



BIODUJŲ KONCENTRACIJOS POKYČIO FOTOBIOABSORBERYJE MATEMATINIS MODELIAVIMAS

Loreta Juškaitė¹, Alvydas Zagorskis²

*VGTU Aplinkos inžinerijos fakultetas, Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra
El. p. ¹loreta.juskaite@vgtu.lt; ²alvydas.zagorskis@vgtu.lt*

Anotacija. Biologiniai biodujų valymo metodai pasaulyje vis plačiau tiriami bei taikomi. Nustatyta, kad naudojant mikrodumblių kultūras biodujos valomos nuo jose esančių teršalų, pavyzdžiui, anglies dioksido. Darbo tikslas – teoriškai įvertinti biodujų sudėties pokyčius fotobioabsorberyje su mikrodumblių suspensija. Darbe nagrinėtas biodujų burbuliukų kilimo greitis fotobioabsorberio modelyje remiantis Hadamardo-Rybczynskio lygtimi. Naudojant programinį paketą Comsol Multiphysics nustatyta biodujose esančių teršalų koncentracijos priklausomybė nuo bioterpės dinaminio klampumo. Įvertintas biodujų koncentracijos pasiskirstymas per visą kolonėlės skerspjūvio plotą. Modeliavimo rezultatai parodė, kad biodujose esančių teršalų koncentracija artėjant prie fotobioabsorberio sienelių mažėja. Didesnis koncentracijos kritimas fotobioabsorberio viršuje parodo didesnę biodujų masės perdavimą į tirpalą.

Raktažodžiai: mikrodumbliai, biodujų valymas, fotobiologinis absorberis, matematinis modeliavimas.

Įvadas

Biodujų gamyba apdorojant organines atliekas yra viena iš efektyviausių priemonių klimato kaitai mažinti. Vis dėlto biodujų sudėtyje yra komponentų, darančių įtaką kogeneracinių variklių darbui bei pačių biodujų energinei vertei. Todėl ieškoma efektyvių būdų anglies dioksidui ir kitiems komponentams (pvz., sieros vandenilis, amoniakas) iš biodujų valyti.

Biodujų valymo procesams pagerinti pasaulyje taikomi skirtingi metodai: cheminiai, fizikiniai, biologiniai. Būtent pastarojo metodo potencialas yra vis plačiau tiriamas ir vertinamas. Intensyviau bandoma panaudoti mikrodumblių kultūras biodujoms valyti, nes gaunama dvejiopa nauda – aukštu efektyvumu išvalytos biodujos ir susiformavusi nauja žaliava – mikrodumblių biomasė. Tam, jog mikrodumbliai palaikytų savo gyvybines funkcijas ir būtų naudingi biodujų valymo proceso metu, jie sunaudoja anglies dioksidą. Taip iš biodujų pašalinami kenksmingi komponentai ir sumažėja biomasės gamybos sąnaudos (Hendroko ir kt., 2013).

Visgi pagrindiniai išskylantys sunkumai yra tinkamų kultūrų parinkimas ir optimalių sąlygų valymo įrenginiuose užtikrinimas, siekiant sumažinti CO₂ ir išvalytose biodujose išlaikyti aukštą CH₄ koncentraciją. Šiai problemai spręsti laboratorijose atliekami tyrimai su skirtingai

mikrodumblių kultūromis prisotintais tirpalais ir suspensijomis.

Tačiau laboratorijose atliekamiems tyrimams yra reikalingos įvairios žaliavos, reikia daug laiko eksperimentiniams stendams paruošti, juos prižiūrėti, auginti mikrodumblių kultūras, jų gyvybinių sąlygų palaikymui reikia daug šilumos ir elektros energijos išteklių, todėl reikalingi dideli finansiniai ištekliai. Laboratoriniai tyrimai tampa brangūs ir sunkiau įgyvendinami, o kartais visai neįmanomi. Šiai problemai spręsti neretai pasitelkiamas matematinis modeliavimas. Teorinis eksperimentinių tyrimų atkartojimas remiantis matematinėmis, fizikinėmis ir cheminėmis formulėmis, nusakančiomis realybėje vykstančius procesus tarp skysčių ir dujų. Matematinio modeliavimo kaip ir eksperimentinio tyrimo metu sudaromos skirtingos sąlygos, siekiant nustatyti teoriškai tinkamiausias sąlygas biodujoms valyti, todėl taikant teorinius modelius yra svarbu įvertinti biodujų koncentracijos pokyčius fotobioabsorberyje.

Skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) programinės įrangos paketas gali atlikti fluidų tekėjimo esant tam tikrai situacijai skaičiavimus. Kad tai padarytų, programinės įrangos paketas turi apskaičiuoti skaitinius sprendinius lygtimis, kurios aprašo fluidų tekėjimą. Modeliuojant

fluidų judėjimą turi būti taikomos lygtys, kurios aprašo judėjimą, pagrindines srauto savybes ir jo ypatybes tekant fluidui. Remiantis masės tvermės dėsnio judėjimo lygtis galima gauti žinant, kad fluido masė kaip ir fluido momentas turi būti išsaugoti (Vaitiekūnas, 2007).

Biodujų koncentracijos pokyčiui fotobioabsorberijoje nustatyti gali būti taikoma „Comsol Multiphysics“ programinė įranga. „Comsol Multiphysics“ programinė įranga gali būti pritaikyta baigtinių elementų (BEM), dalinės diferencialinės lygties sprendimui. Pagrindinėje „Comsol Multiphysics“ programinėje įrangoje yra aštuoni papildomi moduliai, iš kurių biodujų koncentracijos pokyčiui įvertinti gali būti takomi šilumos perdavimo moduliai.

Programinėje įrangoje pateikti modeliai yra sukurti atsižvelgiant į fizikinę aplinką (pritaikytus fizikinius parametrus) ir pateikiami atsižvelgiant į analizės metodus. Kaip ir bet kurioje kitoje problemos sprendimo metodikoje, informacija, gauta iš modeliavimo sprendimų naudojant šias kompiuterines simuliacijas, yra tik tiek gera, kiek geri yra medžiagų koeficientai ir pagrindinės prielaidos, naudojamose modeliui kurti (Pryor, 2009).

Pagrindinis privalumas, gautas derinant kompiuterinį modeliavimą ir pirmąjį principų analizę, yra tas, kad modeliuotojas gali išbandyti tiek skirtingų variacijų vienos problemos sprendimui, kiek reikia, kol problema bus tinkamai išspręsta (ar bent jau bus priartėta prie jos išsprendimo). Visa tai atliekama prieš pradant realius tyrimus laboratorijoje, kur naudojant modelį bus išvengta klaidų ir sutaupyta laiko kuriant fotobioabsorberio konstrukciją ir analizuojant jame vykstančius fizikinius procesus. Įvesties duomenims gali būti naudojami eksperimentinių tyrimų metu gauti duomenys, siekiant modifikuoti modelio parametrus ir greičiau priimti galutinį sprendimą, nei tiesiog naudoti bibliotekoje esančių parametrų pritaikymą.

Viena iš populiariausių „Comsol Multiphysics“ programinės įrangos naudojimo sričių yra dujų-skysčio sąveika. Savo tyrime apie sferinių burbuliukų srauto elgseną ir tempimo koeficientus skysčiuose tyrė ir Indijos mokslininkai (Gollakota ir Kishore, 2017). Savo tyrime aprašė užterštų sferinių burbuliukų srauto ir pasipriešinimo reiškinius kolonose, užpildytose paviršinio aktyvumo medžiagomis, pakrautomis „Carreau“ modelio skysčiais.

Malaizijos mokslininkai (Wahab ir kt., 2019) šią programinės įrangos sritį panaudojo tirdami elektromagnetinio pasipriešinimo tomografijos (ERT) sistemos skysčio-dujų režimo tomogramą, kai yra keli sužadavimo šaltiniai. Jungtiniuose Arabų Emiratuose mokslininkai (Zaidani ir kt., 2019) savo tyrime apie paviršiaus drėkinimo savybių poveikį dujų-skysčio dviejų fazių srautui

nustatyti taip pat pasitelkė „Comsol Multiphysics“ programinę įrangą. Kompiuterinės skysčio dinamikos (CFD) modeliavimas tyrime atliekamas naudojant „Comsol Multiphysics“, dviejų fazių srauto, laminarinį, lygio nustatymo režimą. Taikomos „Navier-Stokes“ lygtys, kurios apibūdina impulsų judėjimą, įskaitant paviršiaus įtempimą ir masės konversijas, taip pat taikomas pakartotinio inicijavimo lygio nustatymas, skirtas atskirti skysčio sąsają tarp oro ir vandens.

