mažėja. Į biologinio oro valymo įrenginį tiekiant acetonu, kurio garų koncentracija 305 mg/m^3 , užterštą orą įrenginio valymo efektyvumas siekia 98 %. Padidinus teršalo koncentraciją iki 712 mg/m^3 , valymo efektyvumas sumažėja iki 94 %. Mažiausias – 89 % – įrenginio valymo efektyvumas gautas valant toluenu užterštą orą biofiltre, kuriame oro srautas teka iš viršaus į apačią.



4.12 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo oro srauto, leidžiamo per įrenginį, greičio

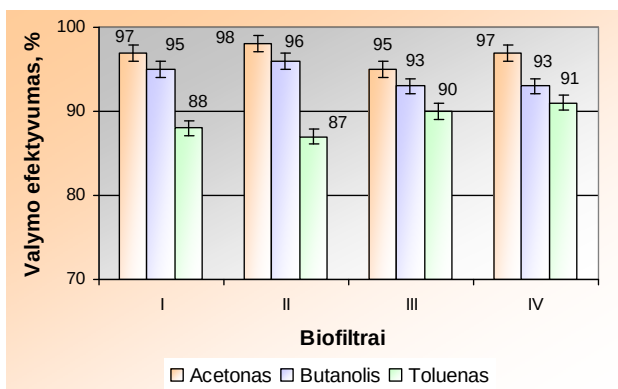
Fig. 4.12. The dependence of biofilter treatment efficiency on the rate of airflow passed through the device

Norint padidinti įrenginio valymo efektyvumą, būtina mažinti į įrenginį tiekiamo teršalo garų koncentraciją. Be to, biofiltre naudoti įkrovas, turinčias gerų sorbcinių savybių. Tyrimai parodė, kad vienu metu derinant biologinį ir adsorb-

cinį valymo metodus pasiekiamas aukštas – iki 98 % – įrenginio valymo efektyvumas. Naudojant gamtinį ceolitą, pailginamas įkrovos naudojimo laikas, o jį sumaišius su medienos skiedromis ir žievėmis pasiekiamas geras įkrovos mikrobiologinis aktyvumas.

Norint pagerinti biofiltro valymo efektyvumą, esant aukštoms koncentracijoms (nuo 500 mg/m^3), būtina didinti kasečių skaičių įrenginiuose arba mažinti į įrenginį tiekiamo oro srauto greitį iki $0,1 \text{ m/s}$. Taip bus padidintas filtre vykstančių biocheminių reakcijų laikas iki 7 s. Aukštas oro valymo efektyvumas gautas biofiltre su adsorbciniu ceolito sluoksniu, kuriame sulaikoma iki 30 % teršalų.

Iš 4.12 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad biofiltro valymo efektyvumas priklauso nuo filtracijos – teršalo sąlyčio su įkrova – laiko. Kuo didesnis filtracijos laikas, tuo didesnis įrenginio valymo efektyvumas. Užteršto oro filtracijos laikas priklauso nuo per biofiltrą leidžiamo oro srauto greičio. Geriausias įrenginio valymo efektyvumas gautas užterštą orą per įkrovą leidžiant $0,3 \text{ m/s}$ greičiu. Esant tokiam oro srauto greičiui teršalų filtracijos laikas siekia 2,5 s, kai acetono garų koncentracija po biofiltro sumažėja nuo 305 iki $6,10 \text{ mg/m}^3$. Mažiausias – 86 % – įrenginio valymo efektyvumas gautas per įkrovą filtruojant acetonu užterštą orą, kai per įrenginį leidžiamo oro srauto greitis siekė $0,7 \text{ m/s}$. Sumažinus per įrenginį leidžiamo oro srauto greitį iki $0,3 \text{ m/s}$, padidėja net ir sunkiai tirpstančių ir skaidomų teršalų, tokių kaip toluenas, valymo efektyvumas. Be to, toluenas priklauso aromatinių angliavandenilių grupei, kurių molekulės – šešianaris benzeno žiedas. Angliavandenilis, turintis daugiau narių benzeno žiede, yra sudėtingesnis, todėl jis blogiau skaidomas mikroorganizmų (4.13 pav.).

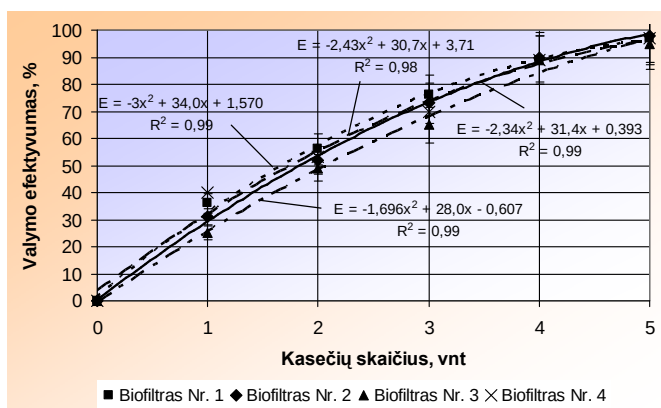


4.13 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo teršalo, leidžiamo per įrenginį, rūšies

Fig. 4.13. The dependence of biofilter treatment efficiency on the type of pollutant passed through the device

Į įrenginį tiekiant butanolio užterštą orą, kai pradinė teršalo garų koncentracija 307 mg/m^3 , įrenginio valymo efektyvumas po 5 įkrovos sluoksnių siekia 96 %, t. y. teršalo koncentracija sumažėja nuo 307 iki $12,28 \text{ mg/m}^3$. Tiekiamo teršalo garų koncentraciją padidinus iki 712 mg/m^3 , filtro efektyvumas sumažėja iki 89 %, o teršalo garų koncentracija iki $78,3 \text{ mg/m}^3$. Būtina pažymėti tai, kad didelę dalį teršalo adsorbavo ceolitas, kurio poringa struktūra ir didelis sorbcinio paviršiaus plotas. Taigi mažiau tirpų vandenyje angliavandenilį geriau sorbuoja iš medienos skiedrų, žievių ir ceolito granulių sudaryta įkrova. Acetonas surakinamas ceolito granulėse, todėl ilgiau išlieka aktyvintoje įkrovoje. Taip pailginamas biocheminių reakcijų laikas, o tai pagerina butanolio sintezę ir įrenginio valymo efektyvumą.

Mažiausias įrenginio valymo efektyvumas gautas valant toluenu užterštą orą. Kai pradinė teršalo koncentracija – 310 mg/m^3 , o leidžiamo oro srauto greitis – $0,3 \text{ m/s}$ biofiltro su adsorbuojančiu ceolito sluoksniu (Nr. 4) valymo efektyvumas siekė 95 %.



4.14 pav. Biofiltrų valymo efektyvumo priklausomybė nuo įrenginio kasečių skaičiaus, kai tiekiamo teršalo koncentracija yra $305 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Fig. 4.14. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes in the device at the supplied pollutant concentration of $305 \pm 5 \text{ mg/m}^3$

Didinant į įrenginį tiekiamo teršalo koncentraciją, biofiltro valymo efektyvumas mažėja, nes mikroorganizmai nespėja visiškai suskaidyti lakiųjų organinių junginių. Iš 4.14 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad didžiausia teršalo apkrova tenka pirmajam įkrovos sluoksniui, kurį sudaro aktyvinta įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių.

Blogiausių valomųjų savybių turėjo biofiltras, kuriame oro srautas teka iš viršaus į apačią. Geresnėmis sorbcinėmis savybėmis pasižymėjo biofiltras su oro drėkinimo kamera ir oro srauto paskirstymo kolektoriumi. Geriausiai teršalai buvo skaidomi pirmame įkrovos sluoksnyje, kuriame suskaidoma iki 40 % teršalų.

Acetono koncentracijos mažėjimo tendencijos skirtingų konstrukcijų biofiltruose yra panašios, nes visuose įrenginiuose yra įrengtos drėkinimo kameros, o biofiltre Nr. 4 įrengtos trys valymo pakopos. Todėl iki 30 % acetono garų yra adsorbuojama ir absorbuojama prieš biofiltrą įrengtose kameros. Didžiausias – 98 % – valymo efektyvumas pasiektas biofiltre su oro drėkinimo kamera. Didelis valymo efektyvumas pasiektas skaidant hidrofilinius organinius junginius tokius kaip acetonas ir butanolis. Orui valyti nuo aromatinių angliavandenilių rekomenduojama naudoti biofiltrą su adsorbuojančiu ceolito sluoksniu.

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Didžiausias – 98 % – oro valymo efektyvumas pasiektas valant acetono garais užterštą orą biofiltre su drėkinimo kamera. Aukštą acetono išvalymo laipsnį lemia geras teršalo tirpumas vandenyje.
2. Valant orą nuo tolueno, kai pradinė teršalo koncentracija yra 104 mg/m^3 , įrenginio valymo efektyvumas siekia 87 %. Mažesnę valymo efektyvumą lemia hidrofobinės teršalo savybės.
3. Geriausiai teršalus sorbavo pirmas biofiltro sluoksnis, užpildytas ceolito granulių, medienos skiedrų ir žievių mišiniu. Šiame sluoksnyje suskaidoma iki 30 % teršalų. Didesnį sluoksnio mikrobiologinį aktyvumą lemia jam tenkanti didžiausia teršalo garų koncentracija siekianti iki 310 mg/m^3 .
4. Didinant leidžiamo teršalo koncentraciją, įrenginio valymo efektyvumas mažėja. Padidinus į biofiltrą tiekiamų acetono garų koncentraciją nuo 103 iki 305 mg/m^3 , valymo efektyvumas sumažėjo nuo 96 iki 80 %. Kadangi mikroorganizmai nespėja oksiduoti organinių junginių, geriau filtras veikia esant mažesnėms pradinėms teršalų koncentracijoms.
5. Didėjant teršalų filtracijos laikui, visų biofiltrų oro valymo efektyvumas padidėja. Pastebimai efektyvumas gerėja padidinus teršalo filtracijos laiką nuo 1,5 iki 7,0 s, tuomet biofiltro valymo efektyvumas pakinta nuo 83 iki 96 %.

Įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo, temperatūrinių- mikrobiologinių ir teršalų degradacijos procesų modeliavimas

Vienas svarbiausių biofiltrų įkrovų parametrų – jos aerodinaminis pasipriešinimas. Todėl šiame skyriuje pateiktas modelis, vaizduojantis įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo pokyčius biofiltre, priklausomai nuo įkrovos sluoksnių skaičiaus, per įrenginį leidžiant oro srautą 0,3 m/s greičiu. Modeliuoti naudotas *Phoenix 3.5* programinis paketas.

Tyrimais nustatyta, kad mikroorganizmų skaičius įkrovoje, o kartu ir biofiltro valymo efektyvumas labai priklauso nuo bioterpėje palaikomos temperatūros. Todėl matematinio modeliavimo metu, naudojant Arenijaus lygtį, buvo rastas temperatūros koeficientas ir lygtis, įvertinantys mikroorganizmų skaičiaus svyravimus tam tikrose temperatūrose.

Biologiniam oro valymui naudojant geromis sorbcinėmis savybėmis pasižyminčias įkrovas, tokias kaip ZeoVit sorbentas ar porolonas, dalis teršalų biofiltre sulaikoma adsorbcijos metu. Todėl modeliuoti taikytas amerikiečių mokslininkų Hodžo ir Devinio (1995, 1997) sukurtas matematinis modelis, leidžiantis

įvertinti ne tik biofiltre vykstančius teršalų biodegradacijos, bet ir jų adsorbcijos bei absorbcijos procesus.

Įrenginyje vykstantys teršalų degradacijos procesai modeliuojami naudojant programas *MathCad 14* ir *MathMechanixs*. Sudarius skaitinį modelį skaičiavimo rezultatai lyginami su eksperimentiniais.

Įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo modeliavimo metodika publikuota autoriaus moksliniuose straipsniuose (Baltrenas and Zagorskis 2006a; Балтренас и Загорскис 2006a).

5.1. Biofiltro įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo modeliavimo metodika

Įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas yra vienas pagrindinių veiksnių, lemiančių įrenginio našumą ir valymo efektyvumą. Biofiltre vykstančių aerodinaminių procesų modeliui sudaryti pasirinktas *Phoenix 3.5* programinis paketas. Ši programa leidžia įvertinti didžiausią reikšmę įkrovos pasipriešinimui turintį poringumo koeficientą. Įkrovos poringumo koeficientas priklauso nuo teršalų filtracijos naudojamos įkrovos geometrijos, formos, frakcijos, sluoksnio aukščio ir kitų parametrų (Pushnov *et al.* 2008).

Vienas svarbiausių įkrovai keliamų reikalavimų – didelis jos paviršiaus plotas, kuris priklauso nuo išorinių ir vidinių įkrovos kapiliarų dydžio. Netaisyklingos struktūros įkrovoje kapiliarai yra įvairių formų: korėta, stačiakampė, cilindrinė ir pan. Vidinių įkrovos kapiliarų forma ir parametrai, tokie kaip dydis, ilgis, perimetras, aukštis turi įtakos įkrovos paviršiaus plotui. Oro tekėjimo greitis kapiliarais veikia įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą. Oro tekėjimo greitis skirtingų formų kanalais yra skirtingas. Oro srauto greitį skirtingos formos poromis sunku nustatyti, todėl jis gali būti apskaičiuojamas matematinėmis formulėmis. Greitį apvalios formos medienos skiedrų, žievių, ceolito ir porolono kapiliarais galima apskaičiuoti pagal formulę (Pushnov *et al.* 2008):

$$u = 2w_0 \left[1 - \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \right], \quad (5.1)$$

čia u – oro srauto greitis taisyklingos formos kapiliarų skerspjūvio taške, m/s; w_0 – vidutinis oro srauto greitis, m/s; R – oro srauto tėkmės skersmuo porose, m; R_0 – kapiliaro skersmuo, m

$$R_0 = \frac{d_e}{2}, \quad (5.2)$$

čia d_e – ekvivalentinis kapiliaro skersmuo, m.

Oro srauto greitis stačiakampio formos kapiliarais apskaičiuojamas pagal formulę:

$$u = \frac{3}{2} w_0 \left[1 - \left(\frac{2y}{\delta} \right)^2 \right], \quad (5.3)$$

čia y – oro srauto tekėjimo atstumas iki kapiliaro sienelės, m; δ – stačiakampio formos kapiliaro (kanalo) plotis, m.

Oro srauto greitis trikampės formos kapiliarais apskaičiuojamas pagal formulę:

$$u = 45 w_0 \left\{ \left(\frac{x}{h} - 1 \right) \left[\left(\frac{y}{h} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right] \right\}, \quad (5.4)$$

čia h – trikampės izocelės aukštis, m; x ir y – taško, kuriame greitis u yra nusistovėjęs koordinatės.

Natūralu, kad trikampės formos įkrovos kapiliaruose, turinčiuose aštrius kampus, oro srauto tekėjimas nėra tolygus. Reinoldso skaičius tokios formos kanaluose yra kelis kartus didesnis už apvalią formą turinčius kapiliarus. Santykis tarp maksimalaus w ir vidutinio w_0 oro srauto greičių apvalios ir stačiakampės formos kapiliaruose išreiškiamas šiomis formulėmis:

$$w_0 = 0,5 w_{\text{maks}}, \quad (5.5)$$

$$w_0 = (2/3) w_{\text{maks}}, \quad (5.6)$$

Vidutinį kapiliaro skersmenį galima išreikšti 5.7 formule:

$$d_e = 4F / P, \quad (5.7)$$

čia F – kapiliaro skerspjuvio plotas, mm^2 ; P – kapiliaro perimetras, mm.

Žinant vidutinį kapiliaro skerspjuvį, specifinis įkrovos paviršiaus plotas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$S_{sp} = 4\varepsilon / d_e, \quad (5.8)$$

čia ε – įkrovos poringumas, %.

Oro kanalai įkrovoje, sudarytoje iš medienos skiedrų, žievių, ceolito ir porolono kubelių, yra įvairios formos. Įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo gradientas gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w_0^2}{2} \frac{L}{d_e}, \quad (5.9)$$

čia ξ – hidraulinio pasipriešinimo koeficientas; ρ – dujų srauto tankis, kg/m^3 ; L – kapiliarų, kuriais teka oro srautas ilgis, m; d_e – kapiliarų, kuriais teka dujų srautas, vidutinis skersmuo, m.

Nusistovėjusiam oro srauto tekėjimui įkrovos skirtingos formos kapiliarais hidraulinio pasipriešinimo koeficientas išreiškiamas formule:

$$\xi = B / \text{Re}, \quad (5.10)$$

čia Re – Reinoldso skaičius; B – koeficientai priklausantys nuo kapiliaro kanalo formos (apvalios formos kapiliarų $B = 64$, stačiakampio formos $B = 56,9$, trikampės formos – 53).

Reinoldso skaičius išreiškiamas formule:

$$\text{Re} = \frac{w_0 d_e}{\nu}, \quad (5.11)$$

čia ν – kinematinė dujų klampa, m^2/s .

