



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Pjezoelektrinių membranų, skirtų srautų valdymo sistemoms, kūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Karolina Stankevičiūtė**

Projekto autorė

**Doc. Rūta Rimašauskienė**

Vadovė

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Pjezoelektrinių membranų, skirtų srautų valdymo sistemoms, kūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Gamybos inžinerija (6211EX015)

---

**Karolina Stankevičiūtė**  
Projekto autorė

**Doc. Rūta Rimašauskienė**  
Vadovė

**Lekt. Darius Eidukynas**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Karolina Stankevičiūtė

## **Pjezoelektrinių membranų, skirtų srautų valdymo sistemoms, kūrimas ir tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Karolinos Stankevičiūtės, baigiamasis projektas tema „Pjezoelektrinių membranų, skirtų srautų valdymo sistemoms, kūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)



## Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

### 1.1. Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei) – Karolinai Stankevičiūtei

#### 1. Projekto tema –

Pjezoelektrinių membranų, skirtų srautų valdymo sistemoms, kūrimas ir tyrimas

*(Lietuviškai)*

Development and research of piezoelectric membranes dedicated to flow control systems

*(English)*

#### 2. Projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas. Sukurti ir iširti membranas spausdintas iš skirtingų medžiagų ir surasti tinkamiausią medžiagą, kuri leistų sukurti didžiausią poslinkį pirmame rezonansiniame dažnyje.

Uždaviniai:

1. Sukurti membranas, spausdintas 3D spausdintuvu iš PLA, PC, ABS ir nailono.
2. Palyginti membranų, spausdintų iš skirtingų medžiagų, sukuriamus poslinkius pirmame rezonansiniame dažnyje.
3. Iširti, ar spausdinimo kryptis turi įtakos membranų poslinkiams pirmame rezonansiniame dažnyje.
4. Palyginti spausdintos pjezoelektrinės membranos ir rinkoje esančio pjezoelektrinio vykdiklio kainas.

#### 3. Pradiniai projekto duomenys –

Netaikoma

#### 4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

3D spausdintuvas, programinis signalų generatorius (TT TGA4121), Polytec lazerinis vibrometras.

Projekto autorė

Karolina Stankevičiūtė

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Vadovė

doc. Rūta Rimašauskienė

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Krypties studijų  
programų vadovė

doc. Regita Bendikienė

*(Vardas, Pavardė)*

*(parašas)*

*(data)*

Karolina Stankevičiūtė. Pjezoelektrinių membranų, skirtų srautų valdymo sistemoms, kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas vadovė doc. Rūta Rimašauskienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Gamybos inžinerija (E10), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: pjezoelektrikai, membranos, oro srovės generatoriai.

Kaunas, 2020. 51 p.

## **Santrauka**

Šio tyrimo tikslas sukurti membranas iš skirtingų medžiagų, surasti tinkamiausią medžiagą, kuri leistų sukurti didžiausią poslinkį pirmame rezonansiniame dažnyje. Šiame darbe ištirtos skirtingos pjezoelektrinės membranos, skirtos oro srovės generatoriams. Membranos spausdintos 3D spausdintuvu, naudojantis lydzios masės formavimo technologija. Tyrimui atspausdintos aštuonios membranos iš termoplastikų, pasirenkant 45° ir 90° spausdinimo kryptis. Membranoms spausdinti naudotos medžiagos: polilaktidas (PLA), akrilnitrilo, stireno ir polibutadieno kopolimeras (ABS), polikarbonatas (PC) ir nailonas. Papildomai palyginimui atspausdinta kompozitinė membrana iš polilaktido (PLA) ir anglies pluošto. Membranos veiktos 5 V ir 10 V įtampomis ir stebėti poslinkiai pirmame rezonansiniame dažnyje. Poslinkiams matuoti naudotas Polytec lazerinis vibrometras. Didžiausią poslinkį pirmame rezonansiniame dažnyje pasiekė iš polilaktido (PLA) spausdinta membrana. 45° spausdinimo kampu spausdinta membrana, veikiamą 5 V įtampa pasiekė net 112,4 nm poslinkį, o veikiamą 10 V įtampa net 214,1 nm, tuo tarpu kitų membranų poslinkiai buvo mažesni. Vertinant spausdinimo krypties įtaką, viena kryptimi spausdintų membranų poslinkių diapazonas buvo nuo 14,4 nm iki 77,4 nm, o kryžiuotai spausdintų – 12,2 nm iki 101,1 nm, veikiant 5 V įtampa. Viena kryptimi spausdintų membranų poslinkių diapazonas svyravo nuo 52,2 nm iki 62,8 nm ir kryžiuotoms – nuo 50,1 nm iki 214,1 nm, veikiant membranas 10 V įtampa. Visais atvejais, išskyrus polikarbonato membranas veikiamas 5 V įtampa, kryžiuotų membranų poslinkiai buvo didesni.