„Comsol Multiphysics“ programinė įranga Ispanijos tyrėjų (Aguilera ir Ortiz, 2016) buvo naudojama tyrime apie fiksuotų įkrovų lūžio kreives H₂S adsorbcijai iš biodujų, nustatant ašinės dispersijos svarbą. Naudojant „Comsol Multiphysics“ programinę įrangą buvo sukurtas biodujų valymo termiškai apdorotu nuotekų dumblo modelis ir buvo išspręsta fiksuotos įkrovos lūžio kreivių H₂S adsorbcijai iš biodujų užduotis. Prognozuoti fiksuotos įkrovos lūžio kreivės H₂S adsorbcijai iš biodujų ant termiškai apdoroto nuotekų dumblo buvo sukurtas modelis ir skaitmeniškai išspręstas naudojant „Comsol Multiphysics“ programinę įrangą. Prognozuojamos lūžio kreivės labai gerai atitiko eksperimentinius duomenis ir buvo aiškiai geresnės nei prognozės, kurias mokslininkai gavo savo ankstesniame tyrime naudodami „Aspen Adsorption“.

Taigi mokslininkai visame pasaulyje naudoja matematinę modeliavimo programinę įrangą „Comsol Multiphysics“ dujų-skysčio dvifazėms sąveikoms nagrinėti, taip pat biodujų sudėtyje esančių elementų pokyčiams nustatyti. Kita matematinio modelio panaudojimo tyrimuose priežastis atsispindi ir pateiktuose pavyzdžiuose – palyginimas su eksperimentiniais rezultatais, bei procesų nagrinėjimas, kuriuos laboratorinėmis sąlygomis ištirti būtų labai sudėtinga arba neįmanoma.

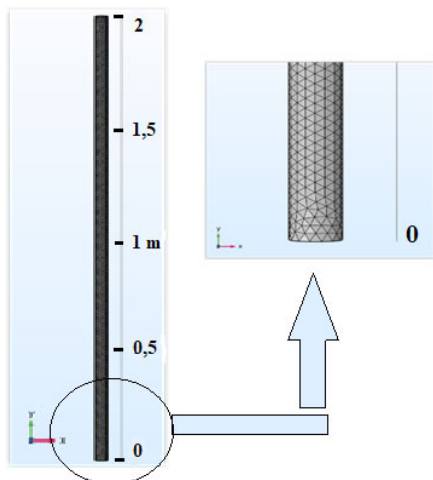
Tyrimo tikslas – teoriškai įvertinti biodujų sudėties pokyčius fotobioabsorberijoje su mikrodumblių suspensija.

Metodika

Biodujų koncentracijos pokyčio fotobioabsorberijoje matematiniam modeliavimui atlikti taikytas „Comsol Multiphysics“ programinis paketas. Taikant programinę paketą buvo sukurtas fotobioabsorberio modelis, kurį sudarė tiesios konstrukcijos kolonėlė, užpildyta biologiškai aktyvuotu tirpalu. Naudota „Bubbly Flow, Laminar Flow (bf)“ fizikinė skaičiavimų aplinka. Kolonėlės aukštis $h = 2$ m, skersmuo $d = 0,05$ m. Atliekant skaičiavimus daroma prielaida, kad kolonėlė pilna tirpalo. Biodujų burbuliukų skersmuo – 1 mm.

Modelyje nustatoma priimta, kad fotobioreaktoriaus kolonėlė užpildyta skysta terpe, o apačioje per difuzorius

įpurškiami biodujų burbuliukai. Dėl plūdrumo burbuliukai kyla į viršų, sukeldami skysčio cirkuliaciją. Modeliuojant tiriamas burbulo sukeltos turbulencijos įtraukimo poveikis. Baigtiniais elementais sudalinto fotobioabsorberio 3D modelis pateiktas 1 paveiksle.



1 paveikslas. Baigtiniais elementais sudalinto fotobioabsorberio modelis

Geometrijos viršus yra laisvas paviršius. Paviršiaus judesio nepaisoma, vietoj to jam nustatoma skysčio slydimo sąlyga. Biodujos gali laisvai ištekėti iš fotobioreaktoriaus per šią ribą. Kitos modelio sąlygos buvo nurodytos skysčio sienelių funkcijomis, o burbuliukų parametrai nurodyti esant nuliniam biodujų srautui.

Burbuliukų srauto sąsaja nustato daugiafazio srauto modelį, skirtą biodujų burbulams skysčiuose. Modelyje sekama vidutinė biodujų fazės koncentracija, o ne kiekvienas burbulas atskirai. Modelis nustato skysčio greitį, slėgį ir biodujų fazės tūrio dalį.

