

ACETONO VALYMO IŠ ORO EFEKTYVUMO TYRIMAI, TAIKANT SEGMENTINĖS KONSTRUKCIJOS BIOFILTRĄ

Denas BACEVIČIUS¹, Alvydas ZAGORSKIS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹denas.bacevicius@stud.vgtu.lt; ²alvydas.zagorskis@vgtu.lt

Santrauka. Lakiųjų organiniai junginiai, tokie kaip acetonas, turi tiesioginę įtaką klimato kaitai, ozono kiekio ore mažėjimui, šiltnamio efekto susidarymui. Vienas iš populiariausių LOJ valymo iš oro metodų yra biologinis oro valymas. Eksperimentiniai tyrimai atlikti siekiant nustatyti naujos konstrukcijos biofiltro, prikrauto polipropileno plokštelių segmentų, efektyvumą. Tyrimų metu buvo nustatinėjamas segmentinės konstrukcijos oro valymo biofiltro efektyvumas, esant skirtingoms pradinėms teršalo koncentracijoms. Skirtingos teršalo koncentracijos gautos acetoną skiedžiant vandeniu. Bandymų metu nustatytas acetono garų valymo iš biofiltro oro efektyvumas, jo kaita esant skirtingoms garų koncentracijoms. Remiantis bandymų rezultatais, didžiausias nustatytas biofiltro oro valymo efektyvumas siekė 93 %. Tyrimų metu nustatyta, kad didinant leidžiamo teršalo koncentraciją, įrenginio valymo efektyvumas mažėja. Padidinus į biofiltrą tiekiamų acetono garų koncentraciją nuo 232 iki 701 mg/m³, valymo efektyvumas sumažėjo nuo 92,8 iki 82,3 %. Kadangi mikroorganizmai nespėja oksiduoti organinių junginių, filtras geriau veikia esant mažesnėms pradinėms teršalų koncentracijoms.

Reikšminiai žodžiai: acetonas, biofiltras, skaidymas, polipropileno plokštelės.

Įvadas

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 (Zagorskis 2009).

Ypač pastebimas aplinkos užterštumas lakiaisiais organiniais junginiais (LOJ). Augant gyventojų populiacijai vystosi pramonė, taip pat didėja LOJ poreikis, todėl kvapų kontrolės sistemos sukelia vis daugiau nepatogumų.

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 (Ergas *et al.* 2008). LOJ turi tiesioginę įtaką klimato kaitai, ozono kiekio ore mažėjimui, šiltnamio efekto susidarymui.

Vis plačiau dažai naudojami pramonėje, plečiasi perdirbamoji pramonė, statybinių medžiagų gamyba, buitinųjų paslaugų sektorius bei žemės ūkis, todėl didėja LOJ emisijos į atmosferą. Lakiesiems organiniams junginiams, turintiems aštrų, nemalonų kvapą, šalinti taikomi įvairūs oro valymo metodai, tačiau visiškai pašalinti kvapų jie ne-

gali (Neves *et al.* 2006). Griežti aplinkosaugos teisės aktai, įgalinti vyriausybinių agentūrų, privertė aplinką teršiančias pramonės šakas imtis veiksmingų oro taršos mažinimo priemonių.

Dėl nuolat didėjančios atmosferos oro taršos ir kylančių higienos bei technologijos reikalavimų biologinis oro valymas tapo neatsiejamu oro tiekimo ir recirkuliacijos sistemų – kondicionierių, ventiliacijos sistemų – elementu (Shareefdeen *et al.* 2003).

Skirtingos konstrukcijos biologinius oro valymo įrenginius gana plačiai tyrinėjo amerikiečių mokslininkai R. Cox, M. Deshusses. Todėl biologiniai LOJ valymo būdai įgijo milžinišką populiarumą atsižvelgiant į keletą privalumų, lyginant su tradiciniais fizikiniais ir cheminiais šalinimo metodais (Zagorskis 2009). Biologiniai LOJ mažinimo metodai yra ne tik ekonomiškai veiksmingesni, bet ir, lyginant su tradiciniais metodais, pavyzdžiui, deginimo ar adsorbcijos, yra nekenksmingi aplinkai (Kennes *et al.* 2009).