Stankevičiūtė Karolina. Development and Research of Piezoelectric Membranes Dedicated to Flow Control Systems . Master's Final Degree Project / supervisor doc. Rūta Rimašauskienė; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering (E10), Engineering Sciences (E).

Keywords: piezoelectric, membranes, synthetic jet generator.

Kaunas, 2020. 51 pages.

## **Summary**

The aim of this study is to create membranes of different materials, to find the most suitable material that would allow to create the greatest displacement at the first resonant frequency. In this work, different piezoelectric membranes for synthetic jet generators were investigated. The membranes were printed on a 3D printer using fused deposition modeling technology. Eight membranes of thermoplastics were printed for the study, with 45 ° and 90 ° printing directions. Membrane printing materials: polylactide (PLA), acrylonitrile, styrene-polybutadiene copolymer (ABS), polycarbonate (PC), and nylon. For further comparison, a composite membrane of polylactide (PLA) and carbon fiber was printed. The membranes were operated at 5 V and 10 V and displacements were observed at the first resonant frequency. A Polytec laser vibrometer was used to measure displacements. The largest displacement at the first resonant frequency was achieved by a polylactide (PLA) printed membrane. The membrane was printed at 45 ° printing angle, the displacement reached 112.4 nm, when voltage was 5 V, and reached even 214.1 nm, when applied voltage was 10 V, while the displacements of other membranes were smaller. When evaluating the influence of the printing direction, displacements ranged from 14.4 nm to 77.4 nm for unidirectional printed membranes and from 12.2 nm to 101.1 nm for cross-printed membranes at 5 V voltage. Displacements ranged from 52.2 nm to 62.8 nm for unidirectional printed membranes and from 50.1 nm to 214.1 nm for cross-printed membranes at 10 V voltage. In all cases except 5 V applied to polycarbonate membranes, the displacements of the crossed membranes were larger.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpos .....</b>	<b>12</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>14</b>
1.1. Pjezoelektrinės membranos .....	14
1.2. Oro srovės generatoriaus .....	21
1.3. 3D spausdinimas .....	23
1.3.1. Selektyvus kietinimas lazeriu .....	24
1.3.2. Stereolitografija .....	25
1.3.3. Lydžios masės formavimas .....	27
<b>2. Metodinė dalis.....</b>	<b>30</b>
<b>3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas.....</b>	<b>35</b>
<b>4. Ekonominė dalis .....</b>	<b>52</b>
<b>5. Rekomendacijos.....</b>	<b>54</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>55</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>56</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Išmatuotos ir imituotos pirmojo ( $1 f_R$ ) ir antrojo rezonanso dažnio ( $2 f_R$ ) ir atitinkamos vibracijos amplitudės (d) keraminėms plokštelėms su PZTFe ir PZTNb [1] .....	15
<b>2 lentelė.</b> Pjezoelektrinio vykdiklio parametrai [6] .....	18
<b>3 lentelė.</b> 3D spausdinimo technologijų palyginimas [18] .....	28
<b>4 lentelė.</b> Naudotų termopolimerų fizikinės ir mechaninės savybės [29].....	30
<b>5 lentelė.</b> Ultimaker 2+ spausdintuvo charakteristikos [28] .....	31
<b>6 lentelė.</b> Spausdinimo charakteristikos.....	31
<b>7 lentelė.</b> Kompozitinio bandymo spausdinimo parametrai .....	32
<b>8 lentelė.</b> Naudotų filamentų duomenys [30].....	52
<b>9 lentelė.</b> Membranų duomenys.....	52
<b>10 lentelė.</b> Vidutinė membranų kaina .....	53



