



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

# **Hidrodinaminės koalescencijos sistemų taikymo skysčių atskyrimui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Kasparas Plungė**

Projekto autorius

**Lekt. Inga Radžiūnienė**

Vadovė

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

# **Hidrodinaminės koalescencijos sistemų taikymo skysčių atskyrimui tyrimas**

## **Baigiamasis magistro projektas**

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

---

**Kasparas Plungė**

Projekto autorius

**Lekt. Inga Radžiūnienė**

Vadovė

**Doc. Viktoras Račys**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

Kasparas Plungė

## **Hidrodinaminės koalescencijos sistemų taikymo skysčių atskyrimui tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Kasparo Plungės, baigiamasis projektas tema „Hidrodinaminės koalescencijos sistemų taikymo skysčių atskyrimui tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Plungė, Kasparas. Hidrodinaminės koalescencijos sistemų taikymo skysčių atskyrimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. Inga Radžiūnienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: koalescencija, hidrodinaminis skirtuvas, skysčių atskyrimas.

Kaunas, 2019. 47 p.

### **Santrauka**

Baigiamajame magistro darbe analizuojamas hidrodinaminis naftos produktų ir vandens atskyrimo įrenginys. Skirtuvo paskirtis yra skatinti mažesnio skersmens naftos produktų lašelių koalescenciją ir efektyviai juos sulaikyti įrenginyje.

Darbo tikslas: iširti inovatyvaus hidrodinaminio skirtuvo efektyvumą, atliekant matematinį ir fizinį skirtuvo efektyvumo įvertinimą.

Teorinėje baigiamojo darbo dalyje apžvelgiama naftos produktų išgavimo, vartojimo ir susidarancios taršos šiais produktais tendencijos. Apžvelgiami dažniausiai vartojami naftos produktų iš vandens atskyrimo metodai, plačiai apžvelgiamos sukauptos žinios apie hidrodinaminius įrenginius, jų tipus, naudojimo sąlygas ir modifikacijas.

Metodinėje baigiamojo darbo dalyje pateikiamos pasirinktos metodikos formulės, aprašoma matematiniam modeliavimui naudota simuliacijos programa SolidWorks SDK (angl. Student Design Kit) (2018-2019 m., Dassault Systemes) ir CFD (angl. Computational Fluid Dynamics) modelis. Apibūdinamos fizinio hidrodinaminio skirtuvo modelio sudedamosios dalys ir testavimo eiga, pateikiama principinė skirtuvo schema.

Rezultatuose aptariami matematinio modeliavimo metu gauti duomenys lyginant skirtingus skirtuvo konstrukcijų parametrus. Fizinis modeliavimas atliekamas atsižvelgus į matematinio modeliavimo metu gautus duomenis. Palyginami matematinio ir fizinio modeliavimo metu gauti rezultatai, nustatomas modelio tikslumas pagal pasiektą įrenginio lašelių atskyrimo efektyvumą, taip pat įvertinami parametrai kurie turi įtakos atskyrimo efektyvumui

Plungė, Kasparas. Investigation of Application of the Hydrodynamic Coalescence Systems for the Separation of Liquids. Master's Final Degree Project / supervisor lect. Inga Radžiūnienė, Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: coalescence, hydrodynamic separator, liquid separation.

Kaunas, 2019. 47.

### **Summary**

The final report for Master's degree focuses on the analysis of an hydrodynamic oil/water separator. The purpose of the separator is to promote coalescence of oil droplets of smaller diameter and to retain them effectively in the device.

Aim of the work: to investigate the efficiency of the innovative hydrodynamic separator by performing mathematical and physical evaluation of the separator.

The theoretical part of the thesis examines trends in oil product extraction, consumption and pollution from these products. The most commonly used methods for separating oil products from water are reviewed. The accumulated knowledge about hydrodynamic devices are widely reviewed, their types, conditions of use and modifications.

The methodical part section presents the equations used to calculate the required hydrodynamic device parameters and a description of mathematical CFD modeling, provided by SolidWorks SDK (2018 – 2019, Dassault Systemes). The components of the physical hydrodynamic separator model and the test run are described, with a schematic diagram of the separator.

The results discuss data obtained during mathematical modeling by comparing different parameters of the separator constructions. Physical modeling is based on data obtained during mathematical modeling. Compare the results of mathematical and physical simulation, determine the accuracy of the model based on the achieved drops separation efficiency of the device, as well as evaluate the parameters that influence the separation efficiency.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Santrumpų sąrašas</b> .....	<b>9</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Literatūros apžvalga</b> .....	<b>11</b>
1.1. Nafta .....	11
1.2. Naftos produktai .....	11
1.3. Naftos produktų naudojimo tendencijos.....	12
1.4. Vandens tarša naftos produktais .....	13
1.4.1. Naftos gavyba ir perdirbimas .....	13
1.4.2. Naftos produktų transportavimas .....	13
1.5. Populiariausi naftos atskyrimo ir valymo metodai .....	14
1.5.1. Naftos ir vandens atskyrimas naudojant tinklelius ir membranas .....	15
1.5.2. Naftos ir vandens gravitacinis atskyrimas naudojant oleofilines medžiagas .....	15
1.6. Hidrodinaminės sistemos.....	18
<b>2. Tyrimų metodika</b> .....	<b>22</b>
2.1. Hidrodinaminiu principu veikiančio skirtuvo komponentų modeliavimas .....	22
2.2. Matematinis srautų modeliavimas .....	23
2.3. Hidrodinaminiu principu veikiančio skirtuvo matematinis modeliavimas .....	25
2.4. Fizinis modeliavimas.....	26
2.4.1. Skirtuvo testavimo įranga.....	27
2.4.2. Naftos produktų koncentracijos nustatymas.....	28
<b>3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas</b> .....	<b>29</b>
3.1. Matematinio srautų modeliavimo rezultatai .....	29
3.1.1. 0,75 l/s našumo įrenginio modeliavimas .....	29
3.1.2. 1,5 l/s našumo įrenginio modeliavimas .....	31
3.1.3. 3 l/s našumo įrenginio modeliavimas .....	33
3.1.4. 6 l/s našumo įrenginio modeliavimas .....	35
3.1.5. 10 l/s našumo įrenginio modeliavimas .....	37
3.1.6. 15 l/s našumo įrenginio modeliavimas .....	39
3.2. Skirtingų konstrukcijų skirtuvų palyginimas.....	41
3.3. Fizinio srautų modeliavimo rezultatai .....	42
3.4. Modelio verifikavimas.....	43
<b>Išvados</b> .....	<b>44</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>45</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Suvartojamas kuro kiekis transportui ir kitiems procesams per dieną [6].....	12
<b>2 lentelė.</b> Lašelio kilimo laiko priklausomybė nuo lašelio skersmens [16] .....	16
<b>3 lentelė.</b> Vandens tankis ir klampa esant skirtingoms temperatūroms [16].....	22
<b>4 lentelė.</b> Matematinio srautų modeliavimo metu naudojami pastovūs sistemos parametrai .....	26
<b>5 lentelė.</b> Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 0,75 l/s srautui .....	30
<b>6 lentelė.</b> Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 1,5 l/s srautui .....	32
<b>7 lentelė.</b> Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 3 l/s srautui .....	34
<b>8 lentelė.</b> Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 6 l/s srautui .....	36
<b>9 lentelė.</b> Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 10 l/s srautui .....	38
<b>10 lentelė.</b> Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 15 l/s srautui .....	40

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Automobilių kiekis 1000 gyventojų priklausomai nuo šalies BVP [6].....	13
<b>2 pav.</b> Publikuotų straipsnių skaičius įvedus į <i>Web of Science</i> paieškos sistemą raktinius žodžius „oil/water separation“ [9] .....	14
<b>3 pav.</b> Naftos produktų lašelių kilimo greitis pagal lašelių skersmenį [16].....	16
<b>4 pav.</b> Naftos ir nuosėdų šalinimo įrenginio gofruotų plokščių pagalba schema [16].....	17
<b>5 pav.</b> Koalescencijos procesas jungiantis lašeliams [16].....	17
<b>6 pav.</b> Adatinių koalescencinių blokų sistema ir pro jį tekančio naftuoto vandens atskyrimo procesas [24] .....	18
<b>7 pav.</b> Hidrodinaminio skirtuvo principinė schema [21] .....	19
<b>8 pav.</b> Hidrodinaminis skirtuvas su flotacijos įranga [25] .....	19
9 pav. Elektro-hidrodinaminis skirtuvas [27].....	20
<b>10 pav.</b> Testuojamo hidrodinaminio įrenginio modelis: a) išbėgimo modulis su cilindru, b) išbėgimo modulis su kūgiu.....	26
<b>11 pav.</b> Hidrodinaminio skirtuvo schema: 1 – įtekėjimo atvamzdis, 2 – hidrodinaminis įtekėjimo modulis, 3 – atsitrenkimo plokštė, 4 – pertvara, 5 – įtekėjimo atvamzdis į ištekėjimo modulį, 6 – hidrodinaminis ištekėjimo modulis, 7 – vidinis modulio cilindras, 8 – atsiskyrusio lengvesnio skysčio gaudyklė, 9 – ištekėjimo iš modulio anga, 10 – ištekėjimo atvamzdis, 11 – hidrodinaminis skirtuvas .....	27
<b>12 pav.</b> Išbandymo stendo schema: 1 – vandens tiekimo latakas, 2 – lengvo skysčio padavimas, 3 – lengvo skysčio ir vandens sumaišymo talpa, 4 – tekėjimo vamzdis d160, 5 – hidrodinaminis skirtuvas, 6 – mėginių ėmimo atvamzdis [21] .....	28
<b>13 pav.</b> Lašelių atskyrimo efektyvumo priklausomybė nuo lašelių dydžio ir hidrodinaminio skirtuvo konstrukcijos, esant 0,75 l/s srautui.....	29
<b>14 pav.</b> 0,75 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu .....	30
<b>15 pav.</b> Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 1,5 l/s srautui .....	31
<b>16 pav.</b> 1,5 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu .....	32
<b>17 pav.</b> Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 3 l/s srautui .....	33
<b>18 pav.</b> 3 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu .....	34
<b>19 pav.</b> Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 6 l/s srautui .....	35
<b>20 pav.</b> 6 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu .....	36
<b>21 pav.</b> Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 10 l/s srautui .....	37
<b>22 pav.</b> 10 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu .....	38
<b>23 pav.</b> Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 15 l/s srautui .....	39
<b>24 pav.</b> 15 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu .....	40
<b>25 pav.</b> Lašelių sulaikymo efektyvumas esant skirtingam srautui.....	41
<b>26 pav.</b> Hidrodinaminis naftos skirtuvas.....	42
<b>27 pav.</b> Skirtuvo bandymo stendas.....	43



## Santrumpų sąrašas

### Santrumpos:

SDK – Studentams skirta projektavimo programinė įranga (angl. Student Design Kit)

CFD – Skaičiuojamoji skysčių dinamika (angl. Computational Fluid Dynamics);

CAD – Dizainas sukurtas kompiuterio pagalba (angl. Computer Aided Design);

DC – Dujų chromatografija.

## Įvadas

Didėjant žmonių populiacijai, labai intensyviai yra skatinami urbanistikos procesai, kurie lemia miestų plėtimąsi, statybų intensyvumą ir žaliųjų zonų naikinimą. Populiacijos augimas daro įtaką sparčiai besivystančiai automobilių rinkai, kuri skatina didesnę naftos ir jos produktų išgavimą ir naudojimą. Stengiantis tausoti neatsinaujinančius išteklius yra kuriami nauji produktai, mašinos, jėgainės, kurios naudoja atsinaujinančius išteklius, taip stengiantis patenkinti vartojimo poreikį, tačiau kol šios technologijos šie produktai yra naujovė ir finansiškai brangios, pirmenybė yra teikiama įprastiems procesams ir produktams.

Išgaunant naftą, ją perdurbant ir naudojant yra susiduriama su neigiamomis pasekmėmis – išsiliejamais ir patekimu į aplinką. Dažniausia situacija po naftos produktų išsiliejimo ir patekimo į aplinką yra susimaišymas su vandeniu. Lengvesni naftos produktai dėl tankio skirtumo palaispniui iškyla į paviršių, tačiau jų kilimo greitis ir laikas tiesiogiai priklauso nuo naftos produktų lašelių dydžio. Kuo lašeliai yra didesni, tuo iškilimo ir atskyrimo laikas yra trumpesnis. Lašelių sustambinimui dažniausiai yra pasitelkiami specialūs įrenginiai, kurie fiziškai skatina lašelius jungtis į didesnes sistemas. Pagrindiniuose tokio tipo įrenginiuose yra naudojami koalescencinių filtrų paketai, plokščių paketai arba specialios konstrukcijos hidrociklonai, kurie atitekančio srauto energijos dėka sustambina mažus naftos produktų lašelius ir priverčia juos iškilti į paviršių. Hidrodinaminio srauto dėka veikiančys įrenginiai savyje neturi galinčių susidėvėti detalių ir pasiekia aukštą atskyrimo laipsnį.

**Tyrimo hipotezė:** Skirtingos konstrukcijos naftos produktų atskyrimo įrenginių su cilindrinio ir kūginiu ištekėjimo moduliu efektyvumas skiriasi dėl skirtingų juose susidarantių sąlygų.

**Darbo tikslas:** ištirti inovatyvaus hidrodinaminio skirtuvo efektyvumą, taikant matematinio ir fizinio modeliavimo metodus.

### Darbo uždaviniai:

1. atlikti mokslinės literatūros, aprašančios hidrodinamikos procesų pritaikymą koalescencijos efektyvumo didinimui, analizę;
2. atlikti matematinį srautų modeliavimą hidrodinaminio principu veikiančiuose atskyrimo įrenginiuose esant skirtingai įrenginio konstrukcijai ir srautams, bei įvertinti atskyrimo efektyvumą;
3. remiantis matematinio modeliavimo rezultatais sukonstruoti ir išbandyti hidrodinaminį naftos produktų atskyrimo įrenginį.

## **1. Literatūros apžvalga**

### **1.1. Nafta**

Nafta yra natūraliai susidaręs riebus, degus skystis, sudarytas iš angliavandenilių ir retkarčiais randamas versmėse ar baseinuose, bet dažniausiai išgaunamas iš žemės gelmių gręžiniais. Neapdirbta ir nerafinuota nafta yra vadinama žalia nafta. Fizinės savybės ir cheminė naftos sudėtis, priklausomai nuo išgavimo šaltinio, labai skiriasi. Išgaunama iš žemės nafta nėra skaidri, joje yra daug lengvų frakcijų, pav., benzino, jos spalva gali būti iki juodos, tokios, kaip yra matoma asfalto sudėtyje. Didžioji dalis naftos būna juodos spalvos, tačiau yra tokių atmainų, kurios yra gintarinės, rudos ar raudonos spalvos, kurios praleidžia saulės šviesą ir spinduliuoja žalsvą atspindį dėl fluorescencinių reiškinių. Sąlyginis žalios naftos tankis svyruoja nuo 0,82 iki 0,95 g/cm<sup>3</sup>. Angliavandeniliai sudaro maždaug nuo 50–90 % neapdirbtos naftos, o likusią dalį daugiausia sudaro organiniai junginiai, tokie kaip O, N, S ir organo-metalai [1, 2, 3].

### **1.2. Naftos produktai**

Išgauta žalia nafta yra naudojama pramonėje ją apdirbant ir išgaunant naujus produktus. Pagrindinis procesas, kurio metu susidaro nauji junginiai yra vadinamas rektifikacija arba frakcinis distiliavimas. Šio proceso metu, dėl skirtingų garavimo ir kondensacijos temperatūrų yra išgaunami dujiniai angliavandeniniai, benzinai, žibalai, dyzelinis kuras, tepalai ir alyvos, mazutas, gudronas ir siera.

Suskystintos dujos – propano ir butano dujų mišinys kuris gali būti suskystinamas didesniame slėgyje aplinkos oro temperatūroje. Suskystintos dujos yra naudojamos kaip kuras, bet taip pat gali būti svarbi naftos chemijos pramonės žaliava [4].

Benzinas ir pirminis benzinai – sudėtingas įvairių komponentų mišinys susidedantis iš naftos perdirbimo gamykloje esančių žemos virimo temperatūros frakcijų. Benzinai naudojami kaip transporto kuras. Pirminio benzino sudėtis taip pat susideda iš žemos virimo temperatūros frakcijų, bet nėra naudojamas kaip kuras, o kaip chemijos pramonės žaliava [4].

Reaktyvinis kuras ir žibalai – aukštesnės virimo temperatūros naftos frakcijų mišinys. Reaktyvinis kuras yra aukštos kokybės degalai ir naudojami reaktyviniuose varikliuose. Žibalai naudojami kaip bendrosios paskirties kuras [4].

Dyzelinai ir šildymo alyva – dyzeliniai, kaip ir benzinai, yra aukštesnės virimo temperatūros kuras plačiai naudojamas transportavimo sektoriuje ir yra griežtai kontroliuojamas. Šildymo alyvos sudėtis panaši į dyzelinio kuro, bet naudojama tik šildymo katiluose ir krosnyse [4].

Mazutas – sudarytas iš sunkiausių žaliavinės naftos frakcijų ir liekanų. Mazutas naudojamas kaip kuras įvairiuose elektriniuose, laivų varikliuose ir t.t [4].

Naftos perdirbimo gamyklos taip pat gali gaminti tepimo alyvas, vaškus, bitumą asfalto gamybai ir išgauti sierą. Parduodant iš naftos išgautus produktus galutiniam vartotojui, kiekvienas iš naftos perdirbimo gamyklos produktų turi atitikti tam tikras specifikacijas susijusias su produktu veikimu, poveikiu aplinkai, jų saugumu ir tvarkymu [4].

Benzinas yra vienas labiausiai ir plačiausiai naudojamų naftos produktų pasaulyje. Jungtinėse Amerikos Valstijose per 2016 metus vidutiniškai buvo suvartota 1480 mln. l naftos produktų per dieną, o tai sudaro 47 % sunaudojamo kuro JAV [5].

Dyzelinis kuras naudojamas automobiliuose, taip pat eksploatuojant galingą techniką, autobusus, traktorius, laivus, traukinius ir elektros generatorius. Krosnių kuras dažniausiai naudojamas boileriuose ir krosnyse, pramonėje ir gaminant elektros energiją. Per 2016 metus šio tipo kuro buvo sunaudota apie 620 mln. litrų per dieną arba 20 % sunaudojamo kuro JAV [5].

Dujiniai angliavandeniliai yra treči pagal labiausiai suvartojamą kurą JAV. Į šią kategoriją įeina tokios dujos kaip propanas, etanas, butanas ir kiti angliavandeniliai, kurie yra išgaunami natūralių dujų išgavimo vietose ir gamyklose. Suvartotas dujų kiekis per 2016 metus siekė 397 mln. l. per dieną [5].

Lėktuvams skirtas reaktyvinis kuras yra ketvirtas pagal suvartojimo kiekį JAV. Šio kuro sąnaudos siekia 255 mln. litrų per dieną [5].

Europoje gaminant elektrą yra atsisakoma iškastinio kuro, ypač naftos, o esančios gamyklos veikia ir lieka tik kaip rezerviniai statiniai. 2015 metais Europoje suvartotas naftos produktų kiekis elektros energijai gaminti buvo ketvirčiu mažesnis, negu 1990 metais [6].