Biofiltro naudojimo trukmė priklauso nuo leidžiamo užteršto oro srauto, kultivuojamų mikroorganizmų veiklos bei nuo filtru palaikomų parametru (temperatūros, drėgmės ir kt.). Dėl šios priežasties ilgesnė gyvavimo trukmė sudaro sąlygas pastovesniam oro valymo efektyvumui, nors

projektuojant stengiamasi sumažinti filtro matmenis, kad biofiltrai galėtų valyti kuo didesnę oro srautą. Paprastai dauguma bioterpių tarnauja iki 5–7 metų (Baltrėnas, Zagorskis 2010; Reij *et al.* 2005).

Įprastai biofilto terpę sudaro kompostas, kurį dažniausiai sudaro durpės, samanės, plastikas ar mediena ir kt. Biofilto terpės esmė yra sudaryti didelį paviršių teršalų adsorbicijai ir absorbcijai. Terpė yra kaip maisto šaltinis mikroorganizmų populiacijai (Syron *et al.* 2008). Kai kurioms terpėms trūksta reikalingų maisto medžiagų, todėl jas reikia mechaniškai papildyti maistingomis medžiagomis (azotu, fosforu ir kt.), kad mikroorganizmai išliktų aktyvūs (Pineda *et al.* 2004; Woertz *et al.* 2002).

Šio darbo tikslas – ištirti ir įvertinti biofilto segmentais išdėstytų polipropileno plokštelių efektyvumą valant iš oro skirtingos koncentracijos acetono garus.

Tyrimų metodika

Tyrimuose naudotas naujos kartos segmentinės konstrukcijos biofiltras (1 pav.). Konstrukcija pasirinkta siekiant pailginti teršalo sąlyčio su įkrova laiką. Taip galima gauti didesnę oro valymo efektyvumą.

Atliekant tyrimus biofiltras buvo pripildytas 8 polipropileno plokštelių segmentų. Polipropileno plokštelių tankis gana mažas, todėl kasetė pripildoma 80 cm aukščio polipropileno plokštelių, kurios yra išdėstytos segmentais (1 pav.).

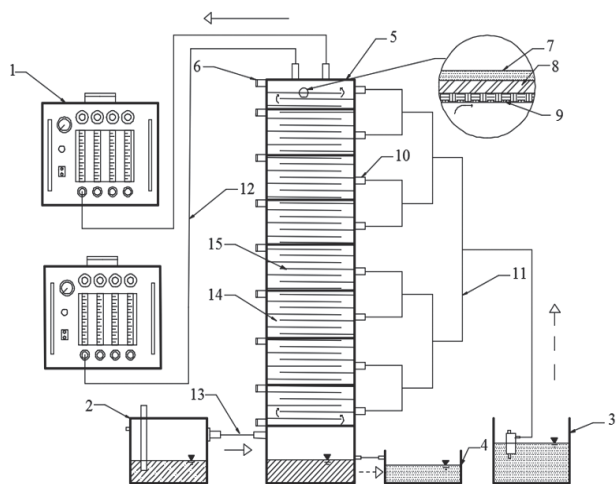
Biofiltre užterštas oras yra siurbiamas aspiratoriumi. Siurbimo greitis – 40 l/min. Toks greitis palaikomas viso bandymo metu. Tyrimo metu naudojami du aspiratoriai, nes oras yra siurbiamas per keturis antvamzdžius.

Per biofiltrą leidžiamo oro srauto greitis ir temperatūra matuojami vokiečių firmos matuokliu Testo 400. Matuojama per biofilto šone įrengtas mėginių ėmimo angas.

Prieš paleidžiant biofiltrą, plokštelės drėkinamos virš kiekvieno sluoksnio įrengtais vandens purkštukais. Į purkštukus vandenį, prisotintą biogeninių elementų, tiekia perteklinio vandens rezervuare įrengtas siurblys. Vandens siurblio darbą valdo biofilto valdymo skyde sumontuota laiko relė, kuri kas valandą 8 sekundėms įjungia vandens siurbli. Tyrimų metu siurblio veikimo laikas sureguliuotas taip, kad biofiltre būtų palaikomas 70 % drėgnis. Biofiltre įrengta drėkinimo sistema leidžia reguliuoti ant plokštelių išlaistomą vandens kiekį.