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Imituojamos membranos centro poslinkio amplitudės pirmojo ir antrojo vibracijos režimo dažnių diapazonu. Palyginami PZTFe (punktyrinės linijos) ir PZTNb poslinkiai, suaktyvinti membranos kampuose [1] .....	14
<b>2 pav.</b> Pjezoelektrinės vykdiklio deformacijos amplitudė (įtampa + -70 V) [2] .....	15
<b>3 pav.</b> Siurblių, turinčių skirtingą pjezoelektrinio sluoksnio storį, srautai (įtampa: $\pm 70$ V) [2]..	16
<b>4 pav.</b> Srauto ir įtampos priklausomybė nuo dažnio [3] .....	16
<b>5 pav.</b> Srauto priklausomybė nuo dažnio (esant dviems mikropompų tipams) [3] .....	17
<b>6 pav.</b> Oro srovės generatoriaus dažnio įtaka (a) diafragmos poslinkiui ir srovės greičiui (b) [5] .....	18
<b>7 pav.</b> Poslinkio priklausomybė nuo įtampos [6] .....	19
<b>8 pav.</b> Pjezoelektrinio keitiklio modeliavimo rezultatai [6] .....	19
<b>9 pav.</b> Savaiminio jutimo diafragmos FEM modeliavimas [7].....	20
<b>10 pav.</b> Santykis tarp srauto ir jutimo įtampos bei sužadavimo dažnio esant 75 V ir 150 V [7] ..	20
<b>11 pav.</b> Oro srauto generatoriaus schema [8] .....	21
<b>12 pav.</b> Eksperimento įranga: a) pjezoelektrinė diafragma įtaisyta į sintetinio oro srauto generatoriaus kamerą; b) sintetinio oro srauto generatorius su viena anga; c) sintetinis oro srauto generatorius su 3 angomis [8] .....	21
<b>13 pav.</b> Pjezoelektrinės membranos poslinkio priklausomybė nuo dažnio; a – sintetinio oro srauto generatorius su 1 anga, 0,5 mm ertme; b – sintetinio oro srauto generatorius su 3 angomis, 0,5 mm ertme [8] .....	22
<b>14 pav.</b> Pjezoelektrinės membranos poslinkio priklausomybė nuo dažnio; a – sintetinio oro srauto generatorius su 1 anga, 1,5 mm ertme; b – sintetinio oro srauto generatorius su 3 angomis, 1,5 mm ertme [8] .....	22
<b>15 pav.</b> Sintetinis oro srovės generatorius, veikiantis dėl pjezoelektrinio elemento; kairėje – vaizdas iš viršaus; dešinėje – vaizdas iš apačios, kur matoma membrana ir pjezoelementas [9] ..	23
<b>16 pav.</b> Sintetinis oro srauto generatorius [9] .....	23
<b>17 pav.</b> 3D spausdinimo procesas (nuo modelio sukūrimo iki atspausdinto objekto) [11] .....	24
<b>18 pav.</b> Selektivaus kietinimo lazeriu schema [13] .....	24
<b>19 pav.</b> Selektivaus kietinimo lazeriu modelis [23].....	25
<b>20 pav.</b> Stereolitografijos procesas [17] .....	26
<b>21 pav.</b> Stereolitografijos būtų atspausdinti objektai (500 $\mu$ m) [18] .....	26
<b>22 pav.</b> Stereolitografijos procesas [24, 25] .....	27
<b>23 pav.</b> Lydžios masės formavimo proceso schema [18] .....	27
<b>24 pav.</b> 3D spausdinimas lydžios masės formavimo būdu [26, 27] .....	28
<b>25 pav.</b> Naudotas Ultimaker 2+ spausdintuvas [28] .....	30
<b>26 pav.</b> Atspausdintas laikiklis (1) ir membrana (2).....	31
<b>27 pav.</b> Į laikiklį įtvirtinta membrana; čia 1- pjezoelektrinis vykdiklis; 2 – įtvirtinta polikarbonato kryžiuotai spausdinta membrana su pjezoelektriniu vykdikliu; 3 – įtvirtinta polikarbonato lygiagrečiai spausdinta membrana su pjezoelektriniu vykdikliu .....	32
<b>28 pav.</b> Kompozitinė membrana (a – membrana su pjezoelektriniu vykdikliu; b – membrana įtvirtinta laikiklyje .....	32
<b>29 pav.</b> Pjezoelektrinis vykdiklis įtvirtintas laikiklyje.....	33
<b>30 pav.</b> Matavimams paruoštas bandinys (1 – membrana pritvirtinta laikiklyje, su pjezoelektriniu vykdikliu) .....	33

