



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

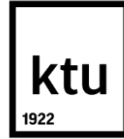
Aluminio oksido nanomembranos gamyba mikrohidraulikos įrenginiams

Baigiamasis magistro projektas

Justas Ciganas
Projekto autorius

Prof. Giedrius Janušas
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Aluminio oksido nanomembranos gamyba mikrohidraulikos įrenginiams

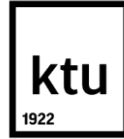
Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Justas Ciganas
Projekto autorius

Prof. Giedrius Janušas
Vadovas

Prof. Arvydas Palevičius
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Justas Ciganas

Aluminio oksido nanomembranos gamyba mikrohidraulikos įrenginiams

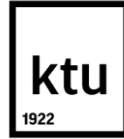
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, *Justo Cigano*, baigiamasis projektas tema „*Aluminio oksido nanomembranos gamyba mikrohidraulikos įrenginiams*“ 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.

(Vardas, Pavardė įrašomi ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – MECHANIKOS INŽINERIJA 6211EX009

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) – Justui Ciganui

1. Baigiamojo projekto tema –

Aluminio oksido nanomembranos gamyba mikrohidraulikos įrenginiams

(Lietuvių kalba)

Fabrication of Aluminum Oxide Nanomembrane for Microhydrolic Devices

(Anglų kalba)

2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

Darbo tikslas – suprojektuoti ir pagaminti aliuminio oksido nanomembranos, skirtos naudoti mikrohidraulikos įrenginiuose mikrodalelių filtravimui, gamybos standą.

3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

Elektrocheminiu būdu pagaminti aliuminio oksido nanomembraną, kurios poros skersmuo turi būti apie 200 nm.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Suformuota nanomembrana turi būti vienalytė porėto aliuminio oksido struktūra

Projekto autorius

Justas Ciganas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Baigiamojo projekto vadovas

Prof. Giedrius Janušas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų programos vadovas

Doc, dr. Kęstutis Pilkauskas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Ciganas, Justas. Aliuminio oksido nanomembranos gamyba mikrohidraulikos įrenginiams. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Giedrius Janušas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis (studijų krypčių grupė), studijų kryptis: Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: aliuminio oksidas, nanomembrana, mikrohidraulika.

Kaunas, 2020. 52 p.

Santrauka

Šiuolaikinė pramonė ir mokslas jau neišsivaizduojami be naujų ir inovatyvių medžiagų, kurios gali atverti įvairias galimybes naujiems procesams. Pastaruoju metu didžioji dalis šių inovacijų apima mikro- ir nanolygius, nes būtent šiuose lygmenyse siekiama pakeisti medžiagos charakteristikas ar sukurti struktūras, kurias būtų galima naudoti mikrohidraulikoje ir kitoje srityje. Gaminant šias struktūras svarbu užtikrinti stabilų gamybos procesą, tvarkingą struktūrą ir nekintančias charakteristikas, todėl šio darbo metu siekiama pagaminti aliuminio oksido nanomembraną ir atlikti laminarinio tekėjimo ir akustinio slėgio analizes. Tyrimo metu pagamintas standas, kurio paskirtis – užtikrinti reikalingas aliuminio oksido nanomembranos gamybos proceso sąlygas.

Darbo objektas. Aliuminio oksido nanomembrana.

Darbo tikslas: pagaminti aliuminio oksido nanomembraną, skirtą naudoti mikrohidraulikos įrenginiuose mikrodalelių filtravimui.

Pagrindiniai projekto rezultatai: mokslinėje literatūroje identifikuoti trys pagrindiniai mikrohidraulikos skysčio srauto valdymo galimi metodai: naudojant hidrostatinį slėgio skirtumą, siurblių arba infuzinių siurblių. Pastebėta, kad sėkmingai gamybai reikalinga tinkamai paruošti ruošinį – naudojama gryno aliuminio plokštelė, kuri turi būti tinkamai paruošta atliekant cheminį valymą, atkaitinimą ir poliravimą. Sėkmingai gautam ruošiniui atliekama anodacija ir cheminis valymas. Anodacijos procesui sudarytas ir ištestuotas eksperimentinis aliuminio oksido gamybos standas. Eksperimentiškai nustatyta, kad pagamintas aliuminio oksido gamybos standas per dešimt minučių penkis šimtus mililitrų dvidešimties laipsnių pagal Celsijų skystį ataušina iki penkių laipsnių pagal Celsijų. Atlikus visas membranos gamybos procedūras, buvo pagaminta aliuminio oksido nanomembrana. Nustatyta, kad pagamintą aliuminio oksido nanomembraną sudaro aliuminis ir deguonis. Naudojant elektrinį mikroskopą nustatytas aliuminio oksido nanomembranos porų skersmuo, kuris pagamintame ruošinyje yra vidutiniškai du šimtai nanometrų. Atstumas tarp porų centro vidutiniškai - du šimtai penkiasdešimt nanometrų. Atlikus laminarinio srauto tekėjimo moduliavimą, rezultatai parodė, kad membranos debitas viename kvadratiname metre, esant vienam Paskalio slėgio skirtumui, skirtingose membranos pusėse yra 0,0117526 l / min. Imituojant akustinio slėgio įtaką aliuminio oksido membranai, dalelės susifokusavo poros centre, esant 3.7 GHz dažniui. Pastebėta, kad esant dvigubai didesniai dažniui poroje susiformuoja dvi centravimosi zonos.

Ciganas, Justas. Fabrication of Aluminum Oxide Nanomembrane for Microhydraulic Devices. Master's Final Degree Project / supervisor Giedrius Janušas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area (study field group), study field: Technological Sciences, Mechanical Engineering.

Key words: alumina, nanomembrane, microhydraulics.

Kaunas, 2020. 52 p.

Summary

Modern industry and science are no longer imaginable without new and innovative materials that can open up a variety of possibilities for new processes. Recently, most of these innovations include micro- and nano-levels. These levels aim to change material characteristics or rotate structures that could be used in microhydraulics and other fields. In the production of these structures, it is important to ensure a stable production process, orderly structure and constant characteristics, therefore, the aim of this work is to produce an alumina nanomembrane and to perform laminar flow and acoustic pressure analyzes. A stand was made during the research. The purpose of the stand is to ensure the necessary conditions for the alumina nanomembrane production process.

The object of the study: alumina nanomembrane.

The purpose of the study: to produce an alumina nanomembrane for use in microhydraulic devices for filtration of microparticles.

The results of the study: identified three main possible methods for controlling the flow of microhydraulic fluid: using a hydrostatic differential pressure, pump or a syringe pump. The production of the membrane requires proper preparation of the workpiece - a pure aluminum plate is used, which must be properly prepared by dry cleaning, annealing and polishing. The successfully obtained workpiece is subjected to anodizing and dry cleaning. An experimental alumina production stand was developed and tested for the anodizing process. It has been found that the produced alumina production stand cools five hundred milliliters of twenty degrees Celsius liquid to five degrees Celsius in ten minutes. After all the membrane manufacturing procedures, an alumina nanomembrane was produced. The alumina nanomembrane produced was found to consist of aluminum and oxygen. Using an electron microscope, the diameter of the alumina nanomembrane pores was determined, which averages two hundred nanometers in the finished workpiece. The average distance between the center of the pores is two hundred and fifty nanometers. After modulating the flow of the laminar flow, the results showed that the membrane flow per square meter at one Pascal pressure difference on different sides of the membrane is 0.0117526 l / min. Simulating the effect of acoustic pressure on the membrane, the particles focused in the center of the pair at a frequency of 3.7 GHz. It has been observed that at twice the frequency, two centering zones are formed in the pair.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Mikrohidraulikos įrenginių, jų valdymo ir gamybos metodų apžvalga.....	12
1.1. Mikro- ir nanohidraulikos sistemos.....	12
1.2. Mikro- ir nanohidraulikos sistemų elementai.....	16
1.3. Aliuminio oksido nanomembranos.....	17
1.4. Akustinis slėgis ir jo įtaka srautui	21
2. Aliuminio oksido membranos gamyba	24
2.1. Teorinis aliuminio oksido gamybos stendo modelis	24
2.2. Anodacijos proceso eiga.....	32
3. Laminarinio tekėjimo ir akustinio slėgio skaitmeninė analizė aliuminio oksido nanoporose	37
3.1. Laminaris tekėjimas aliuminio oksido nanoporose	37
3.2. Akustinio slėgio skaitmeninė analizė	40
4. Rezultatų apibendrinimas.....	46
Išvados	47
Literatūra	48
Priedai.....	53
1 priedas. Programinis valdymo sistemos kodas	53

Lentelių sąrašas

1.3.1 lentelė. Elektrolito ir įtampos įtaka porų skersmeniui ir atstumui tarp jų [40].....	20
2.2.1 lentelė. Aliuminio oksido nanomembranos gamybos eigos aprašymas	33

Paveikslų sąrašas

1.1.2 pav. Mikrokanalų sistema su skysčio įpurškimo skylėmis [15]	14
1.1.3 pav. Prototipinė klampių skysčių filtravimo sistema.....	16
1.3.1 pav. Aliuminio oksido nanomembrana: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono [34]	18
1.3.2 pav. Aliuminio oksido nanomembranos struktūra.....	19
1.3.1 lentelė. Elektrolito ir įtampos įtaka porų skersmeniui ir atstumui tarp [40].....	20
1.4.1 pav. Dalelių atskyrimo būdai: a) centrifugavimas [48]; b) filtravimas [49].....	21
1.4.2 pav. Akustinio slėgio sukurtas srautas [57]	22
1.4.2 pav. Modeliavimo etapų struktūra	23
2.1.1 pav. Struktūrinė aušinimo sistemos schema, kur: 1 – stiklinis indas, 2 – Peltier elementas, 3 – aušinimo pompa kuri turi aušinimo kontūrą 4 – radiatorius, 5 – maitinimo blokas, 6 – valdymo blokas; 7 – magnetinis maišyklės pagaliukas	24
2.1.2 pav. modelis suskaidytas į baigtinius elementus	26
2.1.3 pav. Temperatūros analizės rezultatai	27
2.1.4 pav. Inde esančio skysčio temperatūros kitimas laike.....	27
2.1.5 pav. Temperatūros analizės rezultatai be aušinimo	28
2.1.6 pav. Gamybos stendas, kur: 1 – stiklinis indas, 2 – Peltier elementas, 3 – aušinimo pompa kuri turi aušinimo kontūrą 4 – radiatorius, 5 – maitinimo blokas, 6 – magnetinė maišyklė.....	29
2.1.7 pav. Surinktas stovas: a - aliuminio plokštelė (1) įtvirtinta laikiklyje (2), b - aliuminio plokštelė įtvirtinta laikiklyje pamerkiama į rūgštinį tirpalą (3)	30
2.1.8 pav. Aušinimo sistemos valdymo struktūrinė schema	30
2.1.9 pav. Šaldymo sistemos valdymo blokas su USB ir temperatūros davikliu	31
2.1.10 pav. Teorinių ir praktinių rezultatų palyginimas	32
2.2.1 pav. Gautos membranos vaizdas	33
2.2.2 pav. Pagamintos aliuminio oksido membranos energinis dispersinis spektras	34
2.2.3 pav. Gautos aliuminio oksido membranos elektrinio mikroskopo metu gauti rezultatai	35
3.1.1 pav. Baigtiniais elementais suskaidytas modelis, kur: 1 – ašiai simetrinė linija, 2 – išorinė siena, 3 – įtekantis srautas, 4 – ištekantis srautas	39
3.1.2 pav. Laminario srauto skaičiavimų rezultatai.....	40
3.2.1 pav. Suskaidytas baigtiniais elementais akustinio slėgio modelis, kur: 1 – kietas paviršius, 2 – vibruojantis paviršius, 3 – membranos poros galai	41
3.2.2 pav. Akustinio slėgio analizės rezultatai	42
3.2.3 pav. Akustinis slėgis poros skerspjūvyje, esant 3,7 GHz dažniui	43
3.2.4 pav. Akustinis slėgis poros skerspjūvyje, esant 7,4 GHz dažniui	43
3.2.5 pav. Dalelių judėjimo analizės rezultatai, esant 3,7 GHz dažniui	44
3.2.6 pav. Dalelių judėjimo analizės rezultatai, esant 7,4 GHz dažniui	45

Įvadas

Dvidešimt pirmajame amžiuje populiarėjant nanotechnologijoms atsirado daugybė sprendimų, kuriais galima sukurti išskirtinėmis savybėmis pasižyminčias medžiagas. Šias medžiagas galima taikyti tradicinėse sistemose ir padidinti sistemos efektyvumą ar suteikti galimybę dirbti su mikroorganizmais ir taip pasiekti proveržį medicinoje. Šios išskirtinės savybės atsiranda dėl nuoseklių nanoskalės matmenų išsidėstymo. Šių elementų išsidėstymą ir matmenis galima koreguoti panaudojus kitus techninius parametrus. Nanosistemose galima taikyti tas pačias mechanikos inžinerijos žinias kaip ir įprastose sistemose, tačiau reikia turėti didesnę kiekį žinių medžiagų ir chemijos inžinerijos srityse, siekiant sukurti šias sistemas. Didelį techninį iššūkį kelia ir tradicinių elementų, tokių kaip skysčio siurblio sumažinimas pritaikant nanosistemoms. Pasitelkiant nanosistemų technologijas galima didelius laboratorinius standus sumažinti ir taip gauti daug teigiamų savybių: kompaktiškumą, mažesnę reagentų suvartojimą, greitesnes reakcijas ir tikslesnius analizuojamus parametrus. Taigi, šių technologijų teikiami privalumai naudingi ne tik mokslininkams, bet ir kitiems specialistams [1].

Atsiradus poreikiui efektyvesniam ir ekologiškesniam skysčių filtravimo procesui, buvo atkreiptas dėmesys į pažangias medžiagas, tokias kaip nanopluošto membranos, skirtas filtravimo įrenginiams. Anksčiau skysčių valymui buvo naudojama daugybė technologijų, tokių kaip distiliavimas, apdorojimas cheminėmis dezinfekavimo priemonėmis ar filtravimas smėliu. Tuo tarpu nanomembranos filtravimas yra palyginti naujas metodas, turintis tam tikrų pranašumų, tokių kaip gebėjimą plūduriuoti, mažą energijos suvartojimą, skysčių valymą be chemikalų ar žemą darbinę temperatūrą [2]. Membranos yra pusiau pralaidi terpė, leidžianti prasiskverbti tik tam tikroms dalelėms ir junginiams bei neleidžianti pratekti kitoms. Membranos filtravimo sistemą galima tobulinti naudojant nanopluoštas terpes. Nanopluoštai pasižymi dideliu poringumu ir gerai sujungtomis porų struktūromis, geru pralaidumu, todėl yra idealūs skysčių valymui. Taip pat naudojant šį pluoštą galima filtruoti ir labai tirštus skysčius, pavyzdžiui, naftą. Jeigu pluoštas naudojamas kaip įrankis tirti medžiagas, tada atliekant įvairius tyrimus galima labai tiksliai ištirti medžiagų netiesines savybes [3].

Norint praplėsti membranų pritaikymo galimybes siekiama valdyti kanalo srautą ir jame esančias daleles. Akustohidrauliniai tyrimai yra nauja sritis, kurios tikslas yra ištirti, paaiškinti ir panaudoti akustinių bangų poveikį hidraulikos įtaisuose. Akustinis srautas yra tolygus skysčio judesys, kurį lemia skysčio absorbuojamas akustinis impulsų srautas [4]. Šis efektas naudojamas akustinio srauto valdymui, siekiant sustiprinti ar slopinti akustinį srautą. Dažniausiai šis efektas taikomas tokiose srityse kaip dalelių valdymas ir koncentravimas [5]. Daugelyje manipuliavimo sistemų skysčio kanalų matmenys paprastai yra panašūs į akustinės bangos ilgį [6]. Yra du skirtingi skysčių dalelių valdymo mechanizmai. Pirmasis grįstas akustinės spinduliuotės jėga, kuri leidžia judėti dalelėms aplinkinio skysčio kūno atžvilgiu. Antrojo metodo metu, naudojant akustinį srautą galima nutempti daleles kartu su akustine skysčio tėkme [7]. Tokiu būdu pavienės daleles arba didelius jų kiekius galima valdyti nekontaktiniu būdu. Nekontaktinis būdas rodo, kad manipuluojami objektai yra nepaveikti ir nedeformuoti, o tai labai svarbu mikroorganizmams. Toks dalelių valdymas gali būti naudingas daugelyje sričių.

Kadangi aliuminio nanomembranų tyrimai yra ankstyvoje stadijoje, svarbu atrasti metodus, kurie leistų išplėsti jų galimybes ir gilinti žinias šioje temoje, siekiant geriau suprasti vykstantį procesą.

Darbo metu gauti rezultatai prisidės prie platesnio ir efektyvesnio nanomembranų panaudojimo skirtingose pramonės srityse.

Darbo tikslas – pagaminti aliuminio oksido nanomembraną, skirtą naudoti mikrohidraulikos įrenginiuose mikrodalelių filtravimui.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti mikrohidraulikos įrenginių valdymo ir jų gamybos metodų apžvalgą;
2. Sudaryti aliuminio oksido gamybos eksperimentinį standą;
3. Pagaminti pirmuosius aliuminio oksido nanomembranos pavyzdžius ir juos iširti;
4. Atlikti laminarinio tekėjimo ir akustinio slėgio skaitmenines analizes aliuminio oksido nanoporose.

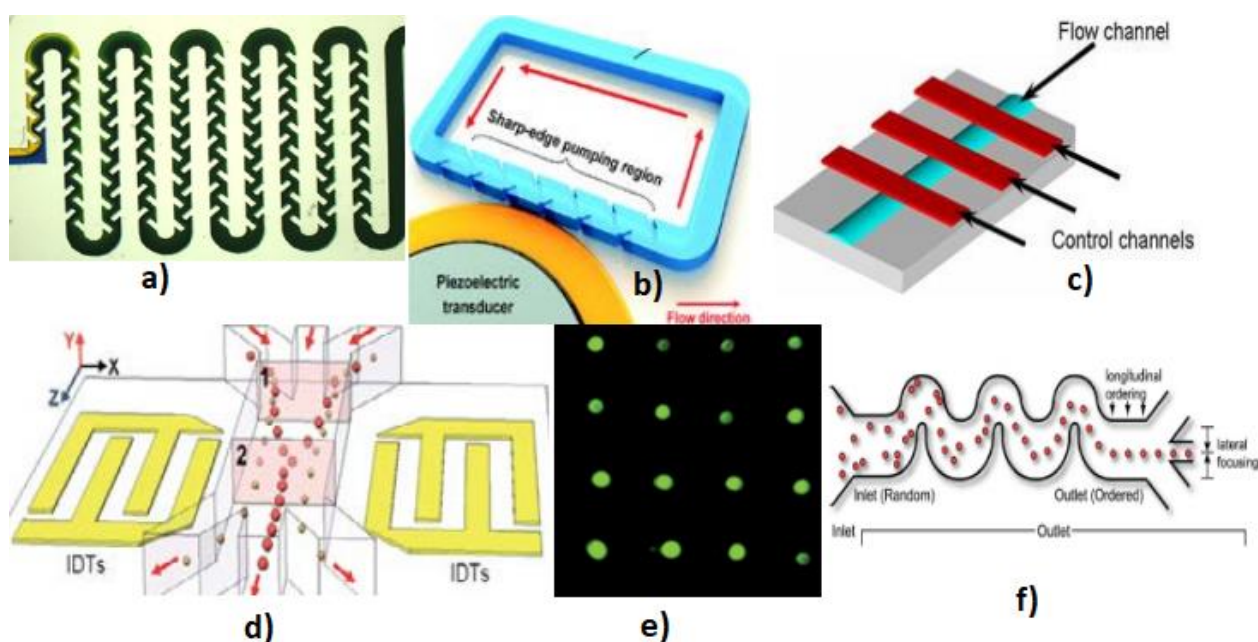
1. Mikrohidraulikos įrenginių, jų valdymo ir gamybos metodų apžvalga

Šiame skyriuje pristatoma mikro- ir nanohidraulikos sistemų, aluminio oksido nanomembranų, akustinio slėgio ir jo įtakos srautui mokslinės literatūros apžvalga.

1.1. Mikro- ir nanohidraulikos sistemos

Nanohidraulikos mokslas ir su tuo susijusios technologijos apima skysčio tekėjimą sistemoje, turinčioje bent vieną nanoskalės matmenį nuo 1 nm iki 100 nm, o mikrohidraulika apima nuo 100 nm iki 100 μm [8]. Esant tokiems matmenims Reinoldso skaičius yra mažas, o srautas paprastai yra laminarinis, tačiau pats srauto greitis dažnai būna didelis, todėl su tokiais režimais gaunami unikalūs mikrohidrauliniai maišymo prietaisai. Remiantis Tarptautinės grynosios ir taikomosios chemijos sąjungos (IUPAC) duomenimis, nanohidraulikos įrenginių poros skirstomos į tris kategorijas: mikroporas, mezoporas ir makroporas, kurių porų dydžiai sistemoje yra atitinkamai mažesni nei 2 nm, nuo 2 nm iki 50 nm ir didesni nei 50 nm [9]. Dėl šių porų galima gauti sudėtingas struktūras, tokias kaip gelio matricos, jonų takeliai, išgraviruotos membranos ir daugelį kitų. Tokios struktūros yra ištirtos ir naudojamos atskyrimo, filtravimo ir katalizės srityse. Šios technologijos plačiai naudojamos tiek moksle, tiek pramonėje.

Teigiama, kad mikrohidraulikos įrenginių sistemos yra naudojamos dviejose pagrindinėse srityse – srauto valdymui ir jame esančių dalelių / ląstelių valdymui. Srauto valdymui išskiriamos maišymo, siurbimo ir vožtuvų sistemos. Skirtos dalelių valdymui, mikrohidraulikos įrenginių sistemos naudojamos atskyrimui, fokusavimui ir pozicionavimui. Šios sistemos pateiktos 1.1.1 paveiksle [10].



1.1.1 pav. Mikrohidraulikos įrenginių sistemos: a) maišymas; b) siurbimas; c) vožtuvai; d) atskyrimas; e) pozicionavimas; f) fokusavimas [10]

Šioms mikrohidraulikos įrenginių sistemoms, skirtoms skysčių ir dalelių valdymui, dažniausiai naudojami 2 metodai – geometrinis ir akustinis. Geometrinio valdymo metodo metu yra pasitelkiama įrenginio konstrukcija ir judantys elementai, kurie vienaip ar kitaip gali nukreipti daleles. Dėl akustinio slėgio galima valdyti skysčio srautus. Taikant šį metodą, skystis yra veikiamas aukšto

dažnio virpesiais, kuriuos sukuria tam tikras virpesių šaltinis. Dažnu atveju, šie du metodai sujungiami, taip siekiant gauti specifines skysčio valdymo galimybes [11].

Yra trys pagrindinės sistemų rūšys, kurios skirtos valdyti skysčių judėjimą mikro- ir nanohidraulinėse sistemose. Kai kuriose sistemose naudojami slėgio skirtumu pagrįsti prietaisai (hidrostatiniai arba slėgio generatoriai), tuo tarpu, kitose sistemose galima tiesiogiai nustatyti srauto greitį, nes yra įpurškiamas konkretus skysčio kiekis. Egzistuoja skysčio siurbliai ir elektroosmosiniai siurbliai, kurie gali būti naudojami skysčio srautui sukurti.