Kaip adsorbentas pasirenkamos polipropileno plokštelės dėl didelio selektyvumo ir geros adsorbicijos.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti atsižvelgiant į biofilto plokštelėms keliamus reikalavimus ir fizines savybes (tankį, porėtumą, masę, paviršiaus plotą), eksperimentiniams tyrimams naudojama plokštelių medžiaga pagaminta iš 100 %



1 pav. Biofilto schema: 1 – aspiratorius; 2 – LOJ dujų šaltinis; 3 – mikroorganizmais aktyvuoto tirpalo rezervuaras su siurbliu; 4 – perteklinio vandens rezervuaras; 5 – biofilto korpusas; 6 – mėginių ėmimo angos; 7 – skystoji fazė; 8 – polipropileno plokštelė; 9 – dujinė fazė; 10 – drėkinimo purkštukai; 11, 12, 13 – sujungimo žarnelės; 14 – polipropileno plokštelių segmentas; 15 – polipropileno plokštelė

Fig. 1. Biofilter scheme: 1 – aspirator; 2 – VOC gas source; 3 – biogenic solution tank with pump; 4 – excess water reservoir; 5 – biofilter housing; 6 – sampling holes; 7 – the liquid phase; 8 – polypropylene plate; 9 – gas phase; 10 – irrigation nozzles; 11, 12, 13 – connecting hoses; 14 – polypropylene plates segment; 15 – polypropylene plate

polipropileno – 100UP. Medžiaga yra austinė, pasižymi puikiomis sugerties savybėmis, ekonomiška. Medžiagos tankis $0,96 \text{ g/cm}^3$. Pasižymi geromis hidrofilinių junginių sorbcinėmis savybėmis (2 pav.).

Polipropilenas patvarus, nes suyra tik veikiamas sieros rūgšties ir panašių elementų. Atsparus šilumai, standus ir stiprus. Jį galima naudoti iki $150 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros. Iš polipropileno gaminių labiausiai žinomi pluoštai, kurie yra atsparūs vandeniui, elastingi. Jie tvirtiausi iš visų sintetinių pluoštų. Naudojami audiniams gaminti, derinant su vilna ir kitais sintetiniais pluoštais (Dingemansa *et al.* 2008).

Tyrimams naudojami laboratoriniai indai, matavimo priemonės ir įranga

Temperatūros ir oro srauto matuoklis „Testo 400“ (temperatūros matavimo ribos $20\text{--}70 \text{ }^\circ\text{C}$, paklaida $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, greičio



2 pav. Medžiaga 100UP
Fig. 2. Material 100UP

matavimo ribos 0–10 m/s, paklaida $\pm 0,02$ m/s), 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, sugraduotas, karščiui atsparus indas (1000 cm³), pipetės (300 ml), švirškintas (400 ml), aspiratorius, MiniRAE 2000 nešiojamas LOJ dujų analizatorius (modelis PGM7600), diferencialinis slėgio matuoklis DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ± 5 Pa).

Tyrimams atlikti taikyti metodai

Acetono (99,9 % grynumo, molinė masė 58,08 g/mol) koncentracijai nustatyti pasirinktas dujų analizatorius MiniRAE 2000 ir laboratoriniai indai, kuriuos naudojant buvo sudarytos acetono koncentracijos priklausomybės nuo segmentų, pagamintų iš polipropileno plokštelių, skaičiaus.

Biofiltras aktyvinamas, palaikant 30 °C temperatūrą, bioterpės rūgštingumą (pH = 7), biogeninių elementų koncentraciją. Siekiant pagerinti savaiminį mikroorganizmų adaptavimąsi bioterpėje, į įrenginį tiekiamas mineralinių druskų tirpalas.

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.

Įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas priklauso nuo jos drėgnio. Todėl biofiltro plokštelės buvo drėkinamos virš segmentų sluoksnių įrengtais purkštukais aktyvuotu tirpalu, kad drėgnis būtų pastovus.

Biologinio oro valymo įrenginio efektyvumo priklausomybei nuo leidžiamosios teršalo koncentracijos nustatyti į įrenginį tiekiamo acetono koncentracija buvo padidinta iki 230 mg/m³. Teršalo koncentracija buvo didinama mažinant skiedimo su vandeniu santykį. Paskui tyrimai buvo kartojami padidinus pradinę acetono koncentraciją iki 350 mg/m³ ir tada iki 700 mg/m³.

Acetono koncentracijos nustatytos fotojonizacijos metodu. Bandymai atlikti biofiltro šone esančiose mėginių ėmimo angose, kurių buvo devynios, jos išdėstytos 10 cm atstumu viena nuo kitos. Bendras plokštelių storis siekė 80 cm.

Atlikus eksperimentinius tyrimus su acetonu, į įrenginį 3 valandas buvo tiekiamas neužterštas, švarus oras. Taip pagreitinama acetono dujų desorbcija.