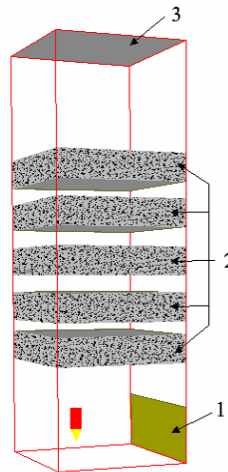
Žinant, kad įkrovos pasipriešinimas tiesiogiai priklauso nuo įkrovos poringumo, ši programa leidžia jį įvertinti.

Skirtingos formos kapiliarų $\text{Re} = 389$, kai $u = 5 \text{ m/s}$, $d_e = 5 \text{ mm}$, o $\nu = 6,42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, tai $\xi = 0,146$, $0,165$ ir $0,136$ – atitinkamai stačiakampės, apvalios ir trikampės formos kapiliarams.

Kai kapiliarų vidutinis skersmuo yra lygus $4,5 \text{ mm}$, tai jo skerspjūvio plotas $F = 20,25 \text{ mm}^2$, $P = 18,0 \text{ mm}$, $d_e = 0,0045 \text{ m}$, $S_{sp} = 889 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Pushnov *et al.* 2008).

Filtrą modeliuotas panaudojant 105 programinio paketo *Phoenix 3.5* bibliotekos uždavinį aprašantį aerodinaminį procesus. Naudojant šį programinį paketą sumodeliuotas biofiltras su penkiais įkrovos sluoksniais. Įkrovą sudaro medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių mišinys. Įvertinus biofiltro įkrovos porėtumą (55 %) ir sluoksnių skaičių (nuo 1 iki 5 vnt., kiekvieno

sluoksnio storis yra po 150 mm) modeliuoti biofiltre vykstantys aerodinaminiai procesai. Įkrovos poringumas nustatytas eksperimentinių tyrimų metu. Nustatant poringumą buvo įvertinta drėgmės įtaka aerodinaminiam pasipriešinimui, todėl papildomai įkrovos drėgnis modeliuojant nebuvo vertinamas. Sukurtas biofiltro modelis pateiktas 5.1 paveiksle.



5.1 pav. Sumodeliuoto biofiltro schema:

1 – oro srauto įtekėjimo anga; 2 – penki įkrovos sluoksniai; 3 – oro srauto ištekėjimo anga

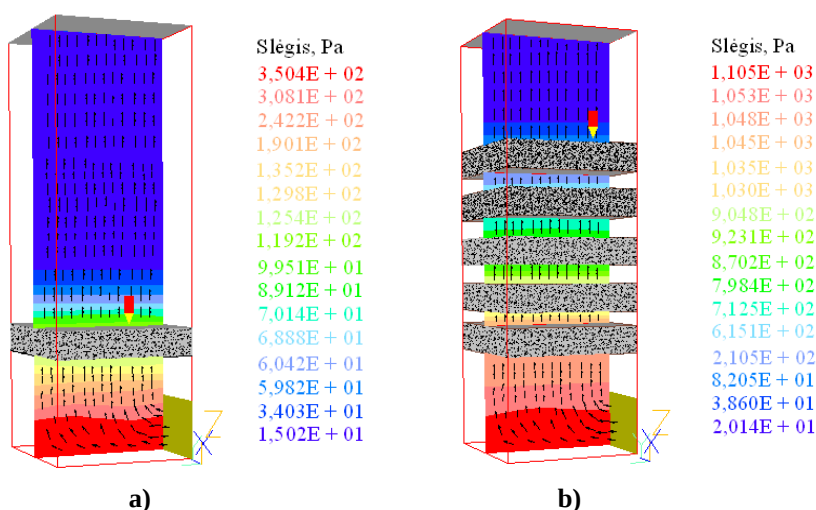
Fig. 5.1. Modelled biofilter scheme: 1 – airflow inlet duct; 2 – five layers of the charge; 3 – airflow discharge duct

Siekiant nustatyti kiekvieno bioterpės sluoksnio įtaką biofiltre esantiems procesams, įkrovos, kurią sudaro skirtingos kilmės medžiagų mišinys aerodinaminio pasipriešinimo procesas biofiltre modeliuotas su pirmuoju ir visais penkiais įkrovos sluoksniais.

Pasirenkamas vidutinis į biofiltrą įtekančio oro srauto greitis, kuris siekia 0,3 m/s, ir oro srauto temperatūra – 30 °C. Kadangi į įrenginį tiekiamo oro srauto greitis yra sudrėkinamas drėkinimo kameroje iki 100 %, todėl oro tankis padidinamas iki 1,5 kg/m³. Į įrenginį užsiduotas oro srautas nukreipiamas per filtro apačioje įrengtą oro srauto įtekėjimo angą. Pratekėjęs penkis įkrovos sluoksnius iš filtro oro srautas pašalinamas per oro srauto ištekėjimo angą. Suvedus duomenis paleidžiamas programos skaičiavimas. Suskaičiuoti modeliavimo duomenys pateikiami grafiniame vaizde (5.2 pav.).

5.2. Įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo modeliavimo rezultatai ir jų aptarimas

Tyrimų rezultatai modeliuoti per įrenginį oro srautą leidžiant 0,3 m/s greičiu. Didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas pasiekiamas prieš pirmąjį įkrovos sluoksnį ir siekia 350 Pa. Didesnį įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą lemia gana didelis ceolito granulių tankis – 2370 kg/m³. Po įkrovos sluoksnio (3.2a pav.) aerodinaminis pasipriešinimas ima tolygiai mažėti ir siekia 15 Pa. Šį pasipriešinimą lemia susidaranti trinties jėgos tarp oro srauto ir biofilto sienelės.

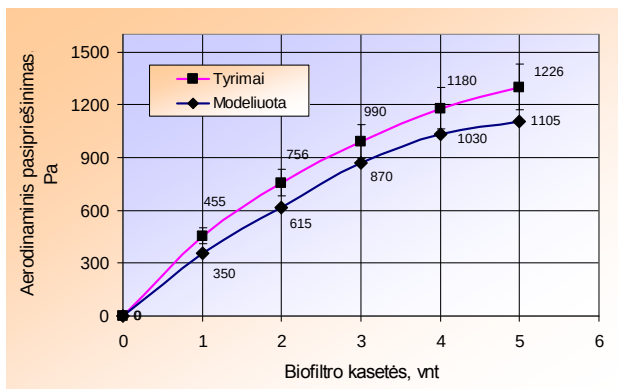


5.2 pav. Biofilto aerodinaminis pasipriešinimas: a) vieno sluoksnio pasipriešinimas, b) biofiltrą užpildžius įkrova

Fig. 5.2. Biofilter's aerodynamic resistance: a) resistance of one layer, b) upon charging the biofilter

Atlikus modeliavimą su penkiais įkrovos sluoksniais, pasiektas 1105 Pa įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas. Iš modeliuojant gautų rezultatų matyti, kad didžiausia apkrova tenka pirmajam įkrovos sluoksniui. Po pirmojo įkrovos sluoksnio aerodinaminis pasipriešinimas sumažėja iki 1030 Pa. Po antrojo įkrovos sluoksnio pasipriešinimas mažėja tolygiai ir siekia 870 Pa. Trečiasis įkrovos sluoksnis sudarytas iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių pasipriešinimą padidina dar 255 Pa. Oro srautui pratekėjus visus penkis įkrovos sluoksnius, sudarytus iš skirtingos kilmės įkrovų, pasipriešinimas sumažėja iki 20 Pa.

Ceolito granulės dėl didesnio tankio padidina įkrovos aerodinaminį pasipriešinimą. Palyginus eksperimentinius tyrimus su matematinio modeliavimo rezultatais, matyti, kad skirtumas nėra didelis. Eksperimentinių tyrimų metu gautas didesnis įkrovos pasipriešinimas už modeliuojant atliktus skaičiavimus siekia 455 Pa. Remiantis eksperimentiniais duomenimis po pirmojo sluoksnio pastebima didesnė įkrovos aerodinaminio pasipriešinimo dinamika, nei modeliuojant.



5.3. pav. Eksperimento ir modeliavimo metu gautų rezultatų palyginimas

Fig. 5.3. Comparison experimental and modelling results

Aerodinaminis pasipriešinimas modeliuojant gautas vidutiniškai apie 15 % mažesnis, nei matuojant monometru. Tačiau, esant nedideliame įrenginio tiekiamo oro srauto greičiui ir aerodinaminiam pasipriešinimui, tokios paklaidos nėra didelės, todėl nepastebima ir didesnių skirtumų tarp eksperimentinių ir sumodeliuotų rezultatų. Po penkių įkrovos sluoksnių įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas yra mažesnis už eksperimento metu gautus rezultatus, tačiau šis skirtumas nėra didelis ir siekia 10 %.

5.3. Biomasės augimą įvertinančio temperatūrinio koeficiento nustatymas ir kreivės lygties aprašymas

Mikroorganizmų aktyvumas priklauso nuo filtrė palaikomos temperatūros. Kylant temperatūrai nuo 20 iki 30 °C, mikroorganizmų aktyvumas didėja, paskui vėl ima mažėti. Mikroorganizmų skaičiaus augimo priklausomybė nuo temperatūros gali būti išreikšta Arenijaus lygtimi (Jin *et al.* 2007):

$$\frac{\partial \ln k}{\partial T} = \frac{E_a}{kT^2}, \quad (5.12)$$

čia E_a – aktyvacijos energija; k – Bolcmano konstanta.

Suintegravę šią lygtį nuo T_1 iki T_2 gauname:

$$\ln \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = \frac{E(T_2 - T_1)}{RT_1 T_2} = \frac{E}{RT_1 T_2} (T_2 - T_1). \quad (5.13)$$

Arenijaus lygtis paprastai naudojama mikroorganizmų aktyvumo priklausomybei nuo temperatūros. Tačiau temperatūrai poveikį gali daryti ir aplinkos veiksniai, todėl reikšmė $\frac{E}{RT_1 T_2}$ yra pastovi, tad ją galime pažymėti raide m .

Tuomet (5.13) lygtis supaprastėja:

$$\ln \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = m(T_2 - T_1). \quad (5.14)$$

Pertvarkę (5.14) lygtį gauname:

$$\frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = e^{m(T_2 - T_1)} = \gamma^{(T_2 - T_1)}. \quad (5.15)$$

Taigi gavome tokią galutinę temperatūrinio koeficiento išraišką:

$$\frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = \gamma^{(T_2 - T_1)}. \quad (5.16)$$

Skirtingų reakcijų atveju molekulių greičiai yra nevienodi. Jie priklauso nuo reaguojančių ir susidarančių medžiagų sudėčių, struktūrų, atomų bei molekulių masių ir t. t. Esant tai pačiai reakcijai, didėjant temperatūrai didėja ir reakcijos greitis. Žemesnėje temperatūroje mikroorganizmų aktyvumas mažesnis nei aukštesnėje. Tačiau pasiekus tam tikrą ribą, aktyvumas ima mažėti. Nustatyta, kad padidėjus temperatūrai skirtingų reakcijų greitis padidėja ar sumažėja γ kartų. Šis dydis vadinamas temperatūriniu koeficientu.

Temperatūriniam koeficientui skaičiuoti naudojami duomenys pateikti 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Temperatūriniam koeficientui skaičiuoti naudojami duomenys

Table 5.1. Data using for temperature gradient calculation

Teršalo pavadinimas	Mikroorganizmų skaičius ceolite, esant tam tikrai temperatūrai							
	20 °C		25 °C		30 °C		35 °C	
	Bakterijos (ksv/g $\times 10^3$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^3$)	Bakterijos (ksv/g $\times 10^3$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^3$)	Bakterijos (ksv/g $\times 10^3$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^3$)	Bakterijos (ksv/g $\times 10^3$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^3$)
Acetonas	41,0	3,3	3,8	13,0	71,0	16,0	46,0	1,7
Butanolis	48,0	18,3	51,3	13,0	177,0	21,0	33,0	216,0
Tolenas	94,0	26,3	50,0	109,0	108,0	13,0	116,0	12,6
Teršalo pavadinimas	Mikroorganizmų skaičius porolone, esant tam tikrai temperatūrai							
	20 °C		25 °C		30 °C		35 °C	
	Bakterijos (ksv/g $\times 10^4$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^4$)	Bakterijos (ksv/g $\times 10^4$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^4$)	Bakterijos (ksv/g $\times 10^4$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^4$)	Bakterijos (ksv/g $\times 10^4$)	Mikromicetai (ksv/g $\times 10^4$)
Acetonas	5,9	1,9	57,0	106,0	130,0	34,0	95,0	2,7
Butanolis	15,3	16,6	59,0	8,0	130,0	26,0	19,0	26,3
Tolenas	61,7	26,3	153,0	27,0	40,0	18,0	30,0	12,6

Bakterijų priklausomybei nuo biofilte palaikomos temperatūros matematiškai aprašyti sudaroma lygtis.

Lygčiai sudaryti naudoti duomenys gauti nustačius bakterijų skaičių įkrovoje, sudarytoje iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono kubelių, leidžiant acetono garais užterštą orą (3.9 pav.). Pasirinkimą lėmė didžiausias bakterijų skaičiaus pokytis prie skirtingų temperatūrų (5.1 lentelė).

5.2 lentelė. Kreivei sudaryti naudojami duomenys

Table 5.2. Date used for curve formation

$T, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35
$y = \text{mikromicetai} \times 10^4, \text{ksv/g}$	10,0	57,4	137,1	99,6

Iš 5.2 lentelėje pateiktų T reikšmių matyti, kad y reikšmė, palyginus su jos reikšme 30 °C temperatūroje, artima nuliui 20 °C temperatūroje, todėl toliau skaičiuoti naudojamos naujos T_i reikšmės, kurios pateiktos 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. Skaičiuoti naudojamos T_i reikšmės

Table 5.3. T_i values used for calculation

T	20	25	30	35
T_i	0	5	10	15

Gauta kreivė gali būti išreikšta lygtimi:

$$y = a \cdot T^2 / e^{bT^2} . \quad (5.17)$$

T reikšmės prilyginus T_i reikšmėms lygties išraiška bus tokia:

$$y = a \cdot T_i^2 / e^{bT_i^2} . \quad (5.18)$$

Pateiktose lygtyse naudojami a ir b koeficientai gauti iš (5.18) lygtį įstačius T_i reikšmes. Į lygtį įstačius T_i reikšmes ir jas išlogaritnavus randamos koeficiento b reikšmės. Toliau skaičiuoti naudojamas b reikšmių vidurkis. b reikšmės įstačius į (5.18) lygtį, toliau galima rasti a reikšmę. Žinant a ir b koeficientų reikšmes gaunama kreivės, parodančios bakterijų skaičiaus priklausomybę nuo biofiltre palaikomos temperatūros, lygtis.

5.4. Gautos temperatūrinio koeficiento ir kreivės diferencialinės lygties reikšmės ir jų aptarimas

Atlikus temperatūrinio koeficiento skaičiavimus nustatytos mikroorganizmų skaičiaus kitimo tendencijos, priklausomai nuo įrenginyje palaikomos oro srauto temperatūros. Iš 5.4 ir 5.5 lentelėse pateiktų duomenų matyti mikroorganizmų augimas ceolito bei porolono įkrovose. Kuo temperatūrinis koeficientas yra aukštesnis, tuo spartesnis yra mikroorganizmų skaičiaus augimas. Kai temperatūrinis koeficientas didesnis už 1, tuomet mikroorganizmų reakcijos greitis didėja. Kai koeficientas mažesnis už 1, mikroorganizmų reakcijos greitis mažėja.

Iš 5.4 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad per įkrovą leidžiant acetono garais užterštą orą 20–25 °C temperatūroje mikroorganizmų temperatūrinis koeficientas yra žemiau vieneto – 0,62, o porolono įkrovoje mikroorganizmų skaičius sparčiai auga, koeficientas siekia 1,57.

5.4 lentelė. Temperatūrinis koeficientas, įvertinantis bakterijų skaičiaus augimą

Table 5.4. The temperature coefficient evaluating a growth in bacteria quantity

Temperatūra, °C	Temperatūrinis koeficientas γ					
	Acetonas		Butanolis		Toluenas	
	Ceolitas	Porolonas	Ceolitas	Porolonas	Ceolitas	Porolonas
20–25	0,62	1,57	1,01	1,31	1,20	0,88
25–30	1,80	1,28	1,28	1,17	0,76	1,17
30–35	0,92	0,94	0,71	0,68	0,94	1,01

5.5 lentelė. Temperatūrinis koeficientas, įvertinantis mikromicetų skaičiaus augimą

Table 5.5. The temperature coefficient evaluating a growth in micromycetes quantity

Temperatūra, °C	Temperatūrinis koeficientas γ					
	Acetonas		Butanolis		Toluenas	
	Ceolitas	Porolonas	Ceolitas	Porolonas	Ceolitas	Porolonas
20–25	1,32	2,21	0,93	0,80	1,33	1,01
25–30	1,04	0,80	1,10	1,27	0,65	0,92
30–35	0,64	0,60	1,08	1,00	0,99	0,93

Bakterijų augimą rodantis koeficientas yra didesnis už vienetą valant per įkrovą leidžiamu acetonu užterštu oru. Didžiausias mikromicetų skaičiaus mažėjimas – 0,60 – užfiksuotas porolone, biofiltre palaikant 30–35 °C temperatūrą.