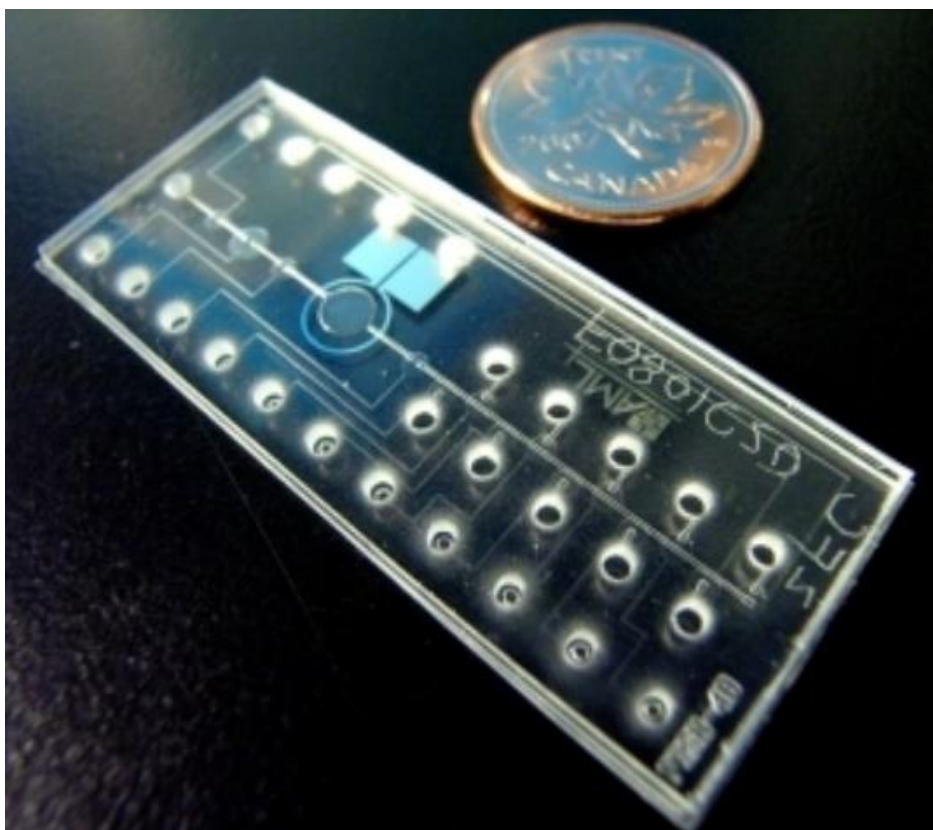
Dėl hidrostatinio slėgio sukurto srauto yra paprasčiau kontroliuoti srautus mikrohidraulinėje sistemoje. Hidrostatinis slėgis – tai stovinčio skysčio slėgis pasirinktame gylio taške. Slėgio skirtumas taip pat gali būti gaunamas keičiant skysčio ir atmosferos sąsajos aukštį skirtinguose rezervuaruose. Šis slėgis atsiranda oro ir skysčio sąsajoje ir priklauso nuo skysčio pobūdžio, atmosferos, rezervuaro talpos bei rezervuaro formos. Dėl laipsniškai besikeičiančio rezervuaro skysčio kiekio, taip pat laipsniškai kinta ir skysčio slėgis, o tai tampa neigiama savybe siekiant sistemos pastovumo. Didžiausias šios sistemos trūkumas – ribotas veikiamo slėgio kontroliavimas mikrokanaluose [12].

Kaip alternatyva hidrostatiniam slėgiui gali būti naudojamas siurblio sukuriamas slėgis. Šiuos siurblius dažniausiai sudaro slėgio šaltinis, membrana ir manometras, skirtas stebėti slėgiui. Šios sistemos patikimumas ir stabilumas priklauso nuo komponentų patikimumo ir jų suderinamumo. Taigi, siurbliai gali labai greitai reaguoti ir padidinti ar sumažinti srautą sistemoje. Siurbliai taip pat gali būti susieti su srauto davikliais, kad būtų užtikrintas srauto greičio valdymas, o ne slėgio valdymas. Taip pat valdyti slėgį galima naudojant elektrinius vožtuvus, kurie kontroliuojami elektroniniu būdu. Šios technologijos pranašumas – greitas atsakas, kurį galima gauti naudojant mikrovožtuvus. Pagrindinis dviejų vožtuvų elektroninių slėgio generatorių trūkumas – sukuriamas svyruojantis slėgis [13].

Netradicinis sprendimas norint valdyti skystį – infuzinį siurbliai. Šios sistemos, visų pirma, buvo sukurtos ir naudotos „perfuzijos“ sistemoms medicinos srityje. Pradėjus tobulinti šią sistemą, pavyko pritaikyti ir mikrohidraulikos sistemoms. Pagrindinis šios sistemos pranašumas – gebėjimas valdyti srautą per mikrokanales nepriklausomai nuo skysčio pasipriešinimo. Pagrindinis infuzinio siurblių trūkumas – impulsinių srautų formavimasis, esant mažam srautui ir trukmei, kuri reikalinga stabilizuoti srautą. Norėdami išspręsti šias problemas, tyrėjai sukūrė infuzinio siurblio stabilizatorių, kuris susideda iš rinkinio, skirto sušvelninti ir (ar) išlyginti srauto greičio svyravimus. Dar vienas netradicinis sprendimas norint sukurti slėgį skystyje – „elektro motiniai“ siurbliai. Šiems siurbliams nebūdingos srauto svyravimo problemos, nes jų veikimas pagrįstas elektriniu skysčio siurbimu per nanoporines medžiagas. Vienas trūkumas – sistemai reikia naudoti mažo elektrinio laidumo skystį [14].

Visi prieš tai išvardinti hidrostatiniai siurbliai yra skirti mikro hidraulinėms sistemoms valdyti. Šioms sistemoms yra reikalingi labai maži skysčių kiekiai (kai kuriais atvejais – iki femtolitru). Šiems mažiems skysčio kiekiams būdingos kitokios savybės nei kasdieniniame gyvenime naudojamiems skysčiams, o tai yra paskata naujiems moksliniams eksperimentams ir inovacijoms. Pagrindinė ir sudėtingiausia užduotis – sudėti visus reikalingus komponentus (vožtuvus, kanalus, slėgio / srauto daviklius ir kt.) į mikro dydžio sistemą, ir kad ši veiktų kaip makrosistema. Mikrosistemos pagrindas – mikrokanales tinklas, kuris susietas su makrodydžio išpjautomis skylutėmis. Per šias skylutes skystis yra išsvirkščiamas į mikro hidraulinę sistemą. Patekęs skystis į mikrokanales yra nukreipiamas,

sumaišomas, atskiriamas arba juo manipuluojama, kad būtų sukurtos automatizavimo ir didelio pralaidumo sistemos. Siekiant gauti norimas savybes – turi būti tiksliai parengtas mikrokanalų tinklo dizainas, o norint tiksliai valdyti skysčius mikrokanalų viduje, reikalingos specialios sistemos. Tokios sistemos pavyzdys pateiktas 1.1.2 paveiksle [15].



1.1.2 pav. Mikrokanalų sistema su skysčio įpurškimo skylėmis [15]

Mikrohidrauliniams prietaisams būdingos fizinės ir cheminės skysčių bei dujų savybės mikroskalėje. Dėl mikrohidraulikos sistemų galima analizuoti ir naudoti mažesnius mėginius, chemikalų ir reagentų kiekius, taip pat sumažinti tyrimų išlaidas [16]. Dėl sistemos kompaktiško dydžio, neretai sutrumpėja ir eksperimento atlikimo trukmė, taip pat vienu metu galima atlikti daugiau operacijų. Dirbant mikroskalėje, galima tikėtis puikių duomenų tikslumo ir reikšmingo parametrų valdymo, kuris leidžia automatizuoti procesą išlaikant našumą. Mikrohidraulinėms sistemoms būdingos įvairios savybės: greitesnis reakcijos laikas, padidėjęs analitinis tikslumas, patobulinta temperatūros kontrolė ir pan. Mikrohidrauliniai kanalai gali būti patobulinti taip, kad leistų vartotojui integruoti automatizaciją į sistemą ir atlikti daugiapakopes reakcijas. Naudojant mikrosistemas galima vykdyti tokias funkcijas kaip toksinų aptikimą iki DNR (deoksiribonukleorūgščių) sekų analizėse ar rašalinių spausdintuvų kūrimą. Šiandieniniame pasaulyje mikrosistemas plačiai pritaikomos biologinėje analizėje [17]:

- integruotas ir supaprastintas biologinės analizės procesas galutiniams vartotojams;
- gali būti atliekami lygiagretūs tyrimai;
- dėl trumpesnių reakcijų greitesnė analizė;
- dėl kompaktiško dydžio gali būti kuriami ir naudojami nešiojamieji prietaisai;
- mažos reagentų sąnaudos;
- bendras sąnaudų sumažinimas analizės metu;

- mikrohidraulikos įrenginiai, leidžiantys padidinti matavimo skiriamąją gebą, o tai lemia didesnę tyrimo tikslumą.

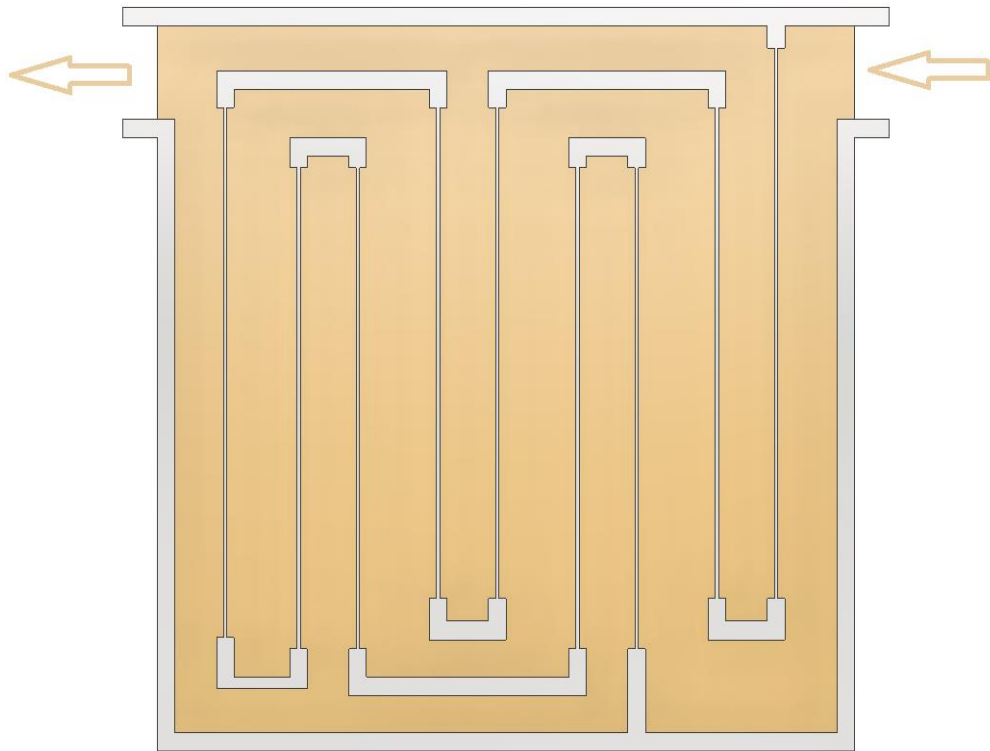
Egzistuoja daug skirtingų struktūrų, tokių kaip nanomembranos ar nanovamzdeliai, kurie naudojami kuriant mikro- ar nanohidraulikos įrenginių sistemas. Pagrindinis šių nanomembranų privalumas tai, kad membrana gali būti naudojama kaip matrica, kuriant kitas nanostruktūras. Šiose membranose atskiros porų vietos yra tvarkingai išdėstytos santykinai dideliame plote. Šių membranų gamybai nereikia brangių litografinių procesų. Galima nanomembraną pritaikyti elektroninių prietaisų, ultragarso įrašymo laikmenų ir nanokatalizatorių gamybai [18]. Pastaruoju metu nanomembranos plačiai naudojamos nanomagnetams, kurie yra ekonomiškai konkurencinga alternatyva šiuo metu naudojamiems SmCo (angl. Segment samarium cobalt) ir ferito magnetams. Nanomagnetams būdingas stiprus magnetinis laukas, lyginant su įprastų magnetų magnetiniu lauku. Ši savybė leidžia sumažinti magnetų dydį, o tai suteikia galimybę keisti jau egzistuojančių sistemų konstrukcijas ir daryti jas dar labiau kompaktiškesnėmis [19].

Chemijoje ir medicinoje neretai naudojami mikrokanalų reaktoriai, kuriuose cheminės reakcijos vyksta uždaroje erdvėje. Mikroreaktoriai tiriami mikroprocesų inžinerijos srityje kartu su kitais prietaisais (pavyzdžiui, tokiais kaip mikrošilumokaičiais), kuriuose vyksta fiziniai procesai. Mikroreaktoriai turi daug pranašumų lyginant su įprasto dydžio reaktoriais, įskaitant didelį energijos efektyvumą, reakcijos greičius, išėigas ir patikimumą [20].

Daugelis cheminės ir biocheminės analizės procesų apima reakcijas ir produkto analizę. Cheminėse reakcijose dažnai išsiskiria įvairūs produktai sudaryti iš kelių cheminių medžiagų, kurias dažnai vėlesniuose analizės etapuose reikia atskirti ir identifikuoti skirtingus komponentus. Šiuose procesuose mikrohidraulikos prietaisus galima kombinuoti su elektriniu lauku. Šis hibridinis įrenginys gali atskirti elementus. Tokia mikrohidraulikos ir elektrinio lauko kombinacija yra universali dėl paprasto aparatūros dizaino ir įvairių medžiagų suderinamumo [21].

Mikrohidraulikos įrenginių sistemos taip pat svarbios ir biologijos srityje. Jos gali būti naudojamos padėti medicininėje diagnostikoje tiriant maisto kokybę ir (ar) aptinkant biologinio karo pėdsakus [22]. Kuriant tokius mikrohidraulinius prietaisus vienas iš pagrindinių tikslų – miniatiūrizuoti ir suderinti klasikinius imunologinius ir genominius aptikimo metodus. Mikro- ir nanohidraulinius prietaisus, skirtus biologiniam aptikimui, galima suskirstyti į dvi pagrindines klases: mėginio paruošimo ir biojutiklių, kuriuose analizė yra paverčiama fiziniu signalu (pvz., elektriniu ar optiniu). Mikrohidraulinės sistemos technologija taip pat suteikia galimybę ištirti ląstelių pobūdį nuo vienaląsčio iki daugialąsčio organizmo. Ląstelių nustatymas vyksta tiksliai ir lokaliai ten, kur dažnu atveju būna sunku ar neįmanoma pasiekti makroskopiniais įrankiais [23].

Skysčių perfiltravimas per mikro- ar nanohidraulines porėtas terpes taip pat aktualus klampiams skysčiams, tokiems kaip nafta, nes filtravimo metu galima išvalyti užterštą naftos produktą. Prototipinė klampių skysčių filtravimo sistema pateikta 1.1.3 paveiksle. Dėl mikrokanaluose esančio laminarinio tekėjimo galima ištirti klampius skysčius, ypač, netiesiškai klampius. Naudojant mikrohidraulinius prietaisus ir pritaikius dalelių greičio matavimo metodus, galima tirti skysčio sąveiką su kietu kūnu. Tai aktualu daugeliui skysčių [24].



1.1.3 pav. Prototipinė klampių skysčių filtravimo sistema

Optohidraulika – tai manipuliavimas skysčiu, naudojant šviesą arba atvirkščiai, manipuliavimas šviesa naudojant skystį, nuo mikro iki nanometrų masto. Pasitelkus mikrohidraulikos įrenginius, galima tiksliai ir lanksčiai kontroliuoti skysčių optines savybes, kad būtų galima sukurti perkonfigūruojamus optinius komponentus, kuriuos sunku arba neįmanoma pagaminti tradiciniais metodais. Be to, dėl neįprastų skysčių savybių mikro- ir nanomastu, atsiranda galimybė manipuluoti skystį, tam naudojant šviesą [25].

Įvairios nanomedžiagos gali būti naudojamos ne tik hidrosistemoms. Neseniai atlikti tyrimai atskleidė, kad nanotechnologijomis sukurtos medžiagos gali pagerinti naujų elektroninių prietaisų savybes ir kompiuterinių sistemų plėtrą ateityje. Kaip pavyzdys – nanoviela, sudaryta iš galio arsenido (GaAs). Ši medžiaga leidžia pagerinti puslaidininkines savybes, kurios lemia geresnes prietaisų charakteristikas [26]. Dėl šios priežasties dauguma puslaidininkinių įtaisų, tokių kaip jungiamieji diodai, tranzistoriai, atminties elementai, jungikliai, šviesos diodai ir keitikliai, jau gaminami naudojant nanopuslaidininkines medžiagas. Be to, neseniai atliktais tyrimais įrodyta, kad naudojant aliuminio oksido membranų šabloną magnetiniame nanovamzdelio masyve, buvo sukurtas apie 155 Mbit / mm² įrašymo tankis. Tai gali pagerinti šiuo metu turimus komercinius kietuosius diskus, kurių įrašymo tankis yra apie 5,74 Mbit / mm² [27].

1.2. Mikro- ir nanohidraulikos sistemų elementai

Mikro- ir nano- skalėje naudojami hidraulikos įrenginiai keičia mažų kiekių skysčių valdymo galimybes. Tai leidžia sukurti sistemas, kurias naudojant galima analizuoti dalelių atskyrimą ir chemines savybes. Tokių įrenginių konstrukcinė struktūra yra nesudėtinga. Mikrohidraulikoje naudojami tokie pat elementai kaip įprastose sistemose: vožtuvai, siurbliai, mikseriai, pavaros, filtrai ir t.t. [28].

Mikrohidrauliniai siurbliai, kurie perneša nedidelius skysčių kiekius, yra plačiai naudojami moksliniuose tyrimuose. Mikrohidrauliniai siurbliai gali būti mikroschemose derinami su kitais elementais tam, kad būtų sukurtos nešiojamosios analizės sistemos. Dėl mikrohidraulikos įrenginiuose efektyvaus ir tikslaus srauto valdymo, iširta daug siurblių tipų tokių kaip: elektriniai, magnetiniai, akustiniai ir mechaninės energijos pagrindu sukurti siurbliai. Šiuos elementus reikia taikyti priklausomai nuo mikrohidraulinės sistemos tipo [29].

Mikrohidraulikoje plačiai naudojamas mikrovožtuvas, kuris sistemose gali būti aktyvusis ir pasyvusis. Aktyvieji mikrovožtuvai gali būti įvairių konstrukcijų: pneumatiniai, magnetiniai, elektrostatiniai ar pjezoelektriniai. Pasyvus mikrovožtuvas naudojamas kaip atbulinis vožtuvas, leidžiantis kanale skysčiui tekėti į vieną pusę. Mikrovožtuvai skirstomi į mechaninius ir nemechaninius. Siekiant valdyti mechaninius vožtuvus – reikia daugiau energijos. Nemechaniniams vožtuvams naudojama diafragma, pagaminta iš „Smart“ medžiagų, kurios keičia savo fizines ar chemines savybes [30].

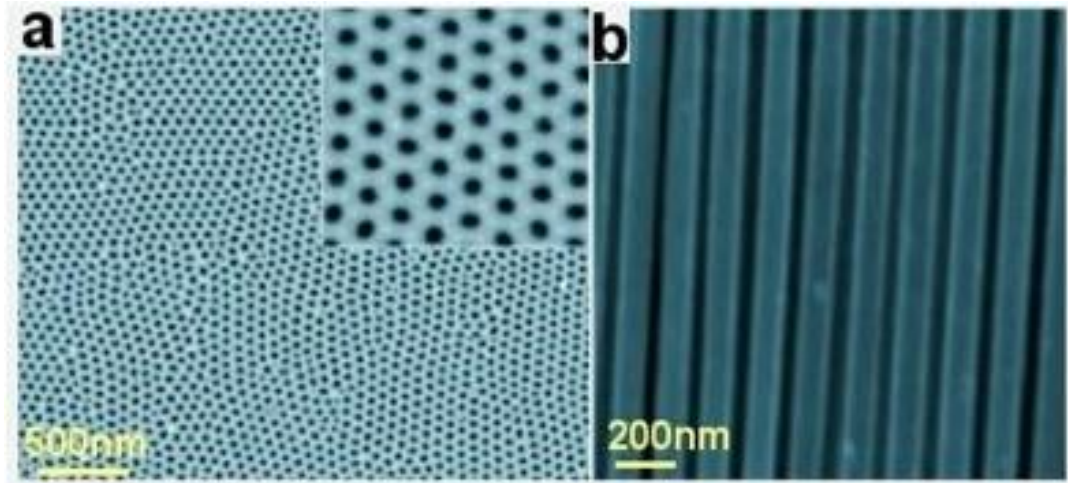
Mikro- ir nanohidraulikos sistemose yra naudojami mikseriai, kurie skirstomi į du tipus: aktyvius, kurie naudoja išorinę energiją, ir pasyvius, kuriuose vyksta difuzija ir chaotiškas maišymasis. Praktikoje plačiau naudojamas pasyvusis mikseris. Jis padidina mikrokanalų tinklo efektyvumą. Mikromikseriai naudojami norint sumaišyti skirtingas medžiagas ir paspartinti reakcijos trukmę [31].

Dar vienas mikrohidraulikos sistemos komponentas – filtras. Visą sistemą sudaro mikrofiltrais, tiekimo kanalai ir pratekėjimo komponentai. Šios sistemos su įdiegta analizės įranga, leidžia greitai atlikti analizę su minimaliu mėginių kiekiu. Mikrofiltrais gali būti naudojami, pavyzdžiui, biologinių mėginių valymui, DNR atskyrimui ir (ar) skysčių chromatografijai. Pagrindiniai šio metodo taikymo pasirinkimo kriterijai – rezultatų pakartojamumas, ekonomiškumas ir patikimumas. Ypač smulkioms detalėms filtruoti yra naudojama aliuminio oksido nanomembrana. Ši membrana gali filtruoti objektus, kurių skersmuo yra 10 nm [32].

1.3. Aliuminio oksido nanomembranos

Šiame darbe dėmesys skiriamas nanomembranomams, kurios pagamintos iš aliuminio oksido. Todėl toliau pristatomos aliuminio oksido nano membranos, jų struktūra, gamyba.

Membranos su skirtingais porų dydžiais gali būti gaminamos iš skirtingų medžiagų. Membrana gali būti apibūdinama kaip plona plėvelė arba plokštelė [33]. Šios membranos gali būti naudojamos mikroorganizmų aptikimui ir imobilizavimui. Aliuminio oksido nanomembranos pavyzdys pateiktas 1.3.1 paveiksle. Norint naudoti šią membraną – būtina pasirinkti reikalingą medžiagą su konkrečiu porų skersmeniu, ilgiu ir paviršiaus struktūra. Parinkus atitinkamą membranos struktūrą, galima atskirti tam tikrus skysčius nuo mikroorganizmų ir vėliau šiuos organizmus imobilizuoti. Siekiama, kad naudojant šias membranas būtų sukurtas mobilus kliniškinis tyrimų standas, kuris būtų tinkamas įrankis ne tik gydytojams, bet ir visuomenei (būtų prieinamas visiems vartotojams) [34].



1.3.1 pav. Aliuminio oksido nanomembrana: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono [34]

Norint kurti sistemas su šiomis aliuminio oksido nano membranomis – būtina teisingai apskaičiuoti jėgas, kad nebūtų pažeista membrana ir nesutriktų dalelių transportavimas. Tam yra naudojama Navier – Stoko (1) lygtis, kuri išvedama iš Antrojo Niutono dėsnio (kuris taikomas skysčiams) [35]:

$$\Sigma \vec{f} = \vec{f}_{gravitacija} + \vec{f}_{slėgis} + \vec{f}_{klampumo} \quad (1)$$

čia $\Sigma \vec{f}$ – suminė jėga; $\vec{f}_{gravitacija}$ – gravitacijos jėga; $\vec{f}_{slėgis}$ – slėgio sukurta jėga; $\vec{f}_{klampumo}$ – klampumo jėga.