Siekiant nustatyti biofiltro valymo efektyvumo priklausomybę nuo plokštelių segmentų skaičiaus, teršalų koncentracijos matuotos prieš ir po plokštelių.

Tyrimų rezultatai

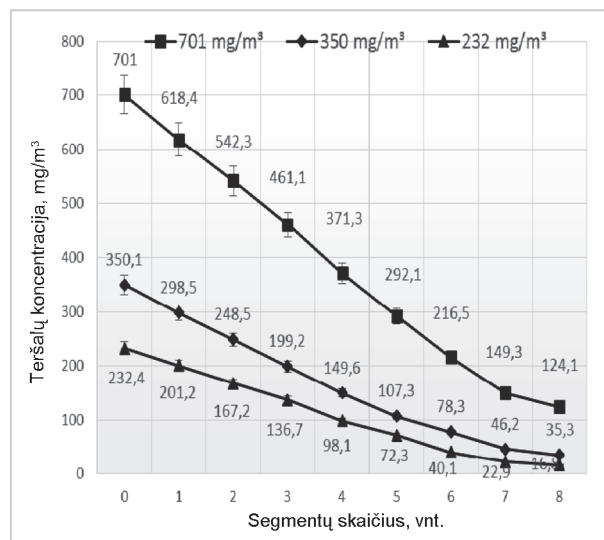
Siekiant įvertinti teršalų adsorbciją ir absorbciją, tyrimai iš pradžių buvo atliekami polipropileno plokštelių segmentus sudrėkinus vandeniu be mikroorganizmų. Tačiau atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad biofiltro valymo efektyvumas siekė tik 30 %. Todėl tyrimai buvo atliekami polipropileno plokštelių segmentus sudrėkinus mikroorganizmais aktyvintu tirpalu.

Atlikus eksperimentinius tyrimus buvo gautos biofiltro valymo efektyvumo priklausomybės nuo į įrenginį tiekiamo teršalo prigimties. Acetonas gerai maišosi su vandeniu ir visiškai tirpus jame, todėl acetono garai geriau absorbuojasi ant polipropileno plokštelės paviršiaus susidariusioje bioplėvelėje.

Didžiausias teršalų koncentracijos mažėjimas matomas pirmame polipropileno plokštelių segmente nuo apačios (3 pav.). Acetono garais užterštam oro srautui pratekėjus pirmą segmentą, acetono garų koncentracija sumažėjo nuo 232,4 iki 201,2 mg/m³.

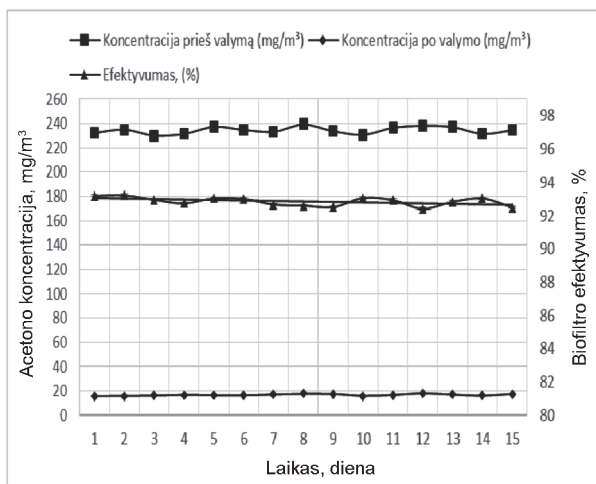
Didžiausias valymo efektyvumas buvo pasiektas valant acetonu užterštą orą. Įrenginio valymo efektyvumas labiausiai padidėjo po pirmo įkrovos segmento. Polipropilenas turėjo poringą struktūrą ir didelį valomojo paviršiaus plotą, todėl dalis teršalo adsorbavosi ant plokštelių paviršiaus (Hartmans *et al.* 2008). Oro valymo efektyvumas pirmajame segmente siekė 13,46 %, o visuose 8-iose segmentuose – 92,77 %.