Per dieną visame pasaulyje yra sunaudojama 15,83 mlrd. l. Daugiausiai kuro ir naftos produktų suvartoja tokios šalys kaip JAV, Europos Sąjunga, Kinija, Indija (žr. 1 lentelė).

**1 lentelė.** Suvartojamas kuro kiekis transportui ir kitiems procesams per dieną [6]

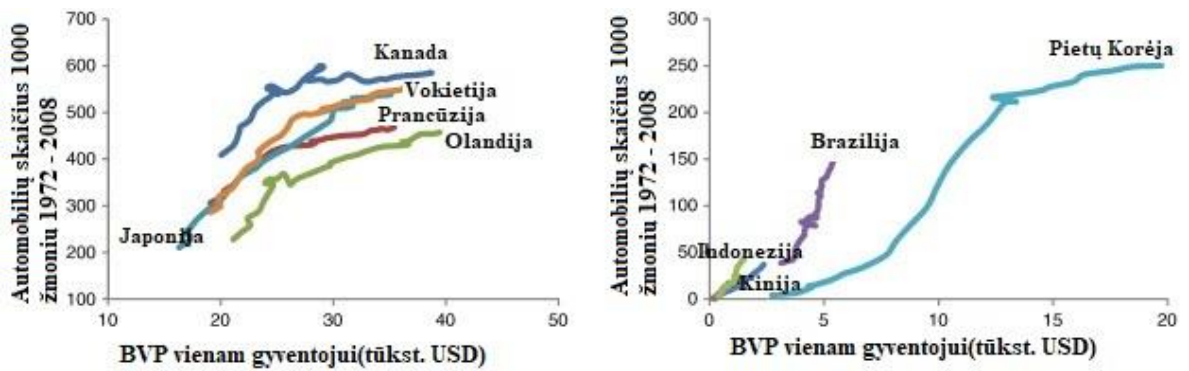
Šalis	Suvartojamas kiekis, %	Suvartojamas kiekis, mln. l/d
Jungtinės Amerikos Valstijos	19,96	3160
Europos Sąjunga	15,0	2384
Kinija	12,4	1969
Indija	4,5	713
Japonija	4,4	635
Rusija	3,15	508

### 1.3. Naftos produktų naudojimo tendencijos

Transportavimo sektorius yra priskiriamas prie didžiausių energijos ir naftos produktų vartotojų visame pasaulyje. Šis sektorius gali būti padalintas į keletą grupių: kelių transportas, aviacija, geležinkeliai, vandens transportas ir tarptautinis jūrų transportas.

Amerikos mokslininkų publikuotame straipsnyje apžvelgiamas laikotarpis nuo 1971 iki 2008 metų [6]. Ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacijos (EBPO) šalyse energijos suvartojimas transporto sektoriuje padidėjo daugiau nei dvigubai. Šalyse, kurios nėra EBPO narės, energijos suvartojimas taip pat padvigubėjo. Naftos produktai sudaro 93 % suvartojamos energijos transporto sektoriuje, kelių transporto sunaudotas kuro kiekis siekia 32,7 mln. barelių ekv. (mbe), 3,08 mbe per 2008 metus suvartota aviacijos sektoriuje.

Kelių transporto suvartojamas energijos kiekis EBPO šalyse padvigubėjo ir pakilo nuo 591 mbe iki 1132 mbe per laikotarpį, kuris apima 1971–2008 m. Šalyse, kurios nėra EBPO narės, naftos suvartojimas per šį laikotarpį išaugo nuo 148 iki 687 mbe. Vertinant didėjimo tendencijas, buvo apžvelgtas laikotarpis iki 2020 metų ir sudarytas grafikas, kuris remiasi ekonominio indikatorius, bendro vidaus produkto (BVP) dydžiu ir transporto priemonių skaičiumi skirtu 1000 gyventojų.



1 pav. Automobilių kiekis 1000 gyventojų priklausomai nuo šalies BVP [6]

Kintant gyventojų pajamų kiekiui, daugėja įsigyjamų automobilių. Šis kiekis taip pat didėja palaipsniui, kol pajamų lygis yra mažas, tuomet pradeda augti sparčiau ir galutinai susinormalizuoja pasiekus reikiamą automobilių kiekį tūkstančiui gyventojų. Labiau išsivysčiusiose ir turinčios geresnius ekonominius rodiklius šalyse, didėjimo tendencija yra įmanoma, tačiau nežymiai, o žvelgiant į šalis, kuriose BVP yra žemesnis, automobilių skaičius didėjimas yra gana spartus, o nuo to priklauso ir suvartojamų naftos produkto kiekis. Pagal atliktus mokslininkų tyrimus prognozuojama, kad per laikotarpį nuo 2009 iki 2020 metų automobilių kiekis išaugs 1,5 karto t. y., nuo 855 mln. iki 1,253 mlrd. [5].

#### 1.4. Vandens tarša naftos produktais

Neretai naftos išgavimo ir perdirbimo procesų metu, taip pat automobilių ir kitų transporto rūšių eksploatacijos metu įvyksta avarijų, kurių metu į aplinką patenka dideli naftos kiekiai. Didžiausi ir pagrindiniai taršos šaltiniai yra natūralių dujų išgavimas iš vandenyno dugno, dugno gręžimas, nuotėkis atsirandantis naftos išgavimo ir transportavimo metu ant žemės ir jūrose, šalinant balasto vandenį iš naftos produktus pervežančių tankerių, avarinės situacijos, kelių ir oro transportas, naftos produktų atliekų tvarkymo metu ir liūčių metu nuo asfaltuotų paviršių nuplaunami naftos produktai [7].

Natūraliai dėl tankio skirtumo didžioji dalis naftos produktų, patekusių į vandenį, atsiskiria ir sudaro naftos sluoksnį ant vandens paviršiaus, tačiau taip išplaukia ne visas naftos, esančios vandenyje, kiekis. Mažesnės koncentracijos ir mažesnio tūrio naftos produktams patekus į vandenį, ant jo paviršiaus susidaro spalvota plėvelė, iš kurios galima lengvai spręsti apie egzistuojančią taršą.

##### 1.4.1. Naftos gavyba ir perdirbimas

Naftos pramonėje išgaunant naftos produktus iš žemės gelmių neretai pasitaiko, kad išgaunama žaliavinė nafta yra susimaišiusi su vandeniu. Tolimesniuose perdirbimo procesuose vanduo turi būti atskiriamas, o į perdirbimo įrenginius tiekiamos naftos sudėtyje turi nebūti vandens.

##### 1.4.2. Naftos produktų transportavimas

Nafta yra išgaunama tiek iš jūrose esančių išgavimo platformų, tiek ir sausumoje. Tolimesnis etapas – šios išgaautos medžiagos transportavimas. Transportavimui yra naudojami įvairūs būdai, kurie priklauso nuo ekonominių ir geografinių faktorių. Jungtinėse Amerikos Valstijose apie 70 % žalios naftos yra transportuojama vamzdynais, 22 % laivais, o likusi dalis keliais ir geležinkeliu [8].

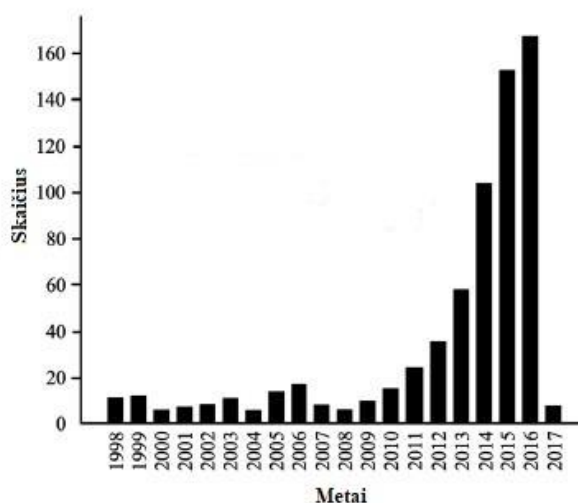
Laivai yra pagrindinė naftos transportavimo rūšis. Transportavimo laivais sistema yra viena iš labiausiai teršiančių sistemų, susijusių su naftos produktų patekimu į aplinką. Tanklaiviuose esantys rezervuarai, pagal technologiją ir struktūrą, visuomet turi būti pilni t. y, tuo metu, kai tanklaivis išpumpuoja jame laikomą naftą, rezervuarai turi būti užpildyti vandeniu, kad laivas neapvirstų. Kartojant procesą ir pakeičiant laive esantį vandenį naftos produktais, išpumpuojamas vanduo į aplinką patenką su naftos produktų likučiais. Tai ir lemia taršos atsiradimą. Transportavimo metu kartais įvyksta tanklaivių avarijos, kurių metu į aplinką išteka ir visas jame laikomas naftos produktų kiekis. Tai gali sukelti katastrofą gamtai ir visai jos aplinkai [9]. Naftos išsiliejimo padariniams šalinti jūros zonose naudojami cheminiai [10], mechaniniai [11 – 13] ir biologiniai metodai [14]. Šių metodų trūkumai yra didelė kaina ir mažas naftos pašalinimo iš vandens lygis.

### 1.5. Populiariausi naftos atskyrimo ir valymo metodai

Naftos produktams atskirti, valyti ir separuoti dažniausiai yra naudojamas gravitacinis separavimas, centrifūginis separavimas, elektrinis dehidratacinis separavimas, cheminis apdorojimas ir koalescencinis (patobulintas gravitacinis) separavimas [15]. Centrifūginio ir elektrinės dehidratacijos separavimo procesai reikalauja papildomos įrangos, kuri padidina energijos suvartojimą. Cheminis apdorojimas, kuris priklauso nuo cheminių medžiagų naudojimo, lengvai sukelia antrinę taršą ir tokios įrangos kaina yra gerokai didesnė. Gofruotos plokštės ir kitos koalescenciją skatinančios priemonės naftos ir vandens atskyrimo leidžia su efektyvinti gravitacinį separavimą [16].

Paskutiniu metu, esant avarinėms situacijoms, plačiai yra naudojamos poringos medžiagos, tokios kaip kempinės, putos ir tekstilė, skirtos sugerti išsiliejusią naftą, tačiau atlikdamos šį veiksmą, jos ne tik adsorbuoja naftos produktus, tačiau sugeria ir vandenį taip sumažindamos adsorbento efektyvumą. Po adsorbicijos proceso, dėl sunkaus ir sudėtingo tolimesnio apdorojimo ir pakartotinio panaudojimo šios medžiagos yra sudeginamos ir užkasamos. Deginant susidariusias atliekas yra sukeliamas antrinė tarša dėl išmetamų dujų ir žemės taršos [9].

Naujų metodų, kurie užtikrintų įrenginių ekonomiškumą, draugiškumą aplinkai, perdirbimą ir pakartotinį medžiagų panaudojimą, taip pat lengvą ir efektyvų naftos ir vandens atskyrimo technologijų panaudojimą, paieška ir plėtojimas išlieka aktualia problema. Per pastaruosius 20 metų straipsnių, kuriuose nagrinėjami naftos produktai ir vandens atskyrimas, gerokai padaugėjo.



2 pav. Publikuotų straipsnių skaičius įvedus į *Web of Science* paieškos sistemą raktinius žodžius „oil/water separation“ [9]

### **1.5.1. Naftos ir vandens atskyrimas naudojant tinklelius ir membranas**

Per pastarąjį dešimtmetį tyrimų, susijusių su tinklelių ir membranų, kurios pasižymi geromis vandens pralaidumo savybėmis, taip pat padaugėjo. Dėl jų paprastumo ir mažos kainos ir pritaikymo platumo smarkiai išpopuliarėjo pramonėje [9].

Gaminant naftos ir vandens atskyrimo tinklelį, austas metalinis laidas yra paveikiamas cheminėmis medžiagomis, kurios suteikia paviršiui geresnių drėkinimo savybių. Kai kurių tyrimų pagrindu yra teigiama, jog tam, kad tinklelis funkcionuotų tinkamai, jo paviršius turi būti hidrofobiškas. Tinklelio efektyvumas ir atskyrimo geba taip pat priklauso nuo kontaktų kampo. Pagaminti tinklelį, kuris gerai atskirtų naftą/vandenį reikalinga taip, kad bent vienas kontaktinis kampas būtų ne mažiau nei  $160^\circ$  [9].

Daugelis tinklelių yra hidrofilinio tipo ir praleidžia pro save vandenį ir yra vadinami selektyviais vandens tinkleliais. Kito tipo tinkleliai yra apibūdinami kaip oleofiliniai ir praleidžia naftos produktus ir vadinami selektyviais naftos tinkleliais [9].

Tinklelio porų dydžiui esant mažiau kaip  $1\mu\text{m}$ , jis yra vadinamas membrana. Membranos veikimo principas yra toks pat kaip ir tinklelio.

Apibendrinant tinklelių ir membranų privalumus ir lyginant juos su kitais taikomais metodais, tinkleliai paprastai gali išvalyti didesnę kiekį naftuoto vandens per tam tikrą laiką, negu membranos. Dėl mažesnių porų dydžio membranos geba atskirti naftos ir vandens emulsijas, o tinklelis tik naftos lašelius, kurie yra didesni nei tinklelio angų dydis. Privalumas naudojant tinklelius ir membranas yra jų pigumas, reikalingas žemas skysčio slėgis. Šios sistemos trūkumai yra tai, kad tinklelių porų dydis ir srauto slėgis yra mažesnis negu membranose, dėl ko sumažėja atskyrimo proceso efektyvumas [9].

### **1.5.2. Naftos ir vandens gravitacinis atskyrimas naudojant oleofilines medžiagas**

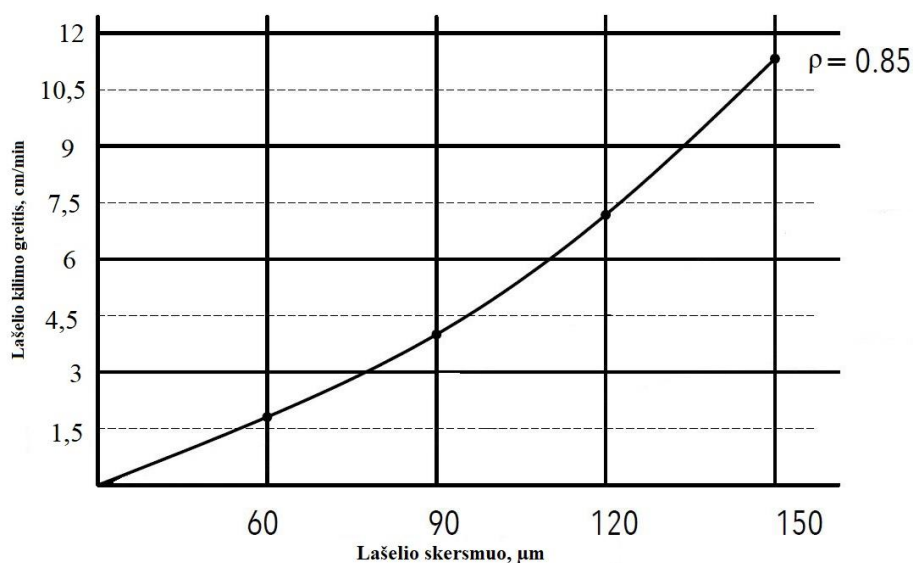
Atskiriant naftos produktus iš vandens taikant gravitacinio atskyrimo metodus yra skatinama naftos produktų koalescencija. Koalescencija yra pagrindinis mažesnio dydžio lašelių jungimosi į didesnius lašelius, procesas [17].

Taikant gravitacinio atskyrimo metodus yra naudojamos oleofilinės medžiagos, prie kurių prikimba ir yra sulaikomi maži naftos produktų lašeliai, kurie jungdamiesi į didesnius lašelius greičiau iškyla į paviršių. Remiantis Stokso dėsnio, kuris yra aprašytas metodinėje dalyje, tarp lašelio dydžio ir jo iškilimo greičio yra kvadratinė priklausomybė dėl lašelio tankio ir dinaminės klampos parametrų. 2 lentelėje pateikiami naftos produktų lašelių skersmenys ir lašelių kilimo trukmė parodanti kiek laiko užtrunka tam tikro dydžio lašeliui iškilti 10 cm [16].

**2 lentelė.** Lašelio kilimo laiko priklausomybė nuo lašelio skersmens [16]

Lašelio skersmuo, $\mu\text{m}$	Lašelio kilimo laikas ( $\rho=0,85 \text{ g/cm}^3$ ), h:min:s
300	0:0:12
150	0:0:42
125	0:1:0
90	0:1:54
60	0:04:12
50	0:06:18
40	0:09:36
30	0:17:24
20	0:38:46
15	1:08:54
10	2:35:02
5	10:02:09
1	258:23:53

Esant kuo mažesniai skersmeniui, lašelių iškilimo laikas ilgėja.  $1\mu\text{m}$  skersmens lašelis  $10 \text{ cm}$  atstumą kyla  $258$  valandas, o lyginant su  $300 \mu\text{m}$  skersmens lašeliu  $77520$  kartus lėčiau.



**3 pav.** Naftos produktų lašelių kilimo greitis pagal lašelių skersmenį [16]

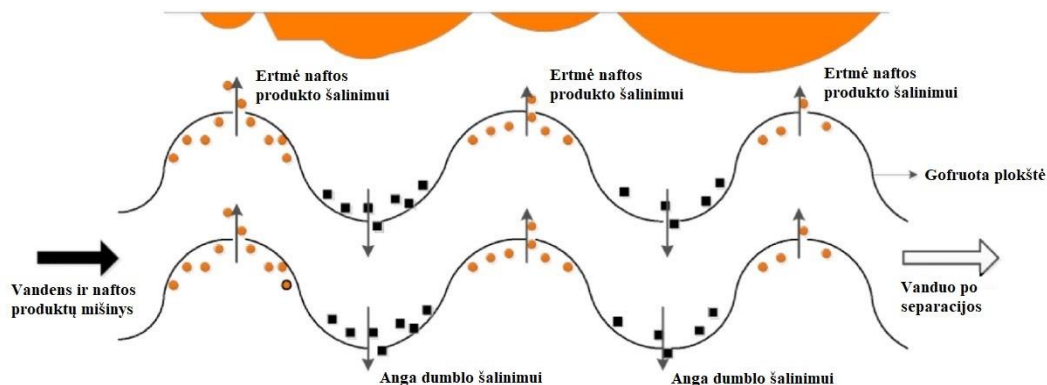
$60 \mu\text{m}$  skersmens naftos produktų lašeliai vandenyje, esant  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  temperatūrai kyla apie  $1,75 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , o  $120 \mu\text{m}$  dydžio lašeliai tokiomis pat sąlygomis kyla  $7 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Tai įrodo, kad padidėjus lašelių dydžiui dvigubai, jų kilimo greitis pasikeitė 4 kartus.

Separavime dažnai yra naudojama kelių tipų ir formų oleofilinės medžiagos. Dažniausiai tai yra gofruotos plokštės arba adatiniai koalescenciniai moduliai kurie jungiasi tarpusavyje taip sudarydami kuo didesnę paviršiaus plotą [16].