Gravitacinė jėga apskaičiuojama pagal (2) formulę:

$$\vec{f}_{gravitacija} = \rho \vec{g} \quad (2)$$

čia ρ – tankis; \vec{g} – sunkio jėga.

Slėgio jėga apskaičiuojama pagal (3) formulę, kur $\vec{f}_{slėgis}$ – bendroji slėgio jėga:

$$\vec{f}_{slėgis} = \frac{\vec{F}_{slėgis}}{dV} = -\nabla \vec{p} \quad (3)$$

čia $\vec{F}_{slėgis}$ – jėga, veikianti ploto vienetą; dV – tūris; $\nabla \vec{p}$ – slėgio pokytis.

Klampumo jėga apskaičiuojama, remiantis (4) formule:

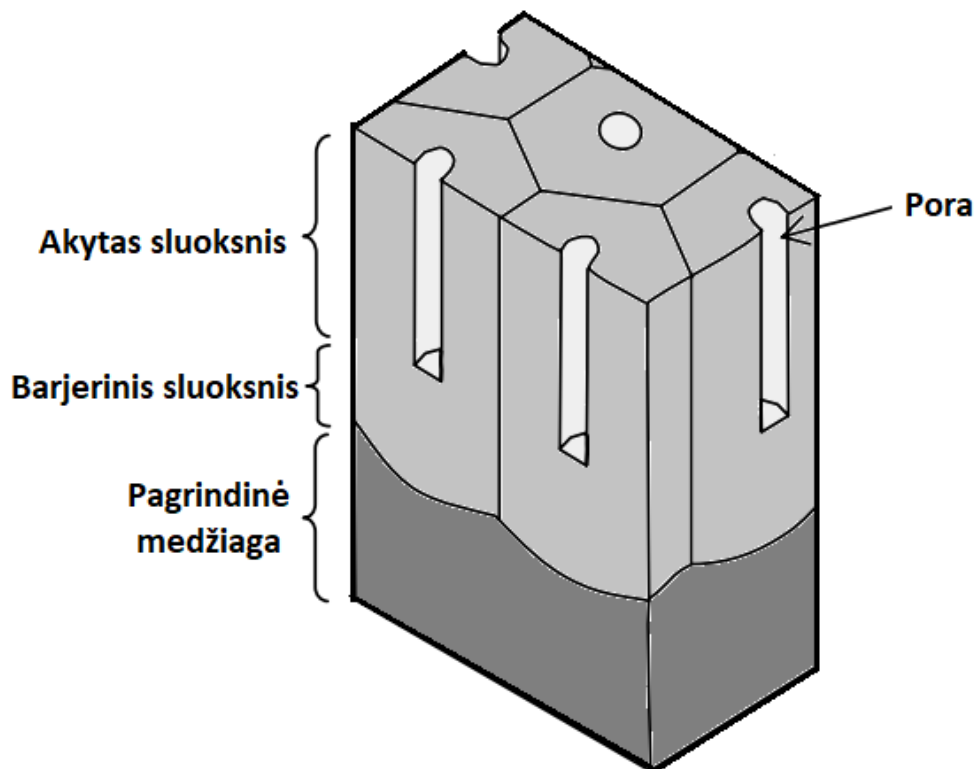
$$\vec{f}_{klampumo} = \frac{d\vec{F}_{klampumo}}{dV} = \eta \cdot \nabla^2 \vec{u} \quad (4)$$

čia η – dinaminis klampos koeficientas; \vec{u} – skysčio greitis.

1 – 4 formules galima taikyti toms sistemoms, kuriose egzistuoja skysčio srautas ir tarp skirtingų membranos pusių susiformavęs skirtingas slėgis.

Siekiant pagaminti aliuminio oksido nanomembraną pagrindiniu procesu yra laikomas anodavimo procesas. Istoriskai, anodavimą pirmą kartą panaudojo Buffo 1857 metais [36]. Jis pastebėjo, kad anodiškai sujungus aliuminį vandeniniame tirpale ir paleidus elektros srovę ant aliuminio išorės susidaro oksido sluoksnis, kuris yra storesnis nei natūralus. Tačiau tokie oksiduoti sluoksniai neturėjo

techninio pritaikymo. Tada 1910 metais pasirodė pirmasis patentas, susijęs su izoliuota aliuminio laidų sluoksnių gamyba [36]. Patentas nebuvo naudojamas, nes sluoksniai neatitiko techninių reikalavimų. Nuo 1970 iki 1980 metų anodavimo procesui buvo pradėta naudoti aukšta įtampa (apie 100 V). Tokia įtampa lėmė skirtingą struktūrą. Tuometinė mikrostruktūra pasižymėjo tvarkingu skylių išdėstymu ir tvarkinga gardele. Vėliau išsiaiškinta, kad kontroliuojant skirtingus parametrus galima gaminti nano- ir mikrosistemoms skirtas aliuminio membranas. Šios membranos struktūrinė nuotrauka pateikta 1.3.2 paveiksle. Šią membraną sudaro poros, kurių skersmuo gali kisti priklausomai nuo anodacijos proceso sąlygų. Šios poros išsidėsčiusios akytame sluoksnyje ir baigiasi ties barjeriniu sluoksniu. Šis sluoksnis yra tarpinis ir tęsiant anodavimo procesą virsta akytu sluoksniu. Anodavimo metu barjerinis sluoksnis pakeičia dalį pagrindinės medžiagos.

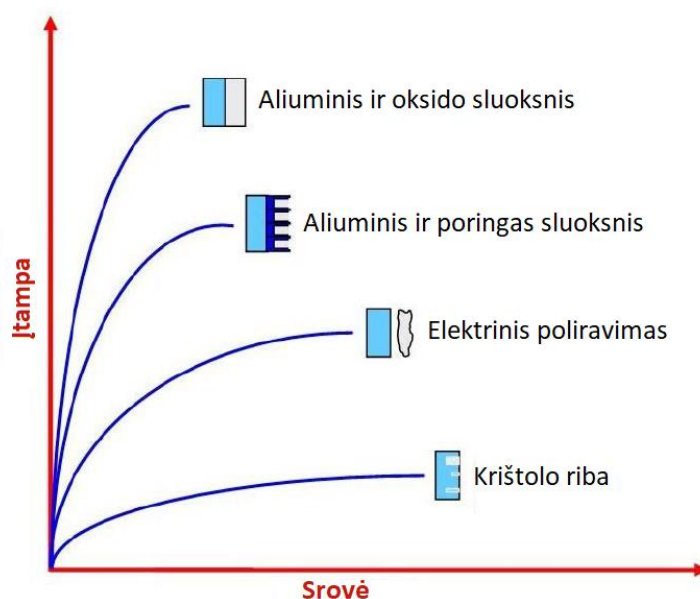


1.3.2 pav. Aliuminio oksido nanomembranos struktūra

Norint naudoti aliuminio oksido nanomembraną kaip pagrindą gaminant kitas nanostruktūras, būtina pagaminti reikalingų matmenų membranos poras. Kai sukuriama taisyklinga membranos pora ir tinkamai parenkami formavimo proceso parametrai, galima pagaminti pasirinktą nanostruktūrą. Keisti šios struktūros parametrus galima reguliuojant membranos porų geometriją ir formavimo parametrus [37].

Membranos porų parametrams didžiausią įtaką daro proceso įtampa. Priklausomai nuo įtampos, membranos gali būti gaminamos dviem būdais: naudojant lengvą anodavimą arba sunkų. Yra žinoma, kad porų skersmenys bei porų aukštis priklauso nuo įtampos. Ši priklausomybė pavaizduota 1.3.3 paveiksle. Grafike matyti, kaip keičiasi aliuminio paviršius priklausomai nuo srovės ir įtampos. Matyti, kad prie žemų įtampų ir didelių srovių, pasiekiamos kristalinės ribos, o esant aukštesnei įtampai ir mažesnėms srovėms vyksta elektropoliravimo efektai. Kai įtampa padidėja, o srovė sumažėja susidaro akytas sluoksnis. Galiausiai, esant labai mažoms srovėms ir didelėms įtampoms,

susidaro storas aliuminio oksido sluoksnis [38]. Būtent šis sluoksnis ir bus analizuojamas šio darbo tyrime.



1.3.3 pav. Aliuminio oksido sluoksnio priklausomybė nuo anodacijos proceso parametrų [39]

Kaip jau minėta, membranos porų skersmuo ir atstumas tarp jų priklauso nuo daug skirtingų parametrų. Vienas iš svarbiausių, kuris nulemia bazinius membranos parametrus, yra elektrolitas. 1.3.1 lentelėje parodyta kaip skirtingi elektrolitai (esant skirtingoms įtampoms) gali lemti membranos porų skersmenį bei atstumus tarp jų [40].

1.3.1 lentelė. Elektrolito ir įtampos įtaka porų skersmeniui ir atstumui tarp jų [40]

Elektrolitas	Porų skersmuo (nm)	Tarp porų esantis atstumas (nm)	Įtampa (V)
Sieros rūgštis	30–35	60–70	25–27
Oksalo rūgštis	40–100	80–200	30–80
Fosforo rūgštis	130–250	250–500	100–195

Vienas iš svarbių parametrų siekiant užtikrinti kokybiškos membranos gamybą – tai tos pačios temperatūros palaikymas anodacijos reakcijos metu. Anodacijos procesui reikalinga žemesnė už kambario temperatūra. Kuo žemesnė temperatūra, tuo procesas stabilesnis ir aliuminio oksido nanomembranos struktūra tampa tvarkingesnė [41]. Šiam tikslui naudojami termoelektriniai moduliai (Peltier), kurių privalumai yra:

- kompaktiškumas;
- lengvai automatizuojamas veikimas;
- nesunkiai sujungiami keli elementai, siekiant didesnės galios.

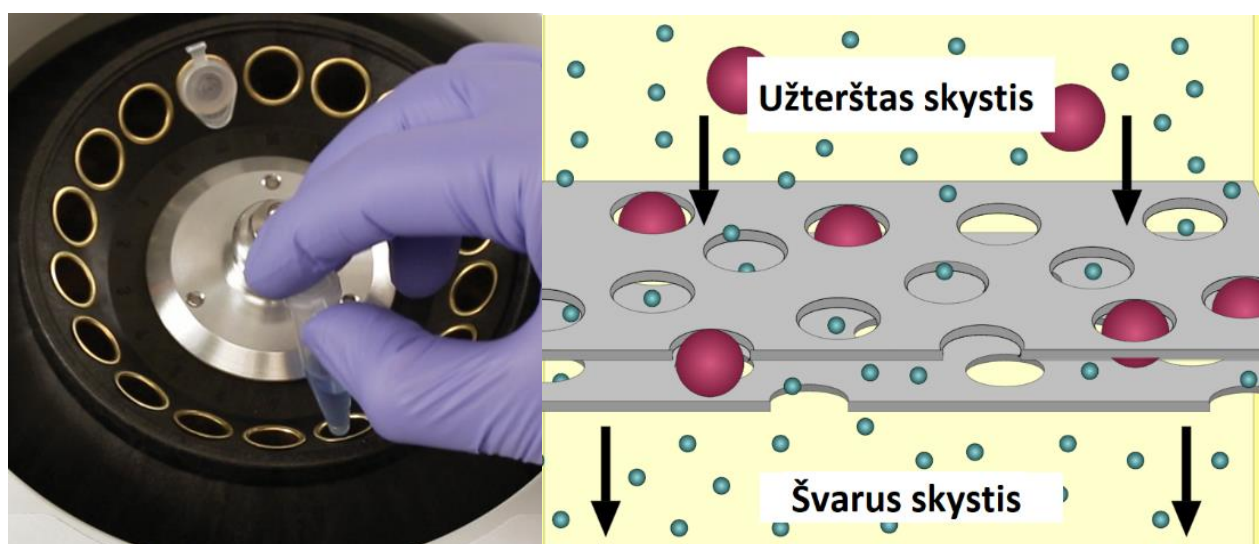
Šaldymo sistema gali būti naudojama įvairioms mikrohidraulikos sistemoms ir (ar) kuriamoms nanomedžiagoms. Šių medžiagų nanodalelėms suteikiamos kai kurios išskirtinės savybės lyginant su kitomis medžiagomis. Dėl šios struktūros aliuminio oksido nanomembrana pasižymi didesniu šilumos perdavimo koeficientu [42], skysčio pasklidimu [43] bei antibakteriniu aktyvumu [44]. Tokią aliuminio oksido membraną galima naudoti nanohidraulikos įrenginiuose kaip pažangią aušinimo

sistema, taip pat galima naudoti įvairiose šilumos valdymo sistemose, t.y. šilumokaičiuose, garintuvuose ar pramoninio aušinimo įrenginiuose.

Sėkmingas aliuminio oksido, kaip biomedžiagos, pritaikymas pradėtas aštuntojo dešimtmečio pradžioje, kai buvo sukurta klubo sąnario endoprotezavimo technologija [45]. Po to atlikti tyrimai atskleidė, kad osteoblastai gali sėkmingai prilipti prie membranos ir tvirtai sąveikauti su nanoporinėmis struktūromis [46]. Membrana gali veikti savarankiškai kaip fizinis barjeras auginant skirtingų tipų ląsteles, esančias arti viena kitos, bet neturinčias tiesioginio kontakto. Ląstelės sąveikauja per molekules, kurios pasklinda į poras ir per nanokanalus į kitą membranos pusę. Naudojant aliuminio oksido membranas ląstelių rūšiavime yra du reikšmingi pranašumai. Pirmasis, parinkus tinkamus parametrus, galima valdyti porų skersmenį, o tai kontroliuoja molekulių difuziją per membraną. Antra, membranos yra optiškai skaidrios, todėl optiniu mikroskopu galima reguliariai tikrinti ląstelių augimą ir morfologiją.

1.4. Akustinis slėgis ir jo įtaka srautui

Yra daug alternatyvių būdų siekiant manipuluoti skystyje daleles. Kiekvienas būdas turi savus privalumus ir trūkumus. Optimalus valdymo pasirinkimas priklauso nuo parametrų: tėkmės greičio, reikalingo tikslumo, dalelių koncentracijos, dalelių savybių ir biudžeto. Klasikiniai dalelių manipuliavimo būdai yra centrifugavimas ir mechaninis filtravimas. Centrifugavimas – procesas, kurio metu panaudojus išcentrinę jėgą skystis ar dalelės juda nuo sukimo centro link kraštų. Mechaninio filtravimo metu yra naudojama filtro geometrija tam, kad būtų atskirtos dalelės nuo medžiagos [47]. Šie metodai veikia patikimai ir siekiant filtruoti didelius skysčių kiekius turi daug pranašumų, tačiau įranga yra nepatogi, taip pat nėra galimybės valdyti atskirų dalelių. Šie du metodai pateikti 1.4.1 paveiksle.



a)

b)

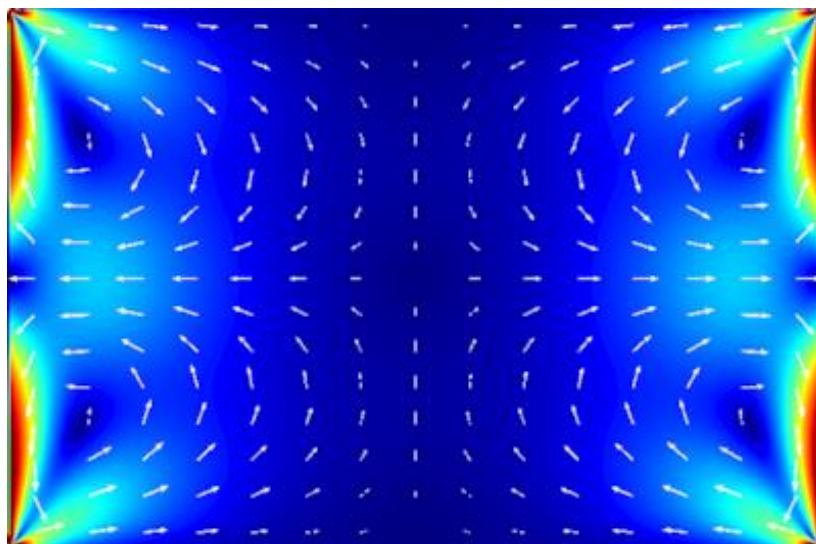
1.4.1 pav. Dalelių atskyrimo būdai: a) centrifugavimas [48]; b) filtravimas [49]

Akustohidrauliniai tyrimai yra naujai tiriama sritis, kurios tikslas yra ištirti, paaiškinti ir panaudoti akustinių bangų poveikį skysčiui. Yra du skirtingi metodai, kurie leidžia manipuluoti skystyje esančias dalelės: akustinė jėga, dėl kurios išsklaidomos dalelės į erdvės pakraščius arba akustinė jėga, kuri sudaro srautą, leidžiantį nutempti daleles kartu su skysčiu. Dalelių tvarkymas ir valdymas šiuo metodu vadinamas akustoforeze [50]. Tokiu būdu pavienes daleles arba didelius jų kiekius galima

valdyti nekontaktiniu būdu, sukuriant akustinį srautą. Akustinis srautas – tai skysčio judesys, skaičiuojamas pagal trukmę per erdvinius svyravimus [51]. Tipiškai žadinamos akustohidraulinės dalelės svyruoja aukšto (MHz) arba žemo (kHz) dažnio režimais. Šiam tikslui dažniausiai naudojami pjezoelektriniai keitikliai, kurie sužadina struktūrą sukuriantį akustinį lauką skysčio viduje [52].

Pjezoelektrinės medžiagos gali transformuoti elektos energiją į mechaninę deformaciją. Šie keitikliai dirbant ultragarsiniu dažniu gali sukurti levitacijos efektą, kuris šio darbo tyrime bus naudojamas. Švininis cirkonato titanatas (PZT) yra tinkama medžiaga ultragarso keitikliui dėl didelės pjezoelektrinės konstantos, santykinio pralaidumo ir elektromechaninio koeficiento. Šiuo įrenginiu galima pasiekti aukštus darbinius dažnius, o tai yra reikalinga norint gauti didelio intensyvumo fokusavimą ir galimybę fokusuoti daleles nanometro eilės aliuminio oksido kanaluose [53].

Akustinis slėgis turi tiek teigiamas, tiek neigiamas savybes. Vienas didžiausių privalumų – dalelės manipuluojamos bekontaktiškai būdu, nes dalelės (pvz., gyvos ląstelės ar bakterijos) yra labai trapios. Didelis optinių žnyplių šiluminis intensyvumas, didelis elektrinis laukas ir stiprūs magnetiniai laukai dažnai yra pavojingi gyvoms ląstelėms ar organizmams [54]. Kadangi akustinio skysčio jėgos laukai gali būti suformuoti pagal turimą įtaiso dizainą (turint sudėtingą konstrukciją), galima pasiekti visas konstrukcijos zonas bei greitai pakeisti jėgų laukus keičiant vieno ar daugiau keitiklių sužadinimo amplitudę, dažnį ir fazę [55]. Vienu metu galima manipuluoti tūkstančiais dalelių, o tai yra didelis pranašumas prieš optinius pincetus. Dėl akustinio skysčio įtaisų paprastumo yra žemesnės jų gamybos ir eksploataavimo išlaidos, o tai dar vienas svarbus pranašumas. Be to, yra galimybė sujungti akustohidraulinį manipuliavimą su kitais manipuliavimo būdais, nes akustinis, elektrinis, optinis ir magnetinis laukai netrukdo vienas kitam [56]. Kadangi akustinė skysčio jėga nepriklauso nuo magnetinių, elektrinių ar optinių dalelių savybių, akustohidraulinis manipuliavimas taip pat yra patraukli alternatyva sistemoms, kuriose negalima naudoti kitų metodų. Akustinio slėgio sukurtas srautas pateiktas 1.4.2 paveiksle.

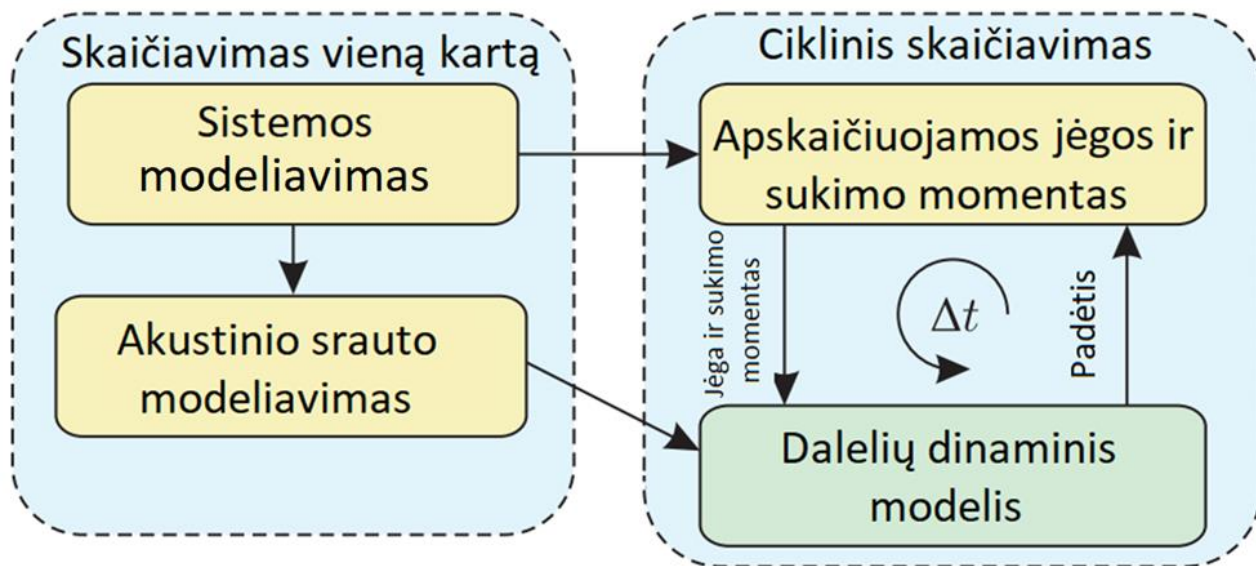


1.4.2 pav. Akustinio slėgio sukurtas srautas [57]

Akustinio slėgio naudojimas dalelių manipuliavimui erdmėje gali būti generuojamas anksčiau minėtu pjezoelektrinio sužadinimo būdu. Norint tiksliai nustatyti, kokiais parametrais reikia žadinti sistemą, kad ji atliktų konkrečią užduotį, šiais laikais naudojamos kompiuterinės simuliacijos. Dėl spartėjančio techninės įrangos našumo skaičiavimo ir vartotojui patogesnės modeliavimo aplinkos, net ir sudėtingų 3D modelių skaitmeninis modeliavimas tampa įmanomas. Dėl šios priežasties,

skaitmeninis modeliavimas yra labai svarbi naujos eksperimentinės analizės dalis. Pagrindinis skaitmeninio modeliavimo tikslas – akustinio slėgio kontekste numatyti dalelių judėjimą skysčio ertmėse ar kanaluose [44].

Pradedant modeliuoti ir žinant konkrečią sistemą, trajektorijos modeliavimo procedūra susideda iš kelių etapų. Modeliavimo etapų struktūra pavaizduota 1.4.3 paveiksle [58]. Iš šios struktūros matyti, kad vieno matematinio modelio neužtenka, todėl reikia juos sujungti. Šiame junginyje iš vienos simuliacijos gauti rezultatai perduodami kitai simuliacijai, kuri apdoroja duomenis per tam tikrą trukmę. Pagrindinis šios analizės rezultatas – gaunamas dalelių padėties ir orientacijos kitimas laike. Kaip tarpinė informacija gaunama – slėgių pasiskirstymas zonose arba dalelių srauto greitis.