Lygčiai, aprašančiai mikromicetų skaičiaus augimą porolone, rasti (5.17) lygtyje pateikti a ir b koeficientai.

5.6 lentelė. koeficiento a lygčių sprendiniai

Table 5.6. Answers to “ a ” coefficient equations

T_i	y	$y = a \cdot T_i^2 / e^{bT_i^2}$	a koeficientas
0	0	0	0
5	57,4	$y = a \cdot 5^2 / e^{b \cdot 5^2}$	$2,30 \cdot e^{25b}$
10	137,1	$y = a \cdot 10^2 / e^{b \cdot 10^2}$	$1,37 \cdot e^{100b}$
15	99,6	$y = a \cdot 15^2 / e^{b \cdot 15^2}$	$0,44 \cdot e^{225b}$

Koeficientai gauti į šią lygtį įstačius T_i reikšmes, kurios pateiktos 5.5 lentelėje. Skaičiavimo rezultatai pateikti 5.6 lentelėje:

Atėmus a koeficiento sistemų lygtis gaunama (5.7 lentelė):

5.7 lentelė. Koeficiento b radimas

Table 5.7. Finding coefficient “ b ”

a koeficiento lygčių sprendiniai	Tarpiniai skaičiavimai	b koeficientas, gautas išlogaritnavus lygtis	Vidutinė b reikšmė
$2,30 \cdot e^{25b} = 1,37 \cdot e^{100b}$	$e^{75b} = 1,68$	0,0069	0,008
$1,37 \cdot e^{100b} = 0,44 \cdot e^{225b}$	$e^{125b} = 3,11$	0,0091	
$2,30 \cdot e^{25b} = 0,44 \cdot e^{225b}$	$e^{200b} = 5,22$	0,0083	

Įstačius b reikšmę 5.7 lentelėje pateiktą a koeficiento sprendinį randame šio koeficiento reikšmes.

5.8 lentelė. Koeficiento a reikšmės radimas

Table 5.8. Finding coefficient “ a ” value

a koeficiento sprendinys	b koeficiento reikšmė	Gauta a koeficiento reikšmė	Vidutinė a koeficiento reikšmė
$2,30 \cdot e^{25b}$	0,008	2,81	2,84
$1,37 \cdot e^{100b}$		3,05	
$0,44 \cdot e^{225b}$		3,66	

Gautų a koeficiento dydžių išsibarstymas nėra didelis, todėl galima naudoti vidutinę a koeficiento reikšmę.

Įstatę gautus a ir b koeficientus į (5.18) lygtį gauname tokią lygties išraišką:

$$y = 2,84 \cdot T_i^2 / e^{0,008T_i^2}. \quad (5.19)$$

Kadangi $T = T_i + 20$, galutinis lygties pavidalas turi būti toks:

$$y = 2,84 \cdot (T - 20)^2 / e^{0,008(T-20)^2}. \quad (5.20)$$

Tiriamas procesas (kolonijas sudarančių vienetų skaičiaus priklausomybė nuo biofilte palaikomos temperatūros) pastebimai prasideda nuo 20 °C temperatūros ir vyksta pagal eksponentinę asimetrinę priklausomybę. Kai temperatūra pasiekia 30 °C, mikroorganizmų aktyvumas ima mažėti. Optimalios mikroorganizmų egzistavimo sąlygos yra 30 °C temperatūroje.

5.5. Teršalų degradacijos matematinio modeliavimo metodika

Modeliavimo tikslas – nustatyti teršalų koncentracijos pokyčius nuo įkrovos sluoksnio aukščio per kurį leidžiamas lakiaisiais organiniais junginiais užterštas oras.

Modeliuoti taikomas Hodžo ir Devinio modelis aprašo teršalų pernašos ir biodegradacijos procesus, vykstančius biofilte (Hodge and Devanny1995). Kadangi teršalas filtruojasi per aktyvintas įkrovas, sudarytas iš medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento ir porolono kubelių mišinių, todėl teršalo garų koncentracija priklauso nuo jo advekcijos, dispersijos, adsorbcijos, absorbcijos ir biologinių procesų. Teršalų degradacijos procesai vyksta dviejose fazėse: dujinėje (1 fazė) ir skystojoje (2 fazė).

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

1. Biofilte turi būti išlaikytas laminarinis dujų tekėjimas.
2. Išlaikytas filtro 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.

Kaip parodė anksčiau atlikti moksliniai tyrimai, dujų srauto turbulentiškumo galima nevertinti, nes biofiltruose tekančio oro srauto greičiai nėra dideli, o Reynoldso skaičius tipiniuose biofiltruose siekia $0,2 < Re < 0,5$ (Leson and Winer, 1991).

Devanny nustatė, kad teršalų pernašos ir biologiniai procesai turi įtakos teršalo koncentracijai tiek dujinėje, tiek skystojoje fazėse. Teršalų biodestrukcijos procesai priklauso nuo įkrovos poringumo, leidžiamo oro srauto greičio, dispersijos koeficiento, biofiltro kasečių skaičiaus (įkrovos sluoksnio aukščio) bei kitų

parametrų. Biofiltre vykstančius teršalų degradacijos procesus galima aprašyti formule (Ardjmand *et al.* 2005):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) [k(k_h C - C_{ads})], \quad (5.19)$$

čia C – teršalo koncentracija, mg/m^3 ; t – teršalo pernašos laikas, h ; D – teršalo dispersijos koeficientas dujinėje fazėje, mg/cm^3 ; x – teršalo tekėjimo atstumas biofiltre, cm ; v – oro srauto greitis įkrovos porose, cm/h ; ε – įkrovos poringumas, %; k – teršalo pernašos greičio konstanta, h^{-1} ; k_h – teršalo filtruojančioje medžiagoje skilimo koeficientas; C_{ads} – teršalo koncentracija skystojoje fazėje, mg/cm^3 .

Nusistovėjus procesui teršalo koncentracijos dujinėje ir skystoje fazėse kinta proporcingai:

$$C_{ads} = k_h C. \quad (5.20)$$

Tuomet

$$\frac{\partial C_{ads}}{\partial t} = k_h \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (5.21)$$

(5.21) lygtyje gautą išraišką įstatę į (5.19) formulę gauname:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \left(k_h \frac{\partial C}{\partial t} + b k_h C \right). \quad (5.22)$$

Teršalo pernašos koeficientas dujinėje ir skystoje fazėse išreiškiamas formule:

$$k_m = \frac{M_{ads}}{M_{oro}} = \frac{C_{ads}(1-\varepsilon)}{C\varepsilon} = k_h \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right), \quad (5.23)$$

čia M_{ads} – teršalo masė skystoje fazėje, mg ; M_{oro} – teršalo masė dujinėje fazėje, mg .

Tuomet (5.23) lygtyje gautą išraišką įstatę į (5.22) formulę gauname:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - k_m \frac{\partial C}{\partial t} - b k_m C. \quad (5.24)$$

Pataisos koeficientas R , išreiškiantis sulaikomo teršalo dalį adsorbcijos metu, priklauso nuo dujinės ir skystosios fazės teršalo masių:

$$R = \frac{M_{ads} + M_{oro}}{M_{oro}} = 1 + k_m. \quad (5.25)$$

Gautą išraišką įstatę į (5.24) lygtį gauname:

$$(1 + k_m) \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - b_1 k_m C, \quad (5.26)$$

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

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

$$C = C_0 e^{b_1 t}. \quad (5.27)$$

Žinant tyrimų metu gautas teršalų garų koncentracijas prieš ir po biofiltro, įkrovą aktyvinant 480 h, pagal (5.28) formulę randamos b_1 reikšmės:

$$b_1 = \frac{\ln(C_0 / C)}{t}. \quad (5.28)$$

Į (5.24) lygtį įstatę (5.25) lygtyje išvestą pataisos koeficientą R gauname bio-filtre vykstančių teršalų degradacijos procesus aprašančią lygtį (Ardjmand *et al.* 2005):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{b_1 k_m}{R} C. \quad (5.32)$$

Mažo našumo biofiltruose leidžiamo oro srauto procesų metu teršalo dispersijos ir pataisos koeficientai nežymūs, tuomet teršalų pernešimo lygtis supaprastėja (Vaiškūnaitė 2004):

$$v \frac{\partial C}{\partial x} + b_1 k_m C = 0. \quad (5.33)$$

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

$$C = C_0 \exp\left(\frac{-b_1 k_m x}{v}\right). \quad (5.34)$$

Teršalų koncentracijų priklausomybėms nuo įkrovos sluoksniu aukščio (bio-filtro kasečių skaičiaus) gauti į programas *MathCad 14* ir *MathMechanics* suvesti duomenys pateikti 5.9 lentelėje.

5.9 lentelė. Modeliuoti naudojami pradiniai duomenys

Table 5.9. Data used for modelling

Parametras	Žymuo	Vienetai	Medienos skiedros ir žievės	Medie- nos skiedrų, žievių ir ZeoVit sorbento mišinys	Medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių mišinys	Medie- nos skiedrų, žievių, ceolito ir porolono mišinys
Poringumas	ε	%	55	45	63	55
Pradinė kon- centracija: acetonas butanolis toluenas	C_0	mg/m ³	302 306 310	308 310 300	318 322 316	305 307 310
Pernašos koeficientas acetonas butanolis toluenas	k_m	–	27,07 17,67 6,39	99,47 48,72 13,59	6,33 4,42 1,63	40,08 19,63 5,47
Skilimo koeficientas: acetonas butanolis toluenas	k_h	–	24,00 15,67 5,67	49,00 24,00 6,69	19,00 13,29 4,88	49,00 24,00 6,69
Teršalo bio- degradacijos konstanta: acetonas butanolis toluenas	b	h ⁻¹	0,0052 0,0059 0,0040	0,0082 0,0067 0,0043	0,0062 0,0055 0,0037	0,0082 0,0067 0,0043
Skaičiavimo žingsnis	∂x	cm	5	5	5	5
Įkrovos aukštis, cm	x	cm	75	75	75	75
Leidžiamo oro srauto greitis	v	cm/h	108×10^3	108×10^3	108×10^3	108×10^3

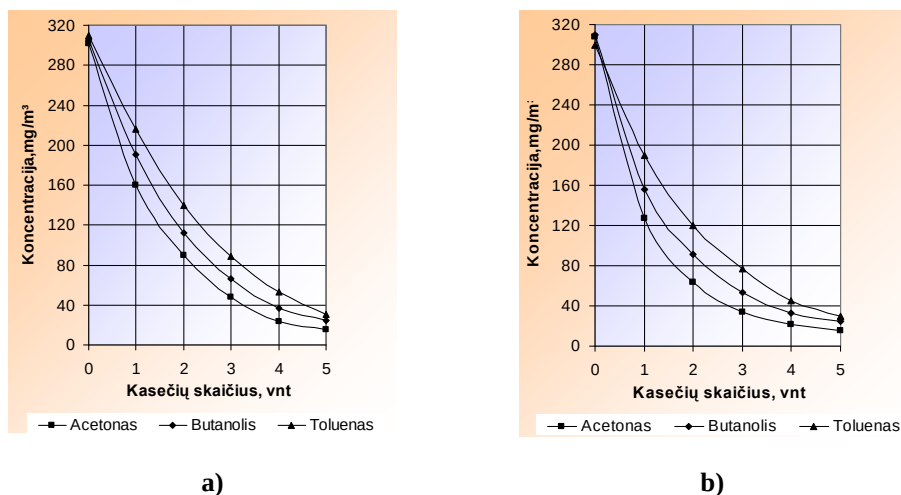
Matematiniam modeliavimui naudojami parametrai, gauti atliekant eksperimentinius tyrimus su didžiausią – 98 % – valymo efektyvumą turinčiu biofiltru su oro srauto drėkinimo kamera.

5.6. Teršalų degradacijos modeliavimo rezultatų analizė

Teršalų degradacijos biofiltre rezultatai gauti naudojant programas *Mathcad 14* ir *Math Mechanixs*. Į (5.34) lygtį įstačius reikalingus koeficientus ir ją apskaičius gauti modeliavimo rezultatai. Atlikti skaičiavimai parodė teršalo koncentracijos pokyčių priklausomybes nuo įkrovos kasečių skaičiaus, t. y. nuo įkrovos sluoksnio aukščio. Gauti rezultatai biofiltrą užkrovus skirtingos kilmės įkrovomis, sudarytomis iš medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento granulių ir porolono kubelių mišinių, pateikti 5.4–5.5 paveiksluose.

Iš 5.4 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad didesnis teršalų koncentracijos sumažėjimas pastebimas po pirmos ir antros kasečių, užkrautų aktyvinta medienos skiedrų ir žievių įkrova. Modeliavimo rezultatai parodė, kad geriausiai iš visų teršalų įkrova sorbavo acetono garais užterštą orą, blogiausiai – tolueno. Per įkrovą leidžiant acetono garais užterštą orą, šio teršalo koncentracija sumažėja nuo 302 iki 90 mg/m³. Tolueno garų koncentracija po dviejų įkrovos sluoksnių sumažėja iki 140 mg/m³. Acetono pernašos koeficientas yra didesnis už butanolio ar tolueno, tai lemia geresnį jo skaidymą. Modeliuojant gauti rezultatai įrodo, kad didžiausias teršalų degradacijos efektyvumas yra pirmuose įkrovos sluoksniuose. 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 už kitus sluoksnius. Sumažėjus acetono garų koncentracijai iki 90 mg/m³ trečiame ir ketvirtame įkrovos sluoksniuose mikroorganizmų aktyvumas sulėtėja, tai įrodo sumažėjęs sulaikomos koncentracijos kiekis šiuose sluoksniuose. Po penktos filtro kasetės acetono garų koncentracija sumažėjo iki 23,1 mg/m³.

Į programą *MathCad 14* įvestos mažesnės, eksperimentinių tyrimų metu gautos, tolueno biodegradacijos konstantos ir skilimo koeficientai lemia modeliavimo metu gautą mažesnę – 89 % – oro valymo efektyvumą. Per įkrovą leidžiant oro srautą greičiu 0,3 m/s tolueno garų koncentracija po penkių biofiltro kasečių, užpildytų aktyvintomis medienos skiedromis ir žievėmis, sumažėja nuo 310 iki 34,1 mg/m³. Matematinio modeliavimo metu gauti rezultatai parodė, kad geriau medienos skiedrose ir žievėse skaidomi hidrofiliniai organiniai junginiai, tokie kaip butanolis, kurio garų koncentracija sumažėjo nuo 306 iki 15,3 mg/m³.

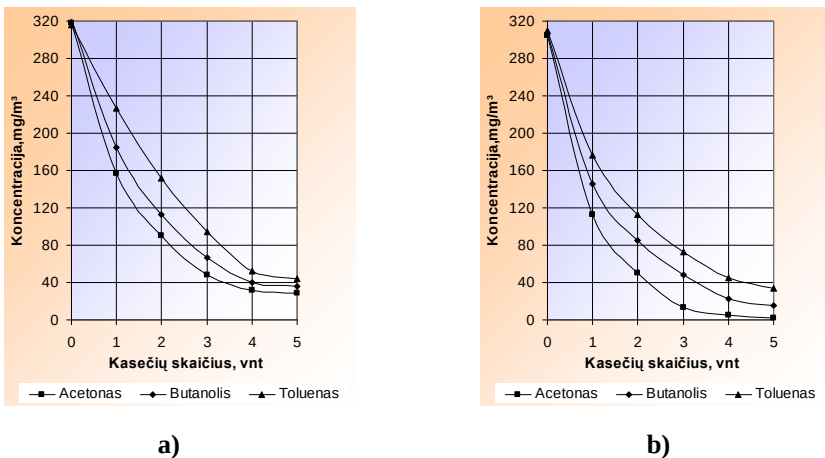


5.4 pav. Modeliavimo metu gautos teršalo koncentracijos priklausomybė nuo biofiltro kasečių skaičiaus: a) naudojant aktyvuotas medienos skiedras su žievėmis, b) naudojant medienos skiedrų, žievių ir ZeoVit sorbento mišinį

Fig. 5.4. The dependence of pollutant concentration on the number of biofilter cassettes: a) filled with activated wood chips and barks, b) filled with a mixture of activated wood chips, barks and ZeoVit sorbent granules

Medienos skiedras ir žievės sumaišius su ZeoVit sorbento granulėmis pastebima, kad teršalų koncentracija pirmuosiuose įkrovos sluoksniuose sumažėja daugiau (5.4b pav.). Acetono garų koncentracija po dviejų įkrovos sluoksnių sumažėja nuo 308 iki 64 mg/m³, t. y. 26 mg/m³ daugiau nei įkrovai naudojant medienos skiedras su žievėmis. Geresnį teršalų skaidymą lemia geromis adsorbicinėmis savybėmis, kurias įvertina pernašos koeficientas k_m , pasižymintis ZeoVit sorbentas.