Modelio tinklelis sukurtas atsižvelgiant į tai, kad šalia burbuliukų įtekėjimo angų jis turi būti tankus, siekiant nustatyti staigius burbuliukų koncentracijos nuolydžius, greičius ir pan. Taip pat tinklelis buvo sudarytas pakankamai tankus tiek fotobioreaktoriaus išorėje, tiek viduje, nes burbuliukai neretai sukuria palyginti sudėtingą srauto struktūrą. Pažymėtina, kad fotobioreaktoriaus naudota cilindriška konstrukcija yra labai paprasta, išliekanti vienoda visame ilgyje, todėl tinklelis atitinkamai taip pat paprastas, be žymių tankumo pakitimų. Vienintelė problema yra ta, kad tai yra apvalų pagrindą turinti geometrinė figūra, t. y. ji nėra kampuota, todėl šiek tiek sunkiau tinklelį išdėstyti trikampiui.

Biodujų srauto debitas (Q) fotobioabsorberyje buvo pasirinktas 2, 5, ir 10 litrų 24 valandų periodui ir atitinkamai siekė $2,3E-8$, $5,8E-8$ ir $11,6E-8$ m³/s. Biodujų tekėjimo greitis apskaičiuotas pagal formulę:

$$u = \frac{Q}{A}, \quad (1)$$

čia A – fotobioabsorberio pjūvio plotas, 0,002 m².

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2)$$

čia d – fotobioabsorberio kolonėlės skersmuo, m.

Biodujų masės pernašos priklauso nuo skystos terpės dinaminio klampumo. Fotobioabsorberyje, priklausomai nuo mikrodumblių koncentracijos, dinaminis klampumas gali kisti, todėl skaičiuojant biodujose esančių komponentų masės pernašas pasirinktos dinaminio klampumo reikšmės siekia $1,00E-3$ Pa·s, $1,30E-3$ Pa·s ir $1,50E-3$ Pa·s.

Reinoldso skaičiui nustatyti naudota formulė:

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu}, \quad (3)$$

čia μ – dinaminis klampumas, kg/(m·s); ρ – biodujų tankis, kg/m³; d_h – hidraulinis kolonėlės skersmuo, m. Pasirinktu atveju $d_h = d = 0,05$ m.

Modelyje biodujų sudėtis parinkta atsižvelgiant į eksperimentinių tyrimų rezultatus, tiriant nuotekų valyklose išsiskiriančias biodujas. Biodujų sudėtis pateikta 1-oje lentelėje.

1 lentelė. Biodujų sudėties įvesties duomenys

CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S
57 %	35 %	1,7 %	0 %

Ekvivalentinis biodujų tankis apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho_e = \%_{\text{metano}} \cdot \frac{\rho_{\text{metano}}}{100} + \%_{\text{CO}_2} \cdot \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{100} + \%_{\text{O}_2} \cdot \frac{\rho_{\text{O}_2}}{100} + \%_{\text{oro}} \cdot \frac{\rho_{\text{oro}}}{100}, \quad (4)$$

čia ρ_{metano} – metano tankis, 0,657 kg/m³; $\%_{\text{metano}} = 57$ %; ρ_{CO_2} – CO₂ tankis, 1,773 kg/m³; $\%_{\text{CO}_2} = 35$ %; ρ_{O_2} – deguonies tankis, 1,284 kg/m³; $\%_{\text{O}_2} = 1,7$ %; ρ_{oro} – atmosferos tankis, 1,2041 kg/m³; $\%_{\text{oro}} = 6,3$ %.

Atlikus skaičiavimus įvertintas tekėjimo turbulentiškumas „Comsol Multiphysics“ aplinkoje.

Oro burbuliukų kilimo greitis fotobioabsorberio modelyje skaičiuojamas remiantis Hadamardo-Rybczynskio (Hadamard, 1911; Rybczynski, 1911) lygtimi.

$$W_b = \frac{2}{3} \frac{R^2 g (\rho_b - \rho_0)}{\mu_0} \frac{\mu_0 + \mu_b}{2\mu_0 + 3\mu_b}, \quad (5)$$

čia R – burbulo slinpuodys, m; g – gravitacinis pagreitis, m/s^2 ; ρ_b – burbulo tankis, kg/m^3 ; ρ_0 – aplinkos skysčio tankis, kg/m^3 ; μ_b – burbulo klampumas, $Pa \cdot s$; μ_0 – aplinkos skysčio klampumas, $Pa \cdot s$; W_b – dėl to susidarantis burbulo greitis, m/s .

Greitis priklauso nuo burbuliuko skersmens, biodujų ir skysčio tankio bei dinaminės klampos. Kuo mažesnis greitis, tuo ilgiau burbuliukai sąveikauja su skysčiu ir skystyje ištirpsta daugiau biodujų.

Fotobioabsorberyje slėgio kitimas modeliavimo metu atitiko teorinę lygtį:

$$p = \rho_0 g h, \quad (6)$$

čia ρ_0 – suspensijos tankis, kg/m^3 ; g – gravitacinis pagreitis, m/s^2 ; h – aukštis, m.