1.4.3 pav. Modeliavimo etapų struktūra [58]

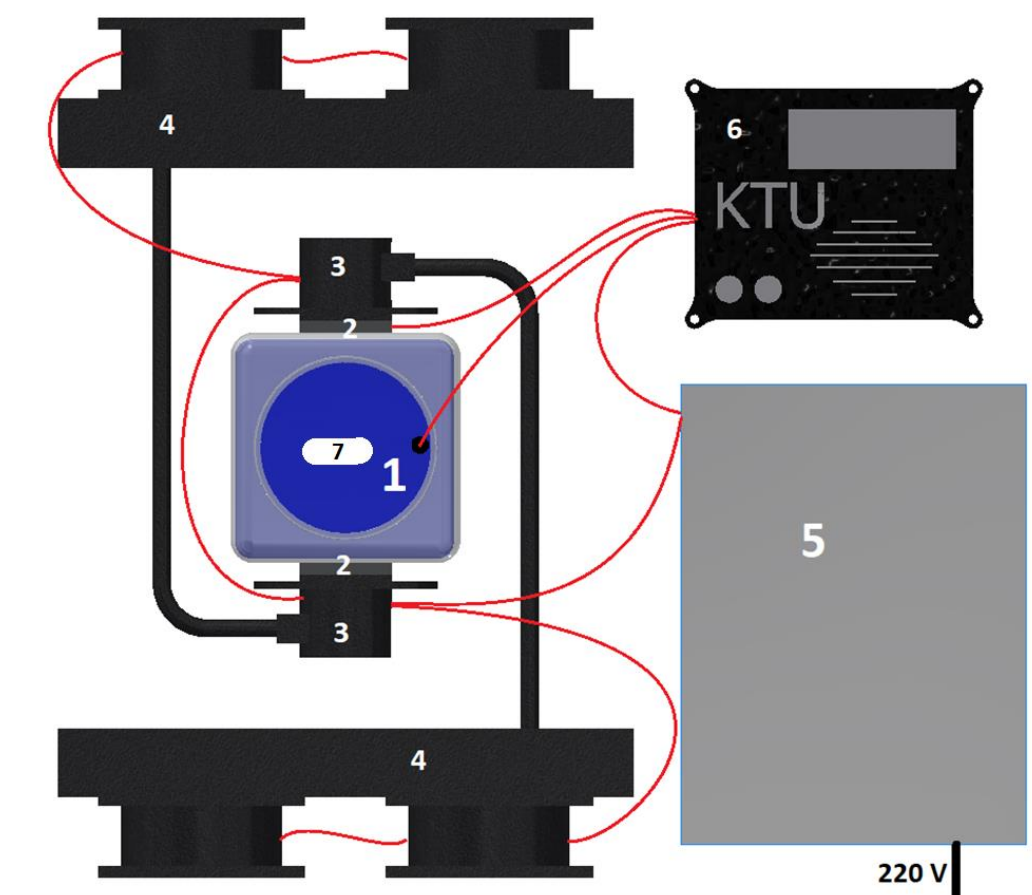
Atliekamos analizės turi būti modeliuojamos taip, kad būtų sumažinama jų trukmė. Vienas iš būdų sutrumpinti analizės trukmę – panaudoti simetrines geometrinės formas. Simuliacijos turi sietis su realiomis fizikinėmis vertėmis. Šios atliktos simuliacinės analizės gali suteikti daug informacijos, siekiant atlikti tikrus eksperimentus. Gautas teorinės vertės turi būti lyginamos su eksperimentinėmis vertėmis.

2. Aliuminio oksido membranos gamyba

Šiame skyriuje pristatoma aliuminio oksido membranos gamybos technologija. Taip pat pristatomi aliuminio oksido nanomembranos gamybos stendo gauti rezultatai. Atlikta teorinė šaldymo sistemos analizė ir gauti rezultatai palyginti su pagaminto stendo parametrais. Pateikiami atlikto aliuminio anodacijos proceso ir gautos membranos tyrimo rezultatai. Aliuminio oksido membranos stebėjimui ir analizavimui naudota baigtinių elementų metodu pagrįsta programinė įranga „COMSOL Multiphysics 5.4“. Tyrime naudojamo indo modelis suprojektuotas naudojant „Autodesk Inventor 2019“ programinę įrangą.

2.1. Teorinis aliuminio oksido gamybos stendo modelis

Remiantis mikrohidraulikos įrenginių gamybos metodų apžvalga, aliuminio oksido membranos gamybos pagrindinė procedūra –anodacija. Šios reakcijos metu didėja inde esančių elementų temperatūra, o siekiant kokybiškos membranos – būtina palaikyti pastovią reakcijos temperatūrą. Šiam tikslui suprojektuota ir sukonstruota aušinimo sistema. Aliuminio oksido gamybos stendą sudaro pagrindiniai elementai ir keletas papildomų, be kurių sudėtinga užtikrinti reaktoriaus indo temperatūrą. Prototipas sudarytas iš stiklinio indo, Peltier elemento, aušinimo pompos, radiatoriaus, maitinimo bloko ir temperatūros valdymo bloko. Kaip papildomi elementai naudojami: laidai, temperatūros davikliai, termopasta ir kt. Prototipo su pagrindiniais elementais struktūrinė schema pateikta 2.1.1 paveiksle.



2.1.1 pav. Struktūrinė aušinimo sistemos schema: 1 – stiklinis indas; 2 – Peltier elementas; 3 – aušinimo pompa, turinti aušinimo kontūrą; 4 – radiatorius; 5 – maitinimo blokas; 6 – valdymo blokas; 7 – magnetinis maišyklės pagaliukas

Kaip jau buvo minėta teorijos apžvalgoje, aliuminio oksido gamybos stendo temperatūra palaikoma naudojant termoelektrinius (Peltier) modulius. Šių modulių matematinis modelis yra ganėtinai sudėtingas, nes pats termoelektrinis procesas yra sudėtingas, tačiau tam apskaičiuoti matematinės išraiškos egzistuoja.

Norint apskaičiuoti, kokio galingumo reikia Peltier elementų, visų pirma, reikia rasti, kiek sistema įšyla pasyviai. Tam reikia sužinoti, koks yra kontaktinis indo paviršiaus plotas su oru. Atlikus projektavimą paaiškėja, kad kontaktinis paviršiaus plotas su oru yra $42\,386\text{ mm}^2$. Realus ir suprojektuoto indo sienelės storis – 3 mm. Šio indo sienelės yra stiklinės, nes reakcijos metu naudojamos agresyvios medžiagos, kurios gali paveikti indo sienes. Stiklo šilumos laidumo koeficientas 0.8 W / (mK) [60]. Reakcija vyksta patalpoje, kurioje oro temperatūra yra $20\text{ }^\circ\text{C}$, tačiau reikalinga, kad indo vidinė temperatūra būtų apie $5\text{ }^\circ\text{C}$. Norimas temperatūrinis pokytis sistemoje yra $15\text{ }^\circ\text{C}$. Įstačius turimas vertes į šilumos srauto (5) formulę [61], gaunama:

$$Q = \frac{k}{s} A \cdot dT = \frac{0.8}{0.003} \cdot 30386 \cdot 10^{-6} \cdot 15 = 121,544\text{ W} \quad (5)$$

čia Q – pasyvus įšilimas; k – šilumos laidumo koeficientas; s – kontaktinės sienos storis; A – paviršiaus plotas, dT – temperatūros pokytis.

Prie pasyvaus įšilimo taip pat prisideda aktyvus šildymas, kuris anodacijos reakcijos metu atsiranda dėl elektrolizės proceso, kai kaista membrana. Šis aktyvus šildymas apskaičiuojamas įtampa sudauginus su srovės stipriu. Tam, kad galėtų vykti membranos formavimosi procesas, anodacijos procesui reikalinga 60 V įtampa ir 1 Ampero srovės stipris. Elektrinės galios (6) formulė su įstatytomis vertėmis yra pateikta toliau [62]:

$$P = V \cdot I = 60 \cdot 1 = 60\text{ W} \quad (6)$$

čia V – įtampa; I – srovės stipris.

Šias dvi temperatūrines apkrovas sudėjus – gaunama viena bendra. Prie šių apkrovų dar prisideda šilumos kiekis, kuris turi būti pašalintas iš medžiagos (pradiniu momentu). Tai priklauso nuo medžiagos savitosios šilumos, jos masės ir temperatūros pokyčio. Šiame darbe siekiama atvėsinti vandenį, kurio masė yra 534 gramai . Savitoji vandens šiluma yra 4182 (J / kgK) [63]. Priimama, kad vandens temperatūra yra tokia pati kaip oro. Įstačius vertes į savitosios šilumos (7) formulę [62], gaunama:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = 4182 \cdot 0,534 \cdot 15 = 33497\text{ J} \quad (7)$$

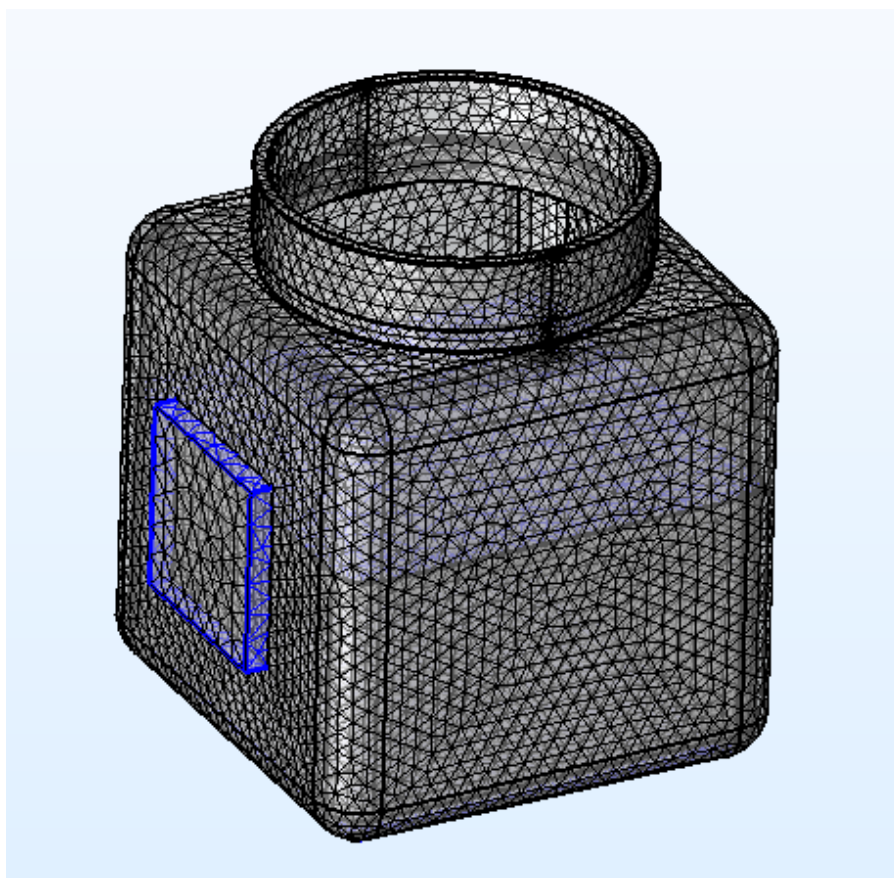
čia c – savitoji medžiagos šiluma; m – masė; ΔT – temperatūros pokytis.

Taip pat siekiama, kad sistema dirbtų našiai, todėl būtina apskaičiuoti, kokio galingumo Peltier elementų reikės. Kuo greičiau norima pasiekti tam tikrą pageidaujamą temperatūrą sistemoje, tuo galingesnio Peltier elemento reikia. Šioje analizėje siekiama, kad sistema atvėstų per 600 sekundžių , todėl norint apskaičiuoti pageidaujamą galingumą, reikia padalinti šilumos kiekį iš norimos aušinimo trukmės. Taip pat dar prisideda pasyvus ir aktyvus šildymas. Bendras reikalingas Peltier elemento galingumo apskaičiavimas pateiktas (8) formulėje [62]:

$$P = \frac{Q}{t} + Q_{akt} + Q_{pas} = \frac{33497}{600} + 121,544 + 60 = 237,37\text{ W} \quad (8)$$

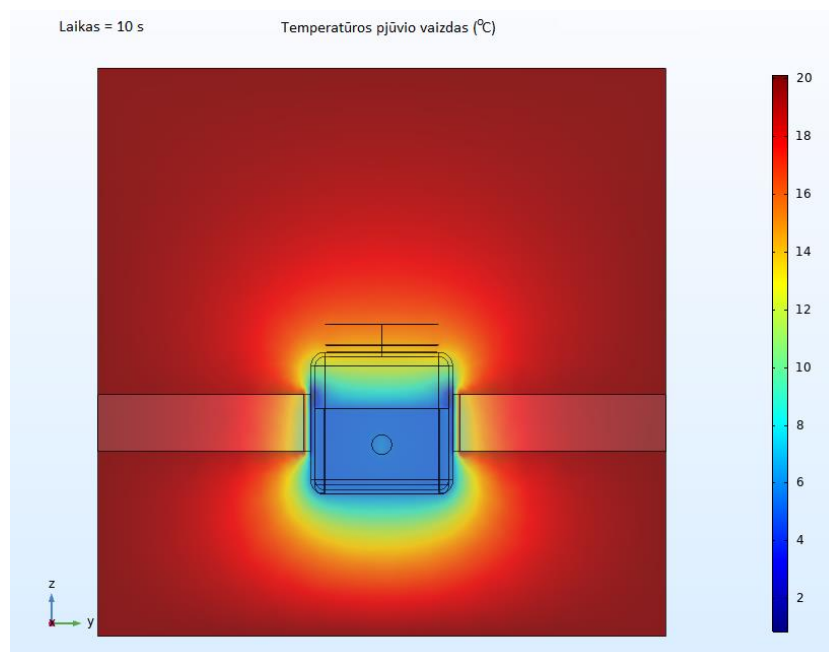
čia Q – šilumos kiekis pradiniu momentu; t – trukmė; Q_{akt} – aktyvus šildymas, Q_{pas} – pasyvus šildymas.

Apskaičiuotas galingumas taikomas baigtiniais elementų metodais pagrįstoje simuliacijoje. Čia panaudojamas tas pats vandens ir stiklinio indo modelis. Papildomai įkeliami du Peltier elementai. Apibrėžiama oro erdvė, kad būtų galima stebėti temperatūros kitimą. Į simuliaciją įtraukiamos objektų medžiagos. Peltier elementas yra pagamintas iš bismuto telūrido – Bi_2Te_3 . Sukuriamas skysčiui judantis duomenas tam, kad būtų gautas analogiškas skysčio maišymas maišant su magnetine maišykle. Šioje analizėje naudojamas temperatūros perkėlimo iš skysčio į kietą medžiagą modelis, elektros srovės modeliai. Vienas jų skirtas modeliuoti aliuminio oksido membraną, o kitas Peltier elementą. Modelis suskaidomas baigtiniais elementais. Suskaidyto modelio vaizdas pateiktas 2.1.2 paveiksle.



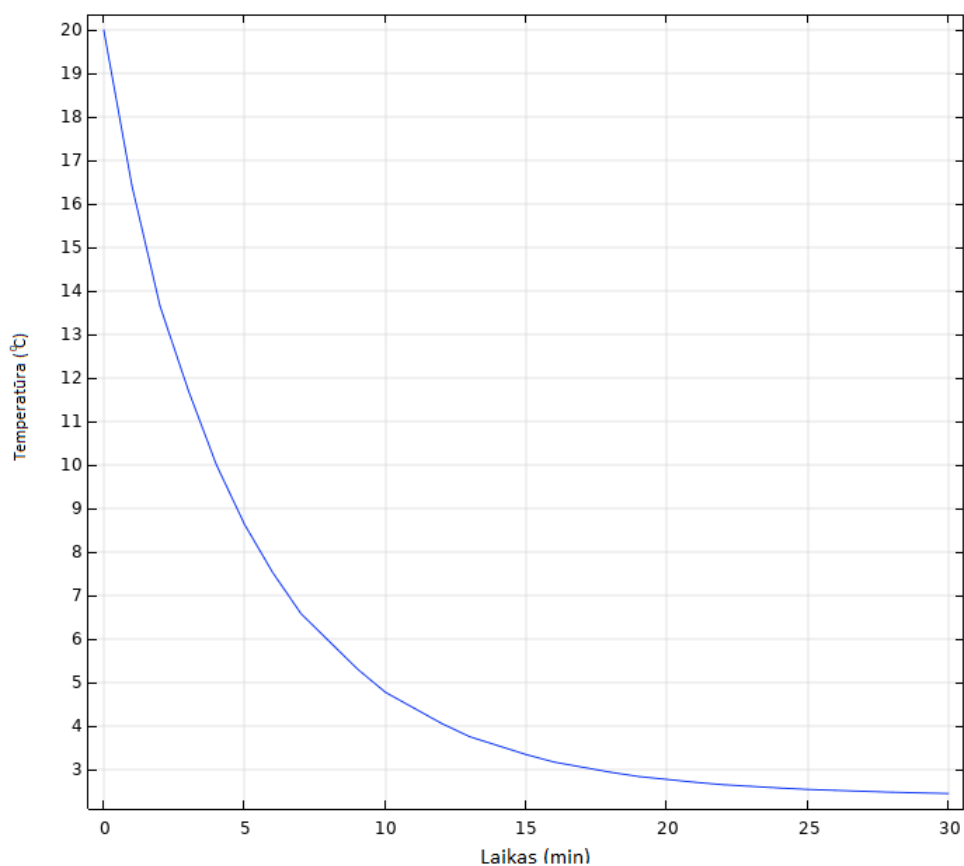
2.1.2 pav. Modelis, suskaidytas į baigtinius elementus

Reaktoriaus komponentai, suskaidyti į baigtinius elementus, yra apjungiami į daugiafunkcinį junginį, kad būtų galima stebėti bendrą temperatūros pokytį sistemoje. Analizės modelis parenkamas kintantis laike. Analizė atliekama vieną valandą vienos minutės žingsniu. Temperatūros analizės rezultatų vaizdą galima matyti 2.1.3 paveiksle.



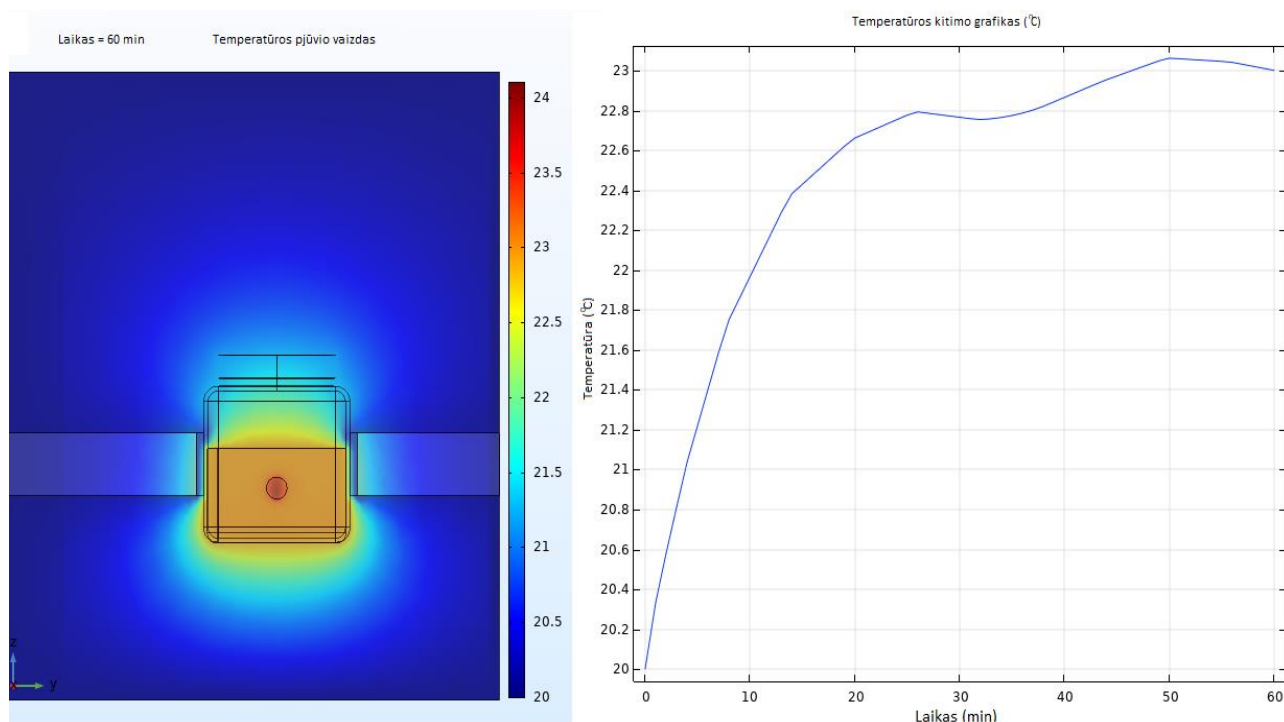
2.1.3 pav. Temperatūros analizės rezultatai

Gauti rezultatai rodo temperatūros pasiskirstymą inde ir aplinkoje. Galima pastebėti, kad prie Peltier elementų temperatūra atvėsta iki 2 °C. Pati aliuminio oksido membrana nežymiai įkaista, tačiau skysčio temperatūros nepaveikia, todėl išlaikoma pastovi skysčio temperatūra. Kadangi analizės modelis yra kintantis laike, galima nubrėžti temperatūros kitimą laike. Šis grafikas pateiktas 2.1.4 paveiksle.