Mažiausias teršalų koncentracijos sumažėjimas gautas medienos skiedras ir žievės sumaišius su porolono kubeliais (5.3 pav.). Didžiausias visų teršalų sumažėjimas pastebimas pirmuose keturiuose įkrovos sluoksniuose. Po ketvirtojo sluoksnio teršalų koncentracija mažėja nedaug. Acetono garų koncentracija po penkių įkrovos sluoksnių sumažėja nuo 318 iki 28,6 mg/m³. Butanolio koncentracija po 75 cm įkrovos sluoksnio storio sumažėjo 89,0 %. Mažesnę skilimo koeficientą, kuris įvertina teršalo adsorbiciją, turinčio tolueno koncentracija po pirmų penkių sluoksnių sumažėjo nuo 316 iki 44,2 mg/m³. Teoriškai apskaičiuotas biofiltro valymo efektyvumas skaidant tolueną siekia 86,0 %. Medienos skiedras ir žievės maišant su porolonu sumažėja teršalo adsorbicija, todėl gauti rezultatai, naudojant šią įkrovą, yra blogesni už modeliuoti naudojamas kitas įkrovas.



5.5 pav. Modeliavimo metu gautos teršalo koncentracijos priklausomybė nuo biofiltro kasečių skaičiaus: a) filtrą užkrovus medienos skiedrų, žievių ir porolono kubelių mišiniu, b) filtrą užkrovus medienos skiedrų, žievių ir ZeoVit sorbento ir porolono mišiniu

Fig. 5.5. The dependence of pollutant concentration on the number of biofilter cassettes: a) filled with a mixture of activated wood chips, barks and foam cubes, b) filled with a mixture of activated wood chips, barks, ZeoVit sorbent granules and foam cubes

Geriausiomis teršalų degradacijos savybėmis pasižymėjo įkrova, sudaryta iš medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento ir porolono kubelių mišinio (5.5b pav.). Skaiciavimai parodė, kad naudojant įkrovą, kuri turi geras sorbcines savybes, teršalų koncentracija sumažėja labiausiai. Acetono garų koncentracija po penkių įkrovos sluoksnių sumažėja nuo 305 iki 2,44 mg/m³. Butanolio valymo efektyvumas po 75 cm storio įkrovos sluoksnio siekė 96,5 %. Blogiausi rezultatai gauti suskaičiavus tolueno valymo efektyvumą, kuris po penkių įkrovos sluoksnių yra 89,0 %.

Gauti modeliavimo rezultatai parodė, kad aukštas teršalų išvalymo laipsnis (iki 99,2 %) gautas panaudojant penkis įkrovos sluoksnius, kurių bendras aukštis siekia 0,75 m. Todėl įkrovos sluoksnio aukštis, siekiant gauti didelį oro valymo efektyvumą, yra pakankamas.

Eksperimentinių tyrimų ir modeliavimo metu nustatyta, kad geriausiomis teršalų filtracijos savybėmis pasižymėjo medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento ir porolono kubelių mišinys. Todėl biofiltracijai naudojamos šios įkrovos tyrimų rezultatai lyginami su modeliuojant gautais duomenimis. Kadangi modeliavimo metu gautos teršalo koncentracijos priklausomybės nuo biofiltro kasečių skaičiaus, o tyrimų metu išvestos įkrovos efektyvumo priklausomybės, todėl bū-

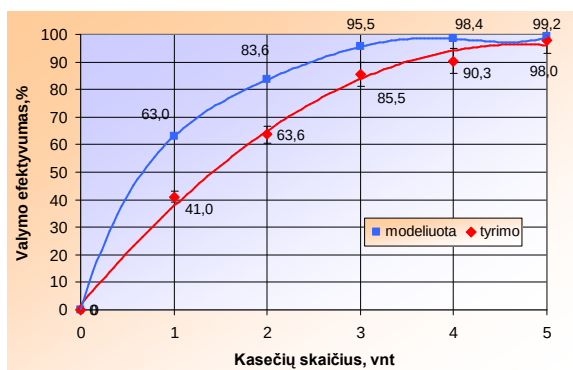
tina koncentracijas perskaičiuoti į įkrovos efektyvumą. Perskaičiavimo rezultatai pateikti 5.10 lentelėje.

5.10 lentelė. Modeliuojant gautos įkrovos efektyvumo priklausomybės nuo biofiltro kasečių skaičiaus

Table 5.10. The dependences of efficiency of the modelled charge on the number of biofilter cassettes

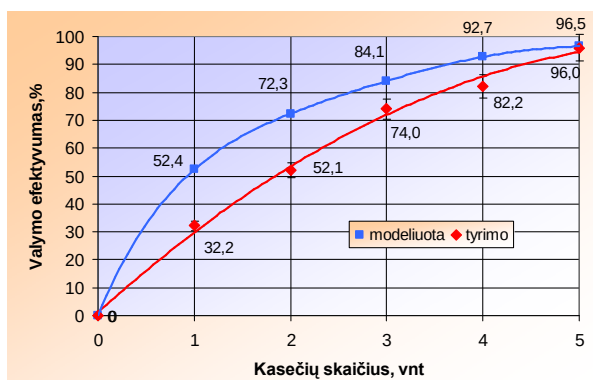
Kasetė	Efektyvumas, %		
	Acetonas	Butanolis	Toluenas
0	0	0	0
1	63,0	52,4	43,2
2	83,6	72,3	63,5
3	95,5	84,1	76,5
4	98,4	92,7	85,5
5	99,2	96,5	89,0

Modeliuojant nustatytos įkrovos efektyvumo išraiškos lyginamos su eksperimentinio tyrimo metu gautais rezultatais.



5.6 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo kasečių skaičiaus per įkrovą leidžiant acetonu užterštą orą

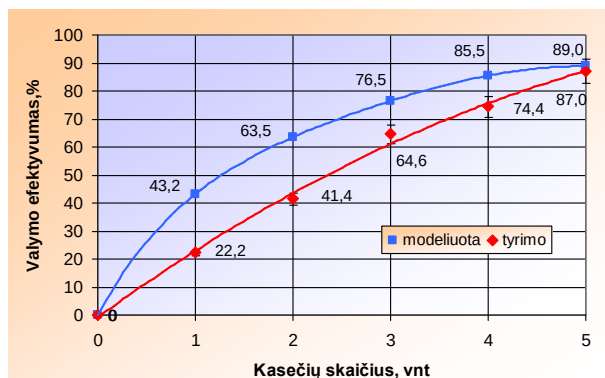
Fig. 5.6. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes when passing acetone-polluted air through the charge



5.7 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo kasetėių skaičiaus per įkrovą leidžiant butanoliu užterštą orą

Fig. 5.7. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes when passing butanol-polluted air through the charge

Didžiausias – 22,0 % – nesutapimas tarp eksperimentinio tyrimo ir modeliavimo metu gautų rezultatų gautas po pirmos biofiltro kasetės (5.6 pav.). Tačiau, kaip matyti iš pateiktų rezultatų, geriausiai teršalus sorbavo pirmasis įkrovos sluoksnis. Didėjant kasetėių skaičiui, rezultatų nesutapimas dėsningai mažėja ir po penktos biofiltro kasetės siekia 1,2 %.



5.8 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo kasetėių skaičiaus per įkrovą leidžiant toluenu užterštą orą

Fig. 5.8. The dependence of biofilter treatment efficiency on the number of cassettes when passing toluene-polluted air through the charge

Lyginant tyrimo ir modeliavimo metu gautus duomenis per biofiltrą leidžiant butanoliu užterštą orą didžiausias valymo efektyvumo skirtumas siekia 22,2 %. Šis nesutapimas gautas po pirmos kasetės (5.7 pav.). Tačiau po penkių įkrovos sluoksnių skirtumas tarp eksperimentinių ir modeliavimo duomenų sumažėja iki 0,5 %.

Tolueno koncentracija tyrimo metu po pirmojo įkrovos sluoksnio kito lėčiau, nei rodo modeliavimo metu gauti rezultatai (5.8 pav.). Tačiau didėjant įkrovos sluoksnių skaičiui valymo duomenų nesutapimas mažėja ir po penktos biofiltro kasetės siekia 2,0 %. Duomenų nesutapimas po pirmųjų įkrovos sluoksnių galėjo atsirasti dėl teršalų desorbcijos, kurią matematiškai labai sudėtinga aprašyti, iš ZeoVit sorbento.

5.11 lentelė. Santykinų paklaidų verčių skaičiavimo rezultatai

Table 5.11. Results of calculating relative error values

Kasetės Nr.	Acetonas			Butanolis			Toluenas		
	E*, (%) mod.	E**, (%) tyr.	P***, %	E*, (%) mod.	E**, (%) tyr.	P***, %	E*, (%) mod.	E**, (%) tyr.	P***, %
1	63,0	41,0	34,92	52,4	32,2	38,55	43,2	22,2	48,61
2	83,6	63,6	23,92	72,3	52,1	27,94	63,5	41,4	34,80
3	95,5	85,5	10,47	84,1	74,0	12,01	76,5	64,6	15,56
4	98,4	90,3	8,23	92,7	82,2	11,33	85,5	74,4	12,98
5	99,2	98,0	1,21	96,5	96,0	0,52	89,0	87,0	2,25

Pastaba: E* – oro valymo efektyvumas modeliavimo metu, E** – oro valymo efektyvumas tyrimų metu, P*** – santykinė paklaida.

Palyginus eksperimentinių tyrimų ir modeliavimo metu gautus duomenis skaičiuojamos santykinės duomenų paklaidos. Santykinų paklaidų vertės pateiktos 5.11 lentelėje. Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad didžiausios santykinės paklaidos, kurios siekia iki 48,61 %, rastos suliginus po pirmos kasetės gautus duomenis. Po penkių biofiltro kasečių nesutapimai tarp modeliavimo ir tyrimo metu gautų duomenų mažėja. Mažiausia santykinė paklaida, kuri siekia 0,52 %, gauta suliginus per biofiltrą leidžiamo acetono garų koncentracijas. Didesnės santykinės paklaidos po pirmų kasečių galėjo atsirasti teršalams desorbuojant iš gamtinio ZeoVit sorbento.

5.7. Penktojo skyriaus išvados

1. Modeliavimo metu skirtingos kilmės įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas siekė 1105 Pa. Aerodinaminio pasipriešinimo modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų metu gauti rezultatai skyrėsi iki 9,9 %.
2. Temperatūrinio koeficiento skaičiavimais gautos mikroorganizmų skaičiaus priklausomybės nuo biofiltre palaikomos temperatūros. Didžiausias – 1,57 – koeficientas, rodantis mikroorganizmų skaičiaus augimą, apskaičiuotas 20–25 °C temperatūroje.
3. Porolone rastų mikroorganizmų skaičiaus priklausomybei nuo įrenginyje palaikomos temperatūros išreikšti matematinio modeliavimo metu gauta lygtis $y = 2,84 \cdot (T - 20)^2 / e^{0,008(T-20)^2}$, rodanti eksponentinę mikroorganizmų skaičiaus priklausomybę nuo renginyje palaikomos temperatūros.
4. Biofiltracinių procesų matematinio modeliavimo ir tyrimų metu gautų rezultatų didžiausias nesutapimas nustatytas sulyginus teršalo koncentracijas po pirmuoju sluoksniu. Priklausomai nuo teršalo prigimties, jis kinta nuo 34 iki 48 %. Mažiausios paklaidos užfiksuotos po penktuoju sluoksniu, jos kinta nuo 0,52 iki 2,25 %. Tyrimo ir modeliavimo metu gautų rezultatų nesutapimas yra nedidelis, todėl galima daryti prielaidą, kad modeliavimui taikytas Hodžo ir Devinio modelis yra tinkamas.

Sukurtų įrenginių ir patobulintos įkrovos drėgnio tyrimo metodikos aprašymas

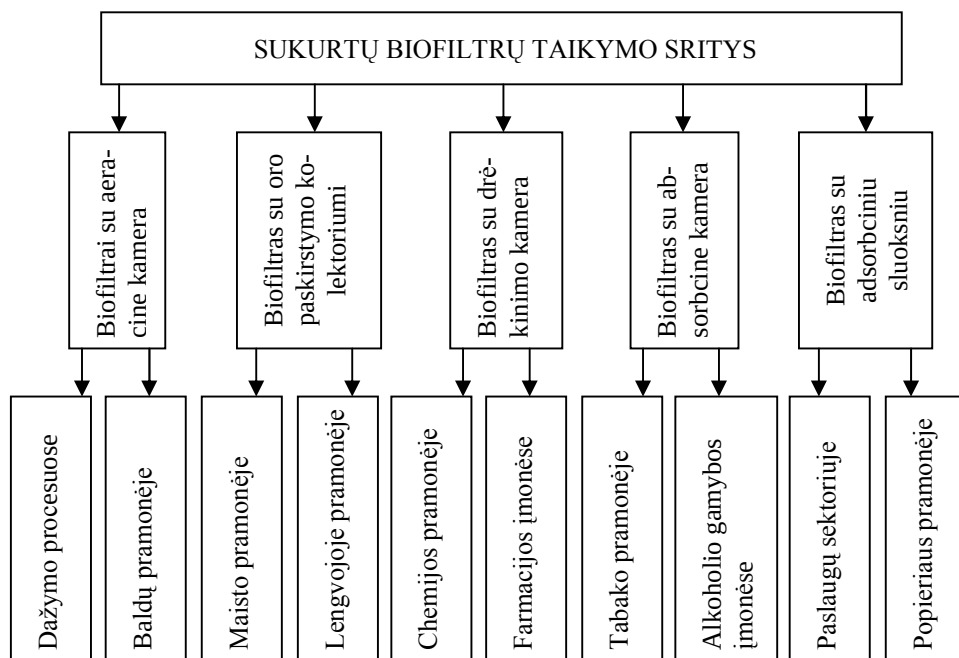
Vykdamas Europos Sąjungos ir Lietuvos Respublikos remiamą projektą, kurio svarbiausias tikslas – diegiant naujausias technologijas padidinti projekto įmonės konkurencingumą, atlikus taikomuosius mokslinius tyrimus, sukurti efektyvesnį oro valymo nuo lakiųjų organinių junginių biofiltro prototipą ir parengti techninius dokumentus serijinei šio įrenginio gamybai. Vykdamas šį projektą buvo sukurti ir pagaminti 5 biofiltrų prototipai, pagrįsti skirtingais inžineriniais sprendimais, kurių kiekvieno našumas siekia iki 1000 m³/h. Remiantis įgytomis įkrovų taikomųjų tyrimų žiniomis, buvo parengtos techninės-technologinės biofiltrų prototipų parametrų specifikacijos, konstrukcinių detalių schemos ir parengti prototipų brėžiniai. Remiantis parengtais brėžiniais buvo surinkti penki biologinio oro valymo įrenginio prototipai su skirtingais technologiniais ir inžineriniais sprendimais ir duomenimis, siekiant rasti geriausią techninių duomenų derinį.

Taip pat skyriuje aprašyta autoriaus patobulinta biofiltruose naudojamų įkrovų drėgnio tyrimo metodika.

Skyriaus tematika paskelbtos autoriaus mokslinės publikacijos (Zagorskis ir Baltrėnas 2004, 2005c) ir gautas patentas (Baltrėnas ir Zagorskis 2008d).

6.1. Sukurtų biofiltrų taikymo sritys ir konstrukciniai sprendimai

Sukurti biologinio oro valymo įrenginiai pasižymi aukštu išvalymo efektyvumu, pigumu, ekologiškumu. Biofiltrus taikyti skatina vis griežtėjančios į aplinkos orą išsiskiriančių teršalų emisijų mažinimo normos. Visuose biofiltruose įrengtos įkrovos drėgmės ir bioterpės temperatūros kontrolės sistemos, užtikrinančios mikroorganizmų, skaidančių lakiuosius organinius junginius, gyvybinę veiklą. Biofiltruose siūloma naudoti įkrovą, sudarytą iš medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento ir porolono kubelių. Sukurti biofiltrai, priklausomai nuo konstrukcijos ypatumų, gali būti naudojami įvairiose pramonės šakose. Dėl filtruose įdiegtų naujų technologijų pasiekiamas aukštas įrenginių efektyvumas valant orą nuo hidrofilinių ir hidrofobinių organinių junginių. Mažo našumo oro valymo biofiltrų taikymo sritys pateiktos 6.1 paveiksle.