Gofruotos plokštės yra plačiai naudojama medžiaga naftos produktų skirtuvuose atskiriant naftos ir vandens mišinį. Plokščių sistemą sudaro viena ant kitos sumontuotos, paliekant  $6 \text{ mm}$  dydžio plyšį,



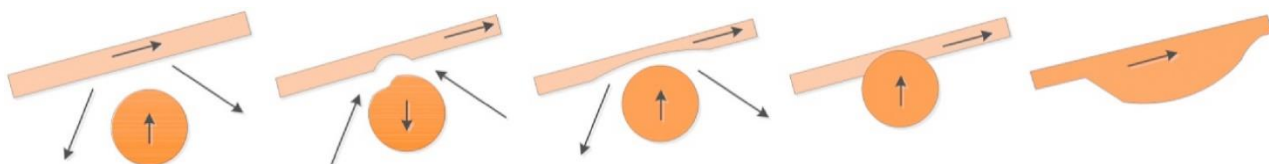
pro kurį prateka atskiriamas skystis. Srautui pratekant per sistemą, dėl didelio iš oleofilinės medžiagos pagamintų plokščių paviršiaus ploto ir pulsuojančio srauto greičio, atsirandančio dėl atstumo tarp plokščių kitimo, naftos produktų lašeliai prikimba prie plokštės. Kaupiantis šių lašelių kiekiui jie yra skatinami susidurti ir sudaryti didesnius junginius, kurie lengviau ir greičiau išplaukia į paviršių pro plokštės esančias angas. Dažniausiai su atitekančiu srautu patenka ir kietos priemaišos, kurios dėl gravitacinių jėgų nusėda ant plokščių bangų įdubų ir per angas nušliaužia žemyn (žr. 4 pav.). Tokio tipo įrenginiai yra efektyvūs, nesukeliantys jokios papildomos taršos, sąlyginai pigūs, tačiau reikalauja gana daug priežiūros, kadangi didelė dalis nusėdančių medžiagų kaupiasi ant plokščių, taip mažinant separavimo efektyvumą [16].



4 pav. Naftos ir nuosėdų šalinimo įrenginio gofruotų plokščių pagalba schema [16]

Naudojant tokio tipo įrangą ir technologiją yra svarbūs keli aspektai. Vienas iš pagrindinių yra srauto greitis. Inercinės jėgos, kurios yra ribojamos dėl greičio, yra svarbiausias faktorius lemiantis lašelių susidūrimą ir koalescenciją. Pritraukimo jėga, kuri taip pat yra ribojama dėl greičio, leidžia didesniems lašams judėti plokštės paviršiumi [17]. Didėjant srauto greičiui, lašelių susidūrimas dėl inercinių jėgų didėja, tačiau separacijos efektyvumas mažėja. Atlikus nemažai mokslinių tyrimų, nustatyta, kad tokio tipo įrenginiai veikia tik esant tam tikram srauto greičiui, kuris yra proporcingas skirtuvo dydžiui [16]. Serbijos mokslininkai tyrė naftos produktų koalescenciją taikant poliuretaniinį filtrą ir nustatė kritinius srauto greičius. Tyrimo rezultatai parodė, kad esant srauto greičiui mažesniai nei kritinė vertė, rezultatai įrenginio išėjime pasikeitė nestipriai, tačiau srauto greičiui padidėjus ir viršijus kritinę reikšmę, naftos produktų koncentracija išėjime stipriai padidėjo [17]. Vokietijos mokslininkai ištyrė koalescencijos separavimo charakteristikas naftos lašelių, kurių dydis nuo 2-12  $\mu\text{m}$  ir pastebėjo, kad didėjant teršalų ir vandens mišinio srauto greičiui, koalescencinės separavimo savybės sumažėjo labai stipriai [18]. Iš to galima daryti išvadą, kad ir lašelių dydis turi įtakos koalescencijai.

Pradinė naftos koncentracija taip pat turi įtakos atskyrimo efektyvumui. Yra daromos kelios prielaidos susijusios su naftos produktų koncentracijos ir koalescencinės medžiagos išdėstymu. Atliekant tyrimus, buvo nustatyta, kad didesnė naftos koncentracija lemia geresnį dviejų skysčių atskyrimą [14].

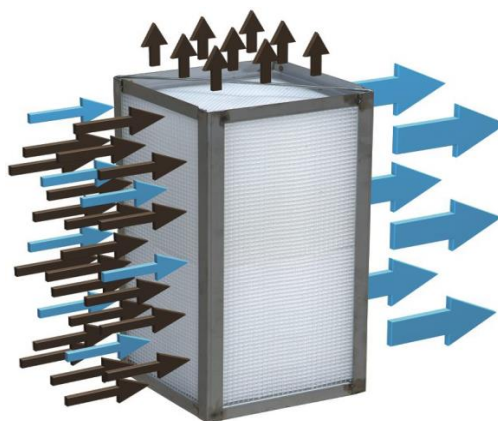


5 pav. Koalescencijos procesas jungiantis lašeliams [16]

Kita plačiai naudojama oleofilinė medžiaga yra adatiniai koalescenciniai paketai. Šie paketai yra sudaryti iš tarpusavyje sujungtų plokščių, kuriuose tarpas tarp viena kitos yra  $<6$  mm. Dėl savo specifinės formos paketų tūrio vienetu yra iki 450 ploto vienetų (pav.,  $450\text{m}^2/\text{m}^3$ ), lyginant su gofruotų plokščių paviršiaus plotu, kuris yra lygus 175 ploto vienetų tūrio vienetu, adatinių koalescencinių blokų paviršiaus plotas yra 2,5 karto didesnis [23].

Adatinių blokų sąveika su naftos ir vandens mišiniu yra pagrįstas koalescencinių naftos savybių skatinimu ir sudarant didesnius naftos produktų lašus (žr. 6 pav.). Šio tipo sistemos yra skirtos atskirti lašus, kurių skersmuo yra nuo  $20\ \mu\text{m}$ .

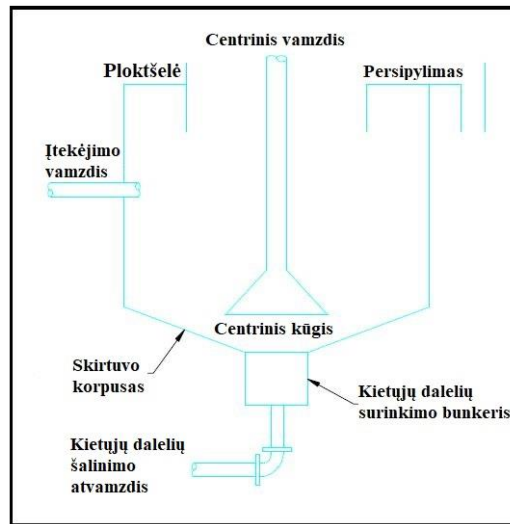
Privalumai kurie yra priskiriami šiai separavimo sistemai yra pigumas, ekologiškumas ir jokio poveikio aplinkai neturintis valymo procesas, taip pat efektyvumas. Lyginant su gofruotomis plokštėmis, šios formos oleofilinė medžiaga neturi didelių plokštumų ant kurių nusėstų ar pakibtų atskiriamos medžiagos. Sustambėję ir atsiskiriantys naftos produktai lengvai išplaukia į paviršių (žr. 5 pav.), nuosėdos lengvai nusėda ant kaupyklos ar talpyklos dugno.



**6 pav.** Adatinių koalescencinių blokų sistema ir pro ją tekančio naftuoto vandens atskyrimo procesas [24]

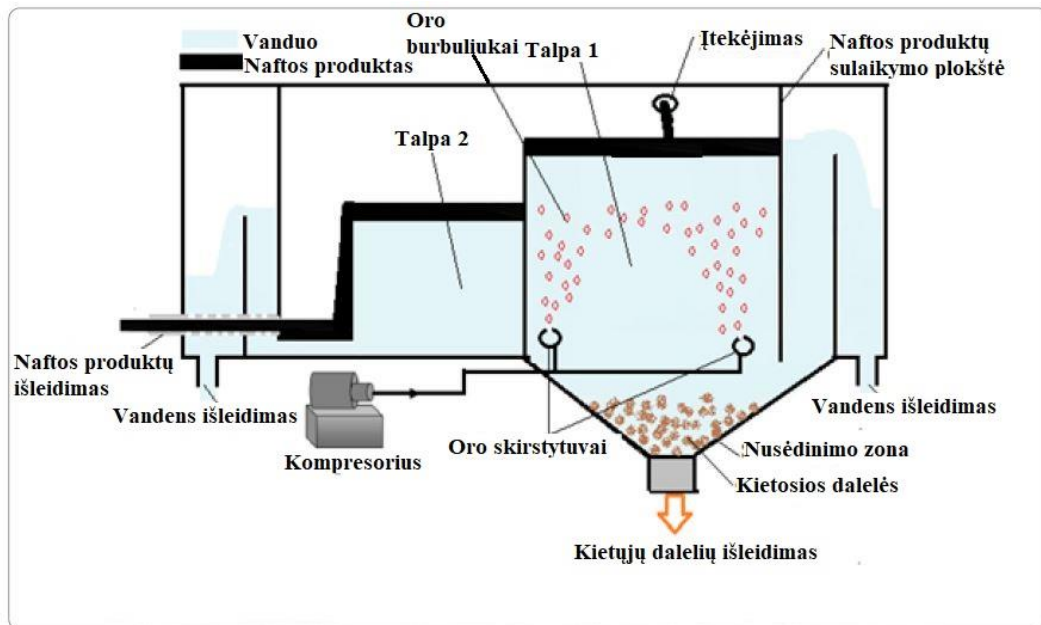
## 1.6. Hidrodinaminės sistemos

Hidrodinaminės sistemos yra sudarytos iš hidrociklonų. Hidrociklonai yra tokio tipo skirtuvai, kuriuose išcentrinę ir įcentrinę jėgų veikimo sukuryje dėka iš skysčių yra separuojamos tarpusavyje nesimaišančios dujos, smulkūs lengvojo skysčio lašeliai, kietos dalelės iš skysčių. Hidrociklonai yra draugiškesni aplinkai, pigesni, neturintys jokių judančių ir galinčių susidėvėti dalių, lengvai aptarnaujami ir pasiekiantys aukštą atskyrimo laipsnį, lyginant su kito tipo skirtuvais, tokiais kaip cheminiai ar biologiniai [19, 20, 21]. Tankio skirtumas skystis-skystis sistemoje yra mažiausias, lyginant su dujos-skystis ar dalelė-skystis sistemomis. Atskyrimas sistemoje skystis-skystis yra sudėtingiausias [22].



7 pav. Hidrodinaminio skirtuvo principinė schema [21]

Hidrociklono veikimo principas pagrįstas įtekančio srauto nukreipimu į skirtuvo korpuso vidinį paviršių. Tekėdamas ratu, didesnio tankio skystis priglunda prie korpuso sienelės, o mažesnio koncentruojasi į viduryje esanti kūgį ir kaupiasi jame. Jeigu su atitekančiu srautu yra nesulaikytų kietųjų dalelių, jos dėl savo svorio sėda į skirtuvo apačią, kur yra surenkamos bunkeryje. Atsiskyręs skystis persipila pro skirtuvo viršuje esantį persipylimą ir išteka iš skirtuvo [21, 24]. Šio tipo įrenginio modifikacijos lėmė aukštą valymo ir atskyrimo efektyvumą.



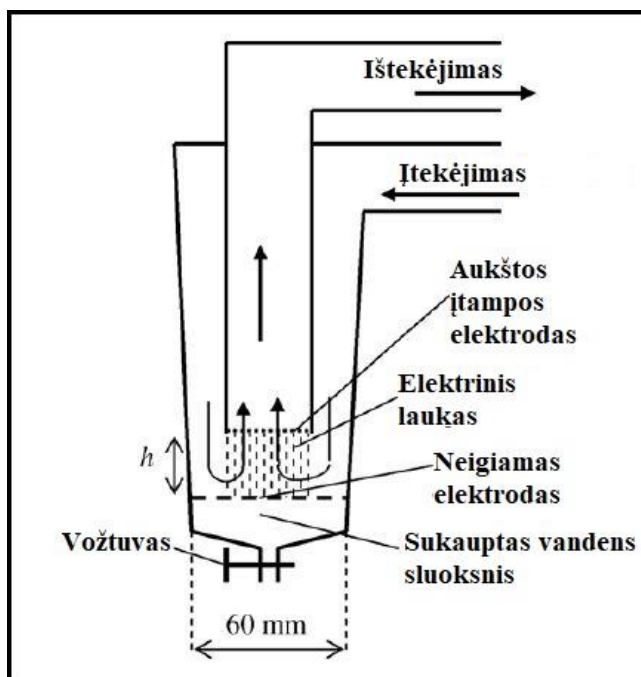
8 pav. Hidrodinaminis skirtuvas su flotacijos įranga [25]

Hidrodinaminiuose naftos produktų skirtuvuose tam, kad būtų padidintas hidrodinaminis atskyrimo efektyvumas, papildomai yra naudojama flotacija. Tokio tipo skirtuvai susideda iš dviejų kamerų, kur į pirmąją atitekėjęs naftos produktų ir vandens mišinys atsiskiria gravitacinės separacijos principu, o skirtuvo apačioje sumontuoti oro skirstytuvai, tiekiantys mažus oro burbuliukus prie kurių prikimba mažesnio skersmens naftos produktų lašeliai ir yra iškeliami į skirtuvo viršų. Su nuotekų srautu atitekėjusios kietosios dalelės nusėda skirtuvo apačioje ir yra šalinamos per apačioje esantį atvamzdį. Atskirtas vanduo išteka iš pirmos kameros per vandens išleidimo atvamzdį.

Naftos produktų ir vandens mišinys per pirmosios kameros viršų patenka į antrąją kamerą. Šioje kameroje vyksta papildoma naftos produktų gravitacinė separacija. Pilnai atsiskyrę naftos produktai yra surenkami ir išleidžiami per naftos išleidimo atvamzdį, o vanduo per vandens išleidimo atvamzdį [25].

Naudojant hidrodinaminius skirtuvus su flotacija daug dėmesio yra skiriama naftos produktų atgavimui po atskyrimo proceso. Pagal atliktus šio tipo skirtuvo tyrimus pastebima, kad mažėjant nuotekų, patenkančių į skirtuvą kiekiui, didėja atgaunamo naftos produkto kiekis. Tokia pati atgaunamo kiekio tendencija matoma ir didėjant naftos produkto kiekiui nuotekose. Pastebėta, kad įvedus flotacijos procesą į skirtuvą, naftos atskyrimo efektyvumas ženkliai padidėjo, taip pat atskiriant naftos produktus iš jūros vandens atskyrimo efektyvumas padidėja labiau, nei atskiriant iš gėlo [25, 26].

Hidrodinaminiai atskyrimo įrenginiai gali būti naudojami ir atvirkštiniam procesui t.y. vandens šalinimui iš naftos produktų. Tokio tipo separacija yra sunkesnė dėl mažo tankio ir didelio nešančiojo skysčio (naftos) klampumo skirtumo, taip pat vandens lašeliai yra gausiai išsklaidyti klampioje naftos terpėje. Papildomos problemos kyla, kai nepertraukiama naftos fazė juda priešinga gravitacinės jėgos veikimo kryptimi ir kai šioje fazėje yra labai daug disperguotų vandens lašelių. Gravitacinis atskyrimas, kuris remiasi dviejų fazių tankių skirtumu ir disperguotų lašelių dydžiu yra atsveriamas tempimo jėgos, kurią sukuria nenutrūkstantis fazės judėjimas. Dėl jo gravitacinis atskyrimo efektyvumas yra mažas. Atskyrimo efektyvumą taip pat apsunkina kitomis medžiagomis tokiomis, kaip paviršiaus aktyviosiomis medžiagomis, asfaltalais ir dervomis apkibę disperguoti maži lašeliai ir kurie skatina lašelių atstūmimą vieną nuo kito. Tokio tipo dviejų skysčių separacijai yra pasitelkiamas elektrinių savybių skirtumas tarp dviejų fazių. Metodas yra paremtas tuo, kad yra sukuriamas papildomas disperguotų lašelių išorinis elektrinis laukas, kurio dėka mažesni vandens lašeliai greičiau sukimba į didesnius ir pagreitinamas šių lašelių gravitacinis atskyrimas [27].



9 pav. Elektro-hidrodinaminis skirtuvas [27]

Nafta su joje esančiais vandens lašeliais į skirtuvą patenka pro viršuje esantį įtekėjimo atvamzdį. Patekęs į skirtuvą srautas yra nukreipiamas žemyn. Korpuso forma yra kūginė, skatinanti hidrodinaminių sūkurių formavimą. Skirtuvo apačioje yra įrengti du aukštos įtampos elektrodai, iš kurių vienas teigiamas, o kitas neigiamas. Pratekantys vandens lašeliai su nafta pro šiuos elektrodus įgauna elektrinį lauką ir susijungia į didesnius lašelius. Vandens, kurio tankis yra didesnis, kaupiasi skirtuvo apačioje ir per apačioje esantį vožtuvą yra išleidžiamas iš skirtuvo [27].

Apibendrinant apžvelgtoje mokslinėje literatūroje pateikiamus duomenis apie hidrodinamines sistemas ir atliktus mokslinius tyrimus pastebima, kad didžiausia įtaką tokio tipo atskiryme turi optimalus srauto greitis, atskiriamų lašelių skersmuo ir naftos produktų koncentracija.

## 2. Tyrimų metodika

### 2.1. Hidrodinaminis principu veikiančio skirtuvo komponentų modeliavimas

Naftos produktai iš vandens yra atskiriami remiantis šių dviejų skysčių sunkio jėga įprastiniuose skystis-skystis skirtuvuose. Gravitacinį lengvesnio skysčio iškilimą į paviršių apibūdina Stokso dėsnis.. Išimtyms taikant šį dėsnį yra [35]:

- dalelės turi būti sferinės formos (rutulio pavidalo);
- dalelių dydis turi būti vienodas;
- tėkmės srautas turi būti laminarinis vertikalia ir horizontalia kryptimis.

Apskaičiuojamas naftos lašelio kilimo greitis pagal Stokso dėsnį:

$$v_k = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_n \cdot \rho_v)}{18 \cdot \mu}; \quad (1.1)$$

čia  $v_k$  – lašelio išskylio greitis, m/s;

$g$  – laisvojo kritimo pagreitis,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ;

$d$  – naftos lašelių diametras,  $\mu\text{m}$ ;

$\rho_n$  – naftos tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_v$  – vandens tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\mu$  - skysčio dinaminės klamos koeficientas,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ .

**3 lentelė.** Vandens tankis ir klampa esant skirtingoms temperatūroms [16]

Temperatūra (°C)	Tankis, $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Dinaminė klampa, $\mu$ Pa·s
0	999,8	1,781
5	1000,0	1,518
10	999,7	1,307
15	999,1	1,139
20	998,2	1,002
25	997,0	0,890
30	995,7	0,798
40	992,2	0,563
50	988,0	0,547

Reinoldso (angl. *Reynolds*) skaičius, skysčių mechanikoje, yra kriterijus, pagal kurį skysčio srautas yra visiškai pastovus (laminarinis) arba vidutiniškai pastovus, esant nedideliems ir nestabiliems svyravimams (turbulentinis). Kai Reinoldso skaičius yra  $< 2000$  srautas yra laminarinis, o esant  $> 2000$  srautas kinta ir tampa turbulentinis [35].

Reinoldso skaičius apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\text{Re} = \frac{d_i \cdot v_k \cdot \rho_i}{\mu} \quad (1.2)$$

čia Re – Reinoldso skaičius;

$d_i$  – lašelio skersmuo,  $\mu\text{m}$ ;

$v_k$  – lašelio išskylio greitis,  $\text{m/s}$ ;

$\rho_i$  – skysčio tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\mu$  – skysčio dinaminės klampos koeficientas,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ .

Skirtuvo efektyvumas yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta = \frac{(C_i - C_o) \cdot (100)}{C_i} \quad (1.3)$$

čia  $\eta$  – efektyvumas, %;

$C_i$  – naftos produktų koncentracija prieš valymą,  $\text{mg/l}$ ;

$C_o$  – naftos produktų koncentracija po valymo,  $\text{mg/l}$ .

## 2.2. Matematinis srautų modeliavimas

Programinėje įrangoje SolidWorks (2018-2019 m., Dassault Systemes) naudojamas Kartesian (angl. *Cartesian*) tinklelio metodas, leidžia atlikti konjuguotus multifizikinius skaičiavimus naudojant tik vieną šio tipo tinklelį, kuriame gali būti skaičiuojami skysčių lašeliai, kietosios dalelės ir kitokie sraute esantys komponentai. Šio tipo skaičiavimo metodas taikomas analizuojant: [17]

- skysčio srauto tyrimuose analizuojant skystas terpes;
- šilumos pernašos ir tiesioginio elektros išlydžio skaičiavimuose kietuosiuose kūnuose.

Skysčių srautų analizė ir šilumos laidumas gali būti nagrinėjami atskirai. Visi šie skaičiavimai gali būti susieti su skirtingais radiacijos modeliais. Visiems šiems fizikiniams reiškiniams analizuoti yra naudojama CAD geometrija, kuri atitinka pirminės geometrinės informacijos šaltinius.

Skystose terpėse, srautų modeliavimo programinė įranga SolidWorks (2018-2019 m., Dassault Systemes), srautų simuliacijoms apskaičiuoti naudoja Navjė-Stokso (angl. *Navier-Stokes*) lygtį, kuri įvertina masės pernašą, judesio momentą ir energijos tvermės dėsnius: [17]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H; \quad (2.3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}; \quad (2.4)$$

Atliekant skaičiavimus didelio greičio srautams bei srautams su smūginėmis bangomis, energijai apskaičiuoti naudojama formulė: [17]

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i (E + \frac{P}{\rho})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H; \quad (2.5)$$

$$E = e + \frac{u^2}{2}; \quad (2.6)$$

Šios formulės yra papildytos formulėmis kurios yra skirtos skystos fazės skaičiavimui, įvertinant skysčio prigimtį, empirines priklausomybes tankiui, klampai ir šiluminiam laidumui pagal temperatūrą. Neelastinių skysčių parametrai apskaičiuojami įvertinant priklausomybę tarp šių skysčių dinaminės klamos, šlyties koeficiento ir temperatūros.

Specialūs modeliai yra naudojami tikrų dujų aprašymui, tūrio kondensavimui, garinimui, kavitacijai ir akytajai terpei.

Programinė įranga SolidWorks (2018-2019 m., Dassault Systemes) atliekant srautų simuliaciją geba apdoroti ir pateikti duomenis analizuojant laminarinius ir turbulencinius srautus. Numatant turbulencinius srautus, yra naudojamos Navjė-Stokso (angl. *Navier-Stokes*) lygtys ir Favré (angl. *Favre*) suvidurkinimas, tokiu būdu yra atsižvelgiama į vidutinį srauto turbulencijos poveikį srauto parametrams. Atliekant šiuos skaičiavimus ir norint gauti tikslesnius rezultatus, į lygtis yra įvedama daugiau sąlygų, kurios reikalauja daugiau duomenų, pavyzdžiui Reinoldso įtempimų. Užbaigiant šią lygčių sistemą, programinė įranga SolidWorks srauto modeliavimui naudoja pernašos lygtis, apibūdinančias turbulencijos kinetinę energiją ir jos sklaidos greitį, panaudojant k-ε modelį.

Modifikuotas k-ε modelis, kartu su slopinimo funkcijomis, paaiškina laminarinį, turbulentinį ir homogeniškų skysčių dėsnis: [17]

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B; \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{ed} \frac{\varepsilon}{k} (f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_b) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k}; \quad (2.8)$$

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij}, \tau_{ij}^R = \mu_t s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}; \quad (2.9)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}; \quad (2.10)$$

Simbolių reikšmės:  $C_\mu=0.09$ ,  $C_{\varepsilon 1}=1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2}=1.92$ ,  $\sigma_k=1$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ,  $\sigma_B=0.9$ ,  $C_B=1$  jeigu  $P_B>0$ , tai  $C_B=0$ , jeigu  $P_B<0$ , tuomet turbulentinė klampa yra nustatoma šia lygtimi:

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}; \quad (2.11)$$

Lamo ir Bremhorsto (angl. *Lam and Bremhorst*) slopinimo funkcija  $f_\mu$  yra aprašoma lygtimi:



$$f_{\mu} = \left(1 - e^{-0.025R_y}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_t}\right); \quad (2.12)$$

Tuomet:

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{ky}}{\mu}; \quad (2.13)$$

$$R_t = \frac{\rho k^1}{\mu \varepsilon}; \quad (2.14)$$

y yra atstumas nuo atskaitos taško iki sienos, o Lamo ir Bremhorsto slopinimo funkcijos  $f_1$  ir  $f_2$  yra aprašomos:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_{\mu}}\right)^3, f_2 = 1 - e^{-R_t^2}; \quad (2.15)$$

Lam ir Brmhosto slopinimo funkcijos  $f_{\mu}$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ , mažina turbulentinę klampą bei turbulentinę energiją ir padidina turbulencijos sklaidos koeficientą, kada Reinoldso skaičius  $R_y$  pagrįstas vidutinio greičio svyravimu ir atstumu nuo sienelės, tampa per mažas. Kuomet  $f_{\mu}=1$ ,  $f_1=1$ ,  $f_2=1$ , žiūrima į pradinį k-ε modelį.

Šilumos srautas apsprendžiamas pagal:

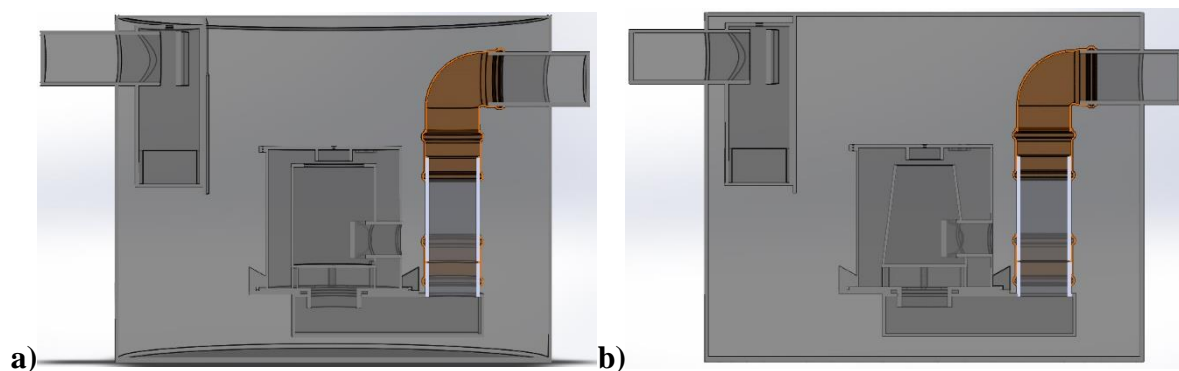
$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, i = 1, 2, 3; \quad (2.16)$$

Konstanta  $\sigma_c=0.9$ , Pr- Prandtlio skaičius (angl. *Prandtl Number*) ir  $h$  – šiluminė entalpija.

Dalelių skaičiavimo užduotis programoje yra nurodant modelio geometriją, jo ribas, įskaitant pradines sąlygas. Visi duomenys yra apibrėžiami tiesiogiai pradiniame CAD modelyje [17].

### 2.3. Hidrodinaminis principu veikiančio skirtuvo matematinis modeliavimas

Tiriamąjį įrenginį, veikiančio hidrodinaminis principais, srautų modeliavimas atliekamas naudojant studentams skirtą SolidWorks (2018-2019 m., Dassault Systemes) SDK (angl. *Student Design Kit*) programinę įrangą. Matematiniai skaičiavimai ir srautų simuliacijos atliekamos remiantis CFD (angl. *Computational Fluid Dynamics*) kodo pagrindu. Ši kompiuterinės programos įranga pasirinkta dėl patogaus naudojimo, funkcijų gausos, kurios puikiai pritaikomos tiriant įvairius elementus ar įvairaus tipo konstrukcijas (tūrinius, kevalinės formos modelius, rėmines konstrukcijas ir jų kombinacijas). Su programine įranga SolidWorks SDK Flow Simulation (liet. srautų simuliacija) analizuojamas hidrodinaminio įrenginio darbas ir tobulinimo galimybės leidžiant skystos terpės srautus. Modeliuojant skysčių dinamikos uždaviniai sprendžiami naudojant baigtinių elementų metodą. Šis metodas leidžia atlikti skysčių analizę plačiose Reinoldso skaičiaus ribose tiek laminariniams, tiek turbulentiškiems srautams, įvertinant terpės spūdumą.



**10 pav.** Testuojamo hidrodinaminio įrenginio modelis: a) išbėgimo modulis su cilindru, b) išbėgimo modulis su kūgiu

Matematinio srautų modeliavimo metu yra modeliuojamas skirtingas skysčio (vandens) srautas, dviejų tipų įrenginio modeliuose (žr. 14 pav.), kuris yra: 0,75 l/s, 1,5 l/s, 3 l/s, 6 l/s, 10 l/s ir 15 l/s. Naftos produktų koncentracijos simuliacijai ir įrenginio efektyvumui nustatyti yra pasitelkiama programinės įrangos SolidWorks (2018-2019 m., Dassault Systemes) CFD ( angl. *Computational Fluid Dynamics*) kodo funkcija Particle Study (liet. dalelių tyrimas). Ši funkcija leidžia modeliuoti į įrenginį tiekiamų dalelių dydį, kiekį, tankį, pasiskirstymo dinamiką ir kitus parametrus. Modeliavimo metu, pasirinktas naftos produktų lašelių dydis: 1  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  ir 100  $\mu\text{m}$ .

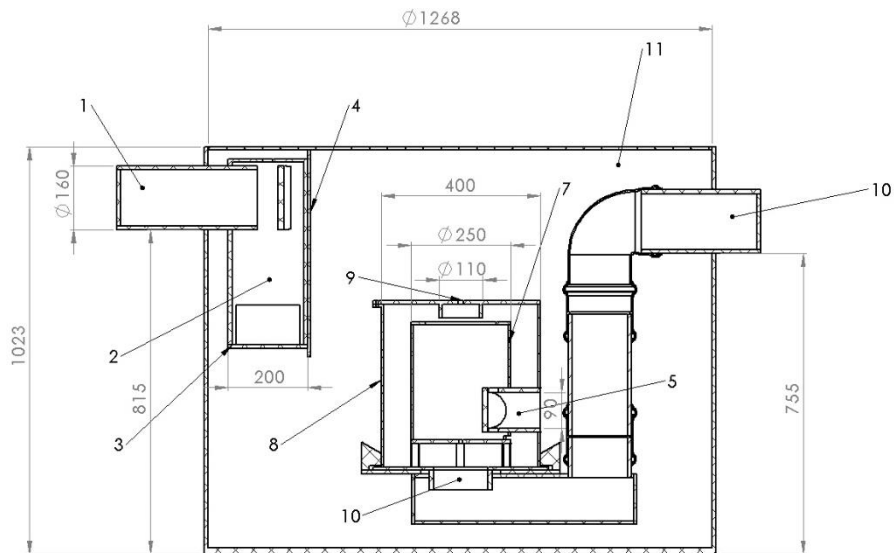
**4 lentelė.** Matematinio srautų modeliavimo metu naudojami pastovūs sistemos parametrai

Duomenys	Matavimo vienetai	Reikšmė
Vandens temperatūra	$^{\circ}\text{C}$	15
Vandens tankis	$\text{kg}/\text{m}^3$	999,1
Vandens dinaminė klampa	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	1,14
Naftos produkto temperatūra	$^{\circ}\text{C}$	15
Naftos produkto tankis	$\text{kg}/\text{m}^3$	845
Naftos produkto dinaminė klampa	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	1,69
Dalelių skaičius	vnt	500

## 2.4. Fizinis modeliavimas

Siekiant verifikuoti matematinio modeliavimo metu gautus rezultatus, sekančiame darbų etape atliekamas fizinis įrenginio modeliavimas. Atlikus kompiuterinį srautų modeliavimą ir atsižvelgus į gautus rezultatus, pagaminamas atitinkamas fizinis modelis ir ištestuojamas realiomis sąlygomis.

Fizinio modeliavimo metu testuojamas įrenginys (žr. 15 pav.) yra sudarytas iš pagrindinių dviejų, hidrodinaminis procesus skatinančių, komponentų. Pirmasis yra hidrodinaminis įtekėjimo modulis (1), o antrasis hidrodinaminis ištekėjimo modulis (5).



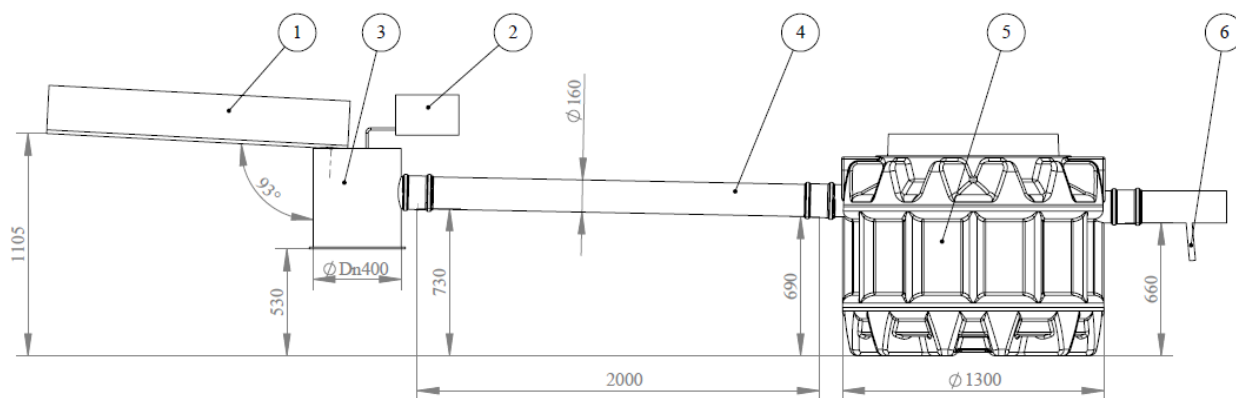
**11 pav.** Hidrodinaminio skirtuvo schema: 1 – įtekėjimo atvamzdis, 2 – hidrodinaminis įtekėjimo modulis, 3 – atsitrenkimo plokštė, 4 – pertvara, 5 – įtekėjimo atvamzdis į ištekėjimo modulį, 6 – hidrodinaminis ištekėjimo modulis, 7 – vidinis modulio cilindras, 8 – atsiskyrusio lengvesnio skysčio gaudyklė, 9 – ištekėjimo iš modulio anga, 10 – ištekėjimo atvamzdis, 11 – hidrodinaminis skirtuvas

Atitekančią dviejų skirtingų tankių skysčių srautą į hidrodinaminį skirtuvą pateka per įtekėjimo atvamzdį (1) ir yra nukreipiamas tangentine kryptimi į hidrodinaminį įtekėjimo modulį (2) kur besisukantis skysčio srautas juda vertikaliai žemyn iki atsitrenkimo į horizontalią plokštumą (3), skatinančią srauto centre besikaupiančių lengvesniojo skysčio lašelių susidūrimą su atsitrenkusiais lašeliais ir jų stambėjimą. Sukibę lengvesnio tankio skysčio lašeliai už pertvaros (4) kyla į skirtuvo viršutinę dalį, kur sudaro atsiskyrusio lengvesnio skysčio sluoksnį ir jame kaupiasi. Nesukibę lašeliai juda su srautu toliau ir per įtekėjimo atvamzdį (5) patenka į hidrodinaminį ištekėjimo modulį (6). Į šį modulį patenkantis srautas yra nukreipiamas tangentine, vidinio cilindro modulio (7) sienelės, kryptimi ir besisukdamas kyla į modulio viršų. Atsiskyre lengvesnės frakcijos lašeliai yra sugaudomi modulio viršutinėje dalyje įrengtoje gaudyklėje (8), o sunkesnis skystis, persipildamas per vidinio cilindro viršutinę dalį, juda link ištekėjimo iš modulio angos (9) ir išteka iš skirtuvo per ištekėjimo atvamzdį (10).

#### 2.4.1. Skirtuvo testavimo įranga

Įrenginio testavimui yra dirbtinai sukuriamos sąlygos, panašios į sąlygas, susidarantiąs požeminiuose vamzdynuose, kur vanduo užterštas naftos produktais, savitaka teka į skirtuvą.

Per testuojamą hidrodinaminį skirtuvą yra leidžiamas nuotekų srautas, taip pat į šį srautą pilamas tiksliai dozuotas naftos produktų kiekis, atitinkantis  $C_n=5$  ml/l naftos produktų koncentraciją įrenginyje. Tam yra naudojamas dyzelinis kuras, kuris pagal standarto EN 858 – 1 reikalavimus yra geriausias atitikmuo pagal lyginamąjį svorį ( $\rho_d=845$  kg/m<sup>3</sup>).



**12 pav.** Išbandymo stendo schema: 1 – vandens tiekimo latakas, 2 – lengvo skysčio padavimas, 3 – lengvo skysčio ir vandens sumaišymo talpa, 4 – tekėjimo vamzdis d160, 5 – hidrodinaminis skirtuvas, 6 – mėginių ėmimo atvamzdis [21]

Į testuojamą įrenginį tiekiamo vandens srauto greičio reguliavimo sklende sureguliuojamas reikiamas vandens debitas. Už reguliavimo sklendės seka srauto atidarymo ir uždarymo sklendė. Tekantis vanduo per vandens tiekimo mazgą patenka į srauto išlyginimo kanalą (1), per kurį pratekėjęs, patenka į naftos produkto ir vandens maišymo talpą (3). Kad abu skysčiai gerai susimaišytų, vanduo į dozavimo indą iš išlyginimo kanalo išteka per standarte numatytos formos groteles (primenančias dušą), kas sukelia aktyvų pūslų susidarymą. Iš naftos produkto dozavimo indo (2), prieš dozavimą sureguliuavus reikiamą dozuojamo skysčio debitą lengvojo skysčio reguliavimo sklende, į maišymo talpą (3) paduodamas naftos produktas (dyzelinas). Dviejų skysčių mišinys vamzdžiu (10) patenka į lengvojo skysčio skirtuvą (4). Iš skirtuvo iš tekančio vandens mėginiai imami per specialiai tam skirtą bandinių ėmimo atvamzdį (6) [21].

#### 2.4.2. Naftos produktų koncentracijos nustatymas

Po atskyrimo proceso iš atskyrimo įrenginio gauti mėginiai yra tiriami ir nustatoma naftos produktų koncentracija juose. Koncentracija buvo nustatoma UAB „Kauno vandenys“ laboratorijoje pagal LAND 61 – 2003 [22].