2.1.4 pav. Inde esančio skysčio temperatūros kitimas laike

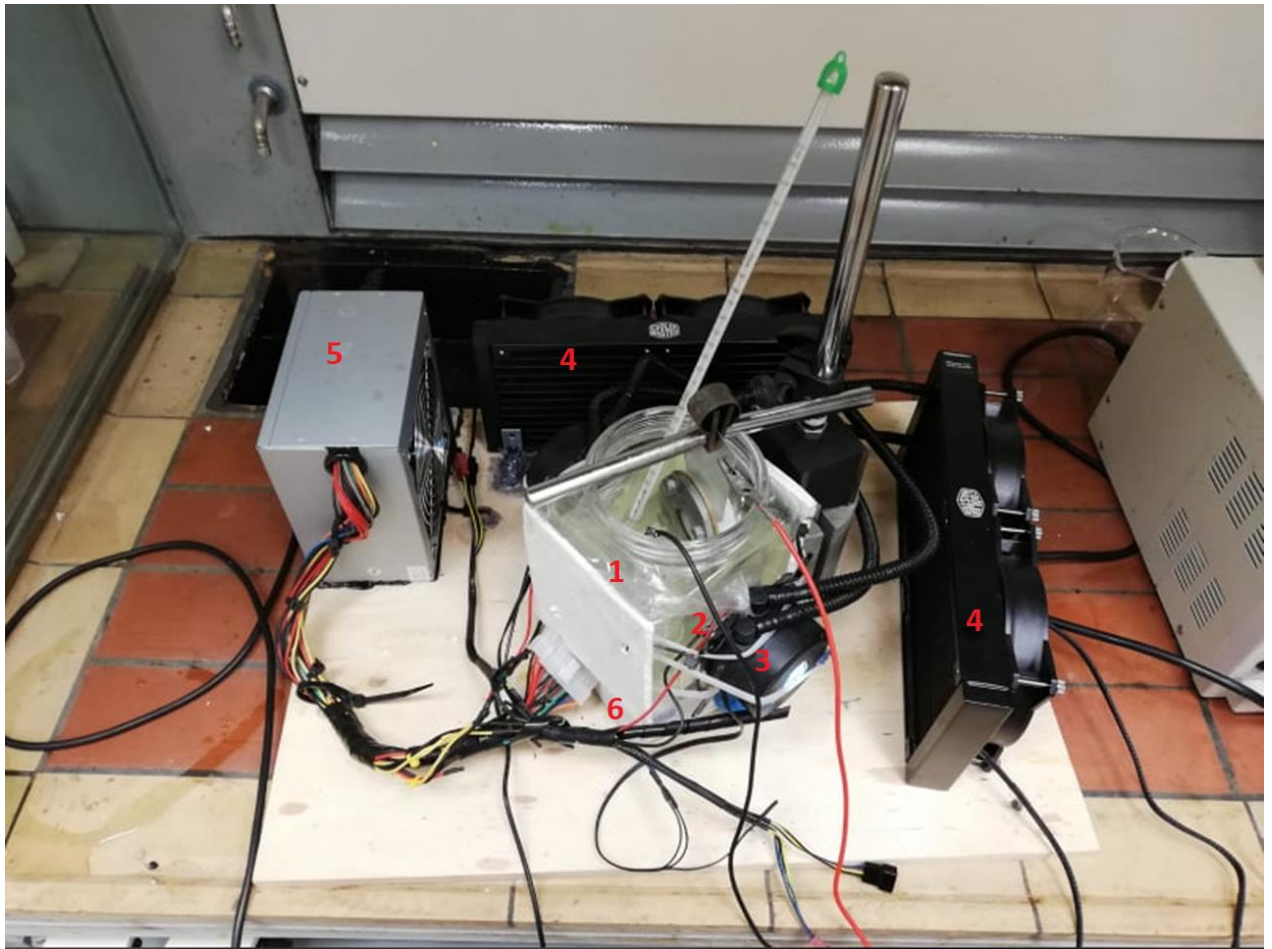
Iš temperatūros kitimo grafiko matyti, kad reikės temperatūros valdymo įrenginio. Šis įrenginys palaikys nustatytą temperatūrą, šiuo atveju, penkis laipsnius pagal Celsijų. Visos analizės metu siekiama pašalinti dėl vykstančių reakcijų sistemoje išsiskiriantį šilumos kiekį. Analizės metu yra galimybė nustatyti, kiek kūnas ir skystis išyla be aušinimo. Kaip matoma iš 2.1.5 paveiksle pateiktų rezultatų – aušinimas būtinas, nes tokioje temperatūroje pagamintos aliuminio oksido poros netvarkingai išsidėsčiusios ir reakcija nestabili. Gautą membraną sunku apibrėžti matematiškai, o gauti jos konkrečias specifikacijas neįmanoma dėl nestabilumo.



2.1.5 pav. Temperatūros analizės rezultatai be aušinimo

Gauti abiejų analizių rezultatai lyginami su pagaminto stendo temperatūros kitimu. Taip patikrinama skaičiavimo metodika su realiu eksperimentu.

Aliuminio oksido gamybos stendo gaminimas prasideda nuo 2.1.1 paveiksle pateiktų elementų paieškos. Šioje struktūrinėje schemoje pateiktas vienas Peltier elementas, nors teoriniuose skaičiavimuose ir analizėje naudoti du. Nuspręsta naudoti daugiau negu vieną šių elementų dėl ekonominių priežasčių. Vieno Peltier elemento galingumas siekia 120 W, o bendras galingumas 240 W (kas yra šiek tiek daugiau nei teoriniuose skaičiavimuose). Pats Peltier elementas sutepamas termopasta, kad būtų geresnis kontaktas su stikliniu paviršiumi ir aušinimo elementu. Šiuos elementus aušins aušinimo sistema, skirta kompiuterio procesoriaus aušinimui. Šią sistemą sudaro radiatorius, du ventiliatoriai, skysčio pompa ir du vamzdžiai. Sistemoje bus du komplektai šių elementų. Visus elektrinius prietaisus maitins 12 V 400 W maitinimo blokas. Visame skystyje norint palaikyti tokią pačią temperatūrą, indo dugne pridedama magnetinė maišyklė, kuri maišys skystį su magnetiniu pagaliuku. Temperatūrai fiksuoti pasitelkiamas gyvsidabrio termometras. Lengvesniam transportavimui ir elementų pozicionavimui, visa sistema sumontuota ant medinės plokštės. Pagamintą standą galima matyti 2.1.6 paveiksle. Ruošiniui įtvirtinti naudojamas stovas, kuris įprastai yra skirtas mėgintuvėlių laikymui chemijos laboratorijose.



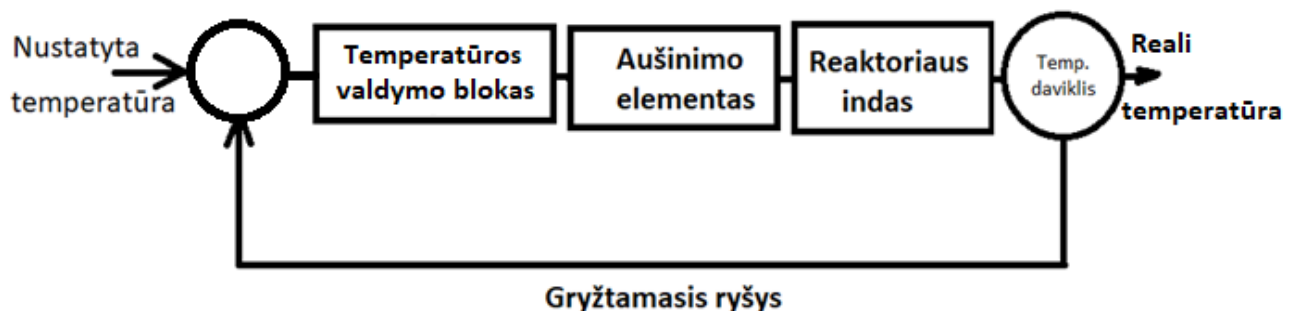
2.1.6 pav. Gamybos stendas: 1 – stiklinis indas; 2 – Peltier elementas; 3 – aušinimo pompa, turinti aušinimo kontūrą; 4 – radiatorius; 5 – maitinimo blokas; 6 – magnetinė maišyklė

Aliuminio oksido membranai gaminti sukonstruojamas mažas stovas. Šiame stove apibrėžiamas konkretus anodacijos proceso plotas, o likęs aliuminis yra izoliuojamas nuo reakcijos. Pagrindinė korpusinė detalė pagaminta iš nerūdijančio plieno kaip ir jungiantieji varžtai su veržlėmis. Kaip izoliatorius naudojamas ABS (akrilnitrilo butadieno stireno) techninis polimeras ir techninė guma. Surinktas stovas pateiktas 2.1.7 paveiksle.



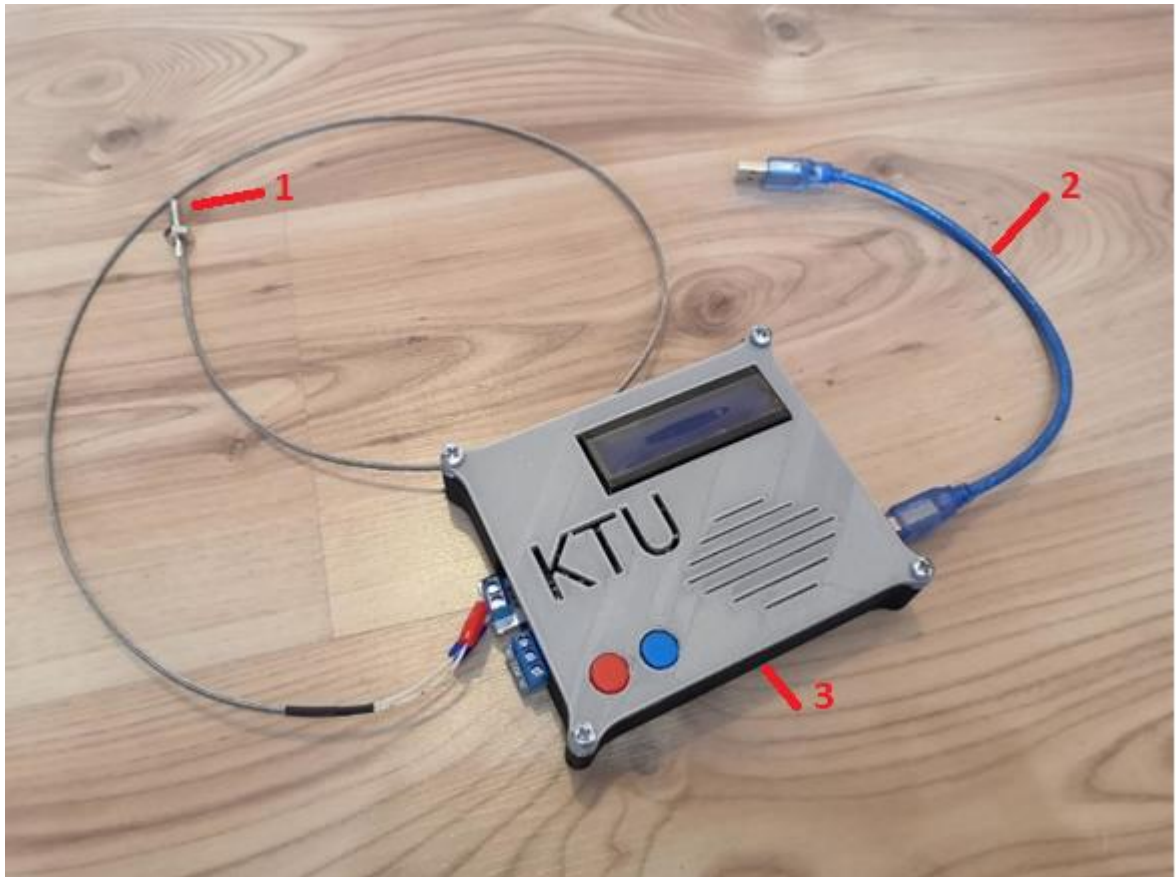
2.1.7 pav. Surinktas stovas: a) aliuminio plokštelė 1 įtvirtinta laikiklyje 2; b) aliuminio plokštelė, įtvirtinta laikiklyje, pamerkiama į rūgštinį tirpalą 3

Visos aušinimo sistemos valdymui pagamintas valdymo blokas. Bloką sudaro „Arduino“ programuojamas valdiklis, relė, USB laidas, mygtukai ir temperatūros daviklis. Programuojamame valdiklyje įdiegta PID (proporcinė (P), integruojanti (I) ir diferencijuojanti (D)) valdymo sistema, kuri priartėjimo metodu siekia stabilizuoti sistemą ir palaikyti nustatytą temperatūrą. Pilnas programinis valdymo sistemos kodas pateiktas 1 priede. Šie elementai sudaro visą valdymo sistemą. Valdymo sistemos struktūrinė schema pateikta 2.1.8 paveiksle.



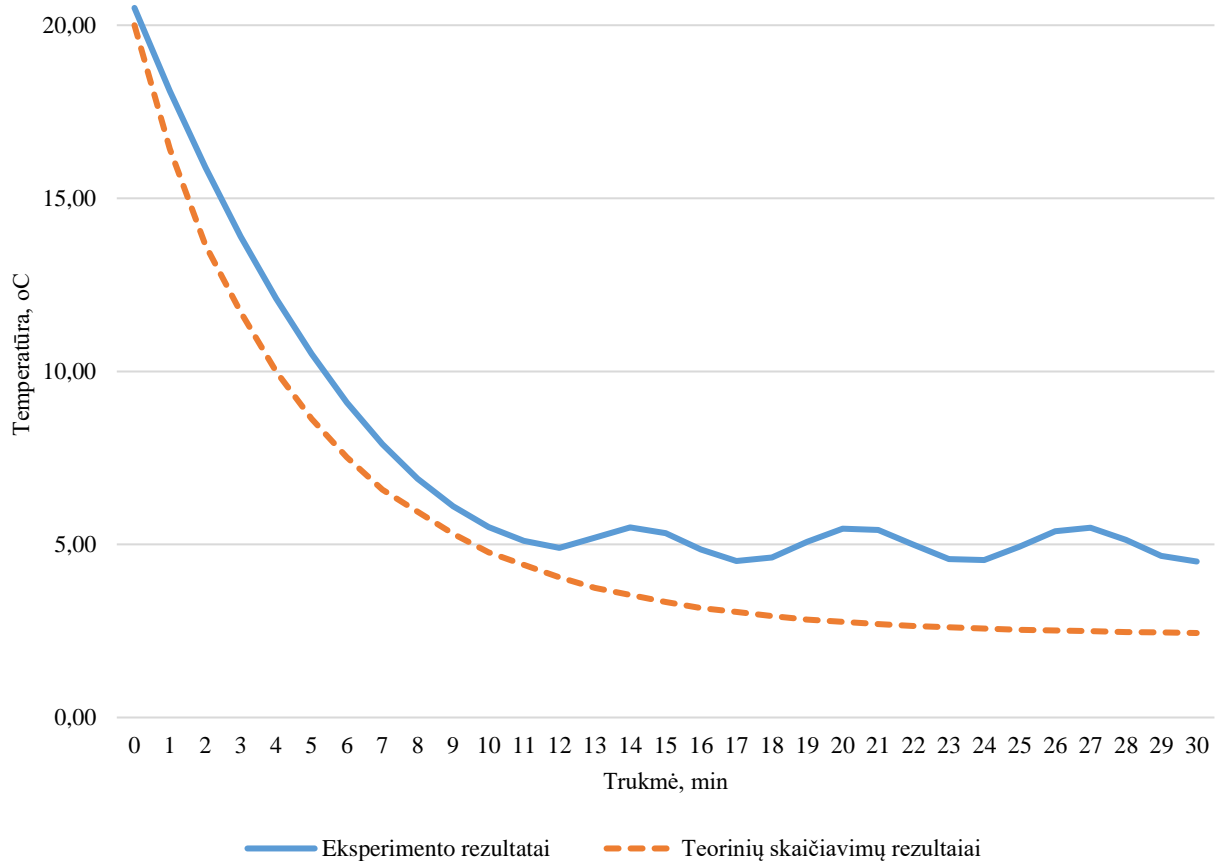
2.1.8 pav. Aušinimo sistemos valdymo struktūrinė schema

Pagaminta valdymo sistema gali kontroliuoti iki 300 W nuolatinės srovės elektrinį prietaisą. Prietaiso temperatūrą galima reguliuoti naudojant du mygtukus, kurie prideda arba atima sistemoje po 1 °C. Temperatūros daviklis turi 0.5 laipsnių paklaidą ir gali fiksuoti temperatūrą nuo -55 °C iki +125 °C [64]. Valdymo bloką galima maitinti per USB laidą. Vienu metu galima fiksuoti temperatūros kitimo informaciją ir persikelti duomenis į kompiuterį. Pagaminto valdymo bloko nuotrauka pateikta 2.1.9 paveiksle.



2.1.9 pav. Šaldymo sistemos valdymo blokas 3 su USB 2 ir temperatūros davikliu 1

Siekiant patikrinti sistemos veikimą į indą pripilta vandens, kurio temperatūra, iš pradžių, 13,4 °C. Vanduo paliktas nusistovėti ir susilyginti su aplinkos temperatūra. Po kurio laiko vandens temperatūra pasiekia 20,5 °C ir daugiau nekinta. Sujungus visus reikiamus elementus, skystis pradamas aušinti ir stebima kaip veikia sistema. Iš pradžių sistemos temperatūra krinta labai intensyviai, vėliau, dėl konvekcijos su aplinka, temperatūra mažėja lėčiau, kol pasiekia 5 °C ir nustoja mažėti. Toliau fiksuojant duomenis pastebėta, kad sistemos temperatūra svyruoja apie 1,5 °C. Temperatūros kitimo grafiką galima matyti 2.1.10 paveiksle. Čia taip pat pateikiamas teorinis grafikas duomenų palyginimui.



2.1.10 pav. Teorinių ir praktinių rezultatų palyginimas

Palyginus rezultatus galima daryti prielaidą, kad eksperimentinis modelis atitinka teorinį. Sistema gali palaikyti pakankamai tikslią temperatūrą, kuri reikalinga siekiant pagaminti membraną su tvarkingu porų išsidėstymu.

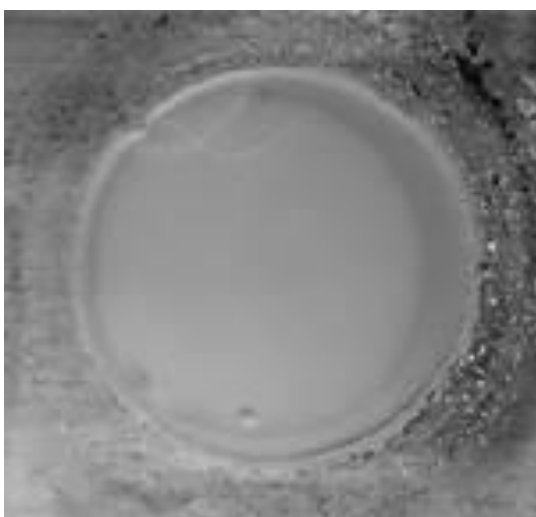
2.2. Anodacijos proceso eiga

Aliuminio oksido membranos gamyba yra sudėtinga procedūra, kurios metu reikia atlikti daug skirtingų veiksmų. Norint geriau suprasti ir tobulinti šį procesą – sudaryta gamybos proceso eiga. Visų pirma, siekiant įvykdyti reakciją, reikia tinkamai paruošti aliumininio ruošinį. Bandinio kokybė gali daryti įtaką kuriamos struktūros kokybei. Reikia atkreipti dėmesį, kad aliuminio ruošinys gali turėti oksido sluoksnį, kuris atsiranda dėl atmosferoje esančio deguonis, tačiau jo sluoksnis yra labai plonas. Bandinys taip pat gali turėti jau esamą paviršiaus struktūrą, atsiradusią dėl mechaninių, terminių, cheminių ar elektrocheminių poveikių. Dėl porų gabaritinių matmenų visi šie išvardinti paviršiaus neatitikimai gali turėti reikšmingą poveikį porų struktūroms, kurios susidaro ant bandinio paviršiaus, todėl jų įtaką būtina sumažinti, siekiant užtikinti kokybišką ir tvarkingai išsidėsčiusią struktūrą. Šio faktoriaus neužtikrinimas gali lemti netikslius tyrimo duomenis. Aliuminio oksido membranos gamybos procese pagrindinė operacija – anodavimas. Šiai reakcijai vykti turi būti sudarytos tinkamos sąlygos ir terpė. Atlikus eksperimentus, nustatyta geriausius rezultatus lėmusi veiksmų eiga. Išsamus gamybos procesas aprašytas 2.2.1 lentelėje [59].

2.2.1 lentelė. Aliuminio oksido nanomembranos gamybos eigos aprašymas

Nr.	Procedūros aprašymas
1	Aliuminio ruošinio iškirpimas ir išlyginimas.
2	Cheminis valymas naudojant acetoną arba chloroformą.
3	Šiluminis lakšto atkaitinimo procesas, įdedant aliuminį tarp stiklinių lakštų 400 ° C temperatūroje 4–5 valandas, azoto aplinkoje (inertinė aplinka), kad būtų pašalinti vidiniai įtempiai.
4	Mechaninis poliravimas naudojant acetoną arba chloroformą.
5	Po cheminio poliravimo naudojant acetoną, bandinys panardinamas į fosforo rūgštį, kad susidarytų hidrofilinis paviršius.
6	Atliekamas pirmas anodavimo procesas, naudojant oksalo rūgštį (40 / 60 V) 1h / 1h 30 min.
7	Atliekama ėsdinimo fazė tuo pačiu tirpalu, kaip ir anksčiau, esant 40 / 50 °C temperatūrai (norint padidinti proceso greitį), o ėsdinama tol, kol paviršius vėl tampa blizgus.
8	Antrojo etapo anodavimo procesas, esant tai pačia įtampa (40 / 60 V) kaip ir pirmojo anodavimo procese, naudojant oksalo rūgštį. Reakcijos laikas turi būti nustatytas eksperimentiniu būdu.
9	Ėsdinimas bandinio kitas paviršius (tam, kad atidaryti poras), naudojant HCl + CuCl ₂ .
10	Naudojant lašą fosforo rūgšties ir lakmuso popierių patikrinamas aliuminio oksido membranos porų atsidarymas (visas paviršius turi įgauti spalvą).
11	Membranos valymas vandeniu ir acetonu. Membranos džiovinimas.

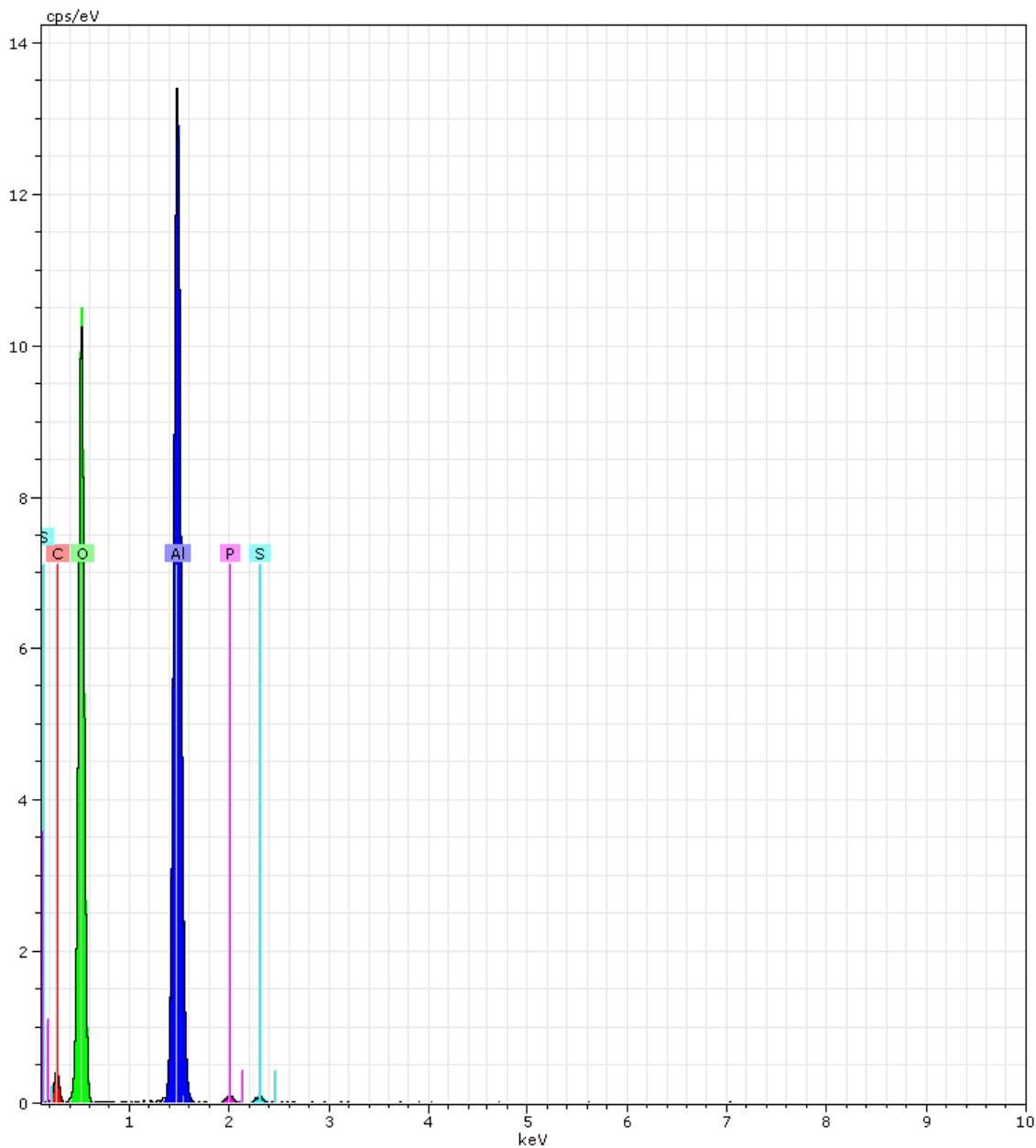
Pagamintas stendas išvalomas ir parengiamas anodacijos procesui. Aliuminio plokštelės ruošinys iškerpamas ir išlyginamas. Chemiam valymui naudojamas acetonas. Laboratorinėje krosnyje įvykdomas šiluminis lakšto atkaitinimo procesas, įdedant aliuminį tarp stiklinių lakštų 400 °C temperatūroje penkioms valandoms. Atkaitimo procesas vyksta inertinėje azoto aplinkoje. Atliekamas mechaninis poliravimas su acetonu. Vėliau bandinys panardinamas į fosforo rūgštį. Po šių veiksmų atliekamas pirmasis anodacijos procesas. Gautas ruošinys nuėsdinamas, o po to dar kartą atliekamas anodacijos procesas. Parengta aliuminio oksido plokštelė nuvaloma ir išdžiovinama. Gautas membranos vaizdas pateiktas 2.2.1 paveiksle.