6.1 pav. Mažo našumo oro valymo biofiltrų taikymo sritys

Fig. 6.1. The application areas of low capacity biofilters presented

Sukurti biofiltrai gali būti naudojami įvairiose pramonės šakose (6.1 pav.). Visi įrenginiai gali būti naudojami orui, užterštam iki 500 mg/m^3 lakiųjų organi-

nių junginių (LOJ) koncentracijomis, valyti. Orui valyti nuo didesnių (nuo 500 mg/m³) LOJ koncentracijų rekomenduojama naudoti biofiltrą su adsorbciniu sluoksniu.

Sukurtas biofilto prototipas su aeracine kamera

Biofiltrą, kurio matmenys yra 1,90×0,755×2,20 m, sudaro penkios stačiakampio formos kasetės. Kiekvienos iš jų matmenys – 0,85×0,65×0,15 m, o filtro našumas siekia iki 1000 m³/h.

Siekiant padidinti biofilto valymo efektyvumą būtina jame palaikyti mikroorganizmams daugintis palankias sąlygas: 40–60 % įkrovos drėgnį, 30 °C bioterpės temperatūrą, rūgštingumą (pH = 7). Įkrovos drėgniui palaikyti ir organinių junginių tirpumui skystojoje fazėje pagerinti apatinėje dalyje įrengtas rezervuaras, pripildytas biogeninių elementų prisotinto vandens.



a)



b)



c)

6.2 pav. Biofiltras su aeracine kamera: a) biofilto vaizdas iš šono, b) biofilto valdymo skydas, c) biofiltre įrengtas aerotankas

Fig. 6.2. A biofilter with an aeration chamber: a) biofilter lateral view, b) biofilter control panel, c) biofilter is fitted up with an aerotank

Organinių junginių absorbcijai pagreitinoti lakiaisiais organiniais junginiais užterštas oras nukreipiamas į vandens rezervuarą – aeracinę kamerą. Aeracijos proceso metu vandenyje pradeda daugintis mikroorganizmai, kurie suskaido dalį

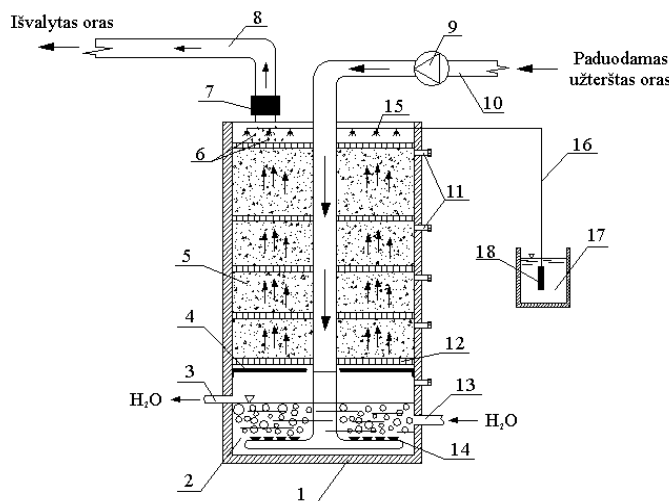
teršalų. Visi angliavandeniliai daugiau ar mažiau tirpūs vandenyje, todėl aeracinė kamera – pirminis angliavandenilių skilimo proceso etapas. Be to, taikant tokią vandens tiekimo modelį įrenginyje užtikrinamas vandens garavimas, kurio metu biofiltre susidaro didelė santykinė drėgmė (iki 100 %), didinanti įkrovos drėgnį. Savaiminio drėkinimo metu sumažinamos įkrovos drėkinimui skiriamos ekonominės sąnaudos.

Biofilto veikimo principas

Ventiliatorius užterštą orą pučia į valymo įrenginį. Mikroorganizmų vystymuisi įkrovoje pagreitinti užteršto oro srauto tiekimo ortakyje sumontuotas kanalinis oro šildytuvas su temperatūros reguliatoriumi, kuris gali palaikyti tiekiamo oro srauto temperatūrą nuo 20 °C iki 35 °C. Temperatūrą fiksuoja biofiltre įrengtas temperatūros jutiklis, kuris sujungtas su oro šildytuvo davikliu. Biofiltre pakilus temperatūrai iki reikiamos ribos, daviklis automatiškai atjungia šildytuvą. Oro srauto greičiui reguliuoti tiekimo ortakyje įrengta sklendė. Siekiant išlaikyti tolygų oro srauto pasiskirstymą per visą įkrovos skerspjuvio plotą apatinėje filtro dalyje įrengtas oro srauto paskirstymo kolektorius. Kolektorius įrengtas biofilto dugne esančiame vandens rezervuare – aeracinėje kameroje, po vandeniu. Taip siekiama sumažinti oro srauto tekėjimo greitį ir palaikyti tolygų oro srauto pasiskirstymą visame įrenginio skerspjuvio plote. Orui pratekėjus per aeracinę kamerą, sumažinama ne tik į įkrovą patenkančių teršalų koncentracija, bet ir iki 100 % padidinamas santykinis oro drėgnis biofiltre. Iš po vandeniu esančio kolektoriaus oro srautas nukreipiamas į viršų įkrovos link. Po ir virš kiekvieno įkrovos sluoksnio įrengti sieteliai, užtikrinantys tolygų oro srauto pasiskirstymą per visą bioterpės sluoksnį. Mikroorganizmų gyvybingumui palaikyti papildomai įkrova drėkinama filtre, virš kiekvienos kasetės, įrengtais purkštukais. Reikiamam įkrovos drėgniui palaikyti vanduo purškiamas ant kiekvieno įkrovos sluoksnio atskirai. Ant įkrovos vanduo siurbliu purškiamas iš filtro apačioje įrengto vandens rezervuaro. Siurblio veikimo režimas reguliuojamas laiko rele. Laiko rele galima nustatyti reikiamą purškimo intervalą ir pauzę. Siekiant suteikti mikroorganizmams didesnę energiją ir geresnę medžiagų apykaitą, įkrovai drėkinti naudojamas vanduo prisotintas biogeninių elementų (druskų). Vandeniui prisotinti biofiltre įrengiama biogeninių elementų tiekimo sistema. Perteklinis vanduo (nutekėjęs nuo įkrovos) grįžta į vandens rezervuarą. Vanduo į įrenginį patenka per vandens tiekimo vamzdį.

Biofiltre numatyta galimybė pašalinti biomasę, susikaupusią vandens rezervuare. Temperatūrai, drėgmei, oro srauto greičiui matuoti per visą skerspjuvio plotą prieš ir po kiekvienos kasetės įrengtos oro mėginių paėmimo angos su užsukamaisiais atvamzdžiais.

Remiantis tyrimų rezultatais gautas Lietuvos patentas „Biofiltras – adsorberis“. Išradimo tikslas – patobulinti valymo įrenginio konstrukciją, pailginti taikomos biologiškai suaktyvintos įkrovos naudojimo laiką.



6.3 pav. Biofiltras – adsorberio schema

Fig. 6.3. Biofilter – adsorber scheme

Aukštas išvalymo laipsnis pasiekiamas tuomet, kai valoma keliomis pakopomis. Biofiltras valymo efektyvumas priklauso ne tik nuo mikroorganizmų skaičiaus, bet ir nuo lakiųjų organinių junginių tirpumo vandenyje.

Siekiant išlaikyti įrenginio valymo efektyvumą, pasikeitus mikroorganizmams vystytis nepalankioms sąlygoms, biofiltre naudojamos kelios įkrovos. Vienos iš jų geriau valys orą esant mažam drėgnumui (20 %), kitos geriau esant aukštesnei drėgmei (60–90 %). Remiantis atliktais eksperimentinių tyrimų rezultatais nustatyta, kad stabiliausias oro valymas esant skirtingam drėgnumui vyksta naudojant įkrovą, sudarytą iš ceolito ir pjuvenų mišinio. Įrenginyje užtikrinus mikroorganizmams egzistuoti reikalingas sąlygas, geriau valoma naudojant aktyvintą pjuvenų įkrovą.

Įvairiomis meteorologinėmis bei technologinėmis sąlygomis, kai atsiranda prastovos, į įrenginį tiekiamas sausas oras, sumažėja įrenginio apkrova ir taršos kiekiai. Geresnėmis valymo savybėmis pasižymi ceolitas, kuris veikia kaip adsorbentas. Todėl geriausias būdas orui valyti – vienu metu naudoti skirtingas įkrovas. Techninį ir ekonominį siūlomo įrenginio efektyvumą lemia paprasta jo

konstrukcija ir nesudėtinga eksploatacija, nes tai garantuoja mažesnes medžiagų ir darbo sąnaudas.

Įrenginio veikimo principas

Ventiliatorius 9 užterštą orą ortakiu 10 pučia į valymo įrenginį. Biofiltre užteršto oro srautas nukreipiamas žemyn vertikalia kryptimi. Taip siekiama sumažinti oro srauto tekėjimo greitį. Tolygiam oro srauto pasiskirstymui visame įrenginio skerspjūvio plote naudojami aeratoriai 14, įrengti vandens rezervuare 2. Siekiant pagerinti teršalų tirpimą vandenyje, užterštas oras iš pradžių prateka vandens sluoksnį, kur vyksta pirminis oro valymo nuo teršalų procesas. Taip bus padidintas oro drėgnis biofiltre 60–80 %. Esant tokiam drėgniui bus sudarytos palankios sąlygos mikroorganizmams vystytis ir daugintis.

Geresniam mikroorganizmų gyvybingumo palaikymui įrengti šildytuvai 4, palaikantys reikiamą 30 °C temperatūrą. Šildytuvai įrengti apatinėje biofiltro dalyje virš vandens rezervuaro 2. Įkrovos aktyvumui pagerinti, ji drėkinama įrengtais purkštukais 15. Į purkštukus biogeniniais elementais prisotintą tirpalą 17 vamzdžiu 16 tiekia vandens siurblys 18. Vanduo į rezervuarą pamažu tiekiamas vandens tiekimo vamzdžiu 13. Perteklinis vandens kiekis iš rezervuaro pašalinamas nuleidimo vamzdžiu 3. Po oro sąlyčio su vandeniu oras teka per sietelius 12, patenka į bioterpę 5, kurioje vyksta antrinis valymo procesas – biologinis oro valymas nuo lakiųjų organinių junginių. Siekiant sumažinti apkrovą apatiniams sieteliui ir pagerinti fizikinius įkrovos parametrus: drėgmės, temperatūros pasiskirstymą, įkrova suskirstoma į 4 kasetes. Iš biofiltro šalinamo oro drėgniui sumažinti ortakyje įrengiamas kondensatorius 7, iš kurio susidarę vandens lašeliai 6 gražinami į įrenginį. Paskui išvalyto oro nuvedimo ortakiu 8 oras šalinamas į aplinkos orą. Temperatūrai, drėgmei, pH matuoti ir oro mėginiams paimti įrengtos mėginių paėmimo angos 11.

Sukurtas biofiltro prototipas su oro paskirstymo kolektoriumi

Geresniam oro pasiskirstymui per visą įrenginio skerspjūvio plotą apatinėje biofiltro dalyje įrengtas perforuotas oro tiekimo kolektorius, užtikrinantis tolygų oro srauto pasiskirstymą per visą įkrovos paviršiaus plotą. Temperatūrų svyravimams sumažinti biofiltro tiekimo ortakyje įrengtas kanalinis oro šildytuvas. Įrenginyje suprojektuota vandens ir kiekvieno įkrovos sluoksnio šildymo sistema. Todėl įrenginį galima įrengti lauke (6.4a pav.).

Įrenginio veikimo principas

Ventiliatorius užterštą orą tiekia į biofiltrą. Tiekimo ortakyje ir pačiame biofiltre po kiekvienu įkrovos sluoksniu sumontuota reikiamos temperatūros (20–35 °C) palaikymo sistema. Tokioje sistemoje bioterpė gali būti šildoma sustabdžius užteršto oro tiekimą į įrenginį. Apatinėje biofiltro dalyje įrengtas oro pa-

skirstymo kolektorius (6.4a pav.). Įdiegus kolektorių užterštas oras pasiskirsto per visą įkrovos paviršiaus plotą. Tokiu būdu išlaikomas tolygus mikroorganizmų pasiskirstymas visame įkrovos sluoksnyje. Temperatūra įrenginyje reguliuojama priklausomai nuo leidžiamo teršalo prigimties ir koncentracijos.

Po ir virš kiekvieno įkrovos sluoksnio įrengti sieteliai, kurie užtikrina tolygų oro srauto pasiskirstymą per visą bioterpės sluoksnį. Mikroorganizmų gyvybinumui palaikyti įkrova drėkinama filtre įrengtais purkštukais (6.4b pav.).



a)



b)



c)

6.4 pav. Biofiltro prototipas: a) biofiltro su oro srauto paskirstymo kolektoriumi vaizdas iš šono, b) drėkinimo sistema, c) oro srauto paskirstymo kolektorius

Fig. 6.4. Biofilter prototype: a) side view of a biofilter with an airflow distribution collector, b) a humidifying system, c) an airflow distribution collector

Reikiamam įkrovos drėgnumui palaikyti vanduo purškiamas ant kiekvieno įkrovos sluoksnio atskirai. Ant įkrovos vanduo siurbliu purškiamas iš filtro apačioje įrengto vandens rezervuaro. Siurblio veikimo režimas reguliuojamas laiko rele. Laiko rele galima nustatyti reikiamą purškimo intervalą. Siekiant suteikti mikroorganizmams didesnę energiją ir geresnę medžiagų apykaitą, įkrovai drė-

kinti naudojamas vanduo, prisotintas biogeninių elementų (druskų). Vandeniui prisotinti biofiltre įrengta biogeninių elementų tiekimo sistema. Perteklinis vanduo (nutekėjęs nuo įkrovos) grįžta į vandens rezervuarą. Vanduo į įrenginį patenka per vandens tiekimo vamzdį.

Sukurtas biofilto prototipas su drėkinimo kamera

6.5 paveiksle pateikta biofilto su drėkinimo kamera schema. Filtre įrengta dviejų pakopų oro valymo sistema. Kiekvienas įkrovos sluoksnis yra drėkinamas atskirai, taip užtikrinama, kad įkrova bus drėkinama geriau. Biofiltre įrengta vandens ir bioterpės pašildymo sistema, užtikrinanti aukštą mikrobiologinį aktyvumą, išjungus ventiliatorių ar sustojus technologiniam procesui.



a)



b)



c)

6.5 pav. Biofiltras su drėkinimo kamera: a) biofilto, turinčio drėkinimo kamerą, vaizdas iš šono, b) biofilto šildymo sistema, c) stalčius su įkrova

Fig. 6.5. A biofilter with a humidification chamber: a) side view of a biofilter with a humidification chamber, b) a biofilter heating system, c) a drawer with a charge

Ventiliatorius oro srauto tiekimo ortakiu užterštą orą tiekia į biologinį oro valymo įrenginį. Iš pradžių oro srautas nukreipiamas į oro sudrėkinimo kamerą. Prieš tai tiekiamas oras pašildomas iki 30 °C ortakyje įrengtu kanaliniu šildytuvu.

Kanalinis oro šildytuvas sujungtas su temperatūros reguliatoriumi, kuris gali palaikyti tiekiamo oro srauto temperatūrą nuo 20 iki 35 °C. Temperatūrą fiksuoja biofiltre įrengtas temperatūros jutiklis, sujungtas su šildytuvo davikliu. Pakilus temperatūrai iki nustatytos ribos daviklis automatiškai atjungia šildytuvą. Organinių junginių skaidymui pagerinti pašildytas oras vandens purkštukais sudrėkinamas drėkinimo kameroje. Drėkinimo kameros apačioje įrengtas vandens rezervuaras, iš kurio vandens siurbliu vanduo tiekiamas į universalius purkštukus. Filtre įrengiami reguliuojamieji vandens purkštukai. Purkštukais galima reguliuoti drėkinimo plotą, lašelių kritimo kampą ir stambumą. Kameroje sudrėkintas oras nukreipiamas į apatinę biofiltro dalį, kurioje įrengtu oro srauto paskirstymo kolektoriumi tolygiai paskirstomas per visą įkrovos skerspjūvio plotą.

Pakeitęs sklaidymo trajektoriją oras nukreipiamas į filtruojančią įkrovą, kurioje kultivuojamos mikroorganizmų kultūros. Siekiant pagerinti teršalų skaidymo procesą įkrova drėkinama vandeniu, kuris iš vandens rezervuaro įrengto filtro apatinėje dalyje išpurškiamas ant filtruojančio sluoksnio per perforuotą PVC vamzdį. Siekiant pagerinti aerodinamines įkrovos savybes filtruojanti terpė yra suskirstyta į atskirus sluoksnius, kurie tarpusavyje atskirti sieteliais. Taip pagerinamas oro pralaidumas ir pasiekiamas mažesnis aerodinaminis pasipriešinimas. Nutekėjęs nuo įkrovos vanduo grįžta į vandens rezervuarą. Siekiant padidinti mikrobiologinį įrenginio aktyvumą, neveikiant ventiliatoriui, filtre šildymo kabeliu pašildomas įkrovai laistyti naudojamas vanduo, o kartu ir bioterpė.