Naftos produktų koncentracijos nustatymui yra naudojamas dujų chromatografijos (DC) metodas. Šio tipo metodas tinka tirti paviršinius, gruntinius vandenius, nuotekas ir leidžia nustatyti naftos angliavandenilių indeksą, kuris yra didesnis nei 0,1 mg/l [22].

Naftos angliavandeniliai iš vandens ekstrahuojami angliavandenilių tirpikliu. Aliuminio oksidu arba florizilu užpildytoje chromatografinėje kolonėlėje naftos angliavandeniliai atskiriami nuo polinių junginių. Sukoncentruoto eliuato alikvotinė dalis analizuojama kapiliarine dujų chromatografija su nepoline kolonėle ir liepsnos jonizacijos detektoriumi (LJD). Matuojamas suminis pikų plotas tarp n-dekano ir n-tetrakontano. Pagal kalibracinę kreivę, sudarytą iš dyzelino ir naftinio tepalo koncentracijų bei jų chromatogramų pikų plotų, apskaičiuojamas naftos angliavandenilių indeksas [22].

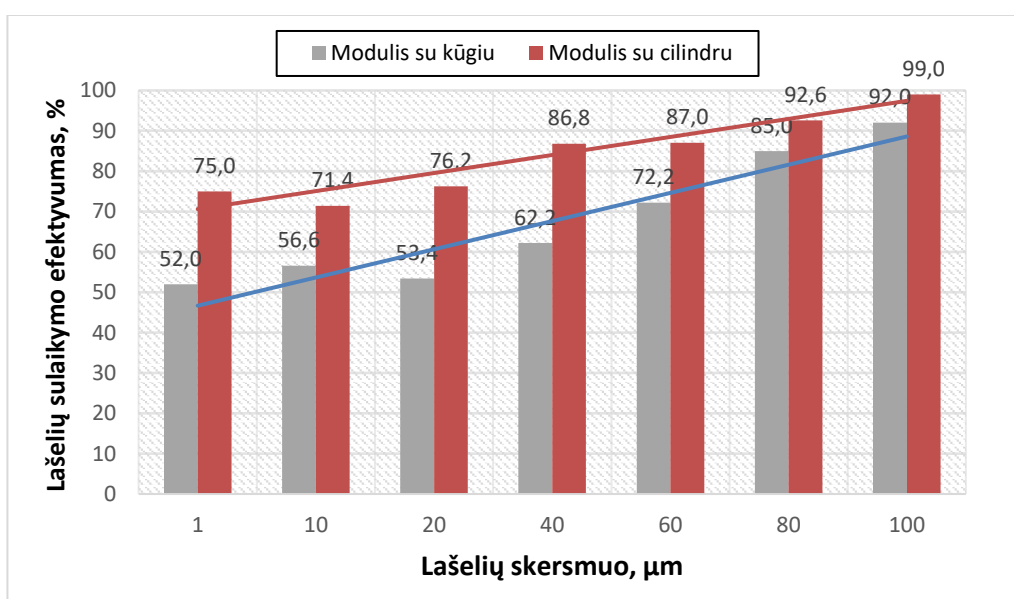
### 3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

#### 3.1. Matematinio srautų modeliavimo rezultatai

Atlikus matematinę srautų simuliaciją naudojant studentams skirtą SolidWorks (2018-2019 Dassault Systemes) SDK Flow Simulation programinės įrangos versiją, buvo nustatytas simuliuojamo hidrodinaminio skirtuvo efektyvumas, įvertinant įeinančių – išeinančių dalelių sraute skaičių. Atliekant simuliacijas buvo tiriami 0,75 l/s, 1,5 l/s, 3 l/s, 6 l/s, 10 l/s ir 15 l/s našumo srautai į įrenginį, stebima jų judėjimo dinamika skirtuve, taip pat į įrenginį tiekiamų 1 μm, 10 μm, 20 μm, 40 μm, 60 μm, 80 μm ir 100 μm lašelių sulaikymas ir dinamika.

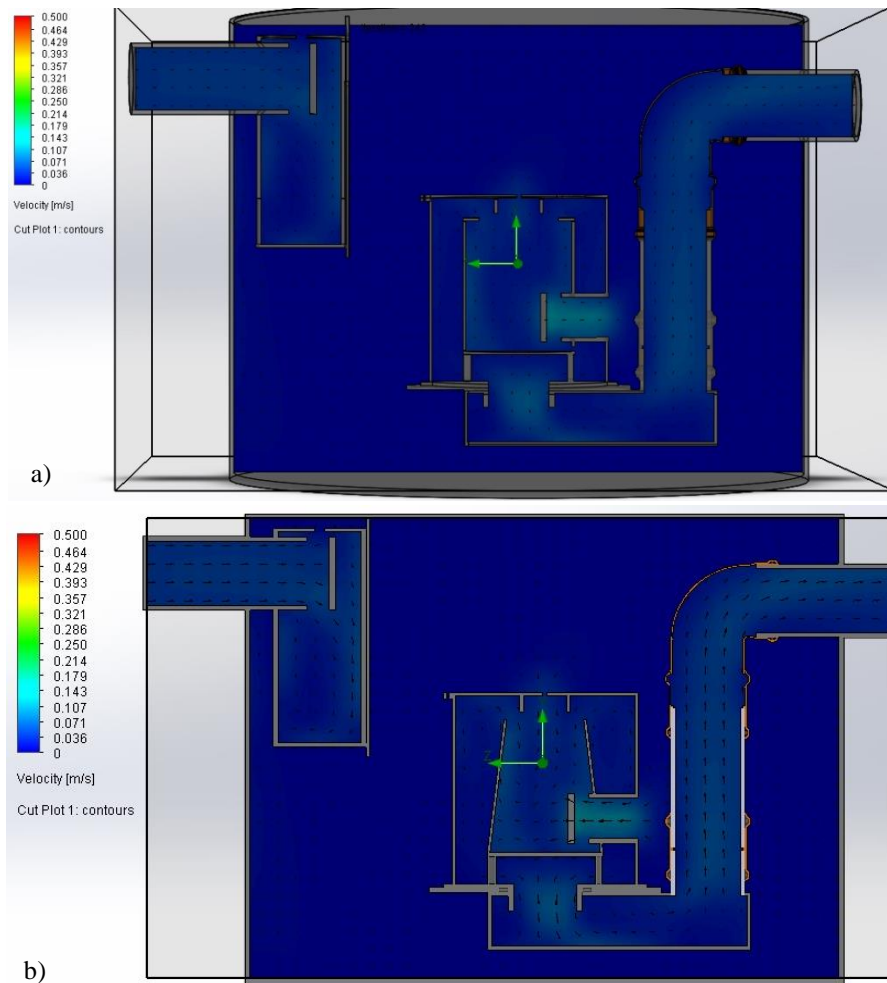
##### 3.1.1. 0,75 l/s našumo įrenginio modeliavimas

Atlikus 0,75 l/s srauto simuliaciją skirtuvuose su cilindrinio ir kūginio ištekėjimo moduliais, buvo nustatytas skirtingo lašelių dydžio sulaikymo efektyvumas abiejuose tirtų skirtuvų tipuose. Pateiktame grafike (žr. 19 pav.) matoma, kad abiejų tipų skirtuvuose efektyviausiai atsiskyrė ir buvo sulaikyti 100 μm dydžio lašeliai. Sulaikymo efektyvumas siekė 99 % skirtuvui su cilindrinio ištekėjimo moduliu ir 92 % su kūginiu. Mažiausias atskyrimo efektyvumas cilindriniam modulyje pasiektas atskiriant ir sulaikant 10 μm dydžio lašelius, o kūginiame modulyje – atskiriant 1 μm dydžio lašelius. Apibendrintai vertinant sumodeliuotą atskyrimo efektyvumą 0,75 l/s srauto skirtuve pastebima, kad didėjant lašelių dydžiui, didėja ir jų sulaikymo efektyvumas. Įvertinus bendrą skirtingo dydžio lašelių atskyrimo efektyvumą, vidutinis skirtuvo su cilindrinio moduliu efektyvumas gautas 84 %, o su kūginiu 67,63 %. Skysčio išbuvimo laikas įrenginyje 1653 s.



13 pav. Lašelių atskyrimo efektyvumo priklausomybė nuo lašelių dydžio ir hidrodinaminio skirtuvo konstrukcijos, esant 0,75 l/s srautui

Atlikto modeliavimo skirtingos konstrukcijos skirtuvams srauto greičiai vizualizuojami 18 pav. pateikiamuose įrenginio pjūviuose, kuriuose matomi skysčio tekėjimo krypties pokyčiai ir srauto greitis skirtingose skirtuvo vietose. Analizuojant srauto greičio parametrus pastebima, kad srauto greitis ties modulių sienelėmis kūginiame modulyje (žr. 20 pav., b) yra intensyvesnis nei cilindriniam (žr. 20 pav., a). Įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžiuose greitis nepakitęs.



**14 pav.** 0,75 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu

Simuliacijos metu buvo fiksuojami duomenys įvertinant ištekėjimo modulio su kūgiu ir cilindru parametrus. Nustatyti parametrai pateikiami 5 lentelėje.

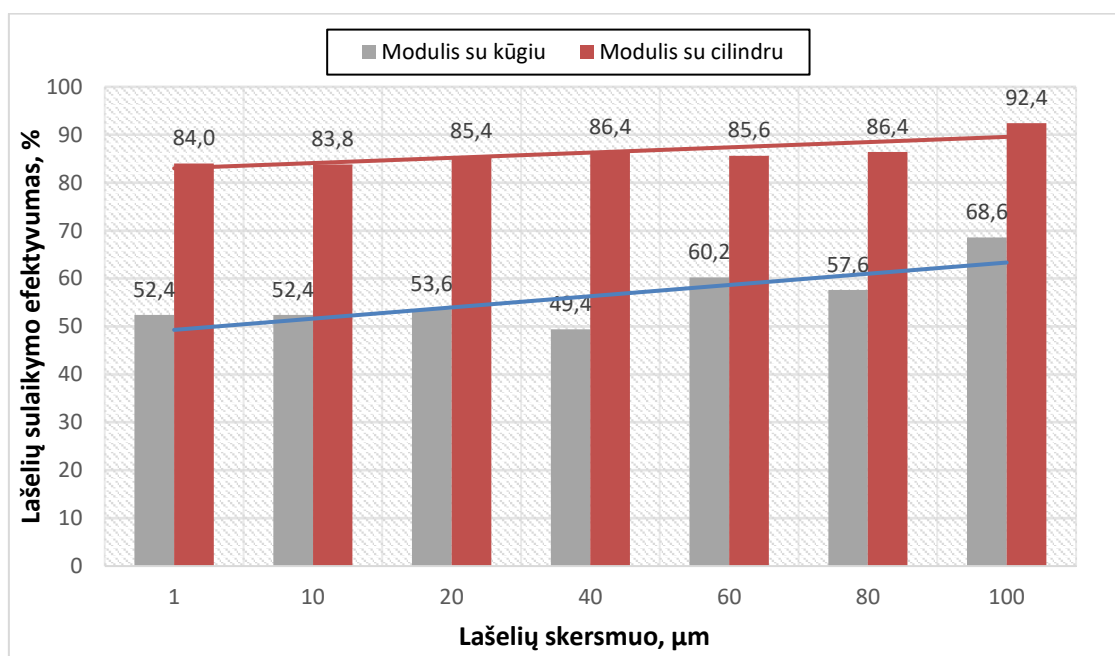
**5 lentelė.** Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 0,75 l/s srautui

Modulis	Srauto greitis, m/s	Suardymo slėgis, Pa	Turbulencijos intensyvumas, %	Turbulencijos energija, J/kg	Turbulencijos laikas, s
Kūgis	0,0011	0,0176	97,88	$6,69 \cdot 10^{-5}$	4,2
Cilindras	0,0009	0,0145	98,19	$8,79 \cdot 10^{-5}$	3,9

Iš 5 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad srauto tekėjimo greitis ties modulio sienoje cilindriniam modulyje yra mažesnis nei modulyje su kūgiu ir siekia 0,0009 m/s. Suardymo slėgio (angl. Shear stress) vertė modulyje su cilindru yra mažesnė ir siekia 0,0145 Pa, su kūgiu 0,0176 Pa. Modulio su cilindru viduje turbulencijos intensyvumas siekia 98,19 %, simuliacijoje su kūgiu 97,88 %. Didesnį turbulencijos intensyvumo rezultatą moduliuose apibūdina turbulencijos energija kuri buvo atitinkamai su cilindru  $8,79 \cdot 10^{-5}$  J/kg, o su kūgiu  $6,69 \cdot 10^{-5}$  J/kg. Turbulencijos laikas buvo mažesnis cilindre ir siekė 3,9 s, o kūgyje 4,2 s. Lašelių atskyrimo efektyvumui įtaką daro intensyvesnė srauto turbulencija ir didesnė turbulencijos energija, kurią sukuria mažesnis greitis ir kuri trunka trumpiau.

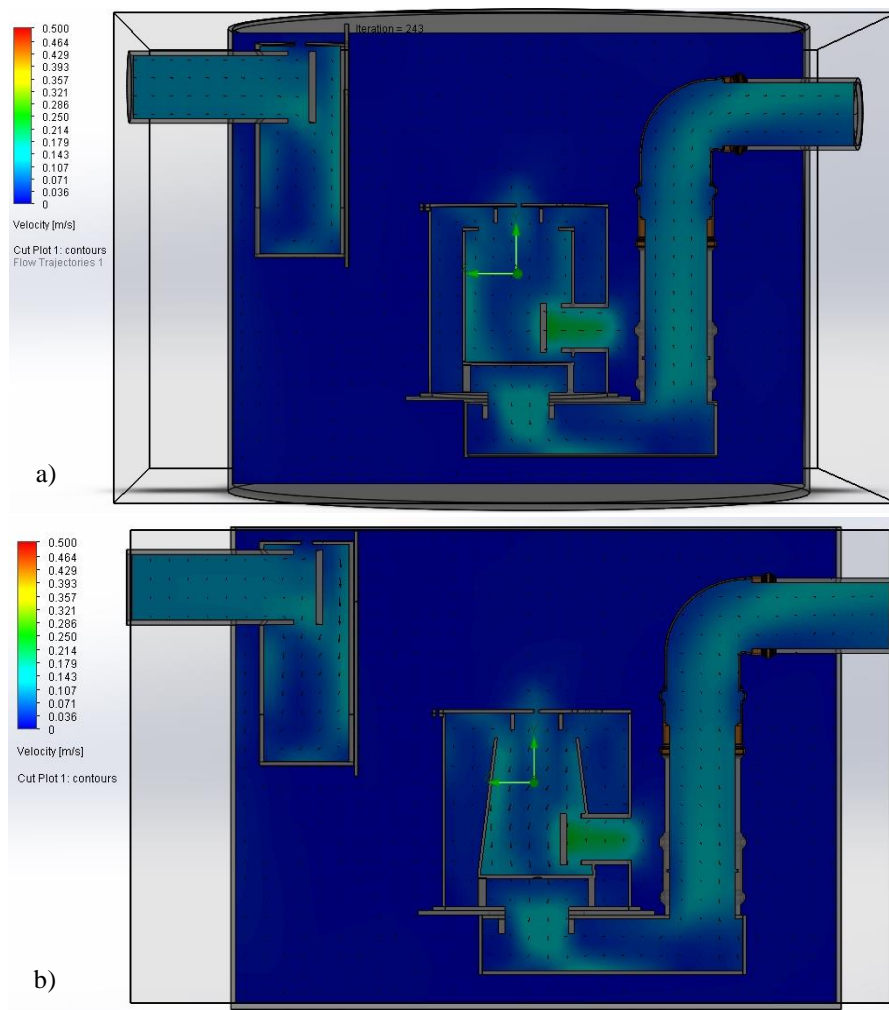
### 3.1.2. 1,5 l/s našumo įrenginio modeliavimas

Atlikus 1,5 l/s srauto simuliaciją skirtuvuose su cilindrinio ir kūginio ištekėjimo moduliais, įrenginio rezultatai lyginant su 0,75 l/s srautu skiriasi. Žemiau pateiktame grafike (žr. 21 pav.) matoma, kad skirtuve su cilindrinio ištekėjimo modulių efektyviausiai atsiskyrė 100  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai ir siekė 92,4 %, 40 ir 80  $\mu\text{m}$  dydžio lašelių atskyrimas siekė 86,4 % efektyvumą, o mažiausias pasiektas efektyvumas atskiriant 10  $\mu\text{m}$  dydžio lašelius – 83,8 %. Ištekėjimo modulyje su kūgiu efektyviausiai atsiskyrė 100  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai ir pasiekė 68,6 % efektyvumą, o mažiausias efektyvumas buvo pasiektas atskiriant 40  $\mu\text{m}$  dydžio lašelius. Bendras skirtuvo su cilindrinio modulių efektyvumas gautas 86,29 %, su kūginio 56,31 %. Apibendrintai vertinant sumodeliuotą atskyrimo efektyvumą 1,5 l/s srauto skirtuve pastebima, kad didėjant lašelių dydžiui, sulaikymo efektyvumas didėja tik modulyje su cilindru, o modulyje su kūgiu kinta netolygiai. Lyginant su 0,75 l/s srautu ir atskyrimo efektyvumu, 1,5 l/s skirtuvas geriau atskiria 1  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  dydžio lašelius, tačiau prasčiau atskiria 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  ir 100  $\mu\text{m}$  dydžio lašelius. Modulis su kūgiu, lyginant su 0,75 l/s srauto skirtuvo atskyrimo rezultatais, geriau atskiria tik 20  $\mu\text{m}$  dydžio lašelius tik 0,2 %, o visus kitus blogiau. Skysčio išbuvimo laikas įrenginyje 826 s.



15 pav. Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 1,5 l/s srautui

Žemiau pateikiamuose simuliuojamo skirtuvo pjūviuose (žr. 22 pav.) yra matomi srauto greičio pasikeitimai lyginant su 0,75 l/s srauto įrenginiu. Analizuojant srauto greičio parametrus pastebima, kad srauto greitis ties modulių sienelėmis ir prie jos kūginiame modulyje (žr. 22 pav., b) yra intensyvesnis nei modulyje su cilindru (žr. 22 pav., a). Abiejų ištekėjimo modulių srauto greitis ties sienelėmis neviršija 0,2 m/s greičio. Įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžiuose greitis nepakitęs.



**16 pav.** 1,5 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu

Simuliacijos metu užfiksuoti duomenys ištekėjimo moduluose su kūgiu ir cilindru pateikiami 5 lentelėje.