2.2.1 pav. Pagamintos membranos vaizdas

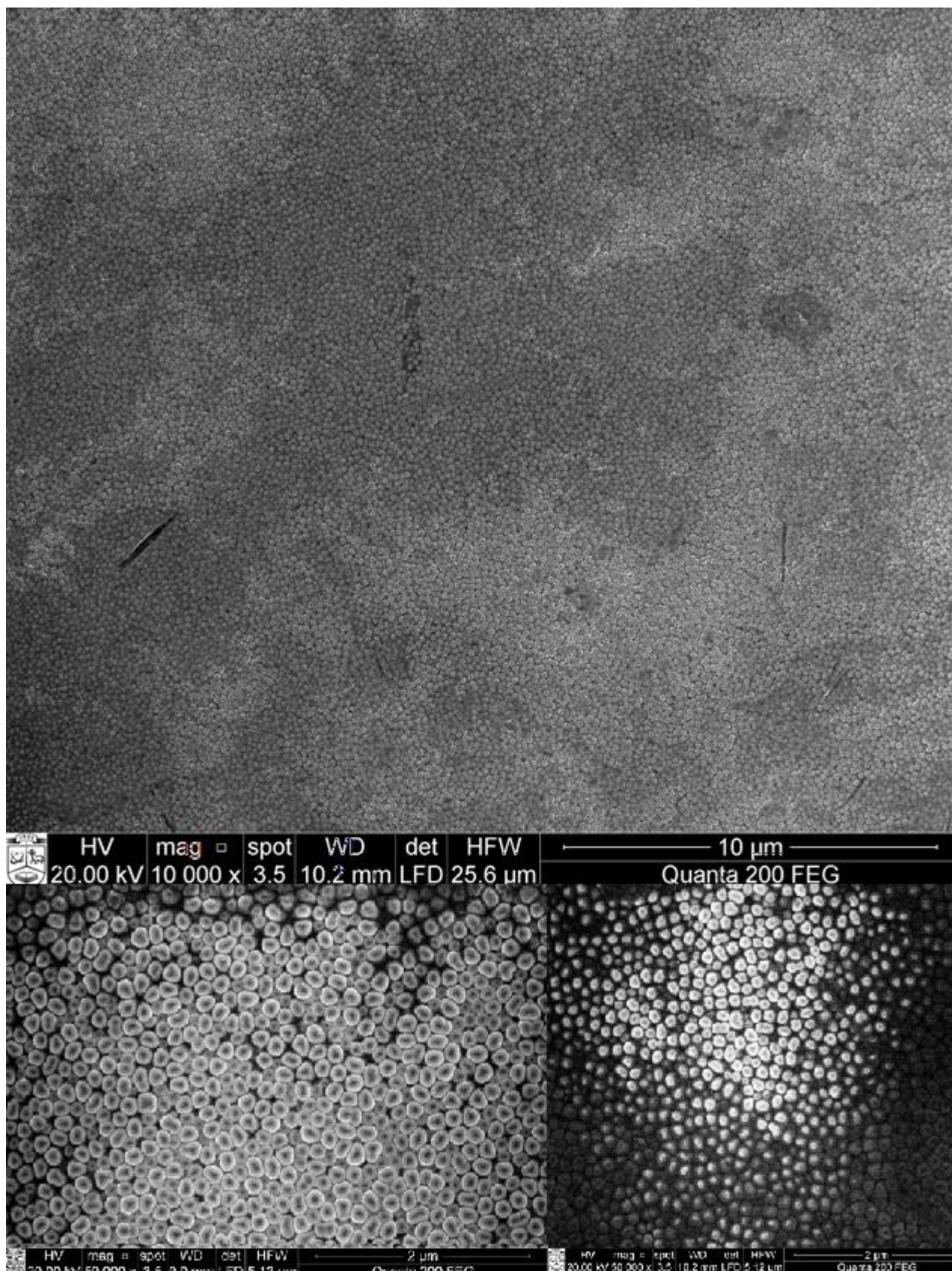
Siekiant tiksliai sužinoti pagamintos membranos cheminę sudėtį ir patikrinti, ar tikrai gautas aliuminio oksidas – panaudotas energinis dispersinis (ED) spektrometras su impulso aukščio analize. Atlikus analizę bandiniuose nustatyti penki pagrindiniai elementai: anglis (C), deguonis (O),

aliuminis (Al), fosforas (P) ir sierra (S). Energinis dispersinis spektras pateiktas 2.2.2 paveiksle. Iš šio spektro galima matyti, kad didžiausios koncentracijos – aliuminio ir deguonies. Šie du elementai sudaro aliuminio oksidą.



2.2.2 pav. Pagamintos aliuminio oksido membranos energinis dispersinis spektras

Energinis dispersinis spektras gali parodyti tik cheminę junginio sudėtį, tačiau negali parodyti gautos membranos struktūros. Šiam tikslui panaudotas elektrinis mikroskopas (SEM). Jo dėka galima tirti ir analizuoti struktūras mikrolygmenyje. Gauti rezultatai pateikti 2.2.3 paveiksle.



2.2.3 pav. Pagamintos aliuminio oksido membranos tyrimo su elektriniu mikroskopu rezultatai

Pateiktose nuotraukose galima pastebėti mikrobrūkšnius, kurie tikėtina, kad liko aliuminio ruošinyje prieš anodacijos procesą. Šiuos brūkšnius galima sumažinti parinkus dar geresnės kokybės ruošinį ir atliekant ilgesnį ruošinio paruošimo procesą. Išanalizavus aliuminio oksido membranos gautus

rezultatus paaiškėja, kad gautos membranos poros skersmuo yra apie 200 nm. Atstumas tarp poros centrų apie 250 nm. Šie gauti rezultatai toliau bus naudojami kompiuterinėse simuliacijose, analizuojant laminarinį srautą porose ir akustinio slėgio įtaką srautui.

3. Laminarinio tekėjimo ir akustinio slėgio skaitmeninė analizė aliuminio oksido nanoporose

Šiame skyriuje pristatomi rezultatai, gauti analizuojant aliuminio oksido nanoporas. Atlikta laminarinio tekėjimo analizė ir bandoma skystyje esančias daleles paveikti akustiniu slėgiu. Siekiant išanalizuoti ir stebėti tokio pobūdžio sistemas, pasirinkta baigtinių elementų metodu pagrįsta programinė įranga „COMSOL Multiphysics 5.4“.

3.1. Laminaris tekėjimas aliuminio oksido nanoporose

Anksčiau šiame darbe buvo minėta, jog nanoporose atsiranda laminarinis tekėjimas. Koks bus tekėjimas lemia bematis kriterijus – Reinoldso skaičius. Kai skystis teka apskritimo formos ertme, Reinoldso skaičius apskaičiuojamas pagal (9) formulę:

$$Re = v \cdot d / \nu \quad (9)$$

čia v – vidutinis greitis; d – vamzdžio vidinis skersmuo; ν – skysčio kinematinis klampos koeficientas.

Kai Reinoldso skaičius yra mažesnis arba lygus 2320, skysčio tekėjimas yra laminarinis. Kai skaičius didesnis nei 2320, bet neviršija 4000 – šis tekėjimas vadinamas neapibrėžtu, o kai viršija 4000 – skysčio tekėjimas yra turbulentinis [60]. Iš šios formulės galima matyti, kad kuo mažesnis skersmuo, tuo labiau tikėtina, kad Reinoldso skaičius bus mažesnis. Artėjant prie mikro- ir nanosistemų matmenų, tampa akivaizdu, kad pasiekti turbulentinį skysčio tekėjimą apvalioje poroje tampa neįmanoma, nes reikalingas srauto greitis tampa labai didelis.

Norint apskaičiuoti aliuminio oksido membranos debitą, pirmiausia reikia rasti vienos poros laminarinio srauto debitą, esant 1 atmosferos slėgio skirtumui. Tam naudojama Puazeilio formulė [61].

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta l} \quad (10)$$

Čia R – vamzdžio spindulys; η – skysčio dinaminės klampos koeficientas; Δp – slėgių skirtumas skirtinguose poros pusėse; l – poros ilgis.

Skaitmeninė analizė atliekama su vandeniu, todėl šio skysčio dinaminės klampos koeficientas 20 °C temperatūroje yra $1,0019 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [62]. Nano poros spindulys gali kisti (kaip buvo minima anksčiau šiame darbe – nuo daug skirtingų parametru), tačiau šiuose skaičiavimuose analizuojama 100 nm spindulio nanopora. Nanoporos ilgis gali kisti, tačiau numatoma, kad ilgis – 2 μm . Su šias duomenimis gaunamas aliuminio oksido nanomembranos poros debitas, kuris lygus $1,95877 \cdot 10^{-20} \text{ m}^3/\text{s}$. Debitas apskaičiuojamas pagal (11) formulę:

$$Q_{poros} = \frac{3,14 \cdot (100 \cdot 10^{-9})^4}{8 \cdot 1,0019 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{2 \cdot 10^{-6}} = 1,95877 \cdot 10^{-20} \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

Norint apskaičiuoti vidutinį greitį poroje, reikia debitą padalinti iš ploto. Tam naudojama (12) formulė:

$$V = \frac{Q}{S} = 6,238 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} \quad (12)$$

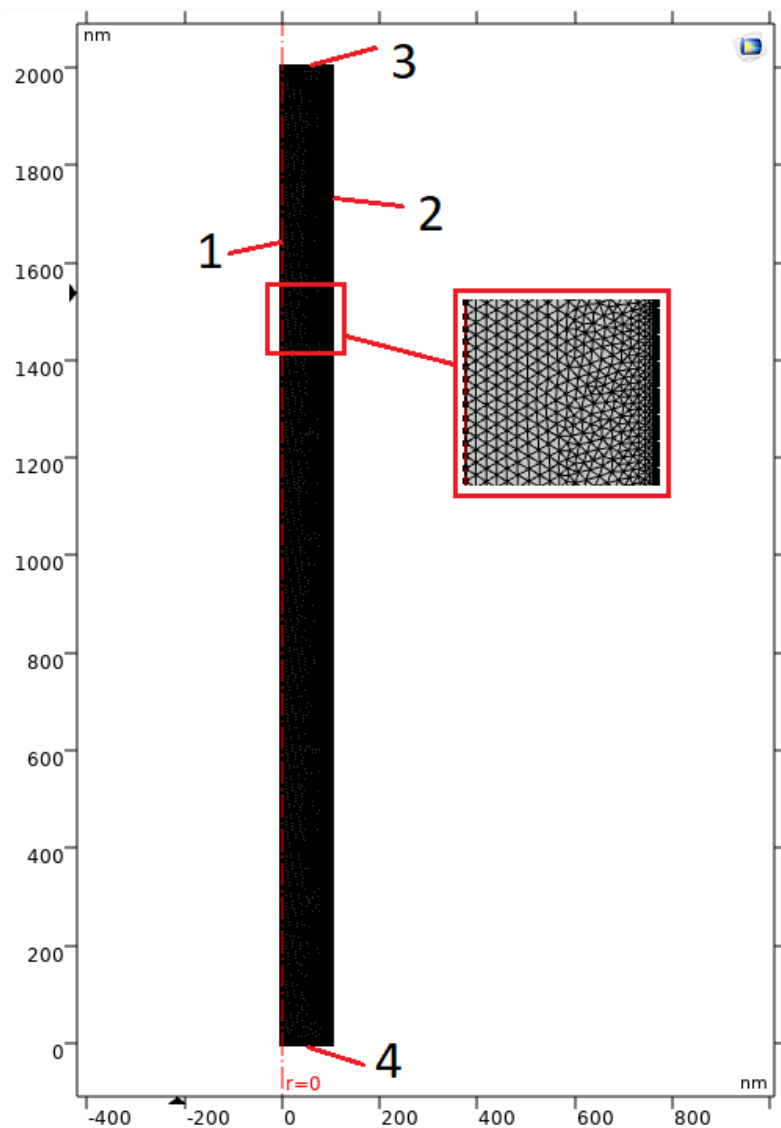
čia V – skysčio greitis; Q – debitas; S – pjūvio plotas poros.

Siekiant rasti membranos bendrą debitą – reikia žinoti, koks kiekis porų yra membranoje. Įvairiuose šaltiniuose minimas skirtingas porų kiekis, tačiau vidutiniškai būna apie 10^{13} porų kvadratiniam metre [68]. Tada bendras membranos debitas apskaičiuojamas pagal (13) formulę:

$$Q_{memb} = Q_{poros} \cdot n_{por.sk} = 1,95877 \cdot 10^{-20} \cdot 10^{13} = 1,95877 \cdot \frac{10^{-7} m^3}{s} = 0,0117526 l/min \quad (13)$$

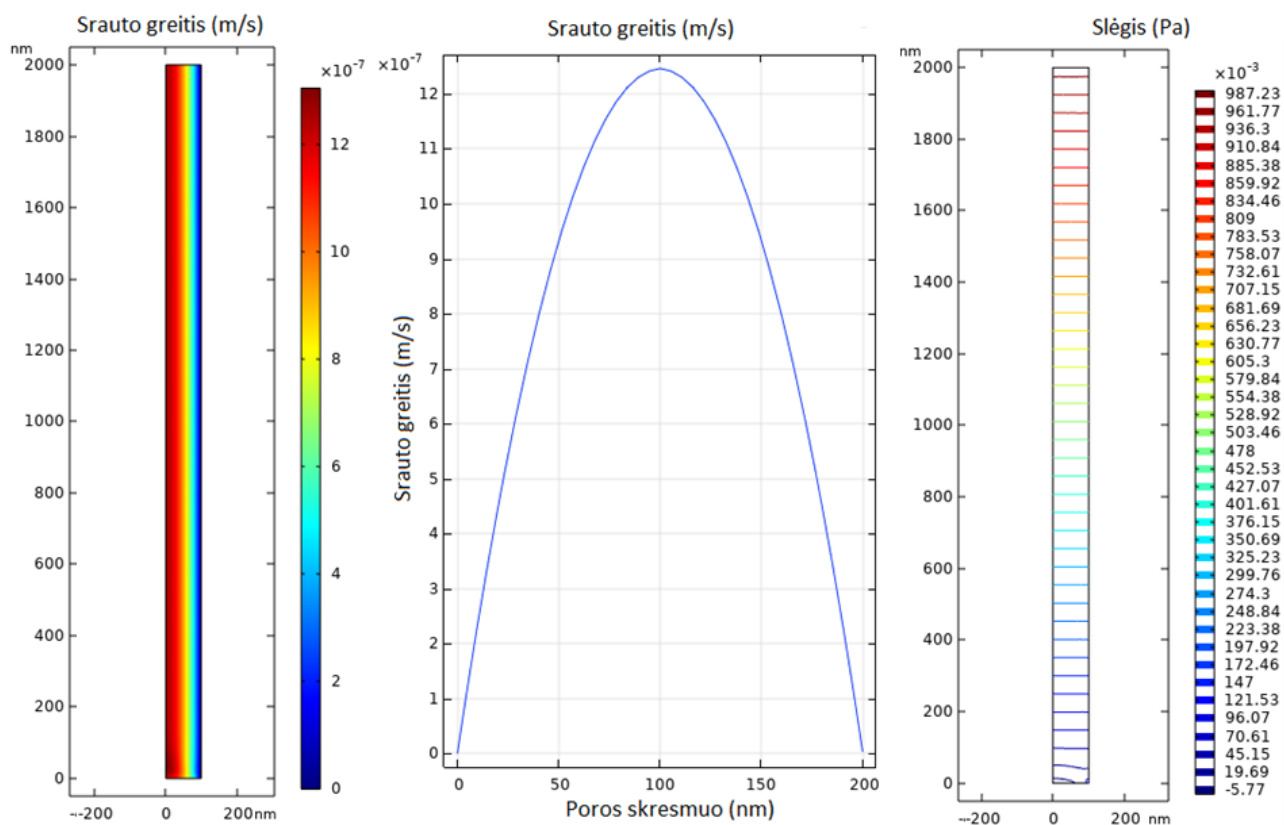
čia Q_{memb} – membranos debitas; Q_{poros} – poros debitas; $n_{por.sk}$ – teorinis porų skaičius kvadratiniam metre.

Šie skaičiavimai palyginami su „COMSOL Multiphysics 5.4“ programine įranga atlikta simuliacija. Šioje programoje skaičiavimai supaprastinami naudojant ašiai simetrinį modelį. Šis poros modelis turi keturias sienas. Viena siena yra ašiai simetrinė, kita siena yra išorinis kontūras, ir dar dvi, kur fiksuojančios įtekantį ir ištekantį srautus. Kaip ir skaičiavimuose, taip ir modeliavime įtekančio srauto siena fiksuojama turinti 1 Pa slėgį, o ištekančioje vietoje nurodomas 0 Pa slėgis. Skysčio temperatūra nurodoma 20 laipsnių pagal Celsijų. Šis modelis pateikiamas 3.1.1 paveiksle. Matematinis modelis skaičiuojamas naudojant nusistovintos sistemos tyrimą.



3.1.1 pav. Baigtiniais elementais suskaidytas modelis: 1 – ašiai simetrinė linija; 2 – išorinė siena; 3 – įtekantis srautas; 4 – ištekantis srautas

Atlikus analizę ir gavus rezultatus, pagrindinis ieškomas srauto greitis pateikiamas greičio pasiskirstymo paveiksle. Vėliau iš šių rezultatų gaunamas laminarinio srauto pasiskirstymo grafikas, kuris yra tipiškas šiam srauto tipui. Iš šio grafiko nesunkiai galima apskaičiuoti vidutinį srauto greitį. Šios simuliacijos rezultatai atskleidė, kad vidutinis skysčio, esančio porose, greitis lygus $6,2135 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. Atlikus skaičiavimus, gauti rezultatai yra artimi teoriniams skaičiavimams. Papildomai, naudojant šiuos skaičiavimus, suformuojami slėgio kitimo porose rezultatai, kurių analitiškai skaičiuojant suformuoti negalima. Laminarinio srauto skaičiavimo rezultatai pateikti 3.1.2 paveiksle.



3.1.2 pav. Laminarinio srauto skaičiavimų rezultatai

Taigi, šios membranos 1 m² debitas, esant 1 Pa slėgio skirtumui, skirtingose membranos pusėse yra 0,0117526 l / min. (Pastaba: šie skaičiavimai yra preliminarūs, todėl kiekvieną atvejį reikėtų analizuoti atskirai).

3.2. Akustinio slėgio skaitmeninė analizė

Dalelių valdymas naudojant akustinį slėgį yra plačiai naudojamas mikrohidraulinėse sistemose. Naudojant šį metodą galima sukurti slėgių skirtumus membranos centre ir dėl sukurto slėgio stebėti dalelių judėjimą. Tam tikslui reikia apskaičiuoti bangos ilgį, kuris tilptų membranos poros gabarituose. Bangos ilgis apskaičiuojamas pagal (14) formulę [69]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (14)$$

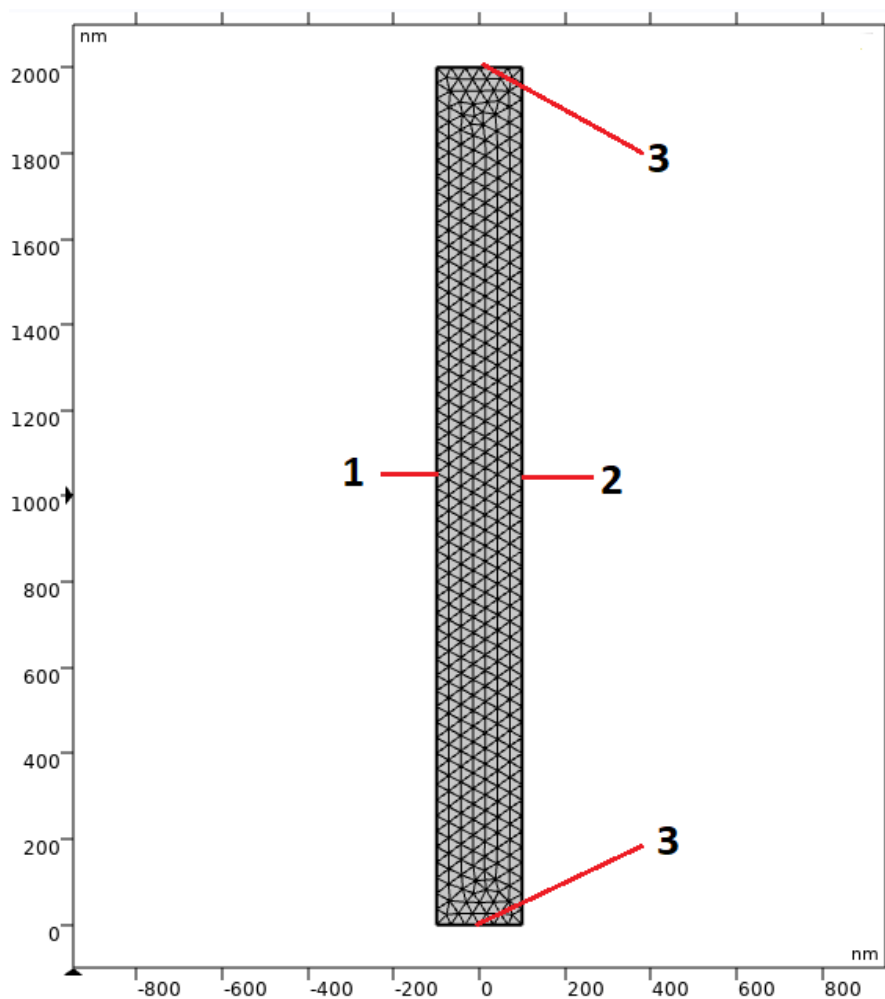
čia λ – bangos ilgis; v – bangos sklidimo greitis; f – bangos dažnis.

Šiuo atveju bangos ilgis turi būti mažesnis nei 200 nm, nes bangos ilgis turi tilpti poroje. Bangos sklidimo greitis vandenyje yra 1480 (m/s) [70]. Į formulę įstačius vertes gaunama, kad bangos dažnis yra lygus 7,4 GHz.

Kaip ir srauto skaitmeninėje analizėje, taip ir čia, apibūrinamas skaitmeninis poros modelis. Šį kartą modelis yra 2D. Šiuose skaičiavimuose yra naudojami du matematiniai modeliai: akustinio slėgio skaičiavimo ir dalelių srauto stebėjimo skystyje modelis. Analogiškai parenkami du skirtingi tyrimai: dažnio ir kintančio laike.