Biodujų koncentracijos sumažėjimas įvertintas remiantis užsienio mokslininkų Li ir kt. (2019) darbais. Modelyje buvo užduotas biodujų masės perdavimo į tirpalą koeficientas $m_{g1} = 0.01 \text{ kg}/(m^3 \cdot s)$. Šis koeficientas gali būti ir matuojamas eksperimentiškai, ir modeliuojamas (plg. Li ir kt., 2019).

Rezultatai ir jų analizė

Atlikus biodujų koncentracijos pokyčio fotobioabsorberyje matematinį modeliavimą buvo apskaičiuoti biodujų burbuliukų ir biodujų tekėjimo greičiai fotobioabsorberio modelyje remiantis Hadamardo–Rybczynskio lygtimi. Rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

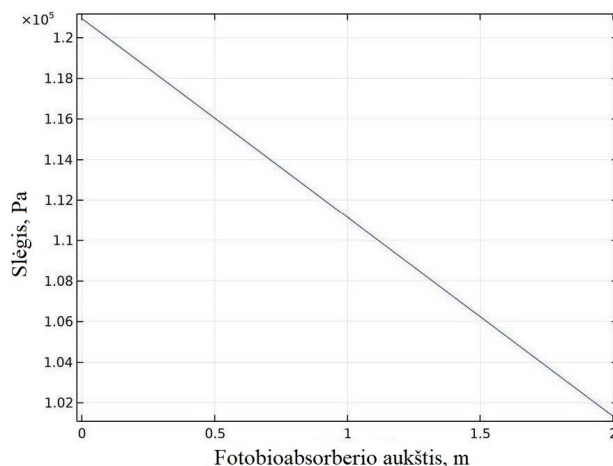
2 lentelė. Biodujų burbuliukų kilimo greičiai priklausomai nuo dinaminės klampos

Eil. Nr.	Dinaminis klampumas, Pa·s	Biodujų burbuliukų kilimo greitis, m/s
1.	0,001	0,8172
2.	0,0013	0,6286
3.	0,0015	0,5448

Slėgio kitimas fotobioabsorberyje modeliavimo metu pateiktas 2 paveiksle.

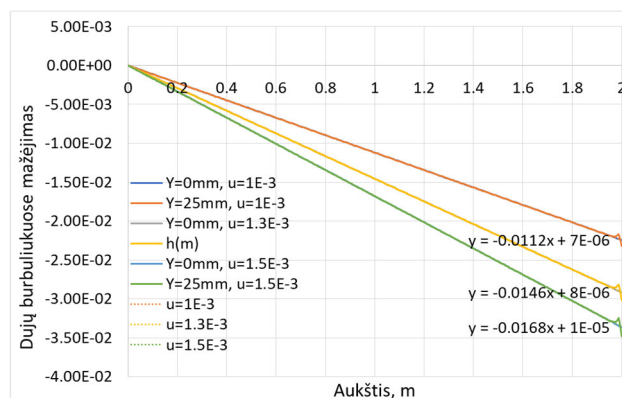
Iš 2 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad fotobioreaktoriaus viršuje, ties 2 metrų aukščiu, nustatytas 100 kPa (1 atm) slėgis, fotobioreaktoriaus apačioje susidaro 122 kPa slėgis (22 kPa skirtumas) – tai yra ir biodujų burbuliuko slėgis. Burbuliukai skystyje kyla pastoviu greičiu. Kylant į viršų skysčio slėgis į burbulo paviršių mažėja, todėl burbuliuko tūris ir atitinkamai skesmuo didėja.

Biodujų koncentracijos mažėjimas, praleidžiant biodujas per mikrodumblių suspensiją skirtingo dinaminio klampumo ($\mu = 0,001; 0,0013; 0,0015 \text{ Pa} \cdot s$) sąlygomis, gautas matematinio modeliavimo būdu (žr. 3 paveiksle).



2 paveikslas. Slėgio kitimas fotobioabsorberyje

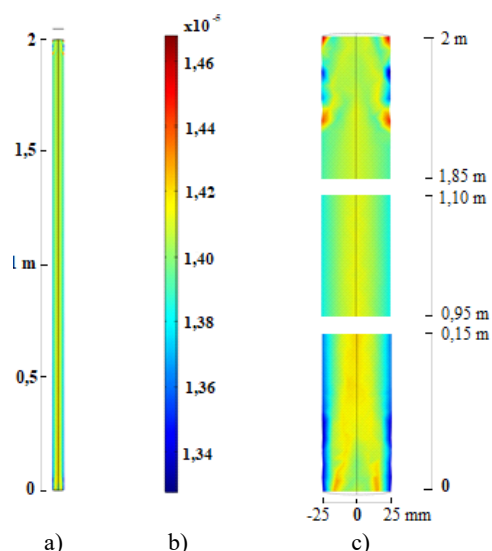
Iš 3 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad santykinis biodujų kiekio burbuliukuose mažėjimas nuo debito nepriklauso. Taip pat jis išlieka vienodas visuose fotobioabsorberio pjūviuose tiek arčiau sienelių, tiek arčiau centro. Nuo debito priklauso tik absoliuti ištirpusių skystyje biodujų dalis.