Sukurtas biofiltro prototipas su oro drėkinimo kamera ir kuriame oro srautas nukreiptas iš viršaus į apačią

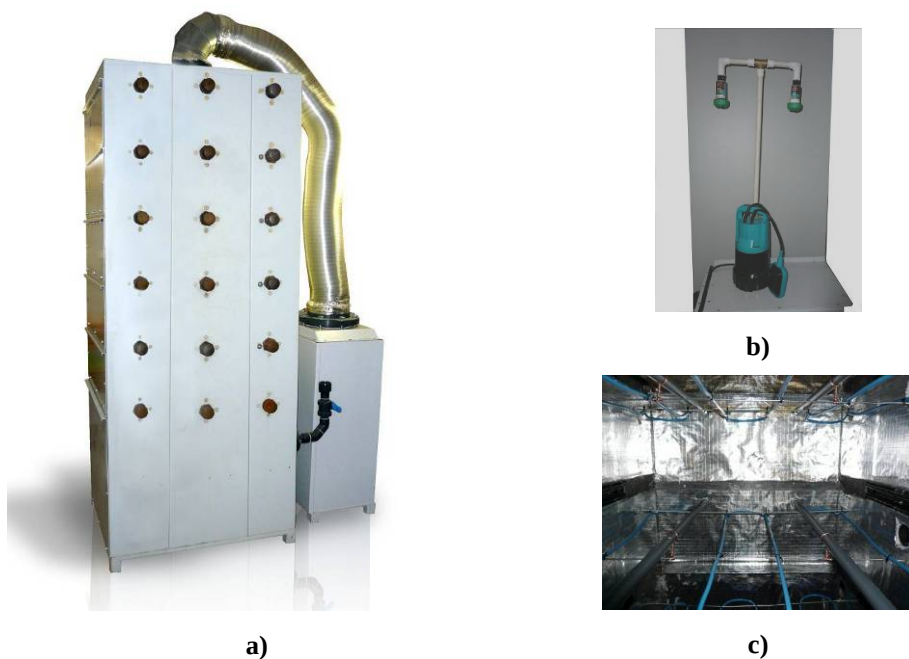
6.6 paveiksle pateiktoje schemoje pavaizduotas biofiltras su drėkinimo kamera. Pažymėtina tai, kad oro srautas biofiltre teka iš viršaus į apačią. Taip sumažinamas drėgmės garavimas įkrovoje. Siekiant padidinti organinių junginių tirpumą vandenyje, įrengta teršalų absorbcinė kamera, kurioje užterštas oras drėkinamas aktyvintais vandens lašeliais. Siekiant pagerinti mikroorganizmų vystymąsi įkrovoje, ji drėkinama vandeniu, prisotintu biogeninių elementų. Įrenginyje įrengta dviejų pakopų valymo sistema (absorbcinis ir biologinis valymas), todėl šiuo įrenginiu gali būti valomos didesnės teršalų koncentracijos. Kadangi oro srautas nukreipiamas iš viršaus į apačią, drėgmė tolygiai pasiskirsto per visą įkrovos sluoksnį.

Įrenginio veikimo principas

Užterštas oras į valymo įrenginį patenka per oro tiekimo ortakį. Mikrobiologiniam įkrovos aktyvumui palaikyti oro srautas pašildomas ortakyje įrengtu kanaliniu šildytuvu. Temperatūrą fiksuoja biofiltre įrengtas temperatūros jutiklis, kuris sujungtas su šildytuvo davikliu. Pakilus temperatūrai iki nustatytos ribos daviklis automatiškai atjungia šildytuvą. Tiekiamo oro srauto greičiui reguliuoti

ortakyje yra įrengta reguliavimo sklendė, kuri gali keisti oro srauto greitį nuo 0,01 iki 0,5 m/s. Lakiųjų organinių junginių skilimui pagreitinti užterštas oras pirmiausia tiekiamas į drėkinimo kamerą, kurioje jis yra sudrėkinamas iki 80–100 %.

Drėkinama viršutinėje kameros dalyje įrengtu purkštuku, per kurį purškiamas vanduo, turintis biogeninių elementų (azoto, fosforo elementų turinčių druskų). Taip pat yra galimybė į vandenį įterpti mikroorganizmų. Iš rezervuaro, įrengto apatinėje kameros dalyje, į purkštuką vanduo tiekiamas siurbliu. Iš kameros oro srautas nukreipiamas į viršutinę biofiltro dalį.



6.6 pav. Biofiltras su oro drėkinimo kamera ir kuriame oro srautas nukreiptas iš viršaus į apačią: a) biofiltro vaizdas iš šono, b) drėkinimo kameros purkštukai, c) bioterpės šildymo sistema

Fig. 6.6. A biofilter with an air humidification changer and changed direction of airflow running: a) biofilter side view, b) humidification chamber sprayers, c) biofilm heatin system

Lakiaisiais organiniais junginiais užterštas oro srautas nukreiptas vertikaliaja kryptimi iš viršaus į apačią ir filtruojasi per filtruojantį sluoksnį, sudarytą iš me-

dienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento granulių ir porolono kubelių. Siekiant užtikrinti geresnį mikroorganizmų vystymąsi šiuos sluoksnius purkštukai drėkina vandeniu.

Vandens rezervuaras įrengtas apatinėje filtro dalyje. Iš jo siurbliu vanduo tiekiamas į perforuotus ortakius, per kuriuos užpurškiamas ant įkrovos. Tekėjęs per filtruojantį sluoksnį, išvalytas oras iš įrenginio šalinamas šalinimo ortakiu. Siekiant išvengti drėkinimo sistemos gedimų, vandens lygiui nukritus iki kritinės ribos siurblys automatiškai išsijungia. Biofiltre įrengta biogeninių elementų įterpimo sistema bei galimybė į filtrą vandenį tiekti tiesiai iš vandentiekio.

Sukurtas biofiltro prototipas su trijų valymo pakopų sistema

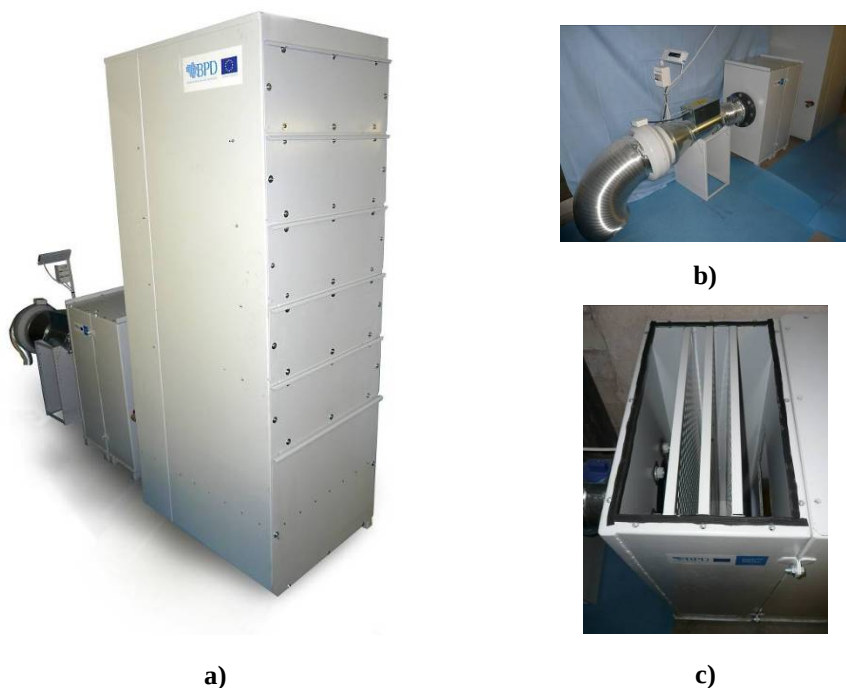
6.7 paveiksle pateikta trijų pakopų valymo sistemą turinčio biofiltro prototipo schema. Įrenginys gali būti naudojamas tose pramonės ūkio šakose, kur išsiskiria nepastovios teršalų koncentracijos. Pirmą kamerą skirtą nepastovioms koncentracijoms išlyginti. Joje įrengta kasetė, pripildyta Zeovit sorbento granulių. Todėl užterštas oras kameroje yra adsorbuojamas ceolito. Po tam tikro laiko teršalai desorbuojasi iš ceolito. Taip išlyginama technologinių procesų metu susidariusi netolygi koncentracija. Be to, sumažinamos didelės teršalų koncentracijos. Pastovi temperatūra įrenginyje gali būti palaikoma išjungus ventiliatorių ar nutrūkus technologiniam procesui.

Įrenginio veikimo principas

Lakiaisiais organiniais junginiais užteršto oro srautas ortakiu tiekiamas į valymo įrenginį. Siekiant pagerinti mikroorganizmų aktyvumą tiekiamas oras yra šildomas kanaliniu oro šildytuvu 20 iki 35 °C įrenginyje. Temperatūrą fiksuoja biofiltre įrengtas temperatūros jutiklis, kuris sujungtas su šildytuvo davikliu. Temperatūrai pakilus iki nustatytos ribos daviklis automatiškai atjungia šildytuvą. Pirmiausia oras tiekiamas į pirminio valymo kamerą su teršalų adsorbcijai skirtu ceolito sluoksniu.

Apvalytas oras iš pirminės valymo kameros tiekiamas į antros pakopos valymo kamerą, kur yra sudrėkinamas siekiant padidinti organinių junginių tirpumą. Oras drėkinamas viršutinėje kameros dalyje įrengtu universaliu vandens purkštuku. Vanduo į purkštukus tiekiamas cirkuliaciniu vandens siurbliu. Mikrobiologiniam bioterpės aktyvumui pagerinti, ji yra šildoma apatinėje biofiltro dalyje įrengtu šildymo kabeliu. Šildymo kabelis vienu metu šildo vandenį ir orą. Iš sudrėkinimo kameros apvalytas oras ortakiu patenka į biofiltrą.

Tolygaus oro srauto tiekimo kolektoriais srautas nukreipiamas vertikaliąja kryptimi į viršų, kur filtruojasi per įkrovos sluoksnius. Įkrova drėkinama naudojant virš jos įrengtus perforuotus vamzdelius, į kuriuos vanduo tiekiamas vandens siurbliu. Apatinėje biofiltro dalyje įrengtas vandens rezervuaras įkrovai drėkinti.



6.7 pav. Biofiltras su trimis oro valymo etapais: a) biofiltras su trijų valymo pakopų sistema vaizdas iš šono, b) biofiltras valdymo pultas su teršalų adsorbcijos ir oro drėkinimo kameromis, c) pirminei teršalų adsorbcijai skirta kamera

Fig. 6.7. A biofilter with three air treatment stages: a) side view of a biofilter with a three level treatment system, b) biofilter control panel with pollutant adsorption and air humidification chambers, c) a chamber intended for initial pollutant adsorption

Sukurti biologinio oro valymo įrenginiai pasižymi aukštu išvalymo efektyvumu (iki 98 %), yra pigūs ir ekologiški.

Įrenginiai gali būti taikomi įvairiose pramonės šakose, kuriose į aplinkos orą išskiriamos lakiųjų organinių junginių koncentracijos. Biofiltrai gali būti pritaikyti dažymo, baldų gamybos, maisto ruošimo, chemijos, naftos perdirbimo procesų metu išsiskiriančių teršalų, tokių kaip acetonas, butanolis, toluenas, butilacetatas, ksilenas, etanolis, metanolis ir kitiems organiniams junginiams sorbuoti ir skaidyti. Taip pat suprojektuoti ir pagaminti valymo įrenginiai gali būti naudojami ne tik angliavandeniliams mažinti, bet ir žemės ūkyje, nuotekų valyklose susidarantiems nemaloniems kvapams šalinti.

Įrenginiai užkrauti skirtingų rūšių įkrovomis, sudarytomis iš medienos skiedrų, ceolito granulių ir porolono kubelių. Parinkus optimalų šių įkrovų sumaišymo santykį, pagreitinamas teršalų sorbcijos ir destrukcijos procesas. Įkrovos, kaip filtruojančios terpės, esmė – sudaryti didelį paviršiaus plotą teršalų adsorbcijai ir absorbcijai. Įkrova taip pat naudojama kaip energijos šaltinis mikroorganizmų populiacijai. Iš medienos skiedrų mikroorganizmai gauna anglies, ceolitas pasižymi molekulinį sietų savybėmis, didele sorbcijos, esant mažiems slėgiams, galia, o porolono kubeliai – dideliu paviršiaus plotu ir drėgmės sulaikymo geba. Todėl porolono kubeliai gali būti naudojami teršalų absorbcijai pagerinti, o ceolitas – kaip adsorbentas. Į ceolito granulių poras patekusios mikroorganizmų kultūros sėkmingai gali jį regeneruoti. Kompleksiškai pritaikius adsorbcinį ir biologinį oro valymo metodus bus pasiektas aukštas įrenginio valymo efektyvumas.

6.2. Patobulinta įkrovos drėgnio biofiltre tyrimo metodika

Detalei biofiltrų įkrovų sorbcijos analizei atlikti patobulinta drėgnio tyrimo metodika. Autoriaus pasiūlyta metodika apima drėgnio priklausomybių nuo biofiltre palaikomos temperatūros, tiekiamo oro srauto greičio tyrimus. Skirtingos kilmės įkrovų mėginiai imami skirtingose įkrovos vietose, tinklelio principu ir skirtinguose sluoksnio gyliuose. Bandiniai, prieš dedant į džiovinio spintą, susmulkinami (6.8a pav.). Ceolito granulės susmulkinamos grūstuvėliu, o porolono kubeliai sukarpomi žirkklėmis.



a)



b)

6.8 pav. Bandinių drėgnio nustatymas: a) bandiniai, paruošti džiovinti, b) bandiniai džiovinimo spintoje

Fig. 6.8. Determining samples humidity: a) samples prepared for drying, b) samples in a drying chamber

Kai įkrovą sudaro kelios medžiagos, imama po 1 g kiekvienos medžiagos ir dedama į tą patį biuską.

Susmulkinus įkrovą, jos bandiniai dedami į džiovinimo spintą ir džiovinami 105 °C temperatūroje 3 valandas. Ištraukti bandiniai pasveriami ir apskaičiuojamas drėgnis.

Baigiantis džiovinimo laikui biuskas uždengiamas ir 45 minutėms dedamas į eksikatorių atvėsti. Atvėsintas biuskas su visu jo turiniu ir dangteliu pasveriamas. Nustatant bandinių drėgmę, laboratorijos oro santykinė drėgmė turi siekti 60 %. Oro srauto greitis ir temperatūra biofiltre matuojami anemometru „Testo 452“. Įkrovos mėginių ir oro srauto greičių bei temperatūros matavimo vietų detalesnis aprašas pateiktas 2 skyriuje.

6.3. Šeštojo skyriaus išvados

1. Biologiniam oro valymui nuo lakiųjų organinių junginių sukurti penki skirtingų konstrukcijų biofiltrai, kurių kiekvieno našumas siekia iki 1000 m³/h. Sukurti įrenginiai yra aukšto oro išvalymo efektyvumo (iki 98 %), pigūs ir ekologiški.
2. Biofiltrai tarpusavyje skiriasi oro srauto ir įkrovos drėkinimo, bioterpės temperatūros ir užteršto oro tiekimo sistemomis. Geriausiai, iki 98 %, teršalai biodegrazuojami įrenginyje su drėkinimo kamera.
3. Aukštesnių – nuo 500 mg/m³ – lakiųjų organinių junginių koncentracijų mažinimui efektyviau veikia biofiltras su teršalus adsorbuojančiu ceolito granulinių sluoksniu. Kai pradinė teršalų koncentracija yra 712±10 mg/m³ įrenginio valymo efektyvumas siekia iki 95,0 %.
4. Priklausomai nuo biofiltro konstrukcijos, įrenginiai gali būti pritaikyti įvairiose pramonės įmonėse, kur į aplinkos orą išmetamos hidrofilinių ir hidrofobinių organinių junginių emisijos.
5. Detalesnei biofiltrų įkrovų sorbcijos analizei atlikti patobulinta drėgnio tyrimo metodika, leidžianti išsamiai įvertinti įkrovos drėgnio priklausomybes nuo biofiltre palaikomos temperatūros, tiekiamo oro srauto greičio bei laiko.