Be to, eksperimentiniais tyrimais buvo nustatyta, kad mikroorganizmai geriau dauginasi tose įkrovose, kuriose



3 pav. Acetono garų koncentracijos mažėjimo priklausomybė nuo biofiltro segmentų skaičiaus

Fig. 3. Acetone concentration decrease dependence on the number of segments of the biofilter



4 pav. Biofiltro valymo efektyvumas, kai tiekiamo acetono koncentracija 232±5 mg/m³

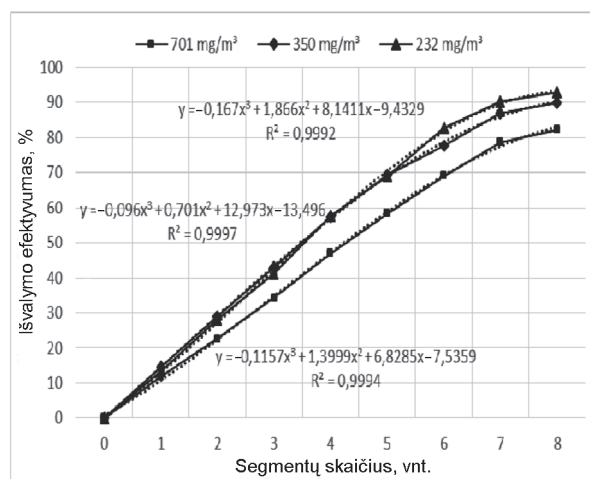
Fig. 4. Biofilter treatment efficiency when fed acetone concentration of 232±5 mg/m³

yra daugiau ištirpusių biogeninių elementų. Didžiausias teršalų koncentracijos mažėjimas pastebėtas išvalius po pirmu polipropileno plokštelių sluoksniu nuo apačios. Teršalų koncentracija gerokai sumažėjo ir išvalius 4 įkrovos segmentų sluoksnį. Išvalius šį sluoksnį acetono garų koncentracija sumažėjo nuo 136,7 iki 98,1 mg/m³.

Įtakos teršalo koncentracijai sumažėti turėjo didelis plokštelių drėgnis, kuris siekė 65 %, ir vandenyje ištirpusios maistinės medžiagos, kurias mikroorganizmai pasisavino medžiagų apykaitos – metabolizmo metu.

Vykdamas bandymus su acetonu, didžiausias acetono išvalymo efektyvumas buvo 93,2 %, jis buvo užfiksuotas pirmąją tyrimo dieną. Tyrimų metu matavimų rezultatai skyrėsi nedaug (4 pav.). Rezultatai vienas nuo kito skyrėsi ±1,5 %. Mažiausias acetono garų valymo iš oro efektyvumas buvo užfiksuotas 12 eksperimento dieną, jis siekė 92,4 %. Tai galėjo nulemti didesnė pradinė teršalo koncentracija, kuri siekė 238,4 mg/m³. Dažniausiai pasikartojantis efektyvumas buvo 93 %, jis buvo 5, 6, 10 ir 14 tyrimo dienomis. Iš atliktų tyrimų rezultatų buvo išvestas aritmetinis vidurkis. Nustatyta, kad vidutinis tyrimų efektyvumas, esant pradinėi acetono garų koncentracijai 232±5 mg/m³, siekė 92,7 %.

Tyrimų metu buvo gauta biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo skirtingos tiekiamo teršalo garų koncentracijos. Šie tyrimai buvo atlikti į įrenginį tiekiant acetonu užterštą orą. Esant didelei substrato – acetono garų – koncentracijai, fermentas buvo saturuojamas, t. y. substratas arba produkto molekulės visuomet užėmė jo aktyvųjį centrą. Tokiomis sąlygomis tolesnio substrato koncentracijos didėjimas nebeveikė fermentacijos reakcijos greičio,



5 pav. Biofiltro valymo efektyvumo priklausomybė nuo biofiltro segmentų skaičiaus esant skirtingai pradinėi acetono koncentracijai

Fig. 5. Biofilter treatment efficiency in dependence on the number of segments of the biofilter under different initial concentrations of acetone

nes visi aktyvūs fermento centrai jau buvo užimti. Todėl didinant teršalo garų koncentraciją įrenginio valymo efektyvumas mažėja (Zagorskis 2009).

Geriausiai acetonas buvo skaidomas esant mažesnei pradinėi teršalo garų koncentracijai. Kai pradinė acetono garų koncentracija buvo 232 mg/m³, biofiltro valymo efektyvumas pasiekė 92,8 %. Padidinus pradinę koncentraciją iki 701 mg/m³, biofiltro valymo efektyvumas sumažėjo iki 82,3 % (5 pav.).