3 paveikslas. Biodujų koncentracijos fotobioabsorberyje mažėjimas skirtingo dinaminio klampumo sąlygomis

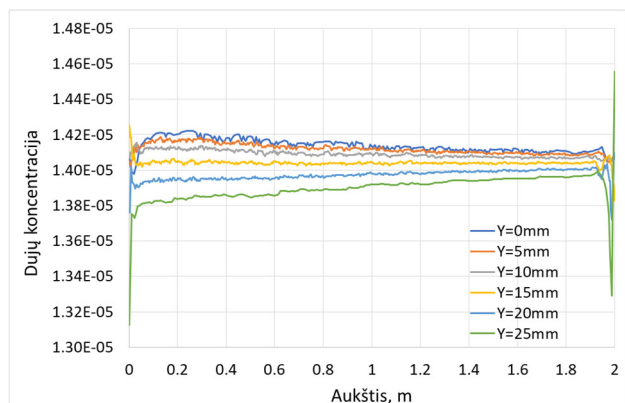
Absoliučios biodujų koncentracijos pasiskirstymo fotobioabsorberyje rezultatai pateikiami 4 paveiksle.

Iš 4 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad didžiausias teršalų koncentracijos sumažėjimas fiksuojamas viršutiniuose kolonėlės sluoksniuose. Didžiausias koncentracijos pokytis apatinėje kolonėlės dalyje fiksuojamas centre. Vidurinėje kolonėlės dalyje teršalų koncentracijos pokytis išlieka panašus per visą kolonėlės skerspjuvio plotą, o viršutinėje dalyje didžiausias teršalų pokytis jau fiksuojamas šalia kolonėlės sienelių. Galima daryti prielaidą, kad biodujų pernašos masė iš pradžių yra didžiausia fotobioabsorberio centrinėje dalyje, po to nusistovi, fotobioabsorberio pabaigoje išsisklaido.

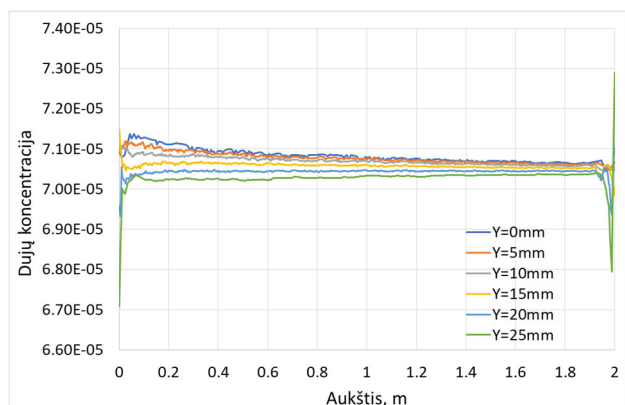


4 paveikslas. Biodujų koncentracijos pasiskirstymas fotobioabsorberyje: a) koncentracija prieš stebėjimo pradžią; b) esant nusistovėjusiam biobiodujų srautui po 50 s; c) 6 kartus padidintos viršutinė, vidurinė ir apatinė kolonėlės dalys

Biodujų koncentracija 5, 6, 7, 8 paveiksluose pateikiama kaip biodujų tūrio ir viso tūrio santykis.



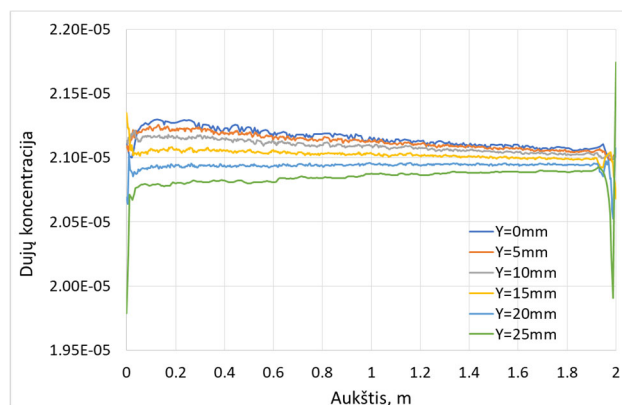
5 paveikslas. Biodujų koncentracijos kitimo priklausomybė, kai $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $Q = 2 \text{ l}/24 \text{ val.}$, pjūviuose 0, 5, 10, 15, 20 ir 25 mm nuo fotobioabsorberio centro