**6 lentelė.** Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 1,5 l/s srautui

Modulis	Srauto greitis, m/s	Suardymo slėgis, Pa	Turbulencijos intensyvumas, %	Turbulencijos energija, J/kg	Turbulencijos laikas, s
Kūgis	0,0022	0,0612	97,88	$3 \cdot 10^{-4}$	2,1
Cilindras	0,0019	0,0489	98,19	$3,8 \cdot 10^{-4}$	2

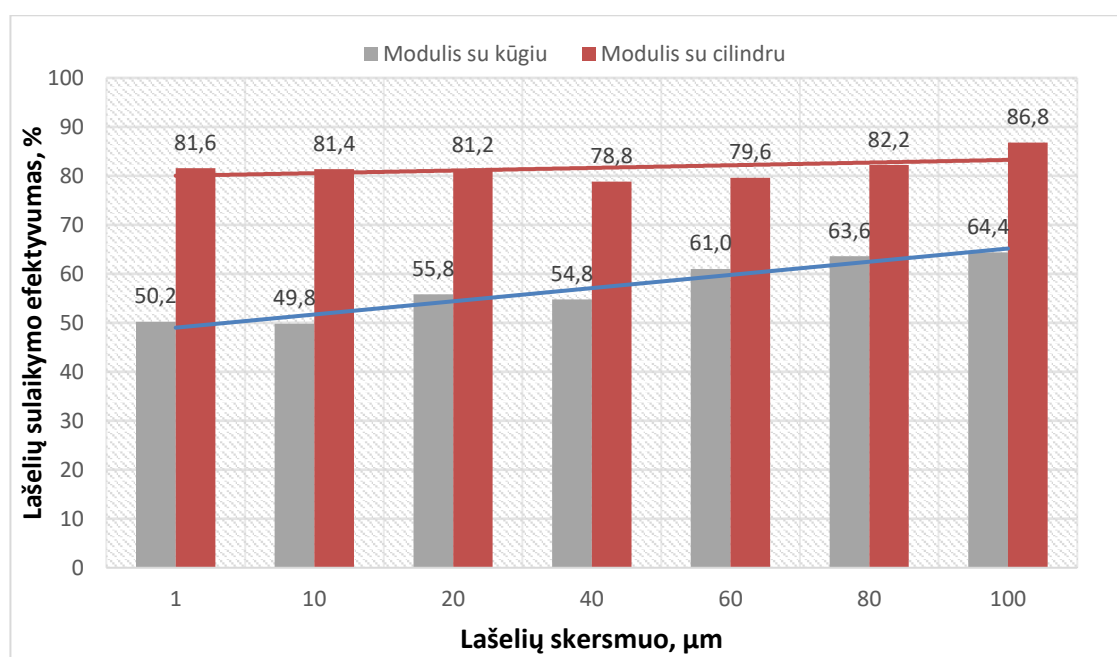
Pagal 6 lentelėje pateiktus skirtuvo ištekėjimo modulių rezultatus matoma, kad srauto greitis ties sienele yra didesnis modulyje su kūgiu ir siekia 0,0022 m/s, o su cilindru 0,0019 m/s. Lyginant su 0,75 l/s srauto gautais rezultatais, greitis padidėjo 2 kartus abiejų tipų moduluose. Suardymo slėgio vertė modulyje su kūgiu siekia 0,0612 Pa, o modulyje su cilindru 0,0489 Pa. Lyginant šias vertes su 5 lentelėje pateikiamais rezultatais, suardymo slėgis padidėjo 3 kartus. Turbulencijos intensyvumas modulyje su cilindru siekė 97,88 %, o su kūgiu 97,88 % ir išliko tokio pačio intensyvumo, kaip 0,75 l/s sraute. Turbulencijos energija ištekėjimo modulyje su cilindru buvo didesnė –  $3,8 \cdot 10^{-4}$  J/kg, o su kūgiu siekė  $3 \cdot 10^{-4}$  J/kg. Turbulencijos laikas abiejuose moduluose buvo 2 sekundės. Lašelių atskyrimo efektyvumui įtakos turėjo 2 kartus padidėjęs srauto greitis modulyje ir taip pat 2 kartus trumpesnis turbulencijos laikas jame. Dėl šių priežasčių, trumpesnę laiką veikiami turbulencijos,



mažesnio dydžio lašeliai nespėja susilieti į didesnio dydžio lašelius ir esant didesniam srauto greičiui yra greičiau pašalinami iš ištekėjimo modulio.

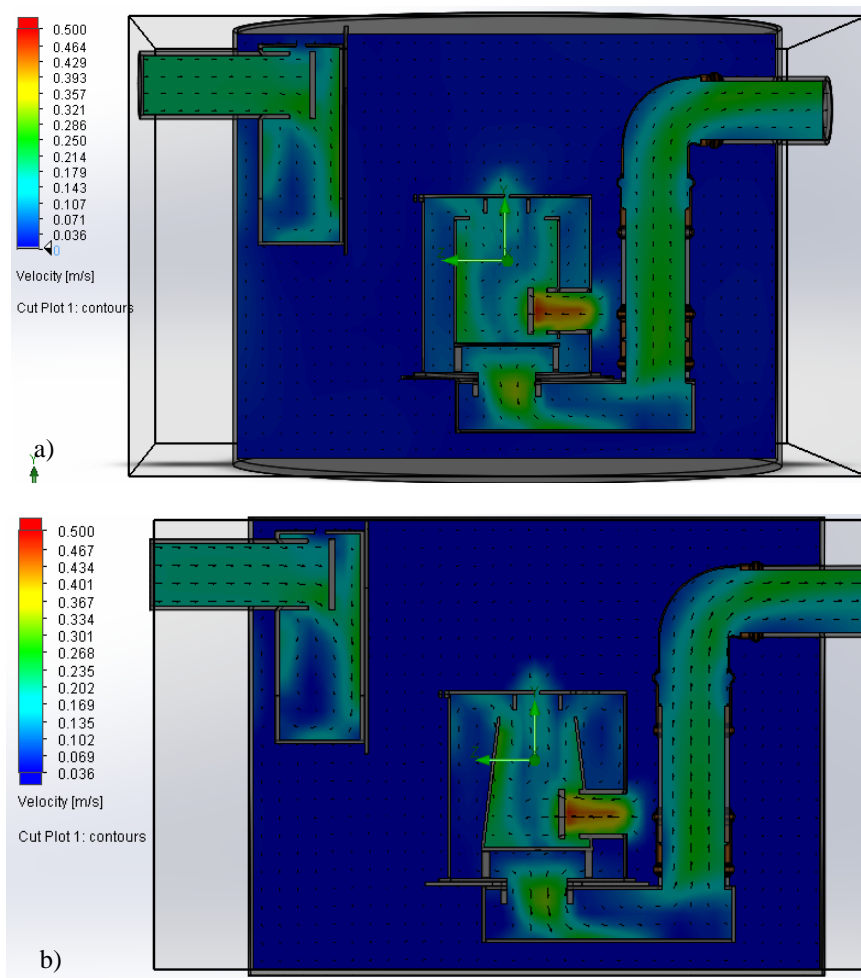
### 3.1.3. 3 l/s našumo įrenginio modeliavimas

Atlikus 3 l/s srauto simuliaciją skirtuvuose su cilindriniais ir kūginiais išėjimo moduliais, buvo nustatytas ir grafike pateikiamas lašelių atskyrimo efektyvumas (žr. 23 pav.). Pagal lašelių sulaikymo efektyvumą, geriausias rezultatas gautas atskiriant ir sulaikant 100 μm dydžio lašelius ir siekė 86,8 % modulyje su cilindru. Lašelių atskyrimo dinamika kito pradėdant nuo 1 μm 81,6 % efektyvumo ir toliau mažėjant iki 40 μm dydžio lašelių 78,8 % sulaikymo efektyvumo. Modulyje su kūgiu atskyrimo dinamika keitėsi su lašelių dydžiu. Stambėjant lašeliams, išvalymo efektyvumas didėjo ir pasiekė didžiausią atskyrimo efektyvumą 64,4 % atskiriant ir sulaikant 100 μm dydžio lašelius. Įvertinus bendrą lašelių atskyrimo efektyvumą 3 l/s srauto skirtuve vidutinis įrenginio su cilindru efektyvumas gautas 81,66 %, o su kūgiu 57,09 %. Bendras skysčio išbuvimo laikas įrenginyje buvo 413 s.



17 pav. Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 3 l/s srautui

Žemiau pateiktame skirtuvo pjūvyje (žr. 24 pav.) su cilindriniais ir kūginiais moduliais yra matomas didesnis srauto greitis skirtingose skirtuvo vietose. Modulyje su kūgiu dalyje (žr. 24 pav., b)) yra matomas platesnis skysčio srauto pasiskirstymas visame kūgio tūryje, ypač prie modulio sienelių ir siekia apie 0,3 m/s greitį, o modulyje su cilindru mažiau intensyviai. Skirtuvo išėjimo atvamzdyje matomas didesnis srauto greitis modulyje su cilindru (žr. 24 pav. a)) negu su kūgiu.



**18 pav.** 3 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu

Simuliacijos metu užfiksuoti duomenys ištekėjimo moduluose su kūgiu ir cilindru pateikiami 6 lentelėje.

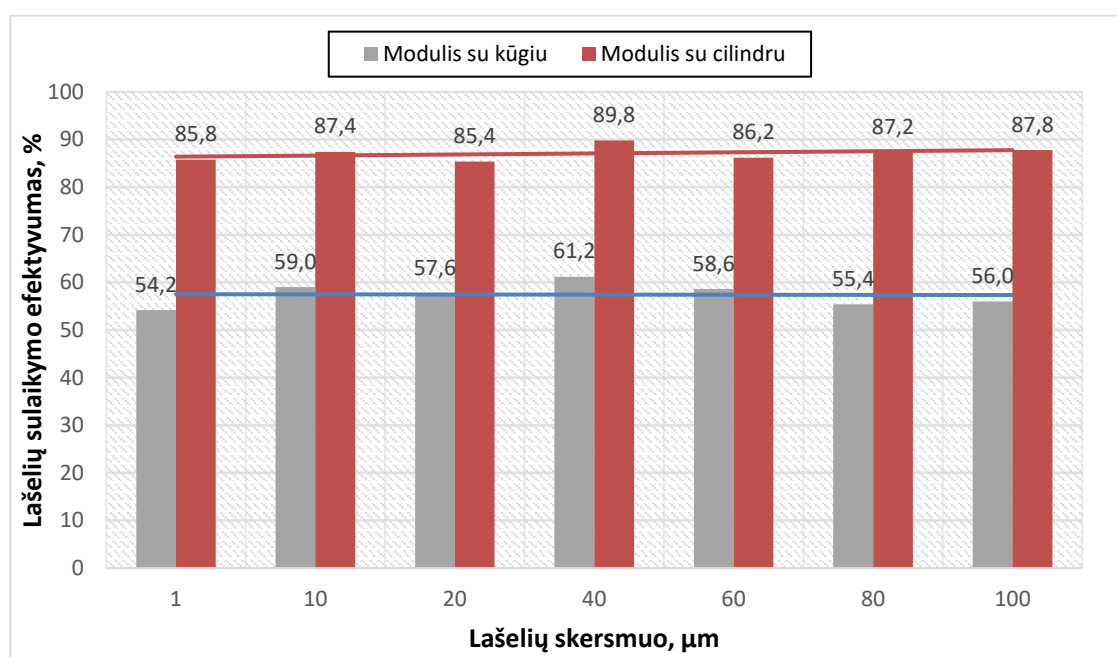
**7 lentelė.** Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 3 l/s srautui

Modulis	Srauto greitis, m/s	Suardymo slėgis, Pa	Turbulencijos intensyvumas, %	Turbulencijos energija, J/kg	Turbulencijos laikas, s
Kūgis	0,0025	0,0217	96,46	$5,16 \cdot 10^{-3}$	2,8
Cilindras	0,0038	0,1776	98,19	$1,64 \cdot 10^{-3}$	0,98

Pagal lentelėje (žr. 7 lentelė) gautus duomenis matyti, kad 3 l/s srauto įrenginyje su cilindrinio moduli ties moduli sienoje srauto greitis buvo 0,0038 m/s ir yra 4 kartus didesnis nei 0,75 l/s srauto įrenginyje, bei 2 kartus didesnis nei 1,5 l/s srauto įrenginyje. Suardymo slėgio parametro mažesnė vertė gauta modulyje su cilindru ir siekia 0,1776 Pa. Šis parametras yra 12 kartų didesnis nei 0,75 l/s srauto įrenginyje gautas dydis ir 3,5 karto didesnis nei 1,5 l/s įrenginyje. Mažesnis turbulencijos intensyvumo parametras gautas modulyje su cilindru, turbulencijos energija siekia tik  $1,64 \cdot 10^{-3}$  ir yra 3 kartus mažesnė nei modulyje su kūgiu. Turbulencijos laikas ilgesnis modulyje su kūgiu ir siekia 2,8 s, o modulyje su cilindru 0,98 s. Apibendrinant 3 l/s srauto įrenginio lašelių atskyrimo efektyvumą pastebima, kad trumpesnis turbulencijos laikas, turbulencijos energija ir suardymo slėgis turėjo įtakos geresniam visų į įrenginį patenkančių lašelių atskyrimo efektyvumui modulyje su cilindru nei su kūgiu.

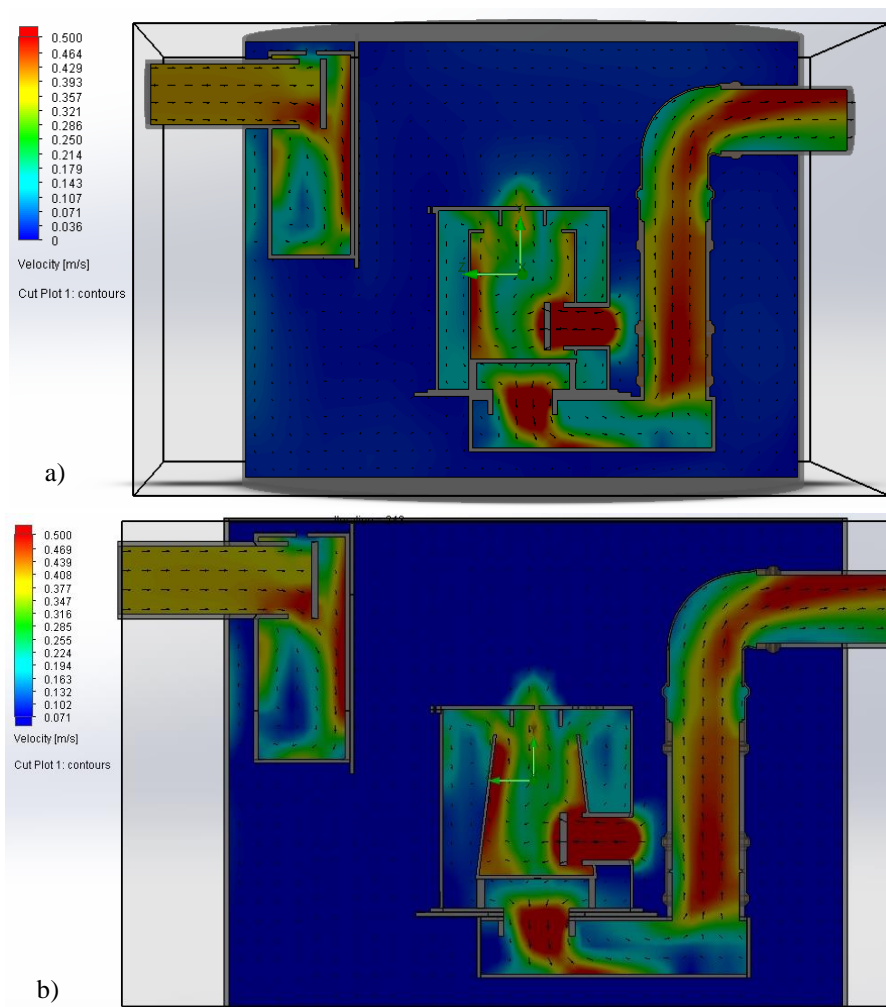
### 3.1.4. 6 l/s našumo įrenginio modeliavimas

Atlikus 6 l/s srauto simuliaciją su kūginiu ir cilindrinio ištekėjimo moduliais, buvo nustatytas skirtingo lašelių dydžio sulaikymo efektyvumas. Pateiktame grafike (žr. 25 pav.) matoma, kad skirtuve su cilindrinio ištekėjimo modulių atskyrimo efektyvumas buvo beveik vienodas visiems tirtiems lašelių dydžiams. Didžiausias lašelių atskyrimo efektyvumas buvo pasiektas atskiriant 40  $\mu\text{m}$  dydžio lašelį, kuris siekia 89,8 %, o mažiausias atskiriant 20  $\mu\text{m}$  dydžio lašelį ir atitinkamai siekia 85,4 %. Modulyje su kūgiu, lašelių atskyrimo dinamika keitėsi mažai. Didžiausias atskyrimo efektyvumas pasiektas sulaikant 40  $\mu\text{m}$  dydžio lašelį, kuris yra 61,2 %, o mažiausias 54,2 % sulaikant 1  $\mu\text{m}$  dydžio lašelį. Apibendrintai vertinant sumodeliuotą atskyrimo efektyvumą 6 l/s srauto skirtuve pastebima, kad buvo atskiriami visų modeliujamų dydžių lašeliai ir bendras įrenginio sulaikymo efektyvumas siekė 87,09 %, o skirtuvo su kūginiu modulių siekė 57,43%. Bendras skysčio išbuvimo laikas skirtuve 206 s.



19 pav. Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 6 l/s srautui

Žemiau pateikiamuose skirtuvo pjūviuose (žr. 26 pav.) matomas srauto greitis skirtinguose skirtuvo vietose. Analizuojant srauto greičio parametrus pastebima, kad, lyginant su 3 l/s srauto skirtuvu, įtekėjimo ir ištekėjimo komponentuose jis pakito. Raudona spalva pažymėtos vietos pjūviuose nurodo, kad srauto greitis didesnis nei 0,5 m/s, o simuliacijos metu pasiektas didžiausias greitis įtekėjimo atvamzdyje į atskyrimo modulį siekė 0,98 m/s. Modulyje su kūgiu (žr. 26 pav. b)) prie sienelių matomas didesnis srauto greitis, pagal raudoną ir žalią spalvas. Modulyje su cilindru (žr. 26 pav. a)) srauto greitis mažesnis. Įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžiuose greitis nepakitęs.



**20 pav.** 6 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu

6 l/s skirtuvo simuliacijos metu buvo fiksuojami ištekėjimo modulio su cilindru ir kūgiu parametrai. Nustatyti parametrai pateikiami 8 lentelėje.