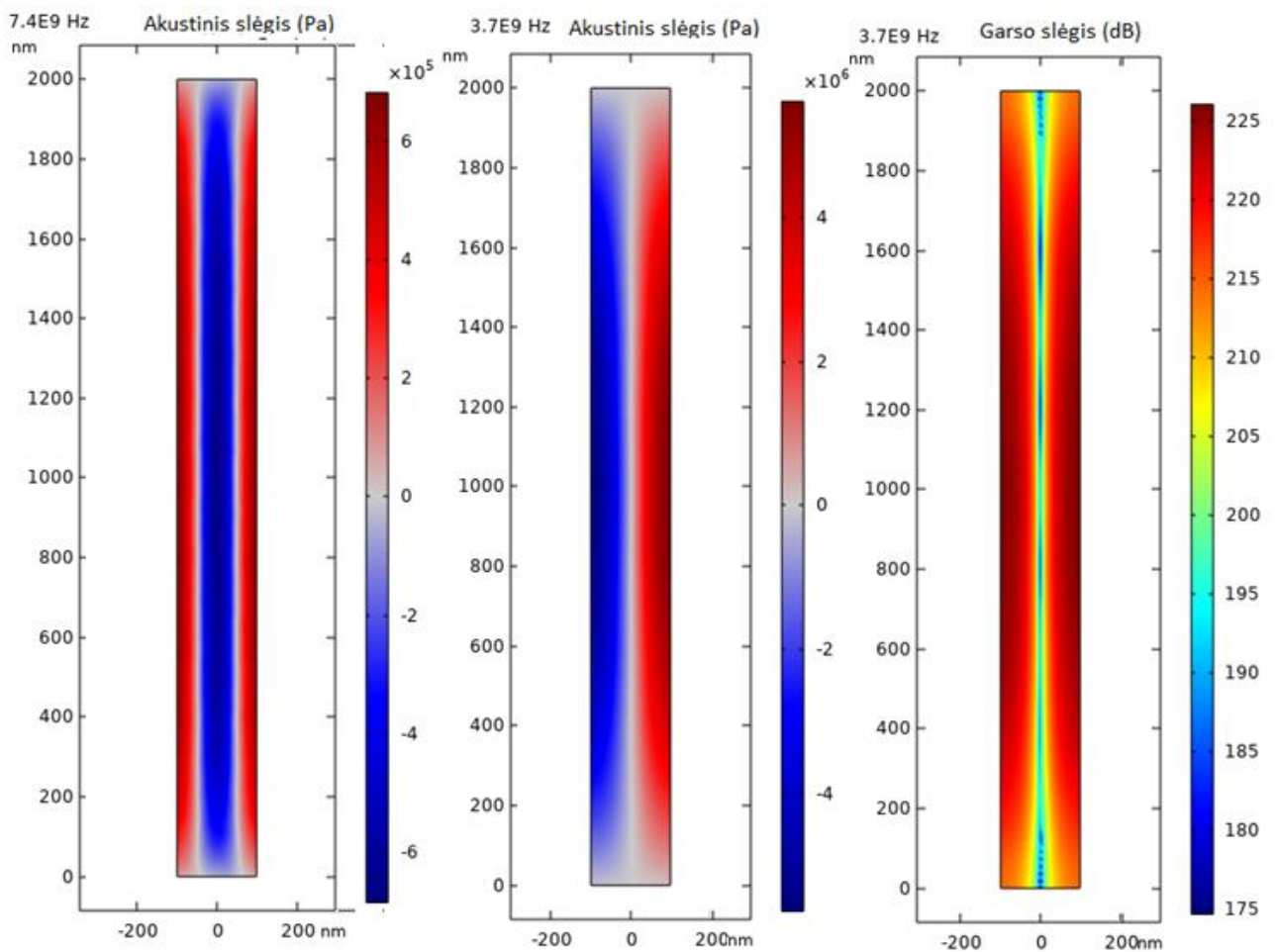
Pirmajame tyrime siekiama rasti slėgio pasiskirstymo vertes, kurios sukuria akustinį slėgį. Šis slėgio pasiskirstymas turi fokusuoti daleles centre tam, kad jos būtų apsaugotos nuo galimų deformacijų.

Tai gali įvykti padidinus slėgio skirtumus porose. Tai lemtų padidėjusį debitą ir tada didesne jėga bei greičiau būtų deformuojamos dalelės. Tai gali pakeisti ląstelės struktūrą ir atsirasti negrįžtami procesai. Tam tikslui apibrėžiamas matematinis modelis su parinktais geometriniais parametrais. Analogiškai atliktai analizei parenkama pagrindinė medžiaga (vanduo) su analogiškais parametrais. Apibrėžiamas visas domenas kaip sritis, kurioje vyks akustinio slėgio analizė. Suformuotas modelis suskaidomas baigtiniais elementų metodais. Šiam modeliui parenkami išorinių porų sienų parametrai ir jų modeliai. Apibrėžtą ir suskaidytą modelį galima matyti 3.2.1 paveiksle. Tyrime parenkamas analizės diapazonas nuo 1 GHz iki 7,4 GHz dažnio. Atlikus analizę gautos skirtingo slėgio zonos. Tyrimai parodė, kad dalelės fokusuojasi nulinio slėgio zonoje.



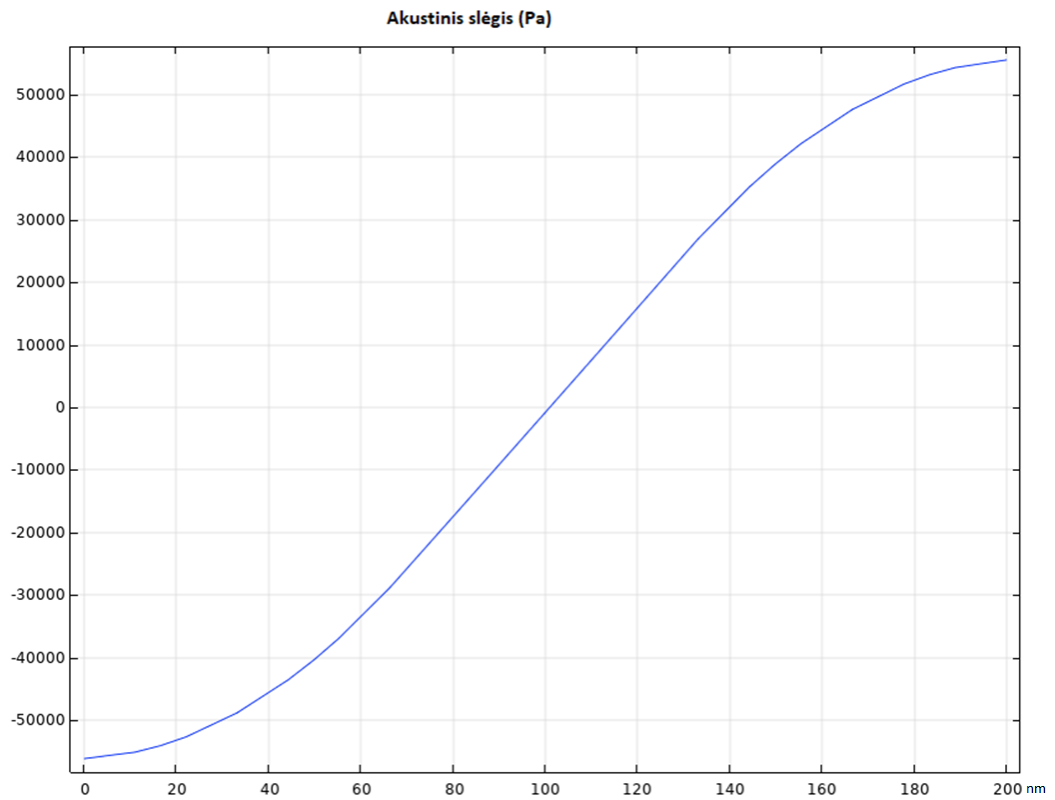
3.2.1 pav. Suskaidytas baigtiniais elementais akustinio slėgio modelis: 1 – kietas paviršius; 2 – vibruojantis paviršius; 3 – membranos poros galai

Atlikus analizę paaiškėjo, kad esant 7,4 GHz dažniui, membranos poroje formuojasi dvi zonos su nuliniams slėgiais. Tai galima paaiškinti akustinės bangos grafiku. Susvyravus pilnam bangos periodui bangos kreivė kerta pagrindinę ašį du kartus, ko pasekoje, ir susiformuoja dvi nulinės zonos. Norint daleles išlaikyti centre nulinė zona turi būti viena. Atlikus kompiuterinius skaičiavimus, pageidaujami rezultatai gauti su dvigubai mažesniu dažniu (3,7 GHz), kaip teoriškai ir buvo galima numatyti. Šiuose rezultatuose maksimalus akustinis slėgis yra lygus $5.5656 \cdot 10^6$ Pa. Taip pat pateikiamas garso slėgio paveikslas, kuriame akivaizdžiai matomas nulinėje zonoje slėgio sumažėjimas, kas lemia intensyvų dalelių judėjimą į centrą. Tarp garso slėgio maksimalios ir minimalios ribos skirtumas 50 (dB). Akustinio slėgio analizės rezultatai pateikti 3.2.2 paveiksle.

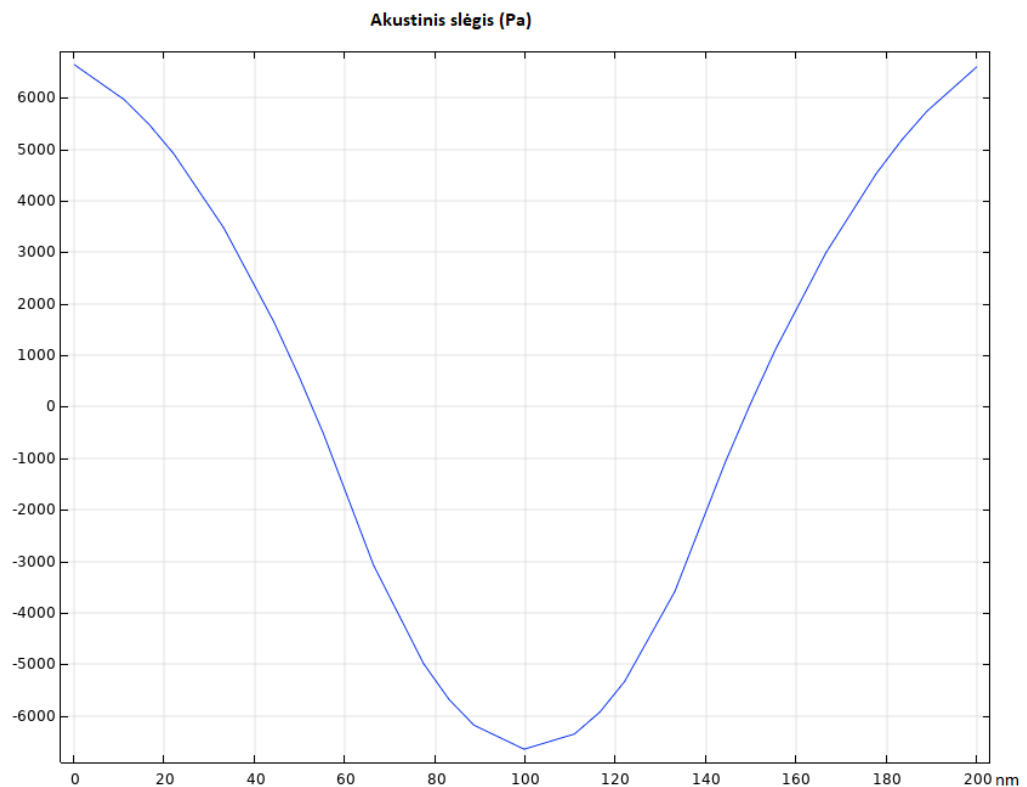


3.2.2 pav. Akustinio slėgio analizės rezultatai

Iš šių duomenų suformuojami du skirtingi grafikai, kurie atspindi slėgio kitimą poros skerspjūvyje, esant 3.7 GHz (žr. 3.2.3 pav.) ir 7.4 GHz (žr. 3.2.4 pav.) dažniams. Paveiksluose matyti kaip tolygiai kinta slėgis, o kreivė labai artima harmoniniam svyravimui.



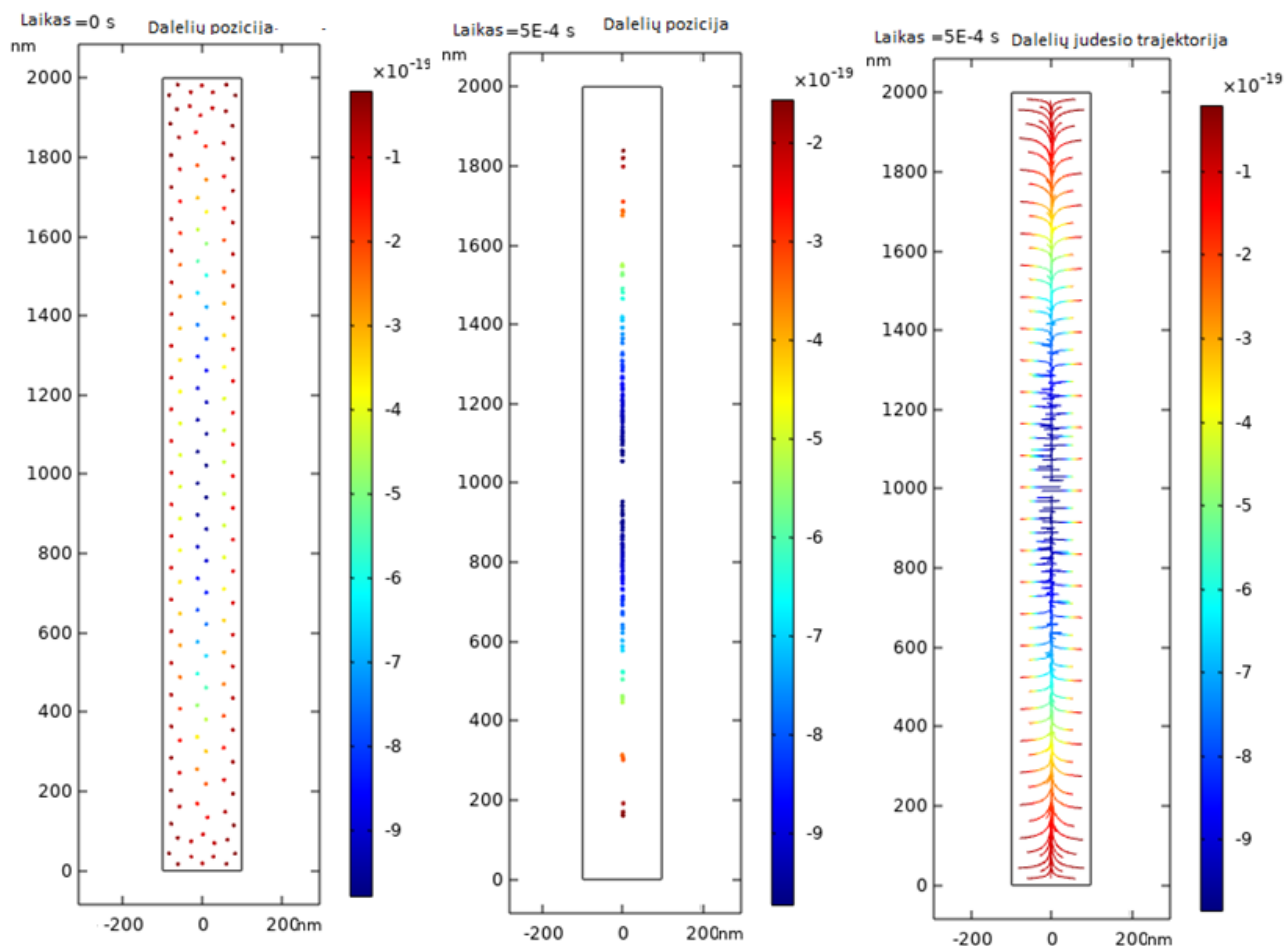
3.2.3 pav. Akustinis slėgis poros skerspjūvyje, esant 3,7 GHz dažniui



3.2.4 pav. Akustinis slėgis poros skerspjūvyje, esant 7,4 GHz dažniui

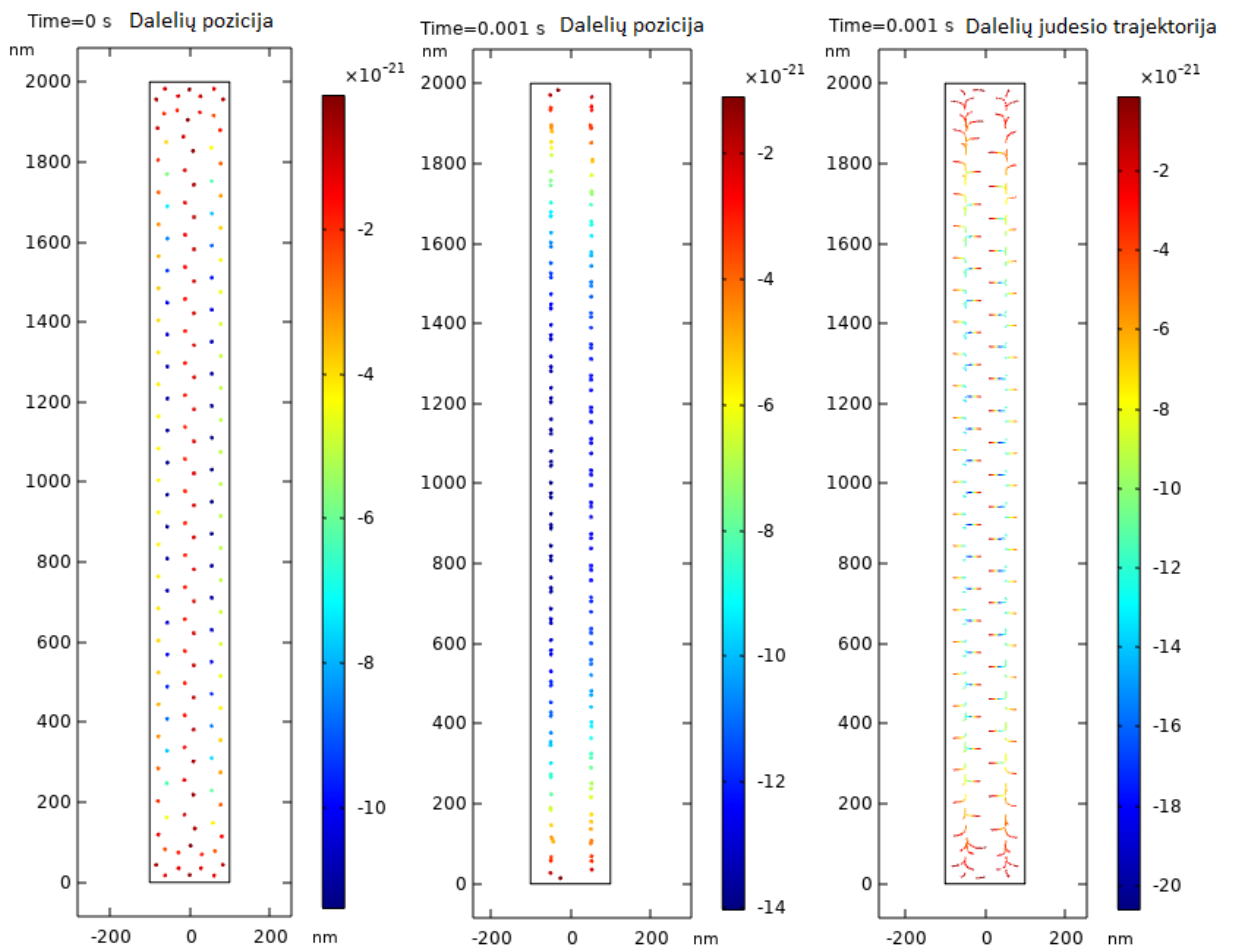
Tolesnėje analizėje naudojama dalis gautų rezultatų, esant 3,7 GHz ir 7,4 GHz dažniams. Aprašant antrąjį analizės tyrimą naudojamas tokių pat matmenų ir suskaidymo modelis kaip ir pirmajame. Į šį tyrimą įtraukiamas dalelių judėjimą skystyje aprašantis ir sprendžiantis modelis. Šioje analizėje

dalelės dešimt kartų mažesnės už analizuojamą porą. Dalelių tankis pasirinktas 5000 kg/m^3 . Analizės metu palaikoma pastovi $20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūra. Prie šio modelio taip pat pridedama sunkio jėga, kuri gali paveikti daleles ir rezultatus. Kadangi šio modelio analizė atliekama besikeičiant laikui, analizės diapazonas nurodomas nuo 0 iki 0.0005 sekundės, esant 0.000001 sekundės žingsniui. Atlikus analizę, gauti dalelių judėjimo rezultatai pateikti 3.2.5 paveiksle.



3.2.5 pav. Dalelių judėjimo analizės rezultatai, esant 3,7 GHz dažniui

Matyti, kad dalelės koncentruojasi centre ir šis koncentravimosi procesas vyksta labai intensyviai. 3.2.6 paveiksle, esant 3.7 GHz dažniui, galima matyti dvi koncentravimosi zonas. Abiejuose paveiksluose galima matyti pradinį ir paskutinį analizės ciklą. Taip pat akivaizdžiai matoma, kad dalelės koncentruojasi dėl akustinio slėgio įtakos.



3.2.6 pav. Dalelių judėjimo analizės rezultatai, esant 7,4 GHz dažniui

Atlikus laminarinio srauto ir dalelių judėjimo panaudojus akustinį slėgį analizes, gauti rezultatai sujungiami į vieną bendrą modelį. Šis modelis vaizduos dalelių judėjimą membranos poroje panaudojus srautą ir akustinį slėgį vienu metu. Parametrai ir modelis lieka analogiškas akustinio slėgio metu atliktam tyrimui, tačiau į šią analizę papildomai įtrauktas skysčio srautas iš pirmos analizės ($6,2135 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$). Atlikus šią analizę ir gavus rezultatus nebuvo pastebėtas joks dalelių pozicijos pokytis. Sukurtam laminariniam srautui nepavyksta nugalėti stipresnės akustinio slėgio sukurtos jėgos, todėl ateities tyrimuose akustinį slėgį galima naudoti tik periodiškam dalelių fokusavimui poros centre.

4. Rezultatų apibendrinimas

Šio darbo tikslas – pagaminti aliuminio oksido membraną, todėl šiam tikslui buvo atliekami aušinimo sistemos projektavimo ir testavimo procesai. Parinktas stiklinis reakcijos indas. Šis indas puikiai tinka vykdyti reakcijas, nes stiklas nedalyvauja cheminėse reakcijose, tačiau yra ir trūkumų – jis nėra toks geras šilumos laidininkas kaip metalai. Ateityje būtų galima surasti ar pagaminti nerūdijančio plieno indą, kuris taip pat kaip ir stiklas nedalyvautų reakcijoje, tačiau būtų geras šilumos laidininkas. Aprašytas ir nubraižytas teorinis gamybos stendas su temperatūros valdymo sistema. Ateityje dėl geresnio aušinimo ir temperatūros palaikymo būtų galima izoliuoti sistemą šilumai nelaidžiomis medžiagomis. Matematiniai skaičiavimai parodė, kad reikės 237,37 W galingumo Peltier elementų sistemai aušinti. Tokiai mažai sistemai tai yra labai daug. Jeigu būtų poreikis šį procesą pritaikyti masinei gamybai – reikėtų keisti aušinimo sistemą. Taip pat, jeigu reikėtų sistemą ataušinti iki dar žemesnių temperatūrų dabartinis įrenginys to nepajėgtų atlikti, todėl ši sistema turi apribojimą. Jeigu atsirastų poreikis, galima pagamintą aušinimo sistemą naudoti ir kitose mokslinės veiklos srityse. Panaudojus gautą įrenginį ir pritaikius aprašytą gamybos procesą buvo pagaminta aliuminio oksido membrana. Nustatyta, kad gautos membranos poros skersmuo yra apie 200 nm. Gautas skersmuo yra tam tikros lokaliaios vietos parametras ir gali kisti ištyrus membraną išsamiau, o tai gali lemti netikslumus tolesniuose tyrimuose, todėl tai yra sąlyga, kurią būtina įvertinti. Su pagaminta membrana galima filtruoti makromolekules ar gaminti nanovamzdelius. Ateities perspektyvoje reikėtų rasti porų skersmens priklausomybę nuo įtampos ar srovės. Radus šią priklausomybę būtų lengviau prognozuoti tyrimo rezultatus. Dar vėlesniuose tyrimuose būtų galima pritaikyti gautą metodiką kitoms medžiagoms ir mėginti gauti ne tik aliuminio oksido membraną, bet ir kitokių oksidų membranas.