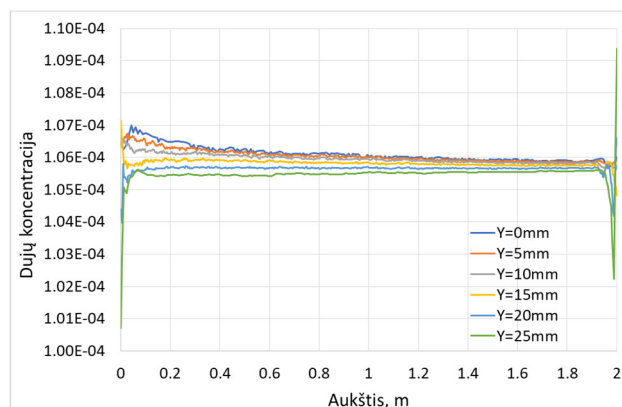
6 paveikslas. Biodujų koncentracijos kitimo priklausomybė, kai $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $Q = 10 \text{ l}/24 \text{ val.}$, pjūviuose 0, 5, 10, 15, 20 ir 25 mm nuo fotobioabsorberio centro

Kadangi priklausomybės yra tiesinės, skaičiavimai atlikti ribinėms pasirinktoms sąlygoms, t. y. biodujų srauto debitui fotobioabsorberyje 2 ir 10 l/24 val. ir dinaminiam skysčio klampumui 1,00E-3 Pa·s, 1,50E-3 Pa·s.

Matematinio modeliavimo absoliučios biodujų koncentracijos pasiskirstymo, esant nusistovėjusiam biodujų srautui (praėjus 50 s nuo stebėjimo pradžios) atskiruose pjūviuose 0, 5, 10, 15, 20 ir 25 mm nuo fotobioabsorberio centro, pateikiami 5–8 paveiksluose.



7 paveikslas. Biodujų koncentracijos kitimo priklausomybė, kai $\mu = 0,0015 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $Q = 2 \text{ l}/24 \text{ val.}$, pjūviuose 0, 5, 10, 15, 20 ir 25 mm nuo fotobioabsorberio centro



8 paveikslas. Biodujų koncentracijos kitimo priklausomybė, kai $\mu = 0,0015 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $Q = 10 \text{ l}/24 \text{ val.}$, pjūviuose 0, 5, 10, 15, 20 ir 25 mm nuo fotobioabsorberio centro

5–8 paveiksluose biodujų koncentracija reiškia biodujų mišinio koncentraciją skystyje. Tai yra standartinė „Comsol Multiphysics“ programos išvestis, reiškianti biodujų tūrio santykį su visomis kitomis mišinį sudarančiomis dalimis (bedimensinis dydis). Iš 5–8 paveiksluose pateiktų rezultatų matyti, kad biodujų mišinio koncentracija artėjant prie fotobioabsorberio sienelių mažėja. Didesnis koncentracijos kritimas fotobioabsorberio viršuje reiškia didesnę biodujų masės perdavimą į tirpalą. Būtina pažymėti, kad darbo tikslas buvo įvertinti biodujų burbuliuko

trajektoriją bei masės pernašas dujinėje-skystoje terpėje, todėl mikrobiologiniai procesai šiame modelyje nebuvo vertinti.

Skaiciuojant burbuliuko judėjimo trajektoriją skystyje, pagal Comsol koncepciją į modelį įrašomos biodujų burbuliukams būdingos vertės. Kadangi skysčio judėjimo gaunamos tiesinės trajektorijos yra neinformatyvios, apie burbuliukų judėjimo trajektorijas reikia spręsti iš 4–8 pav. veiksluose pateiktų rezultatų.