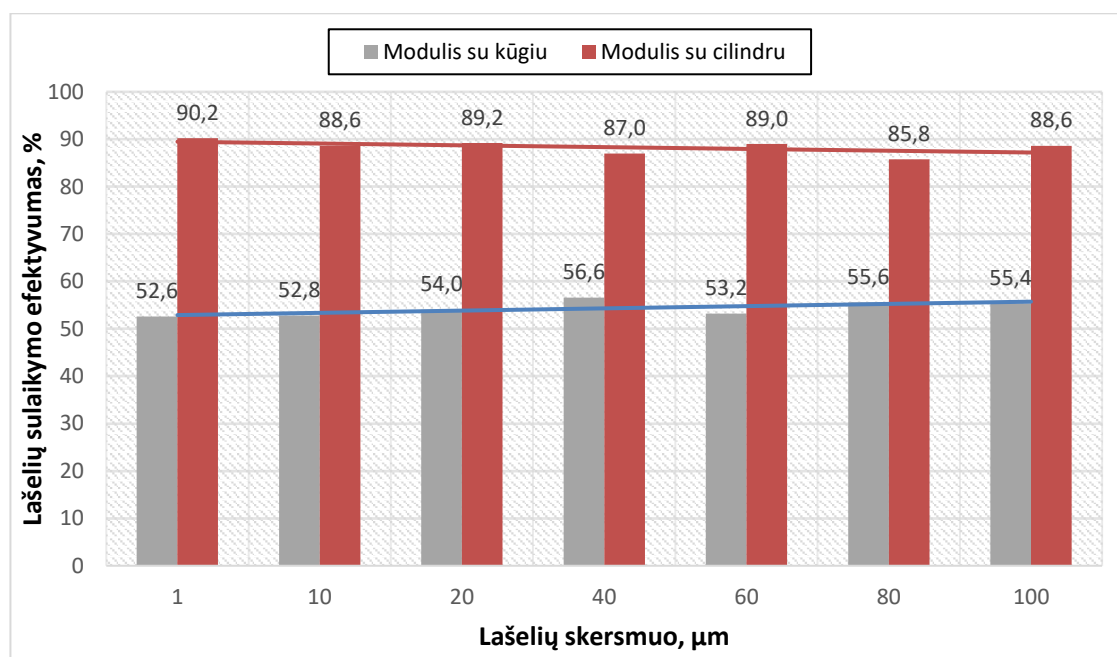
**8 lentelė.** Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 6 l/s srautui

Modulis	Srauto greitis, m/s	Suardymo slėgis, Pa	Turbulencijos intensyvumas, %	Turbulencijos energija, J/kg	Turbulencijos laikas, s
Kūgis	0,0088	0,7598	97,89	$6,17 \cdot 10^{-3}$	0,48
Cilindras	0,0077	0,6266	98,19	$6,66 \cdot 10^{-3}$	0,48

Pagal 8 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad mažesnis srauto greitis pasiektas modulyje su cilindru ir siekė 0,0077 m/s ir yra 2 kartus didesnis nei 3 l/s srauto įrenginyje. Suardymo slėgio vertė modulyje su cilindru siekia 0,6266 Pa ir yra 3,5 karto didesnė nei 3 l/srauto įrenginio. Turbulencijos intensyvumas išliko nepakitęs lyginant su 0,75 l/s, 1,5 l/s ir 3 l/s srauto skirtuvais. Turbulencijos energijos kiekis modulyje su cilindru, lyginant su 3 l/s srauto skirtuvu, padidėjo 4 kartus ir siekė  $6,6 \cdot 10^{-3}$  J/kg. Turbulencijos laikas abiejų tipų moduluose siekė 0,48 s. Apibendrinant 6 l/s srauto atskyrimo efektyvumui įtakos turi mažesnis srauto greitis cilindrinio modulio vidinėje dalyje ir mažesnis suardymo slėgis.

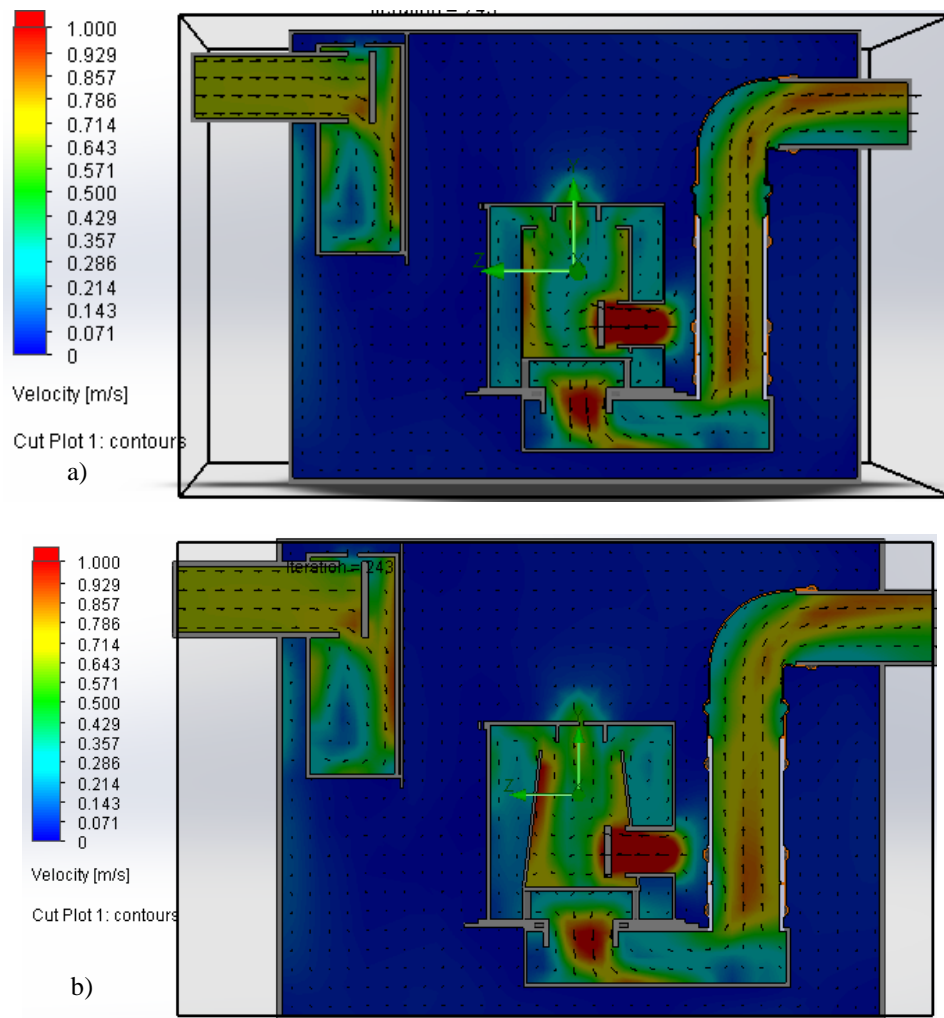
### 3.1.5. 10 l/s našumo įrenginio modeliavimas

Atlikus 10 l/s srauto simuliaciją įrenginyje su cilindrinio ir kūginio ištekėjimo moduliais, buvo nustatytas skirtingo lašelių dydžio sulaikymo efektyvumas abiejuose tirtų skirtuvų tipuose. Pateiktame grafike (žr. 27 pav.) matoma, kad skirtuvas su cilindrinio ištekėjimo moduliū pasiekė geresnius rezultatus nei skirtuvas su kūgiu. Didžiausias lašelių sulaikymo efektyvumas 90,2 % buvo pasiektas modulyje su cilindru atskiriant 1 μm dydžio lašelius. Sulaikant didesnio dydžio lašelius, sulaikymo efektyvumas mažėjo. Mažiausias efektyvumas siekė 85,8 % sulaikant 80 μm dydžio lašelius. Modulyje su kūgiu didžiausias efektyvumas 56,6 % pasiektas sulaikant 40 μm dydžio lašelius, o mažiausias 52,6 % sulaikant 1 μm lašelius. Įvertinus bendrą lašelių sulaikymo efektyvumą, skirtuvas su cilindrinio ištekėjimo moduliū pasiekė 88,34 %, o su kūgiu 54,31 %. Bendras skysčio išbuvimo laikas skirtuve 124 s.



21 pav. Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 10 l/s srautui

Žemiau pateikiamuose 10 l/s srauto skirtuvo pjūviuose (žr. 28 pav.) matomas srauto greitis skirtinguose įrenginio komponentuose su cilindrinio ir kūginio moduliū. Svarbu paminėti, kad greičio skalė nustatyta tokia, kad maksimalus rodomas srauto greitis skirtuve būtų iki 1 m/s. Ankščiau pateiktuose pjūviuose (žr. 20 pav., 22 pav., 24 pav., 26 pav.) skalė nustatyta iki 0,5 m/s srauto greičio vaizdavimui. Pjūvyje su kūginio moduliū (žr. 26 pav. b) yra pastebimai didesnis srauto greitis moduliū viduje. Dalis skysčio iš kūginio moduliū persipila per viršutinę moduliū dalį didesniu greičiu nei modulyje su cilindru. Įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžiuose greitis, priklausomai nuo moduliū tipo, nesikeitė.



**22 pav.** 10 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu

Žemiau pateiktoje 9 lentelėje pateikiami parametų rezultatai, kurie buvo fiksuojami ant cilindro ir kūgio modulių vidinių sienelių.

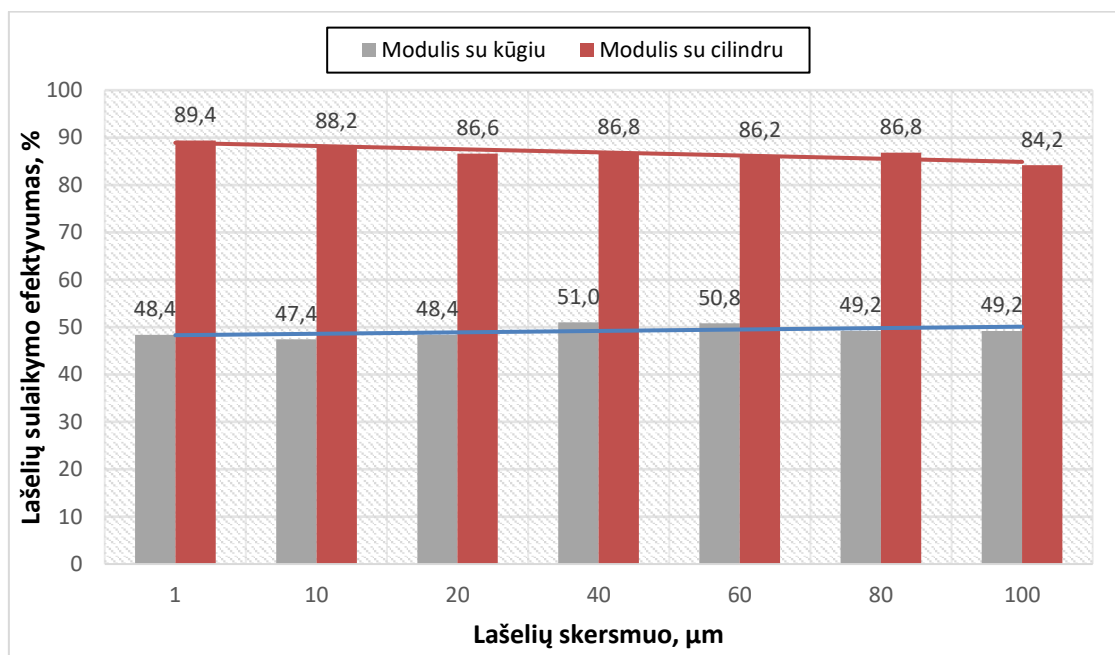
**9 lentelė.** Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 10 l/s srautui

Modulis	Srauto greitis, m/s	Suardymo slėgis, Pa	Turbulencijos intensyvumas, %	Turbulencijos energija, J/kg	Turbulencijos laikas, s
Kūgis	0,0149	1,9207	97,89	$1,71 \cdot 10^{-2}$	0,29
Cilindras	0,0128	1,5843	98,19	$1,83 \cdot 10^{-2}$	0,28

Pagal 9 lentelėje pateiktus duomenis matoma, kad srauto greitis modulyje su cilindru yra mažesnis ir siekia 0,0128 m/s ir yra daugiau kaip 1,5 karto didesnis nei 6 l/s srauto skirtuve su cilindrinio moduli. Suardymo slėgio vertė modulyje su cilindru siekia 1,5843 Pa ir yra mažesnė nei modulyje su kūgiu. Turbulencijos intensyvumas išliko nepakitęs kaip ir mažesnio srauto skirtuvuose. Turbulencijos energija modulyje su cilindru siekia  $1,83 \cdot 10^{-2}$  Pa ir yra 2,7 karto didesnė nei 6 l/s srauto skirtuve. Turbulencijos laikas abiejų tipų moduluose nesiskiria. Apibendrinant 10 l/s srauto skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumą ir vidinės modulio sienelės parametrus pastebima, kad į skirtuvą patenkantis didesnis skysčio srautas skatina susidaryti didesnę turbulencijos energiją ir mažesnę suardymo slėgį, dėl kurių efektyviau sukimba ir yra sulaikomi mažesni lašeliai. Modulyje su kūgiu turbulencijos energija buvo mažesnė, o suardymo slėgis didesnis, tai lėmė prastesnį atskyrimo efektyvumą.

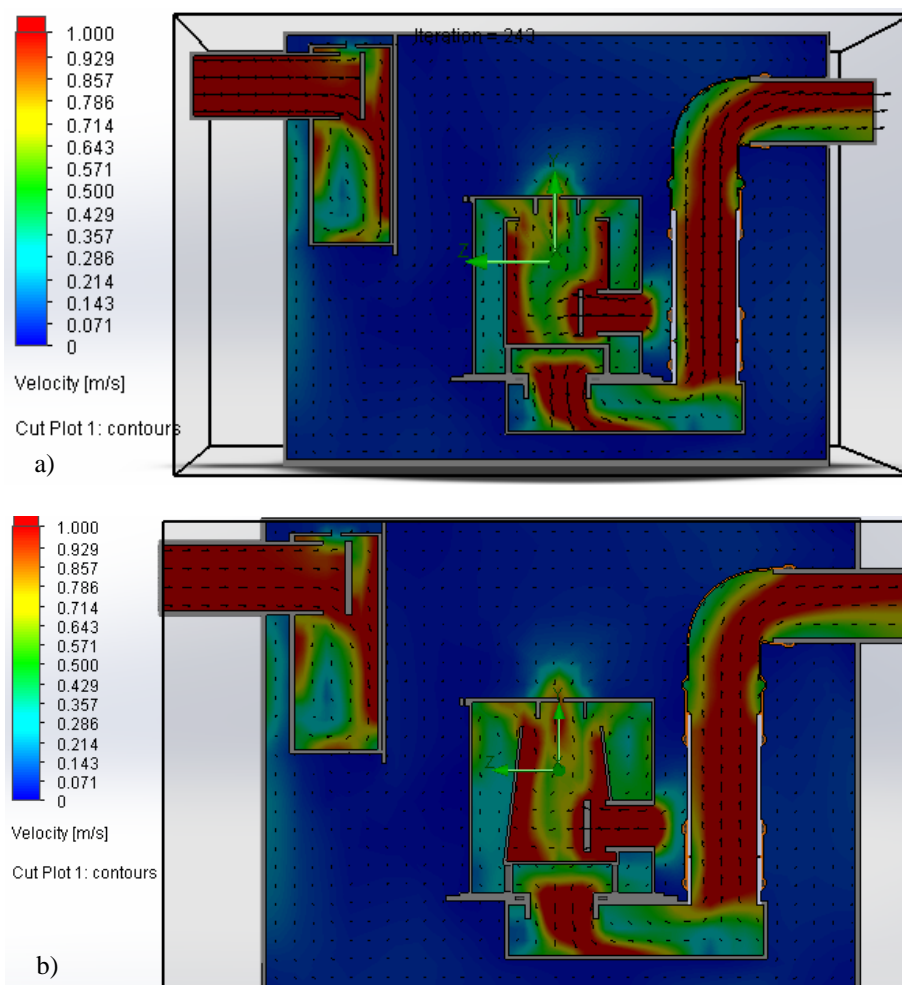
### 3.1.6. 15 l/s našumo įrenginio modeliavimas

Atlikus srauto simuliaciją 15 l/s srauto skirtuve su cilindrinio ir kūginio ištekėjimo moduliais, buvo nustatytas skirtingo lašelių dydžio sulaikymo efektyvumas. Pateiktame grafike (žr. 29 pav.) matoma, kad efektyviausiai 89,4 % buvo sulaikomi 1  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai modulyje su cilindru. Sulaikymo efektyvumas didėjant lašelių dydžiui mažėja ir pasiekia 84,2 % sulaikymo efektyvumą 100  $\mu\text{m}$  dydžio lašelių. Modulyje su kūgiu efektyviausiai 51 % buvo sulaikomi 40  $\mu\text{m}$  dydžio lašeliai, o mažiausias atskyrimo efektyvumas 47,4 % pasiektas atskiriant 10  $\mu\text{m}$  dydžio lašelius. Įvertinus bendrą lašelių sulaikymo efektyvumą, skirtuvas su cilindrinio moduli siekė 86,89 %, o su kūginiu 49,2 %. Bendras skysčio išbuvimo laikas įrenginyje 82,6 s.



23 pav. Hidrodinaminio skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumas esant 15 l/s srautui

Žemiau pateikiamuose 15 l/s srauto skirtuvo pjūviuose (žr. 30 pav.) vizualizuojamas srauto greitis atskiruose skirtuvo komponentuose. Analizuojant srauto greičio parametrus pastebima, kad srauto greitis skirtuve su ištekėjimo kūginiu modulio (žr. 30 pav. b) yra intensyvesnis nei cilindriname modulyje (žr. 30 pav. a). Modulyje su kūgiu didesnis skysčio tekėjimo greitis užima didesnę modulio tūrį, taip pat persipildamas skystis per kūgio viršutinę juda didesniu greičiu nei modulyje su cilindru. Abiejuose skirtuvo pjūviuose pastebimas didesnis srauto greitis lengvesnio skysčio gaudyklės vietoje (žr. 17 pav. 7).



**24 pav.** 15 l/s srauto hidrodinaminio skirtuvo pjūvis, vaizduojantis srauto greitį išbėgimo modulyje: a) su cilindru; b) su kūgiu

Žemiau pateiktoje 10 lentelėje pateikiami parametrų rezultatai, kurie buvo fiksuojami ant cilindro ir kūgio modulių vidinių sienelių.

**10 lentelė.** Hidrodinaminio ištekėjimo modulio parametrai, esant 15 l/s srautui

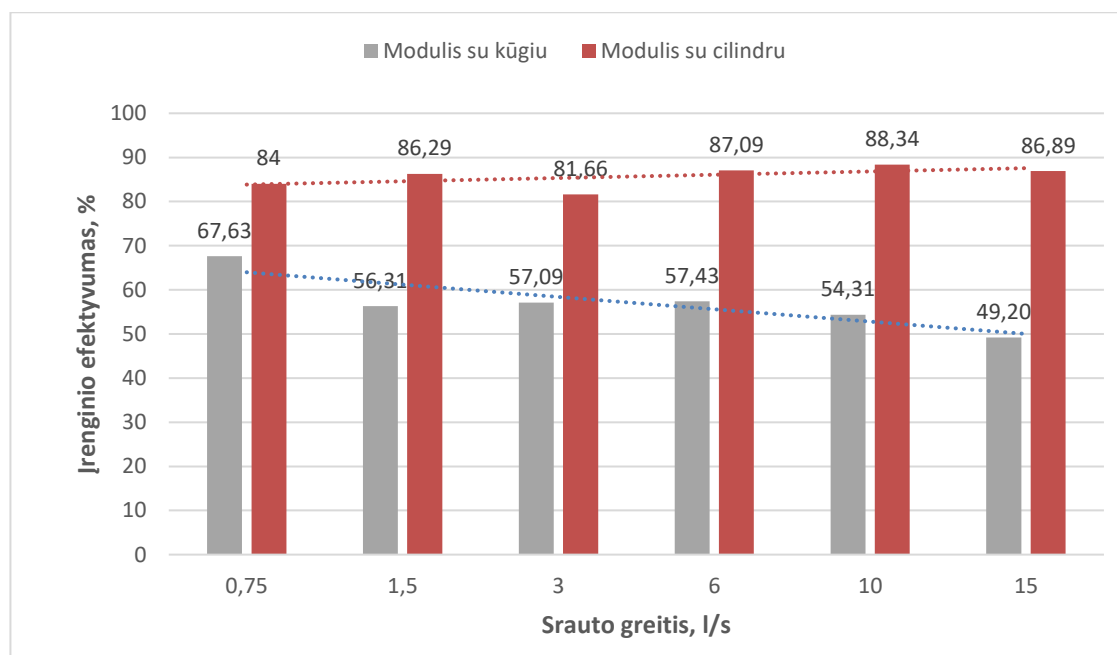
Modulis	Srauto greitis, m/s	Suardymo slėgis, Pa	Turbulencijos intensyvumas, %	Turbulencijos energija, J/kg	Turbulencijos laikas, s
Kūgis	0,0224	4,0169	97,89	$3,97 \cdot 10^{-2}$	0,19
Cilindras	0,0192	3,2802	98,2	$4,17 \cdot 10^{-2}$	0,18

Pagal 10 lentelėje pateiktus duomenis matoma, kad srauto greitis modulyje su cilindru yra mažesnis ir siekia 0,0192 m/s ir yra 1,5 karto didesnis nei 10 l/s srauto skirtuve su cilindrinio moduli. Suardymo slėgio vertė modulyje su cilindru siekia 3,2802 Pa ir yra mažesnė nei modulyje su kūgiu. Turbulencijos intensyvumas išliko nepakitęs kaip ir mažesnio srauto skirtuvuose. Turbulencijos energija modulyje su cilindru siekia  $4,17 \cdot 10^{-2}$  J/Pa ir yra 2,2 karto didesnė nei 10 l/s srauto skirtuve. Turbulencijos laikas abiejų tipų moduluose nesiskiria, bet lyginant su kitų srautų skirtuvais yra mažiausias. Apibendrinant 15 l/s srauto skirtuvo lašelių atskyrimo efektyvumą ir vidinės modulio sienelės parametrus pastebima, kad į skirtuvą patenkantis didesnis skysčio srautas skatina susidaryti didesnę turbulencijos energiją ir mažesnę suardymo slėgį, dėl kurių efektyviau sukimba ir yra sulaikomi mažesni lašeliai. Modulyje su kūgiu turbulencijos energija buvo mažesnė, o suardymo slėgis didesnis, tai lėmė prastesnį atskyrimo efektyvumą.