Teorinė apžvalga ir matematinis modelis atskleidė, kad aliuminio membranose vyrauja laminarinis tekėjimas. Šioje membranoje yra labai didelis porų kiekis, kurio tiksliai išmatuoti neįmanoma. Atliktas membranos poros laminarinio srauto modeliavimas taip pat parodė, kaip kanale kinta slėgis. Ateityje gautus rezultatus reikėtų palyginti su eksperimentinėmis vertėmis. Šiam tikslui reikėtų papildomos įrangos. Gauti rezultatai gali prisidėti kuriant filtrų charakteristikas.

Atlikus akustinio slėgio skaitmeninę analizę ir gavus rezultatus paaiškėjo, kad geriausias ir intensyviausias dalelių judėjimas vyksta, esant 3.7 GHz dažniui. Pastebėta, kad esant dvigubai didesniai dažniui, dalelės fokusuojasi dviejose zonose. Tai įgalina atlikti dar platesnius tyrimus. Esant dalelių fokusavimuisi, laminarinis srautas nebepajėgia nugalėti akustinio slėgio sukurtų jėgų ir nenustumia dalelių srovės kryptimi. Dėl šios priežasties, norint transportuoti sufokusuotas daleles, reikės akustinį slėgį naudoti cikliška. Toks sprendimas tyrėjus įgalins saugiai transportuoti daleles membranos pora.

Toliau pateikiamos tolesnės tyrimo kryptys ir perspektyvos:

- galima praplėsti tyrimą naudojant kitas chemines medžiagas ar stebėti kaip reakcija reaguoja į vieną ar kitą parametro pokytį. Toks tyrimo praplėtimas leistų sukurti dar kokybiškesnes membranas ir jas plačiau panaudoti;
- atsižvelgiant į energijos suvartojimą, šaldymo proceso metu galima pakeisti Peltier elementą į ekonomišką alternatyvą;
- tikslinga atlikti tyrimą ir nustatyti reakcijos temperatūros įtaką membranos struktūrai.

Išvados

1. Atlikus mikrohidraulikos įrenginių, jų valdymo ir gamybos metodų apžvalgą, identifikuoti trys pagrindiniai mikrohidraulikos skysčio srauto valdymo galimi metodai: naudojant hidrostatinį slėgio skirtumą, siurblių arba infuzinių siurblių. Taikant šiuos metodus galima skystį transportuoti per aliuminio oksido membraną. Išanalizavus aliuminio oksido nanomembranos gamybą, nustatyta, kad sėkmingai gamybai reikalinga tinkamai paruošti ruošinį – gryno aliuminio metalo plokštelė turi būti tinkamai paruošta atliekant cheminį valymą, atkaitinimą ir poliravimą. Norint sėkmingai gauti porėtą membraną, atliekama anodacija ir cheminis valymas. Remiantis mokslinės literatūros analize sudarytas aliuminio oksido membranos gamybos stendas.
2. Remiantis sudaryta aliuminio oksido nanomembranos stendo gamybos principine schema, surinktas ir ištestuotas eksperimentinis gamybos stendas, kurio pagrindinė paskirtis – aušinti anodacijos reakciją. Stendas sudarytas iš šių dalių: stiklinio indo, termoelektrinio modulio (Peltier), aušintuvo, valdymo įrenginio, elektrinio termometro ir maitinimo bloko. Stendui testuoti atlikta skaitmeninė analizė, kuri parodė šilumos sklaidą inde ir temperatūros kitimą laike. Eksperimentiškai nustatyta, kad pagamintas aliuminio oksido gamybos stendas, esant nustatytai penkių laipsnių pagal Celsijų temperatūrai, per dešimt minučių penkis šimtus mililitrų dvidešimties laipsnių pagal Celsijų skystį ataušina iki penkių laipsnių pagal Celsijų. Kai skysčio temperatūra – penkių laipsnių pagal Celsijų, dėl naudojamo temperatūros valdymo įrenginio, automatiškai palaikoma nustatyta temperatūra pusantro laipsnio diapazone.
3. Naudojant anodacijos procesą pagamintos pirmosios aliuminio oksido nanomembranos. Norint patikrinti aliuminio oksido struktūrinį vientisumą atliktas tyrimas su energiniu dispersiniu spektrometru ir nustatyta, kad pagamintą aliuminio oksido nanomembraną sudaro aliuminis ir deguonis. Naudojant elektrinį skenuojantį mikroskopą ištirtą nanomembranos paviršiaus morfologija. Nustatytas vidutinis aliuminio oksido nanomembranos porų skersmuo, kuris vidutiniškai yra du šimtai nanometrų. Atstumas tarp porų centrų vidutiniškai – du šimtai penkiasdešimt nanometrų.
4. Kadangi mikrohidraulikos įrenginiai naudojami mikrodalelių filtravime, ištirta akustinio slėgio įtaka mikrodalelių pasiskirstyme ir jų dinamikoje. Atlikus laminarinio srauto tekėjimo modeliavimą, rezultatai parodė, kad membranos debitas viename kvadratiniam metre, esant vienam Paskalio slėgio skirtumui, skirtingose membranos pusėse yra 0,0117526 l / min. Toks membranos debitas yra optimalus, todėl pagamintą oksido membraną galima taikyti mikrohidraulikos sistemose. Nustatyta, kad, esant 3.7 GHz dažniui, mikrodalelės fokusuojasi poros centre, o tai leidžia pašalinti dalelių kontaktą su poros vidinėmis sienelėmis. Pastebėta, kad esant dvigubai didesniai dažniui poroje susiformuoja dvi centravimosi zonos.

Literatūra

1. KEES, Eijkel. Commercial importance of a unit cell: nanolithographic patenting trends for microsystems, microfabrication, and nanotechnology. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* [interaktyvus]. 2006, **5**(1), 1-6 [žiūrėta 2020-03-05]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/1.2183318>
2. TLILI, I., TIMOUMI, Y. & B. S. NASRALLAH. Thermodynamic analysis of Stirling heat engine with regenerative losses and internal irreversibilities. *Int. J. Engine Res.* [interaktyvus]. 2007, **9**, 45–56 [žiūrėta 2020-03-05]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1243/14680874JER01707>
3. TIMOUMI, Y., TLILI, I. & B. S. NASRALLAH. Performance optimization of Stirling engines. *Renewable Energy* [interaktyvus]. 2008, **33**, 2134–2144 [žiūrėta 2020-03-05]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.012>
4. HAMMARSTROM, B., T. LAURELL & J. NILSSON. Seed particle – enabled acoustic trapping of bacteria and nanoparticles in continuous flow systems. *Lab on a Chip* [interaktyvus]. 2012, **12**, 4296–4304 [žiūrėta 2020-02-24]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/C2LC40697G>
5. HAMMARSTROM, B., B. NILSON, T. LAURELL, J. NILSSON & S. EKSTROM. Acoustic trapping for bacteria identification in positive blood cultures with MALDI-TOF mS. *Anal. Chem.* [interaktyvus]. 2014, **86**, 10560–10567 [žiūrėta 2020-02-24]. Prieiga per: doi: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac502020f>
6. WIKLUND, M., R. GREEN & M. OHLIN. Acoustofluidics 14: applications of acoustic streaming in microfluidic devices. *Lab. Chip.* [interaktyvus]. 2012, **12**, 2438–2451 [žiūrėta 2020-02-24]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/c2lc40203c>
7. HAHN, P. *Numerical Simulation Tools for the Design and the Analysis of Acoustofluidic Devices: doctoral Thesis* [interaktyvus]. ETH Zurich, 2015 [žiūrėta 2020-02-24]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010606727>
8. PRAKASH Shaurya ir Junghoon YEOM. *Nanofluidics and Microfluidics – Systems and Applications*. New York: William Andrew, 2014. ISBN 9781437744705.
9. PATRICK Abgrall and Nguyen NAM-TRUNG. *Nanofluidics*. Boston: Artech house. ISBN-13: 978-1-59693-350-7.
10. KWON, S. K. et al. Sensing cyanide ion via fluorescent change and its application to the microfluidic system. *Tetrahedron Letters* [interaktyvus]. 2008, **49**(26), 4102–4105 [žiūrėta 2020-03-07]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2008.04.139>
11. DUAN, C., KARNIK, R., LU, M. C. ir A. MAJUMDAR. Evaporation-induced cavitation in nanofluidic channels. *PNAS* [interaktyvus]. 2012, **109**(10), 3688-3693. [žiūrėta 2020-03-07]. Prieiga per: doi: <https://www.pnas.org/content/109/10/3688>
12. LRTB Lietuvos Respublikos terminų bankas [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: <http://terminai.vlkk.lt/paieska?search=Hidrostatinis+sl%C4%97gis&limit=15>
13. JHOAN, M.C. ir kt. Visualization of two-phase gas-liquid flow in a radial centrifugal pump with a vaned diffuser. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [interaktyvus]. 2020, **187**, 106848 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106848>
14. CHEN, M. C. ir kt. Three-dimensional Printing of Thermoplastic Materials to Create Automated Syringe Pumps with Feedback Control for Microfluidic Applications. *J Vis Exp* [interaktyvus]. 2018, **138**, 57532 [žiūrėta 2020-03-29]. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3791/57532>

15. Microfluidic reviews [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://www.elveflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/introduction-to-lab-on-a-chip-2015-review-history-and-future/>
16. SIA, S. K., & G. M. WHITESIDES. Microfluidic devices fabricated in poly (dimethylsiloxane) for biological studies. *Electrophoresis* [interaktyvus]. 2003, **24**(21), 3563–76 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1002/elps.200305584>
17. DITTRICH, P. S. & MANZ, A. Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery. *Nature Reviews Drug Discovery* [interaktyvus]. 2006, **5**(3), 210–218 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/nrd1985>
18. WANG, H. & Z.Q. ZOU. Self-organized growth of Mn nanocluster arrays on Si (111)-n (7 × 7) surfaces. *Appl. Phys. Lett.* [interaktyvus]. 2006, **88**, 103-115 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1063/1.2184809>
19. DRAK, M. & L.A. DOBRZAŃSKI. Corrosion of Nd-Fe-B permanent magnets. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [interaktyvus]. 2007, **20**, 239-242 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol20/1369S.pdf
20. ASAI, Tatsuuro et al. Switching Reaction Pathways of Benzo b thiophen-3-yl lithium and Benzo b furan-3-yl lithium Based on High-resolution Residence-time and Temperature Control in a Flow Microreactor. *Chem. Lett.* [interaktyvus]. 2011, **40**(4) 393–395 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1246/cl.2011.393>
21. UGAZ, V. M. & J. L. CHRISTENSEN. Electrophoresis in Microfluidic Systems. *Microfluidic technologies for miniaturized analysis systems* [interaktyvus]. 2007, 393-438, [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-68424-6_10
22. CASQUILLAS, G. V., BERRE, M. L., PIEL, M. & P. T. TRAN. Microfluidic tools for cell biological research. *Nanotoday* [interaktyvus]. 2010, **5**(1), 28-47 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2009.12.001>
23. SHEMESH, J., BRANSKY, A, KHOURY, M. & S. LEVENBERG. Advanced microfluidic droplet manipulation based on piezoelectric actuation. *Biomedical Microdevices* [interaktyvus]. 2010, **12**, 907-914 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1007/s10544-010-9445-y>
24. BAHRAMI, M., YOVANOVICH, M. M. & J. R. CULHAM. Pressure Drop of Fully-Developed, Laminar Flow in Microchannels of Arbitrary Cross-Section. *Journal of Fluids Engineering* [interaktyvus]. 2006, **128**(5), 1036-1044 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1115/1.2234786>
25. YAN, R. P, YANG, Y. R., TU, X. & C. L. SONG. Transformation optofluidics: control of light propagation in a chip. *Seventh International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2019)* [interaktyvus]. 2019, 11205 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1117/12.2541992>
26. GUDI KSEN, M. S., LAUHON, L. J., WANG, J., SMITH, D. C. & C. M. LIEBER. Growth of nanowire superlattice structures for nanoscale photonics and electronics. *Nature* [interaktyvus]. 2002, **415**, 617-620 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/415617a>
27. XU, C. L., LI, H., ZHAO, G. Y. & H. L. LI. Electrodeposition and magnetic properties of Ni nanowire arrays on anodic aluminum oxide/Ti/Si substrate. *Applied Surface Science* [interaktyvus]. 2006, **253**(3), 139-1403 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.02.056>

28. BRIAN, J. Kirby. *Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics– Transport in Microfluidic Devices*. New York: Cornell University, 2010. ISBN: 9780521119030.
29. GAO, Y. et al. Acoustic bubble-based bidirectional micropump. *Microfluidics and Nanofluidics* [interaktyvus]. 2020, **24**(4), 1-10 [žiūrėta 2020-04-19]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1007/s10404-020-02334-6>
30. TANG, S. Q. et al. Novel multi-way microvalve with ease of fabrication and integration for microfluidics application. *Sensors and Actuators B: Chemical* [interaktyvu]. 2019, **286**, 289-300 [žiūrėta 2020-04-19]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.10.118>
31. AYOIB, A. et al. Low Cost Design and Fabrication of PDMS Microfluidics Micromixers for DNA Extraction. 2017 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM) [interaktyvus]. 2017, 227-230 [žiūrėta 2020-04-19]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1109/RSM.2017.8069158>
32. MAJEED, B. et al. Silicon Microfilter Device Fabrication and Characterization for Diverse Microfluidics Applications. 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC) [interaktyvus]. 2011, 1834-1838 [žiūrėta 2020-04-19]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2011.5898764>
33. LRTB Lietuvos Respublikos terminų bankas [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: <http://terminai.vlkk.lt/paieska?search=membrana&limit=100>
34. KUMAR, S. Challa. *Microfluidic Devices in Nanotechnology: Fundamental Concepts*. 2010. ISBN: 9780470472279.
35. AZONANO: Engineering of Nanomembranes for Emerging Applications [interaktyvus]. 2009 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2445>
36. BAHRAMI, M., YOVANOVICH, M. M. & J. R. CULHAM. Pressure Drop of Fully-Developed, Laminar Flow in Microchannels of Arbitrary Cross-Section. *Journal of Fluids Engineering* [interaktyvus]. 2006, **128**(5), 1036-1044 [žiūrėta 2020-04-20]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1115/1.2234786>
37. WIELAGE, B., ALISCH, G., LAMPKE, TH. & D. NICKEL. Anodizing – a key for surface treatment of aluminium. *Key Engineering Materials* [interaktyvus]. 2008, **384**, 263-281 [žiūrėta 2020-03-25]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.384.263>
38. WU, X. J. et al. Electrochemical synthesis and applications of oriented and hierarchically quasi-1D semiconducting nanostructures. *Coordination Chemistry Reviews* [interaktyvus]. 2010, **254**, 1135-1150 [žiūrėta 2020-03-25]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.02.014>
39. THOMPSON, G. E. Surface characteristics of aluminium and aluminium alloys [interaktyvus]. 1994 [žiūrėta 2020-02-20]. Prieiga per: <https://www.slideshare.net/corematerials/talat-lecture-5101-surface-characteristics-of-aluminium-and-aluminium-alloys>
40. MANKOTIA, D. Review of Anodic Porous Alumina Membrane Development. *SSRG International Journal of Humanities and Social Science*. 2015. ISSN: 2394 – 2703.
41. ZAPOLSKIS, P. Elektroninio termostato, skirto plonųjų manganitų sluoksnių savybių tyrimams magnetiniame lauke kūrimas, panaudojant peltje elementą [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1855275/1855275.pdf>
42. EASTMAN, J. A., CHOI, U. S., LI, S. & L. J. THOMPSON. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *Symposium V – Nanophase and Nanocomposite Materials II* [interaktyvus]. 1996, **457** [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1557/PROC-457-3>

43. WASAN, D. T. & A. D. NIKOLOV. Spreading of nanofluids on solids. *Nature* [interaktyvus]. 2003, **423**, 156–159 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1038/nature01591>
44. ZHANG, L. et al. Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). *Journal of Nanoparticle Research* [interaktyvus]. 2007, **9**, 479–489 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-006-9150-1>
45. BOUTIN, P. et al. Alumina-on-Alumina Total Hip Arthroplasty: A Minimum 18.5-Year Follow-up Study. *The Journal of Bone and Joint Surgery* [interaktyvus]. 2002, **84**, 69-77 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/11565504_Alumina-on-Alumina_Total_Hip_Arthroplasty_A_Minimum_185-Year_Follow-up_Study
46. KARLSON, M. Nano-Porous Alumina, a Potential Bone Implant Coating. Uppsala: Uppsala University, 2004. ISBN 91-554-6007-0.
47. GORKIN, R. et al. Centrifugal microfluidics for biomedical applications. *Lab Chip* [interaktyvus]. 2010, **10**(14), 1758–1773 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/B924109D>
48. Micro 12™ - High Speed Microcentrifuge [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: <https://www.ekfdiagnostics.com/micro-12.html>
49. Filtration [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-11] Prieiga per: <https://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/6937>
50. MOISEYENKO, R. P. & H. Bruus. Whole-System Ultrasound Resonances as the Basis for Acoustophoresis in All-Polymer Microfluidic Devices. *Phys. Rev. Applied* [interaktyvus]. 2019, **11** [žiūrėta 2020-03-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014014>
51. WU, J. Acoustic Streaming and Its Applications. *Fluids* [interaktyvus]. 2018, **3**(4), 108 [žiūrėta 2020-03-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.3390/fluids3040108>
52. DUAL, J & D. MOLLER. Acoustofluidics 4: Piezoelectricity and application in the excitation of acoustic fields for ultrasonic particle manipulation. *Lab Chip* [interaktyvus]. 2012, **12**(3), 506–514 [žiūrėta 2020-03-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/C1LC20913B>
53. CHOI, Y. M. ir kt. Performance Improvement of Ring-Type PZT Ceramics for Ultrasonic Dispersion System. *Micromachines* [interaktyvus]. 2020, **11**(2), 144 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.3390/mi11020144>
54. WIKLUND, M. Acoustofluidics 12: Biocompatibility and cell viability in microfluidic acoustic resonators. *Lab Chip* [interaktyvus]. 2012, **12**(11), 2018–2028 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/c2lc40201g>
55. DUAL, J. & T. SCHWARZ. Acoustofluidics 3: Continuum mechanics for ultrasonic particle manipulation. *Lab Chip* [interaktyvus]. 2012, **12**(2), 244–252 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/C1LC20837C>
56. HAHN, P., SCHWAB, O. & J. DUAL. Modeling and optimization of acoustofluidic micro-devices. *Lab Chip* [interaktyvus]. 2014, **14**(20), 3937–3948 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1039/c4lc00714j>
57. Acoustic Streaming in a Microchannel Cross Section [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://www.comsol.com/model/acoustic-streaming-in-a-microchannel-cross-section-17087>
58. PHILIPP, H. Numerical Simulation Tools for the Design and the Analysis of Acoustofluidic Devices [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/108717>

59. ПЕТУХОВ, Д. И., Создание мембранных материалов на основе анодного оксида алюминия. [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: http://www.nanometer.ru/2009/11/29/12595213427068/PROP_FILE_files_12/%CF_1.1.5_%D1%EF%E5%F6%EF%F0%E0%EA_%E7%E0%E4%E0%F7%E0-12.pdf
60. RAMANAUSKAS, J., BLIUDŽIUS, R. IR V. STANKEVIČIUS. Langų šiluminės savybės: Monografija. 2005. ISBN 9955-09-983-6.
61. Šilumos mainai: Šilumos sklidimo būdai [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: <https://remontogidas.lt/images/siluma-garsas/Silumos%20mainai.%20Laidumas.%20Konvekciija.%20Spinduliavimas.%20www.remontogidas.lt.pdf>
62. ENESCU, D. & E. O. VIRJOGHE. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews [interaktyvus], 2014, **38**, 903-916 [žiūrėta 2020-03-07]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114004973?via%3Dihub>
63. NORDLUND, T. M. & HOFFMANN, P. M. Quantitative Understanding of Biosystems: An Introduction to Biophysics: Second Edition. Boca Raton: CRC Press. ISBN-10: 1138633410.
64. DS18B20 Digital Thermometer [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
65. STAPONKUS, V. Hidraulika. Kaunas: Technologija. 2001. ISBN 9986-13-944-9.
66. Skysčio dinaminės klampos matavimas puazeilio metodu [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per: http://asu.lt/wp-content/uploads/2015/01/2_skysciu_dinamines_klampos_matavimas_puazeilio_metodu_2013_09_18.pdf
67. Skysčių klampumo koeficientai [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per: <https://www.de2.lt/naudinga-informacija/lentel%C4%97s/1660-skys%C4%8Di%C5%B3-klampumo-koeficientai>
68. FISCH, M. R., PRIMAK, A. & S. KUMAR. X-ray diffraction study of Anodisc filters. Physical Review E [interaktyvus]. 2001, **65**, 046615 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.046615>
69. Navickas, J. Fizika 2 dalis: Mokojoji knyga. Kaunas: Ardiva, 2008. ISBN 978-9955-896-46-3.
70. JOSEPH, R. L. Ultrasonic Waves in Solid Media. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0521548896.

Priedai

1 priedas. Programinis valdymo sistemos kodas

```
#include "max6675.h"
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
int soPin = 4;// SO=Serial Out
int csPin = 5;// CS = chip select CS pin
int sckPin = 6;// SCK = Serial Clock pin
int pinOut = 7;
const int buttonPin = 9;
const int minbuttonPin = 10;
int buttonState = 0;
int minbuttonState = 0;
double Temp=150;
double Tem=40;
double K=1;
double Time=1;
double Timev=1;

MAX6675 robojax(sckPin, csPin, soPin);

void setup() {

  Serial.begin(9600);// initialize serial monitor with 9600 baud
  Serial.println("Robojax MAX6675");
  lcd.begin(16, 2);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(buttonPin, INPUT);
  pinMode(minbuttonPin, INPUT);
}
void loop() {
  buttonState = digitalRead(buttonPin);
  minbuttonState = digitalRead(minbuttonPin);
  lcd.clear();
  lcd.print("Mat. C = ");
  lcd.print(robojax.readCelsius());
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Nus. C = ");
  lcd.print(Temp);
  if (buttonState == HIGH){
    Temp = Temp +2.5;
    delay(200);}
  if (minbuttonState == HIGH){
```

```
Temp = Temp -2.5;
delay(200);}
else {
; }
if (robojax.readCelsius() < 15){
  delay(1000);
  digitalWrite(pinOut, LOW);}
else {
Serial.println(robojax.readCelsius());
K = -0.05 + Temp / robojax.readCelsius();
Time = 1500 * K * K * K * K;
Timev = 3300 / K / K / K / K;
Serial.println(Time);
digitalWrite(pinOut, LOW);
delay(Time);
digitalWrite(pinOut, HIGH);
delay(Timev);
}
}
```