Išvados

1. Didžiausias – 92,77 % – oro valymo efektyvumas buvo pasiektas valant acetono garais užterštą orą. Aukštą acetono išvalymo laipsnį lėmė geras teršalo tirpumas aktyvuotajame tirpale.
2. Geriausiai teršalus mikroorganizmai skaidė pirmame biofiltro segmente. Šiame sluoksnyje buvo suskaidoma iki 15 % teršalų. Didesnį sluoksnio mikrobiologinį aktyvumą lėmė jam tenkanti didžiausia teršalo garų koncentracija, kuri siekė iki 710 mg/m³.
3. Padidinus į biofiltrą leidžiamo teršalo koncentraciją, įrenginio valymo efektyvumas mažėjo. Padidinus į biofiltrą tiekiamą acetono garų koncentraciją nuo 232 iki 701 mg/m³, valymo efektyvumas sumažėjo nuo 92,8 iki 82,3 %. Kadangi mikroorganizmai nespėjo oksiduoti organinių junginių, filtras geriau veikė esant mažesnėms pradinėms teršalų koncentracijoms.

Literatūra

- Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2010. Investigation into the air treatment efficiency of biofilters of different structures, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 18(1): 23–31. <http://dx.doi.org/10.3846/jeelm.2010.03>
- Dingemans, M.; Dewulf, J.; Braeckmana, L.; Langenhovea, H. V.; Friess, K.; Hynekb, V.; Sipekb, M. 2008. Mass transfer characteristics for VOC permeation through flat sheet porous and composite membranes: The impact of the different membrane layers on the overall membrane resistance, *Journal of Membrane Science* 322(1): 234–242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2008.05.043>
- Ergas, S. J.; Shumway, L.; Fitch, M. W.; Neemann, J. J. 2008. Membrane process for biological treatment of contaminated gas streams, *Biotechnology and Bioengineering* 63(4): 431–441. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0290\(19990520\)63:4<431::aid-bit6>3.0.co;2-g](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1097-0290(19990520)63:4<431::aid-bit6>3.0.co;2-g)
- Hartmans, S.; Reij, M. W.; Keurenties, J. T. F. 2008. Membrane Bioreactors for waste gas treatment, *Journal of Biotechnology* 59: 155–167.
- Kennes, C.; Rene, E. R.; Veiga, M. C. 2009. Bioprocesses for air pollution control, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 84(10): 1419–1436. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.2216>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1385/ABAB:129:1:130>
- Pineda, J.; Auria, R.; Perez-Guevara, F.; Revah, S. 2004. Biofiltration of toluene vapours using a model support, *Bioprocess Engineering* 23: 479–486. <http://dx.doi.org/10.1007/s004499900181>
- Reij, M. W.; de Gooijer, C. D.; de Bont, J. A. M.; Hartmans, S. 2005. Membrane bioreactor with a porous hydrophobic membrane as a gas-liquid contactor for waste gastreatment, *Biotechnology and Bioengineering* 45: 107–115. <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260450203>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1007/s10295-003-0026-4>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1021/es0719428>
- Woertz, J. R.; Van Heiningen, W. N. M.; Van Eekert, M. H. A.; Kraakman, N. J. R.; Kinney, K. A.; Van Groenestijn, J. W. 2002. Dynamic bioreactor operation: effects of packing material and mite predation on toluene removal from off-gas, *Applied Microbiology and Biotechnology* 58: 690–694. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-002-0944-5>
- Zagorskis, A. 2009. *Mažo našumo oro valymo biofiltrų tyrimai ir kūrimas*. Vilnius: Technika. 145 p.

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF AIR CLEANING FROM ACETONE USING A SEGMENTAL CONSTRUCTION BIOFILTER

D. Bacevičius, A. Zagorskis

Abstract

Volatile organic compounds, e. g. acetone, have a direct impact on climate change, decrease of ozone in the air, and on the growth of greenhouse effect. One of the most popular air purifying methods from VOC is a biological air cleaning. Experimental investigations were conducted to determine the efficiency of the new structure of biofilter with polypropylene plates segments. During the investigations the efficiency of segmental construction biofilter of air purification at different initial concentrations of pollutants was determined. Different concentrations of pollutants were estimated during the acetone dilution with water. During the tests the efficiency of biofilter air purification from acetone vapor and its change under different concentrations of vapors was set. Based on test results, the maximum efficiency of biofilter air purification was up to 93%. Studies have shown that increasing the allowable pollutant concentration, the efficiency of air purification unit decreases. Increasing the concentration of supplied acetone vapor into the biofilter from 232 to 701 mg/m³, cleaning efficiency decreased from 92.8 to 82.3%. Since microorganisms fail to oxidize organic compounds, the filter works better at lower initial concentrations of pollutants.

Keywords: acetone, biofilter, degradation, polypropylene plates.