### 3.2. Skirtingų konstrukcijų skirtuvų palyginimas

Atlikus matematinę srautų simuliaciją naudojant studentams skirtą SolidWorks (2018-2019 Dassault Systemes) SDK Flow Simulation (liet. srautų simuliacija) programinės įrangos versiją buvo nustatytas skirtuvo efektyvumas sulaikant skirtingo dydžio lašelius, lyginant skirtuvo konstrukciją su cilindrinio ir su kūginiu ištekėjimo moduliu. Pagal gautus simuliacijos rezultatus kurie aprašyti 3.1 skyriuje matoma, kad skirtuvas su cilindrinio ištekėjimo moduliu efektyviau veikė visais tirtais atvejais. Žemiau pateikiamas grafikas, apibendrinantis visų tirtų srautų lašelių sulaikymo efektyvumą (žr. 31 pav.)



25 pav. Lašelių sulaikymo efektyvumas esant skirtingam srautui.

Pagal grafike pateiktus duomenis matoma, kad efektyviausiai naftos produktų lašeliai buvo atskiriami 10 l/s srauto skirtuve ir siekė 88,34 %, o mažiausias sulaikymo efektyvumas 81,66 % buvo 3 l/s srauto skirtuve. Lašelių sulaikymo dinamika skirtuve kito netolygiai. Skirtuve su kūginiu ištekėjimo moduli didėjant skysčio srautui efektyvumas mažėjo. Didžiausias efektyvumas 67,63 % pasiektas sulaikant lašelius 0,75 l/s srauto skirtuve, mažiausias 49,2 % 15 l/s skirtuve.

Pagal gautus duomenis visų simuliacijų metu, galima teigti, kad optimalus srauto greitis susidarantis ištekėjimo modulio viduje yra pagrindinis veiksnys, lemiantis lašelių sulaikymo efektyvumą skirtuve. Dėl srauto greičio didėja naftos produkto mažesnių lašelių susidūrimas ir šių lašelių koalescencija. Nuo skysčio srauto greičio priklauso pagrindiniai parametrai: turbulencijos energijos dydis ir suardymo slėgis [40]. Naftos produktų lašelių kinetinė energija yra tiesiogiai susijusi su turbulentine skysčio energija skirtuve. Didesnė turbulencijos energija ir turbulencijos intensyvumas skatina mažesnių naftos produktų lašelių koalescenciją į didesnius ir jų sulaikymą skirtuve. Esant didesniam srauto greičiui ir didesniam suardymo slėgiui, didesni naftos produkto lašeliai yra suardomi į mažesnius lašelius, kurie su tekančiu srautu išteka iš skirtuvo [40]. Visų nagrinėjamų simuliacijų metu modulyje su cilindru buvo fiksuojamos mažesnės srauto greičio ir suardymo slėgio reikšmės nei modulyje su kūgiu, taip pat modulyje su cilindru turbulencijos energija buvo didesnė.

### 3.3. Fizinio srautų modeliavimo rezultatai

Pagal gautus matematinio srautų modeliavimo rezultatus, pasirinkta atlikti fizinį srautų modeliavimą 3 l/s ir 6 l/s srautų skirtuvams. Fizinis modelis su cilindrinio ištekėjimo modulių gaminamas iš polietileno. Bendras skirtuvo tūris 790 l.



26 pav. Hidrodinaminis naftos skirtuvas

Pagaminto skirtuvo testavimas buvo atliekamas įmonėje kuri gamina paviršinių ir gamybinių nuotekų valymo įrenginius.

Atliekant bandymą realiomis sąlygomis buvo sukurtas 3 l/s ir 6 l/s vandens srautas į kurį buvo dozuojamas naftos produkto kiekis atitinkamai 15 ml/s ir 30 ml/s greičiu. Testavimo metu vizualiai buvo stebimas didesnių naftos produktų lašelių kilimas ir kaupimasis skirtuvo paviršiuje. Mėginiai, iš skirtuvo ištekancio atvamzdžio, buvo imami remiantis LST EN 858-1:2002 [38] standarte nurodyta metodika (žr. 2.4 skyrių). Ištyrus išvalytų nuotekų mėginius, nustatyta, kad 3 l/s srauto skirtuve naftos produktų koncentracijos vidurkis iš 5 mėginių (1 – 1,13 mg/l, 2 – 0,87 mg/l, 3 – 0,81 mg/l, 4 – 0,52 mg/l, 5 – 0,47 mg/l) siekė  $0,76 \pm 0,24$  mg/l ir lyginant su pradine užterštumo koncentracija 4250 mg/l, sumažėjo 5592 kartus. 3 l/s srauto skirtuvo atskyrimo efektyvumas siekė 99,98 %. 6 l/s srauto skirtuve naftos produktų koncentracijos vidurkis iš 5 mėginių (1 – 14 mg/l, 2 – 12 mg/l, 3 – 7,3 mg/l, 4 – 4,8 mg/l, 5 – 10 mg/l) siekė  $9,62 \pm 3,27$  mg/l lyginant su pradine užterštumo koncentracija sumažėjo 441 kartą. 6 l/s srauto skirtuvo atskyrimo efektyvumas siekė 77,34 %. Gavus mažesnę atskyrimo efektyvumo rezultatą 6 l/s sraute, buvo pakartotas skirtuvo testavimas sumontuojant hidrodinaminius atskyrimo komponentus į didesnio tūrio 1300 l rezervuarą. Atlikus testavimą, gauta naftos produktų koncentracija po valymo siekė 1,45 mg/l ir nuo pradinės užterštumo koncentracijos sumažėjo 2931 kartą. Pasiektas 6 l/s srauto skirtuvo didesniame rezervuare efektyvumas siekė 99,96 %.

Pagal gautus fizinio modeliavimo rezultatus galima teigti, kad didėjant skysčio srautui ir mažėjant skysčio išbuvimo laikui skirtuve, atskyrimo efektyvumas mažėja.

Toliau pateiktame paveiksle (žr. 33pav.) vaizduojama įranga, naudota atliekant fizinio modelio testavimą realiomis sąlygomis.



27 pav. Skirtuvo bandymo stendas

### 3.4. Modelio verifikavimas

Atlikus matematinę ir fizinę srautų modeliavimą buvo gauti duomenys apie atskyrimo efektyvumą. Matematinio srautų modeliavimo metu tiriant 3 l/s skirtuvo atskyrimo efektyvumą buvo gauta 81,66 % atskyrimo efektyvumas. Atliekant fizinę 3 l/s srauto modeliavimą buvo gautas 99,98 % atskyrimo efektyvumas kuris buvo 18,32 % didesnis, nei matematinio modeliavimo metu. Atliekant 6 l/s srauto matematinę modeliavimą gautas skirtuvo efektyvumas siekė 87,09 %, o fizinio modeliavimo metu į tą patį skirtuvą kaip ir 3l/s – 77,4 %. Fizinio modeliavimo metu gautas skirtuvo efektyvumas buvo 9,69 % mažesnis.

Gauti skirtingi rezultatai galėjo atsirasti dėl nevienodų eksperimento sąlygų tarp matematinio ir fizinio modeliavimo. Matematinio modeliavimo metu visi nustatyti sistemos parametrai tokie, kaip vandens temperatūra, tankis ir srauto greitis buvo nekintantys, o fizinio modeliavimo metu šių parametru reikšmės galėjo pakisti.

## Išvados

1. Atlikus išsamią literatūros analizę pastebėta, kad ieškant efektyvių skirtingo tankio skysčių atskyrimo metodų, vis dažniau yra tiriami hidrodinaminiu principu veikiantys įrenginiai. Išanalizuota hidrodinaminiais principais veikiančių įrenginių sandara, veikimo principai ir konstrukcijos. Remiantis apžvelgtoje mokslinėje literatūroje pateikiama informacija, buvo pasirinkti įrenginio darbo efektyvumo tyrimo parametrai ir metodai.
2. Matematinio srautų modeliavimo metu buvo įvertintas naftos produktų lašelių sulaikymo efektyvumas įrenginyje su cilindrinio ir kūginio ištekėjimo moduliais. Įrenginio efektyvumas 0,75 l/s srauto įrenginyje su cilindrinio moduliu siekė 84 %, su kūginio 67,73 %. 1,5 l/s srauto skirtuvo efektyvumas su cilindru – 86,29 %, su kūgiu – 56,31 %. 3 l/s srauto skirtuvo efektyvumas su cilindru – 81,66 %, su kūgiu – 57,09 %. 6 l/s srauto skirtuvo efektyvumas su cilindru – 87,09 %, su kūgiu – 57,43 %. 10 l/s srauto skirtuvo efektyvumas su cilindru – 88,34 %, su kūgiu – 54,31 %. 15 l/s skirtuvo atskyrimo efektyvumas su cilindru – 86,89 %, su kūgiu – 49,2 %. Modeliavimo rezultatai parodė skirtingo dydžio lašelių atskyrimo dinamiką, įtekančio srauto greičio gradientą skirtuve. Nustatyta, kad hidrodinaminio atskyrimo įrenginio efektyvumas priklauso nuo įvairių parametru: įtekančio skysčio srauto greičio, srauto turbulencijos energijos, suardymo slėgio, į skirtuvą patenkančių lašelių dydžio ir išbuvimo skirtuve laiko.
3. Remiantis matematinio modeliavimo rezultatais, iš polietileno buvo pagamintas ir ištestuotas fizinis naftos produktų skirtuvas su cilindrinio ištekėjimo moduli. Tyrimo metu nustatytas naftos produktų atskyrimo realiame įrenginyje efektyvumas: 3 l/s srauto skirtuve naftos produktų koncentracija po valymo siekė  $0,76 \pm 0,24$  mg/l (atskyrimo efektyvumas - 99,98 %), 6 l/s srauto skirtuve -  $9,62 \pm 3,27$  mg/l (77,34 % efektyvumas). Tolimesni tyrimai galėtų būti orientuoti į optimalaus įrenginio tūrio parinkimą skirtingam srauto greičiui.

## Literatūros sąrašas

1. RUDZINSKI, Walter E.; AMINABHAVI, Tejraj M. A review on extraction and identification of crude oil and related products using supercritical fluid technology. *Energy & fuels*, 2000, 14.2: 464-475.
2. SPEIGHT, James G. Sources and Types of Organic Pollutants. *Environmental organic chemistry for engineers*. Butterworth-Heinemann, 2016, 153–201, ISBN 9780128044926.
3. NOLAN, Dennis P. Physical Properties of Hydrocarbons and Petrochemicals. *Handbook of fire and explosion protection engineering principles: for oil, gas, chemical and related facilities (Fourth Edition)*. Gulf Professional Publishing, 2019, 65-88, ISBN 9780128160022.
4. CLEWS, Robert. Fundamentals of the Petroleum Industry. *Project finance for the international petroleum industry*. Academic Press, 2016, 83-99, ISBN 9780128001585.
5. EUROSTAT. Oil and petroleum products. (2017). [žiūrėta 2018-05-10]. Prieiga per internetą : [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Oil\\_and\\_petroleum\\_products\\_-\\_a\\_statistical\\_overview](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Oil_and_petroleum_products_-_a_statistical_overview)
6. KESHAVARZIAN, Maryam, et al. Projections of oil demand in road transportation sector on the basis of vehicle ownership projections, worldwide: 1972–2020. *Economic Modelling*, 2012, 29.5: 1979-1985.
7. AIZEMBERG, Luiz, et al. Formulations for a problem of petroleum transportation. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237.1: 82-90.
8. SIDDIQUI, Atiq; VERMA, Manish; VERTER, Vedat. An integrated framework for inventory management and transportation of refined petroleum products: Pipeline or marine?. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 55: 224-247.
9. GUPTA, Raju Kumar, et al. Oil/water separation techniques: a review of recent progresses and future directions. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5.31: 16025-16058.
10. HUSSEIN, M.; AMER, A. A.; SAWSAN, I. I. Oil spill sorption using carbonized pith bagasse: trial for practical application. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2008, 5.2: 233-242.
11. ZAHUGI, Emaad Mohamed H.; SHANTA, Mohamed M.; PRASAD, T. V. Design of multi-robot system for cleaning up marine oil spill. *International Journal of Advanced Information Technology*, 2012, 2.4: 33.
12. GHANNAM, Mazmdouh T.; CHAALAL, Omar. Oil spill cleanup using vacuum technique☆. *Fuel*, 2003, 82.7: 789-797.
13. FRANKLIN, Charles L.; WARNER, Lori J. Fighting chemicals with chemicals: the role and regulation of dispersants in oil spill response. *Nat. Resources & Env't*, 2011, 26: 7.
14. GAASEIDNES, Knut; TURBEVILLE, Joseph. Separation of oil and water in oil spill recovery operations. *Pure and applied chemistry*, 1999, 71.1: 95-101.
15. ZHANG, Lianbin, et al. A self-cleaning underwater superoleophobic mesh for oil-water separation. *Scientific reports*, 2013, 3: 2326.
16. HAN, Yunrui, et al. A review of the recent advances in design of corrugated plate packs applied for oil–water separation. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2017, 53: 37-50.
17. DUDEK, Marcin, et al. Microfluidic tools for studying coalescence of crude oil droplets in produced water. *Chemical Engineering Science*, 2018, 191: 448-458.

18. AMERICAN SOCIETY OF PLUMBING ENGINEERS. Grease interceptors. *Plumbing Engineering Design Handbook*. 2016, ISBN 9781891255403.
19. ZHANG, Lu-hong, et al. Optimal design of a novel oil–water separator for raw oil produced from ASP flooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 59.3-4: 213-218.
20. OLADZAD, Sepideh; FALLAH, Narges; NASERNEJAD, Bahram. Combination of novel coalescing oil water separator and electrocoagulation technique for treatment of petroleum compound contaminated groundwater. *Water Science and Technology*, 2017, 76.1: 57-67.
21. KULKARNI, Prashant S.; PATEL, Shagufta U.; CHASE, George G. Layered hydrophilic/hydrophobic fiber media for water-in-oil coalescence. *Separation and purification technology*, 2012, 85: 157-164.
22. SOKOLOVIC, R. M.; SOKOLOVIC, Slobodan M.; DOKOVIC, Bosko D. Effect of Working-Conditions on Bed Coalescence of an Oil-in-Water Emulsion Using a Polyurethane Foam Bed. *Industrial & engineering chemistry research*, 1997, 36.11: 4949-4953.
23. MAGIERA, Robert; BLASS, Eckhart. Separation of liquid-liquid dispersion by flow through fibre beds. *Filtration & separation*, 1997, 34.4: 369-376.
24. LANTEC PRODUCTS INC. (JAV.) Stacked packing with spacing features. Inventors: LANG, Ko C. . U.S. Patent No 6,241,222, 2001. United States Patent and Trademark Office [žiūrėta 2019-04-05]. Prieiga per : <https://patents.google.com/patent/US6241222B1/en>
25. LIU, Yucheng, et al. Three-phase hydrocyclone separator—a review. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 100: 554-560.
26. Mahmoud, Mohamed Ahmed M., Hydrodynamic Separator Unit for Removal and Recovery Oil from Wastewater. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, J Pet Environ Biotechnol, 2016, 7: 266.
27. TIAN, Jinyi, et al. An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. *Separation and Purification Technology*, 2018.
28. EOW, John S.; GHADIRI, Mojtaba; SHARIF, Adel O. Electro-hydrodynamic separation of aqueous drops from flowing viscous oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 55.1-2: 146-155.
29. SHI, Shi-ying, et al. A study on separation performance of a vortex finder in a liquid-liquid cylindrical cyclone. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 2010, 22.5: 391-397.
30. WILSON, Matthew A., et al. Assessment of hydrodynamic separators for storm-water treatment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135.5: 383-392.
31. EPA. Stormwater Technology Fact Sheet: Hydrodynamic Separators. 1999.
32. HUANG, Long, et al. Development of a novel high-efficiency dynamic hydrocyclone for oil–water separation. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 130: 266-273.
33. SIMKIN, D. J.; OLNEY, R. B. Phase separation and mass transfer in a liquid-liquid cyclone. *AIChE Journal*, 1956, 2.4: 545-551..
34. Physical characteristics of water. [žiūrėta 2019-01-20]. Prieiga per internetą: [https://www.thermexcel.com/english/tables/eau\\_atm.htm](https://www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm)
35. LÓPEZ-VAZQUEZ, Carlos M.; FALL, Cheikh. Improvement of a gravity oil separator using a designed experiment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 157.1-4: 33-52.
36. MACKENZIE, L. Davis. Water and wastewater engineering: *Design principles and practice*. McGraw-Hill Education, 2019.

37. SOBACHKIN, A.; DUMNOV, G. Numerical basis of CAD-embedded CFD. In: *NAFEMS World Congress*. 2013. p. 9-12.
38. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 858-1:2002. Lengvųjų skysčių (pvz., alyvos ar benzino) skirtuvai. 1 dalis. Konstravimo, veikimo ir bandymo principai, ženklėjimas ir kokybės tikrinimas (EN 858-1:2002) = Separator systems for light liquids (e.g. Oil and petrol) - Part 1: Principles of product design, performance and testing, marking and quality control: Lietuvos Standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
39. LAND 61 – 2003. Vandens kokybė. Dujų chromatografijos metodas naftos angliavandenilių indeksui nustatyti [interaktyvus]. Vilnius. 2003 m. Žiūrėta 2019 m. balandžio 12 d. Prieiga per internetą: < <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.438B30CE3969> >.
40. CAI, Xiaolei, et al. Numerical studies on dynamic characteristics of oil-water separation in loop flotation column using a population balance model. *Separation and Purification Technology*, 2017, 176: 134-144.