Išvados

1. Matematinio modeliavimo metu nustatyta, jog biodujų burbuliukų skystyje kilimo greitis priklauso nuo skysčio dinaminio klampumo. Modelis leido nustatyti fotobioabsorberyje tekančių biodujų burbuliukų greičio priklausomybę nuo skysčio dinaminio klampumo. Dinaminiam klampumui padidėjus 1,5 karto (nuo 0,001 iki 0,0015 Pa·s), burbuliukų kilimo greitis sumažėja nuo 0,8172 iki 0,5448 m/s. Taigi didėjant biomasės koncentracijai skystoje terpėje, biodujų sąlyčio laikas su bioterpe didėja, todėl pagerinama biodujose esančių komponentų masės pernaša.
2. Modelis leido teoriškai nustatyti biodujų koncentracijos kitimo priklausomybes nuo skysčio dinaminio klampumo. Atlikus biodujų koncentracijos pokyčio fotobioabsorberyje matematinį modeliavimą buvo nustatyta, kad santykinis biodujų kiekio burbuliuokuose mažėjimas nuo debito nepriklauso, t. y. jis išlieka vienodas visuose fotobioabsorberio pjūviuose. Nuo debito priklauso absoliuti ištirpusių skystyje biodujų dalis.
3. Įvertinus biodujų koncentracijos pasiskirstymą per visą kolonėlės skerspjūvio plotą nustatyta, kad biodujų koncentracija, artėjant prie fotobioabsorberio sienelių, mažėja. Didesnis koncentracijos kritimas fotobioabsorberio viršuje reiškia didesnę biodujų masės perdavimą į tirpalą.

Literatūra

- Aguilera, P. G., & Ortiz, F. G. (2016). Prediction of fixed-bed breakthrough curves for H₂S adsorption from biogas: Importance of axial dispersion for design. *Chemical Engineering Journal*, 289, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.075>
- Gollakota, A. R., & Kishore, N. (2017). Flow behaviour and drag coefficients of spherical bubbles in surfactant-laden Carreau model fluids. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal (PCFD)*, 18(4). <https://doi.org/10.1504/PCFD.2018.093587>

- Hadamard, J. S. (1911). Mouvement permanent lent d'une sphère liquid et visqueuse dans un liquide visqueux. *CR Hebd. Seances Acad. Sci., Paris*, 152, 1735–1738 (in French).
- Hendroko, R. S., Wahono, S. K., Wahyudi, A., Salundik, Praptiningsih, G. A., & Liwang, T. (2013). Preliminary studies on biological purification system: integrated biogas from small anaerobic digestion and natural microalgae. In *2nd Natural Pigments Conference for South East Asia (NP-SEA)*, 12–13 July 2013. Indonesia: R&D Center Universitas Ma Chung Malang.
- Li, X., Wang, W., Zhang, P., Li, J., & Chen, G. (2019). Interactions between gas–liquid mass transfer and bubble behaviours. *Royal Society Open Science*, 6(5), 190136. <https://doi.org/10.1098/rsos.190136>
- Pryor, R. W. (2009). *Multiphysics modeling using COMSOL®: a first principles approach*. Jones & Bartlett Publishers.
- Rybczynski, W. (1911). Über die fortschreitende Bewegung einer flüssigen Kugel in einem zähen Medium. *Bull. Acad. Sci. Cracovie*, 40–46.
- Vaitiekūnas, P. (2007). *Šilumos mainų matematinis modeliavimas*. Technika. <https://doi.org/10.3846/878-S>
- Wahab, Y. A., Fuad, M. F., Ghani, N. M. A., Zain, Z. M., Noh, M. M., Zawawi, M. A., & Najib, M. S. (2019, November). Image reconstruction for liquid-gas regime identification based on multiple excitation sources in electrical resistance tomography system. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/705/1/012025>
- Zaidani, M., Sassi, M., & Sanduleanu, M. (2019). Numerical investigation on the effect of surface wetting properties on gas–liquid two-phase flow in microchannel using level set method. In *ASTFE Digital Library* (pp. 1439–1444). Begel House Inc. <https://doi.org/10.1615/TFEC2019.mph.028096>

MATHEMATICAL MODELING OF BIOGAS CONCENTRATION CHANGE IN PHOTOBIOABSORBER

L. Juškaitė, A. Zagorskis

Summary

Biological methods for purifying biogas are increasingly being researched and applied worldwide. Microalgae cultures have been found to decontaminate biogas from pollutants such as carbon dioxide. The aim of this work is to evaluate theoretically changes of biogas composition in photobioabsorber with microalgae suspension. In the paper the growth rate of biogas in the photobioabsorber model based on Hadamard-Rybczynski equation was investigated. Using the software package Comsol Multiphysics, the concentration of pollutants in biogas is determined from the dynamic viscosity of biotechnology. Distribution of biogas concentration over the whole cross-section of the column was evaluated. The simulation results showed that the concentration of pollutants in biogas decreases as biogas approaches to photobioabsorber walls. The greater drop in concentration at the top of the photobioabsorber indicates a greater mass transfer of gas into the solution.

Keywords: microalgae, biogas purification, photobioabsorber, mathematical modeling.