Bendrosios išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad oro valymui naudojant sintetines įkrovas padidėja biofiltrų eksploatacinės išlaidos, o organinės kilmės įkrovų naudojimo laikas siekia tik iki 3 metų. Todėl remiantis pasauline biologinio oro valymo patirtimi yra galimybė sukurti ekonomiškus geresnės konstrukcijos mažo našumo biofiltrus.
2. Atlikus įkrovų drėgnio tyrimus nustatyta, kad skirtingu greičiu į įrenginį tiekiant orą, įkrovos, sudarytos iš ZeoVit sorbento, medienos skiedrų ir žievių mišinio, drėgnis kinta nuo 38 iki 44 %. Šią įkrovą sumaišius su porolono kubeliais ir ją sudrėkinus, drėgnis padidėja iki 56 %. Esant tokiam įkrovos drėgniui pasiekiamas didžiausias – 98 % – biofiltro valymo efektyvumas.
3. Atlikus įkrovų aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus nustatyta, kad įkrovos, sudarytos iš medienos skiedrų, žievių, ceolito granulių ir porolono mišinio, aerodinaminis pasipriešinimas, esant 0,3 m/s leidžiamo oro srauto greičiui, siekia iki 1226 Pa. Norint sumažinti įkrovos pasipriešinimą, būtina mažinti į įrenginį tiekiamo oro srauto greitį iki 0,1 m/s.

4. Atlikus kiekybinius mikrobiologinius tyrimus nustatyta, kad organinių junginių destrukcijos procese dominavo bakterijos. Daugiausia bakterijų rasta biofiltre palaikant 30 °C temperatūrą. Skaidant acetoną porolone rasta $13,0 \times 10^5$ ksv/g, o ceolite – $0,71 \times 10^5$ ksv/g bakterijų. Esant tokiam mikrobiologiniam įkrovos aktyvumui per 150 mm sluoksnio storio įkrovą leidžiamų acetono garų koncentracija sumažėja labiausiai – iki 84 mg/m³.
5. Lakiesiems organiniams junginiams skaidyti sukurti penki 1000 m³/h našumo skirtingų konstrukcijų biofiltrai, kurių oro valymo efektyvumas siekia iki 98 %. Nustatytas didelis – 97 % – biofiltro su aeracine kamera oro valymo efektyvumas. Atsižvelgus į 1,2 karto didesnius šio įrenginio korpuso matmenis, 2 % padidėjusį filtro efektyvumą lėmė mažesnis – 0,2 m/s – per įrenginį leidžiamo oro srauto greitis.
6. Atlikus skirtingos konstrukcijos biofiltrų oro valymo efektyvumo tyrimus nustatyta, kad padidinus į biofiltrą leidžiamų acetono garų koncentraciją nuo 305 iki 712 mg/m³, biofiltro valymo efektyvumas kito nuo 98 iki 81 %. Kadangi mikroorganizmai nespėja oksiduoti organinių junginių, todėl filtras geriau išvalo orą nuo teršalų, kurių koncentracija mažesnė. Biofiltre įrengta drėkinimo kamera 3 % pagerina teršalų absorbciją, o kartu ir biodegradaciją.
7. Atlikus biofiltrų oro valymo efektyvumo eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad didėjant teršalų filtracijos laikui, biofiltrų oro valymo efektyvumas taip pat padidėja. Pastebimai efektyvumas gerėja padidinus teršalo filtracijos laiką iki 7,0 s, tuomet biofiltro valymo efektyvumas padidėja nuo 80 iki 96 %. Siekiant išlaikyti aukštą įrenginio oro valymo efektyvumą, būtina mažinti per biofiltrą tekančio oro srauto greitį iki 0,1 m/s.
8. Modeliuojant nustatytas skirtingos kilmės įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas siekia 1105 Pa. Eksperimentinio ir modeliavimo metu gauto tyrimo paklaida siekia 9,9 %. Biofiltracinių procesų modeliavimo metu gauti rezultatai nuo eksperimentinių tyrimų skyrėsi nedaug, paklaida kito iki 2,25 %. Todėl galima daryti prielaidą, kad matematinio modeliavimo ir tyrimų metu gauti rezultatai yra patikimi.

Rekomendacijos

1. Lakiaisiais organiniais junginiais užteršto oro valymui įvairiose pramonės šakose rekomenduojama naudoti sukurtus skirtingos konstrukcijos mažo našumo biofiltrus, užpildytus medienos skiedrų, žievių, ZeoVit sorbento ir polono mišiniu. Naudojant šiuos įrenginius, kurių našumas yra iki 1000 m³/h, pasiekiamas aukštas – iki 90–98 % valymo efektyvumas.
2. Sukurtą oro valymo biofiltrą su aeracine kamera rekomenduojama naudoti vandenyje labiau tirpiems, hidrofiliniams organiniams junginiams, tokiems kaip acetonas, skaidyti (gautas Lietuvos patentas Nr. LT 5528).
3. Pramonės įmonėse išsiskiriančių teršalų nepastovioms koncentracijoms mažinti rekomenduojama vienu metu naudoti organinės ir neorganinės kilmės įkrovas. Aukštas iki 98 % biofiltro valymo efektyvumas pasiekiamas derinant biologinį ir adsorbcinį oro valymo metodus.
4. Pramonės ūkio šakose technologinių procesų metu išsiskiriančioms didesnėms, nuo 500 mg/m³, teršalų koncentracijoms mažinti rekomenduojama naudoti biofiltrą su adsorbciniu ceolito sluoksniu ir adsorbcine kamera.

Literatūros sąrašas

Air pollutant/air emissions. 2009. [Žiūrėta 2009 m. vasario 16 d.]. Prieiga per internetą: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>>.

Aizpuru, A.; Malhautier, L.; Roux J. C.; Fanlo, J. L. 2003. Biofiltration of a mixture of volatile organic compounds on granular activated carbon, *Biotechnology and Bioengineering* 83(4): 479–488.

Alonso, C.; Suidan, M. T.; Byung, R.; Kim, B. R.; Kim, B. J. 1998. Dynamic mathematical model for the biodegradation of vocs in a biofilter: biomass accumulation study, *Environmental Science & Technology* 32(20): 3118–3123.

Amanullah, M.; Farooq, S.; Viswanathan, S. 1999. Modeling and simulation of a biofilter, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 38, 2765–2774.

Amanullah, M.; Viswanathan, S.; Farooq, S. 2000. Equilibrium, kinetics, and column dynamics of methyl ethyl ketone biodegradation, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 39: 3387–3396.

Angerer, T. 1999. Abluftreinigung bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA), in *medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt*, 118 s.

Aplinkos būklė 2004. 2005. LR Aplinkos ministerija. Vilnius. 78 p.

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.

Arriaga, S.; Munoz, R.; Hernandez, S.; Guieysse, B.; Revah, S. 2006. Gaseous hexane biodegradation by *fusarium solani* in two liquid phase packed-bed and stirred-tank bioreactors, *Environmental Science & Technology* 40(7): 2390–2395.

Baltrėnas, P.; Paliulis, D. 2002. *Adsorbciniai oro valymo filtrai* [Adsorptional air cleaning filters]. Vilnius: Technika. 219 p.

Baltrėnas, P.; Paliulis D.; Šimaitis R. 2001. Pernešimo procesų adsorbciniame filtre skaitinis modeliavimas, *Aplinkos inžinerija* 9(2): 77–84.

Baltrėnas, P.; Vaiškūnaitė, R. 2003. Mikrobiological investigation of activated pine bark charge for biofilters, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 11(1): 3–9.

Baltrėnas, P.; Zigmontienė, A.; Vaiškūnaitė, R. 2004. *Oro valymo biotechnologijos* [Biotechnology of air purification]. Vilnius: Technika. 205 p.

Biofilter for odour control. [Žiūrėta 2006 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.likusta.de/en-biofilter.html>>.

Biofilters medium. [Žiūrėta 2005 m. lapkričio 18 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.tholander.com>>.

Bridžiuvienė, D.; Levinskaitė, L.; Lugauskas, A.; Paškevičius, A.; Pečiulytė, D.; Repečkienė, J.; Salina, O.; Varnaitė, R. 1997. *Mikrobiologiniai medžiagų pažeidimai* [Microbiological lesion of materials]. Vilnius: UAB „Valstiečių laikraštis“. 469 p.

Cai, Z.; Kim, D.; Sorial, G. A. 2006. Performance of trickle-bed air biofilter: a comparative study of a hydrophilic and a hydrophobic VOC, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 6: 57–69.

Canet, X.; Gilles, F.; Su, B. L.; Weireld, G.; Frre, M.; Mougin, P. 2007. Adsorption of alkanes and aromatic compounds on various faujasites in the henry domain. 2. composition effect in X and Y zeolites, *Journal of Chemical & Engineering* 52: 2127–2137.

Chan, A. A. 2006. *Biofiltration of Odorous Gas Emissions*. Department of Civil and Environmental Engineering. 54 p.

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.

Chan, W. C.; Peng, K. H. 2008. Biodegradation of methyl ethyl ketone and methyl isopropyl ketone in a composite bead biofilter, *Engineering in Life Sciences* 8(2): 167–174.

Chang, K.; Lu, Ch. 2003. Biofiltration of isopropyl alcohol by a trickle-bed air biofilter, *Biodegradation* 14(1): 9–18.

Chen, J. P.; Mou, H.; Wang, L. K.; Matsuura, T. 2004. Membrane Filtration, *Environmental Engineering, Volume 4: Advanced Physicochemical Treatment Processes*, Chapter 7, 203–259.

Cheng, H.; Reinhard, M. 2006. Sorption of trichloroethylene in hydrophobic micropores of dealuminated Y zeolites and natural minerals, *Environmental Science & Technology* 40: 7694–7701.

- Chitwood, D. E.; Devinny, J. S. 2001. Treatment of mixed hydrogen sulfide and organic vapors in a rock medium biofilter, *Water Environment Research* 73(4): 426–435.
- Converti, A.; Del Borghi, M.; Zilli, M. 1997. Evaluation of phenol diffusivity through *Pseudomonas putida* biofilms: application to the study of mass velocity distribution in a biofilter, *Bioprocess Engineering* 16: 105–114.
- Cox, H. H. J. Deshusses, M. A. 2002. Effect of starvation on the performance and re-acclimation of biotrickling filters for air pollution control, *Environmental Science & Technology* 36(14): 3069–3073.
- Cox, H. H. J. Sexton, T.; Shareefdeen, Z. M.; Deshusses, M. A. 2001. Thermophilic biotrickling filtration of ethanol vapors, *Environmental Science & Technology* 35(12): 2612–2619.
- Darlington, A. B.; Dat, J. F.; Dixon, M. A. 2001. The biofiltration of indoor air: air flux and temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene and xylene, *Environmental Science & Technology* 35: 240–246.
- Delhomenie, M. C.; Bibeau, L.; Bredin, N.; Roy, S.; Broussau, S.; Brzezinski, R.; Kugelma, J. L.; Heitz, M. 2002. Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost-based bed, *Advances in Environmental Research* 6: 239–254.
- Delhomenie, M. C.; Bibeau, L.; Gendron, J.; Brzezinski, R.; Heitz, M. 2001. Toluene removal by biofiltration: influence of the nitrogen concentration on operational parameters, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40(23): 5405–5414.
- Deshusses, M. A.; Cox, H. H. J. 1999. Biotrickling filters for air pollution control, *Environmental Progress*: 180–196.
- Deshusses, M. A.; Johnson, C. T. 1999. Biofiltration of high loads of ethyl acetate in the presence of toluene, *Journal of the Air & Waste Management Association* 49: 973–979.
- Deshusses, M. A.; Johnson, C. T. 2000. Development and validation of a simple protocol to rapidly determine the performance of biofilters for VOC treatment, *Environmental Science & Technology* 34(3): 461–467.
- Devinny, J. S.; Deshusses, M. A.; Webster, T. S. 1999. *Biofiltration for air pollution control*. CRC Press, Boca Raton, 299.
- Dhamwichukorn, S.; Kleinheinz, G. T.; Bagely, S. T. 2001. Thermophilic biofiltration of methanol and α -pinene, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 26: 127–133.
- Elmrini, H.; Bredin, N.; Shareefdeen, Z. and Heitz, M. 2004. Biofiltration of xylene emissions: bioreactor response to variations in the pollutant inlet concentration and gas flow rate, *Chemical Engineering Journal* 100: 149–158.
- Engesser, K. H.; Plaggemeier, T. 2000. Microbiological aspects of biological waste gas purification, in *Biotechnology, 2nd edition, Volume 11c, Environmental Processes III, Solid waste and waste gas treatment, preparation of drinking water*, Wiley-VCH, Weinheim, 275–302.

Estimated National Emissions of Volatile Organic Compounds. 2006. [Žiūrėta 2009 m. vasario 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.bts.gov/publications/national_transportation_statistics/2006/html/table_04_42.html>.

Goncalves, J. J.; Govind, R. 2009. Enhanced biofiltration using cell attachment promoters, *Environmental Science & Technology* 43(4): 1049–1054.

Günther, T. 2005. *Funktionalitätsprüfung von Biofiltermaterialien zum Abbau von Schwefelwasserstoff und VOC*. Kurzbericht, REHAU AG + Co. 9 s.

Hartikainen, T.; Martikainen, P. J.; Olkkonen, M.; Ruuskanen, J. 2002. Peat biofilters in long-term experiments for removing odorous sulphur compounds, *Water, Air, and Soil Pollution* 133: 335–348.

Hashisho, Z.; Emamipour, H.; Cevallos, D.; Rood, M. J.; Hay, K. J.; Kim, B. J. 2007. Rapid response concentration-controlled desorption of activated carbon to dampen concentration fluctuations, *Environmental Science & Technology* 41(5): 1753–1758.

Hodge, D. S.; Devinny, J. S. 1995. Modeling removal of air contaminants by biofiltration, *Journal of Environmental Engineering* 121 (1): 21–32.

Hodge, D. S.; Devinny, J. S. 1997. Determination of biofilter model constants using mini-columns, *Journal of Environmental Engineering* 123 (6): 577–585.

Hornos, J. A.; Gabaldon, C.; Soria, V. M.; Marzal, P.; Penya-roja, J. M.; Izquierdo, M. 2007. Long-term performance of peat biofilters treating ethyl acetate, toluene, and its mixture in air, *Biotechnology and Bioengineering* 96(4): 651–660.

Iliuta, I.; Iliuta, M. C.; Larachi, F. 2005. Hydrodynamics modeling of bioclogging in waste gas treating trickle-bed bioreactors, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 44(14): 5044–5052.

Jang, J. H.; Hirai, M.; Shoda, M. 2004. Styrene degradation by *Pseudomonas* sp. SR-5 in biofilters with organic and inorganic packing materials, *Applied Microbiology and Biotechnology* 65(3): 349–355.

Jankevičius, K.; Liužinas, R. 2003. *Aplinkos biologinis valymas* [Biological Cleaning of Environmental]. Vilnius: Apyaušris. 342 p.

Jantschak, A.; Daniels, M.; Paschold, R. 2004. Biofilter technology: an innovative and cost-effective system to remove VOC, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 17(3): 255–260.

Jin, Y.; Guo, L.; Veiga, M. C.; Kennes, Ch. 2007. Fungal biofiltration of α -pinene: effects of temperature, relative humidity, and transient loads, *Biotechnology and Bioengineering* 96(3): 433–443.

Jeong, G. T.; Lee, G. Y.; Cha, J. M.; Park, D. H. 2008. Comparison of packing materials in biofilter system for the biological removal of hydrogen sulfide: Polypropylene fibrils and volcanic stone, *Korean Journal of Chemical Engineering* 25(1): 118–123.

Kan, E.; Deshusses, M. A. 2003. Development of foamed emulsion bioreactor for air pollution control, *Biotechnology and Bioengineering* 84(2): 240–244.

- Kennes, Ch.; Thalasso, F. 1998. Waste gas biotreatment technology, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 72: 303–319.
- Kiared, K.; Fundenberger, B.; Brzezinski, R.; Viel, G.; Heitz, M. 1997. Biofiltration of air polluted with toluene under steady-state conditions: experimental observations, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 36(11): 4719–4725.
- Kong, Z.; Farhana, L.; Fulthorpe, R. R.; Allen, D. G. 2001. Treatment of volatile organic compounds in a biotrickling filter under thermophilic conditions, *Environmental Science and Technology* 35(21): 4347–4352.
- Laškova, T.; Zabukas, V.; Vaitiekūnas, P. 2007. Meteorologinių sąlygų įtaka lakiųjų organinių junginių sklaidai pažemės atmosferos sluoksnyje, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 15(3): 135–143.
- Leethochawalit, M.; Bustard, M. T.; Wright, P. C. 2001. Novel vapor-phase biofiltration and catalytic combustion of volatile organic compounds, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40(23): 5334–5341.
- Leson, G.; Winer, A. M. 1991. Biofiltration: An innovative air pollution control technology for VOC emissions, *Journal of the Air & Waste Management Association* 41: 1045–1054.
- Li, H.; Mihelcic, J. R.; Crittenden, J. C.; Anderson, K. A. 2003. Field measurements and modeling of two-stage biofilter that treats odorous sulfur air emissions, *Journal of Environmental Engineering* 129 (8): 684–692.
- Li, C.; Moe, W. M. 2005. Activated carbon load equalization of discontinuously generated acetone and toluene mixtures treated by biofiltration, *Environmental Science & Technology* 39(7): 2349–2356.
- Lim, K. H., Park, S. W. Lee, E. J. 2005. Effect of temperature on the performance of a biofilter inoculated with *pseudomonas putida* to treat waste-air containing ethanol, *Korean Journal of Chemical Engineering* 22(6): 922–926.
- Liu, B. Q.; Babajide, A. E.; Zhu, P.; Zou, L. 2006. Removal of xylene from waste gases using biotrickling filters, *Chemical Engineering & Technology* 29(3): 320–325.
- Liu, Q.; Liu, X.; Arowolo, E. B.; 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 (English Edition)* 11(5): 514–520.
- Lu, C.; Chang, K.; Hsu, S. 2004. A model for treating toluene and acetone mixtures by a trickle-bed air biofilter, *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 20: 185–192.
- Lu, C.; Lin, M.; Chu, W. 2000. Removal of BTEX vapor from waste gases by a trickle-bed biofilter, *Journal of the Air and Waste Management Association* 50: 411–417.
- Lu, C.; Lin, M.R.; Wey, I. 2002. Removal of acetone and methylacetate mixtures from waste gases by a trickle-bed air biofilter, *Environmental Technology* 23: 243–252.
- MacNevin, D.; Barford, J. 2001. Inter-relationship between adsorption and pH in peat biofilters in the context of a cation-exchange mechanism, *Water Research* 35: 736–744.
- Malhautier, L.; Khammar, N.; Bayle, S.; Fanlo, J. L. 2005. Biofiltration of volatile organic compounds, *Applied Microbiology and Biotechnology* 68(1): 16–22.

Micrococcus mucilaginosus. [Žiūrėta 2006 m. spalio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Micrococcus_mucilaginosus_01.png>.

Miller, M. J.; Allen, D. G. 2004. Transport of hydrophobic pollutants through biofilms in biofilters, *Chemical Engineering Science* 59: 3515–3525.

Miller, M. J.; Allen, D. G. 2005. Biodegradation of α -pinene in model biofilms in biofilters, *Environmental Science & Technology* 39(15): 5856–5863.

Mohammad, B. T.; Veiga, M. C.; Kennes, Ch. 2007. Mesophilic and thermophilic biotreatment of BTEX-polluted air in reactors, *Biotechnology and Bioengineering* 97(6): 1423–1438.

Mohseni, M.; Allen, D. G. 2000. Biofiltration of mixtures of hydrophilic and hydrophobic volatile organic compounds, *Chemical Engineering Science* 55: 1545–1558.

Mokslinio tyrimo rezultatai. 2007. [Žiūrėta 2007 m. vasario 19 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.siauliukolegija.lt/UserFiles/File/MTV/MOKOM/1%20Mokslinio%20tyrimo%20rezultatai.pdf>>. 34 p.

Neves, L. C.; Miyamura, T. T.; Moraes, D. A.; Penna, T. C.; Converti, A. 2006. Biofiltration methods for the removal of phenolic residues, *Applied Biochemistry and Biotechnology* 129(1): 130–152.

Nielsen, D. R.; Daugulis, A. J.; McLellan, P. J. 2005. Transient performance of a two-phase partitioning bioscrubber treating a benzene-contaminated gas stream, *Environmental Science & Technology* 39(22): 8971–8977.

Oh, Y. S.; Choi, S. C. 2000. Selection of suitable packing material for biofiltration of toluene, m- and p-xylene vapors, *Journal of Microbiology* 38: 31–35.

Oro antropogeninė tarša iš stacionarių taršos šaltinių. 2008. Aplinkos apsaugos agentūros duomenys. [Žiūrėta 2009 m. vasario 16 d.]. Prieiga per internetą: <<http://aaa.am.lt/VI/index.php#r/1345>>.

Ottengraf, S.P.P.; Konings, J.H.G. 1991. Emission of microorganisms from biofilters, *Bioprocess Engineering* 7: 89–96.

Park, S. J. 2004. State of the art of the deodorizing technology in Korea. *East Asia Workshop on Odor Measurement and Control Review*, p. 59–66.

Piyaprasit, Ch. 2005. *Entwicklung eines Systems zum mechanischen Biomasseaustag bei Biorieselbettreaktoren*. Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung, Universität Stuttgart Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, 152 s.

Porolono techniniai duomenys. 2006. [Žiūrėta 2006 m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.vitabaltic.lt/lt/Techniniai_duomenys>.

Pseudomonas aeruginosa. 2006. [Žiūrėta spalio 11 d.]. Prieiga per internetą: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/85/Pseudomonas_aeruginosa_01.jpg.

- Pushnov, A. S.; Berengarten, M. G.; Lagutkin, M. G.; Sokolov, A. S.; Shustikov, A. I. 2008. Effect of channel geometry in regular ceramic packings on the hydrodynamics of heat and mass exchange, *Chemical and Petroleum Engineering* 44(5–6): 307–311.
- Pushnov, A. S.; Berengarten, M. G.; Ryabushenko, A. S. 2008. Improving Aerodynamics of Graduating Cooling Units, *Russian Journal of Applied Chemistry* 81(3): 542–557.
- Reza, I.; Cox, H. J.; Deshusses, M. A.; Schroeder, E. D. 2005. Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal, *Environmental Progress* 24(3): 254–267.
- Rhodococcus* sp. [Žiūrėta 2006 m. spalio 11 d.]. Prieiga per internetą: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Rhodococcus.jpg>>.
- Ruokojarvi, A.; Ruuskanen, J.; Martikainen, P. J.; Olkkonen, M. 2001. Oxidation of gas mixtures containing dimethyl sulfide, hydrogen sulfide, and methanethiol using two-stage biotrickling filter, *Journal of the Air and Waste Management Association* (51): 11–16.
- Schwarz, B. C. E.; Devinny, J. S.; Tsotsis, T. T. 2001. A biofilter network model – importance of the pore structure and other large-scale heterogeneities, *Chemical Engineering Science* 56: 475–483.
- Sercu, B.; Núñez, D.; Van Langenhove, H.; Aroca, G.; Verstraete, W. 2005. Operational and microbiological aspects of a bioaugmented two-stage biotrickling filter removing hydrogen sulfide and dimethyl sulphide, *Biotechnology and Bioengineering* 90(2): 259–269.
- Sercu, B.; Peixoto, J.; Demeestere, K.; Elst, T.; Langenhof, H. 2006. Odors Treatment: Biological Technologies, in *Odors in the Food Industry*, Chapter 8, Springer US, 125–158.
- Shareefdeen, Z.; Herner, B.; Webb, D.; Wilson, S. 2003. Biofiltration eliminates nuisance chemical odors from industrial air streams, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 30: 168–174.
- Sheridan, B. A.; Curran, T. P.; Dodd, V. A. 2002. Assessment of the influence of media particle size on the biofiltration of odorous exhaust ventilation air from a piggery facility, *Bioresource Technology* 84: 129–143.
- Shim, E. H.; Kim, J.; Cho, K. S. Wook Ryu, H. W. 2006. Biofiltration and inhibitory interactions of gaseous benzene, toluene, xylene, and methyl *tert*-butyl ether, *Environmental Science & Technology* 40(9): 3089–3094.
- Studer, M.; Rudof von Rohr, P. 2008. Novel membrane bioreactor: able to cope with fluctuating loads, poorly water soluble VOCs, and biomass accumulation, *Biotechnology and Bioengineering* 99(1): 38–48.
- Syron, E.; Casey, E. 2008. Membrane-aerated biofilms for high rate biotreatment: performance appraisal, engineering principles, scale-up, and development requirements, *Environmental Science & Technology* 42 (6): 1833–1844.
- Taylor, K.; Smith, G.; Ross, S.; Smith, M. 1999. The prediction of pressure drop and distribution in packed bed filters, in *Proceedings of Second International Conference on*

CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO held in 6–8 December 1999 in Australia, 273–280.

Tekorienė, R.; Lugauskas, A. 2001. *Pseudomonas (Migula) genties bakterijų štamų išskyrimas iš dirvos, vandens, medienos bei maisto produktų ir jų lyginamoji charakteristika*, *Ekologija* 3: 14–18.

Teršalų išmetimas į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių. 2009. Lietuvos Respublikos Statistikos departamento duomenys. [Žiūrėta 2009 m. vasario 16 d.]. Prieiga per internetą: <<http://db1.stat.gov.lt/statbank/default.asp?w=1280>>.

Tymczyna, L.; Chmielowiec-Korzeniowska, A.; Saba, L. 2004. Biological treatment of laying house air with open biofilter use, *Polish Journal of Environmental Studies* 13(4): 425–428.

Using bioreactors to control air pollution. 2003. United States Environmental Protection Agency. North Carolina, 28.

Vaiškūnaitė, R. 2004. *Biofiltro su suaktyvinta pušų žievių įkrova tyrimai ir taikymas orui valyti* [Research and application of the biofilter with activated pine bark charge for air purification]. Vilnius: Technika. 181 p.

Vaiškūnaitė, R.. 2008. Mathematical modelling of biofilter's temperature regimes, in *Proceedings of the 7th International Conference Environmental Engineering*. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Technika, 433–441.

Vaitiekūnas, P. 2007. *Šilumos mainų matematinis modelilavimas*. Vilnius: Technika. 290 p.

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

Van Liere, H. C.; Van Groenestijn, J. W. 2003. Thermophilic biofiltration (THERBO [trademark]): Biological cleaning of hot and fatty waste gases. *VDI Berichte* 1777: 275–279.

Wani, A. H.; Branion, R. M. R.; Lau, A. K. 1998. Degradation kinetics of biofilter media treating reduced sulfur odors and VOCs, *Journal of the Air and Waste Management Association* 48: 1183–1190.

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

Xiaobing, L.; Farooq, S.; Viswanathan, S. 2003. Evaluation of a novel reactor–biofilter system, *Industrial & Engineering Chemistry* 42(4): 752–763.

Yamamoto, T.; Okubo, M.; Hung, Y. T.; Zhang, R. 2005. Odor pollution control, *Advanced Air and Noise Pollution Control* 2: 273–334.

Zein, M. M.; Suidan, M. T.; Venosa, A. D. 2004. MtBE biodegradation in a gravity flow, high-biomass retaining bioreactor, *Environmental Science & Technology* 38(12): 3449–3456.

ZeovIt ekologiškai švarus produktas, pagamintas iš ceolito. 2006. [Žiūrėta 2006 m. gegužės 14 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.elega.lt>>.

Zigmontienė, A. 2007. Usage of active sludge and active carbon suspension in the biological air purification, *Ecology* 53(3): 75–79.

Zigmontienė, A.; Baltrėnas, P. 2004. Biological purification of air polluted with volatile organic compounds by using active sludge recirculation, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 12(2): 45–52.

Zigmontienė, A.; Vaiskunaite, R. 2005. Application of the biological air purification technologies in *Proceedings of the 6th International Conference Environmental Engineering*. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Technika, 311–315.

Zilli, M.; Palazzi, E.; Sene, L.; Converti, A.; Borghi, M. 2001. Toluene and styrene removal from air in biofilters, *Process Biochemistry* 37: 423–429.

1979 metų tolimų tarpvalstybinių oro teršalų pernašų konvencijos protokolas dėl rūgštėjimo, eutrofikacijos ir pažemio ozono mažinimo. 2003. Oficialus leidinys L 179, 17/07/2003 p. 3–54.

Žilinskas, R. P. 2003. *Matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimas*. Kauno technologijos universiteto elektroninis leidinys. 19 p.

2001 m. oro kokybės metraštis. LR Aplinkos ministerija. 2002. Vilnius. 19 p.

Установка биологической очистки выбросов воздуха – биофильтр. [Žiūrėta 2006 m. spalio 11 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.sfera-saratov.ru/biofilch.php>>.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose leidiniuose, referuojamuose Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėje Thomson ISI Web of Science

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2007a. Investigation into determining the humidity of charge used for biological air treatment, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 15(4): 193–199. ISSN 1648-6897 (print), ISSN 1822-4199 (online).

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2008a. Investigation of cleaning efficiency of biological air-treatment device with activated charge of different origin, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 16(3): 113–120. ISSN 1648-6897 (print), ISSN 1822-4199 (online).

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2009a. Investigation of cleaning efficiency of a biofilter with an aeration chamber, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 17(1): 12–19. ISSN 1648-6897 (print), ISSN 1822-4199 (online).

Straipsniai recenzuojamuose leidiniuose, referuojamuose Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėje Thomson ISI Master Journal List

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2007b. Research into biological air treatment, *Ecology* 53(3): 84–88. ISSN 0235-7224.

Straipsniai recenzuojamuose leidiniuose, referuojamuose Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėje Thomson ISI Proceedings

Baltrėnas, P.; Vaiškūnaitė, R.; Zagorskis, A. 2005a. Experimental studies of air flow rate and aerodynamic resistance of biological air purification device that contains activated fir bark charge, in *Proceedings of the 6th International Conference Environmental Engineering, May 26–27, 2005 Vilnius, Lithuania*. Vilnius, 25–29. ISBN 9986-05-850-3.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2008b. Quantitative microbiological investigation of activated foam and zeolite charges used for biological air treatment, in *Proceedings of the 7th International Conference Environmental Engineering, May 22–23, 2008 Vilnius, Lithuania*. Vilnius, 57–64. ISBN 978-9955-28-263-1.

Straipsniai tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose mokslo žurnaluose

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2005b. Experiments on small biofilters containing activated spruce bark, *Chemical and Petroleum Engineering* 41(9–10): 492–495 (in USA), publikacijos „Балтрена́с и Заго́рски́с 2005“ vertimas. ISSN 0009-2355.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2006a. Simulating aerodynamics processes in a biofilter, *Chemical and Petroleum Engineering* 42(5–6): 278–281 (in USA), publikacijos „Балтрена́с и Заго́рски́с 2006a“ vertimas. ISSN 0009-2355.

Straipsniai recenzuojamuose kituose mokslo žurnaluose

Балтрена́с, П.; Заго́рски́с, А. 2005. Экспериментальные исследования малогабаритных биофильтров с активированной еловой корой, *Химическое и нефтегазовое машиностроение* 9: 35–37 (in Russian). ISSN 0023-1126.

Балтрена́с, П.; Заго́рски́с, А. 2006a. Моделирование аэродинамических процессов в биофильтре, *Химическое и нефтегазовое машиностроение* 5: 41–42 (in Russian). ISSN 0023-1126.

Балтрена́с, П.; Заго́рски́с, А. 2006b. Очистка воздуха биофильтром с активированной еловой корой, *Экология и промышленность России* август: 16–19 (in Russian). ISSN 1816-0395.

Straipsniai Lietuvos mokslo konferencijų leidiniuose

Zagorskis, A.; Baltrėnas, P. 2004. Biologinio oro valymo įrenginio techninių parametru vertinimas, iš 7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25 d., pranešimų medžiaga: *Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, 100–106 (in Lithuanian). ISBN 9986-05-755-8.

Zagorskis, A.; Baltrėnas, P. 2005c. Biologinio oro valymo įrenginių panaudojimo galimybės pramonėje, iš 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 24 d., pranešimų medžiaga: *Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, 442–449 (in Lithuanian). ISBN 9986-05-876-7.

Zagorskis, A.; Baltrėnas, P. 2006b. Bioįkrovų taikymas valant orą nuo lakiųjų organinių junginių, iš 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2006 m. kovo 30 d., pranešimų medžiaga: Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 436–441 (in Lithuanian). ISBN 9955-28-037-9.

Zagorskis, A.; Baltrėnas, P. 2007c. Biofiltro, užkrauto aktyvuota ceolito ir medienos pjūvenų įkrova, eksperimentiniai tyrimai iš 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2007 m. kovo 29 d., pranešimų medžiaga: Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 94–101 (in Lithuanian). ISBN 978-9955-28-162-7.

Zagorskis, A.; Baltrėnas, P. 2008c. Biofiltro užkrauto skirtingos kilmės įkrovomis aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai, iš 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 3 d., pranešimų medžiaga: Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 73–80 (in Lithuanian). ISBN 978-9955-28-385-0.

Patentas

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2008d. Lietuvos patentas Nr. 5528 „Biofiltras – adsorberis“. Valstybinio patentų biuro oficialaus biuletenio „Išradimai, dizainas, prekių ženklai“ 2008 m. Nr. 11, išduotas 2008-08-25.

Alvydas ZAGORSKIS

MAŽO NAŠUMO ORO VALYMO BIOFILTRŲ TYRIMAI IR KŪRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
aplinkos inžinerija ir kraštovarkla (04T)

RESEARCH AND DESIGN OF LOW CAPACITY AIR TREATMENT
BIOFILTERS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (04T)

Autoriaus kontaktinis adreslas:

alvydas.zagorskis@ap.vgtu.lt

2009 04 10. 15,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,
J. Jasinskio g. 16A, LT-01112 Vilnius