<b>31 pav.</b> Matavimų standas Polytec 3D lazerinis vibrometras: 1 – signalų generatorius; 2 – trys skanavimo kameros skirtos 3D virpesių matavimams; 3 – valdymo vienetas; 4 – stiprintuvas P200; 5 – bandinio vieta .....	33
<b>32 pav.</b> PC lygiagrečiai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa .....	35
<b>33 pav.</b> PC kryžiuotai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa.....	36
<b>34 pav.</b> PC lygiagrečiai ir kryžiuotai spaudintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 5 V įtampa .....	36
<b>35 pav.</b> PC lygiagrečiai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa .....	36
<b>36 pav.</b> PC kryžiuotai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa .....	37
<b>37 pav.</b> PC lygiagrečiai ir kryžiuotai spaudintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 10 V įtampa .....	37
<b>38 pav.</b> Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš PC spaudintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtampos palyginimas.....	37
<b>39 pav.</b> ABS lygiagrečiai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5V įtampa .....	38
<b>40 pav.</b> ABS kryžiuotai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa .....	38
<b>41 pav.</b> ABS lygiagrečiai ir kryžiuotai spaudintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 5V įtampa .....	39
<b>42 pav.</b> ABS lygiagrečiai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa ....	39
<b>43 pav.</b> ABS kryžiuotai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa .....	40
<b>44 pav.</b> ABS lygiagrečiai ir kryžiuotai spaudintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 10V įtampa .....	40
<b>45 pav.</b> Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš ABS spaudintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtampos palyginimas.....	40
<b>46 pav.</b> PLA lygiagrečiai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5V įtampa .....	41
<b>47 pav.</b> PLA kryžiuotai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa .....	41
<b>48 pav.</b> Iš PLA spaudintų membranų poslinkių kreivės, veikiant jas 5 V įtampa .....	41
<b>49 pav.</b> PLA lygiagrečiai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10V įtampa .....	42
<b>50 pav.</b> PLA kryžiuotai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa .....	42
<b>51 pav.</b> Iš PLA spaudintų membranų poslinkių kreivės, veikiant jas 10 V įtampa .....	43
<b>52 pav.</b> Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš PLA spaudintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtampos palyginimas.....	43
<b>53 pav.</b> Nailono lygiagrečiai spaudinta membrana, veikiant membraną 5 V įtampa.....	43
<b>54 pav.</b> Nailono kryžiuotai spaudinta membrana, veikiant membraną 5 V įtampa .....	44
<b>55 pav.</b> Nailono lygiagrečiai ir kryžiuotai spaudintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 5 V įtampa .....	44
<b>56 pav.</b> Nailono lygiagrečiai spaudinta membrana, veikiant membraną 10 V įtampa.....	45
<b>57 pav.</b> Nailono kryžiuotai spaudinta membrana, veikiant membraną 10 V įtampa .....	45
<b>58 pav.</b> Nailono lygiagrečiai ir kryžiuotai spaudintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 10 V įtampa .....	45
<b>59 pav.</b> Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš nailono spaudintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtampos palyginimas.....	46
<b>60 pav.</b> Kompozito poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant kompozitą 5 V įtampa .....	46
<b>61 pav.</b> Kompozito poslinkis 1 modoje, veikiant kompozitą 10 V įtampa.....	47
<b>62 pav.</b> Membranos spaudintos iš kompozito poslinkių kreivės.....	47
<b>63 pav.</b> Pjezoelektrinio vykdiklio poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, kai įtampa 5 V .	47

<b>64 pav.</b> Pjezoelektrinio vykdiklio poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, kai įtampa 10 V	48
<b>65 pav.</b> Pjezoelektrinio vykdiklio poslinkių kreivės.....	48
<b>66 pav.</b> Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant lygiagrečiai spausdintas membranas 5V įtampa palyginimo grafikas .....	48
<b>67 pav.</b> Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant lygiagrečiai spausdintas membranas 10 V įtampa palyginimo grafikas .....	49
<b>68 pav.</b> Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant kryžiuotai spausdintas membranas 5 V įtampa palyginimo grafikas .....	49
<b>69 pav.</b> Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant kryžiuotai spausdintas membranas 10 V įtampa palyginimo grafikas .....	50
<b>70 pav.</b> Membranų poslinkių kreivės (lyginant su pjezoelektrinio vykdiklio poslinkiu) .....	50

## **Santrumpos**

ABS – akrilnitrilo, stireno ir polibutadieno kopolimeras

PC – polikarbonatas

PLA – polilaktidas

PZT – švino cirkonatas-titanatas

FDM – lydyto nusodinimo modeliavimas (fused deposition modeling)

SLS – selektyvus kietinimas lazeriu (selective laser melting)

SLA – stereolitografija (stereolithography)

## **Įvadas**

Pastaraisiais metais daugybė jutiklių ir vykdyklių yra gaminami iš pjezoelektrinių savybių turinčių medžiagų, todėl yra atliekami reikšmingi tyrimai, padedantys tobulinti ir geriau suprasti pjezoelektrines medžiagas, kurios padeda dar labiau tobulinti šiuolaikines technologijas [1-4].

Aktyvus srauto valdymas šiuo metu yra labai svarbi tyrimų sritis, gana dažnai susijusi su inžineriniais pritaikymais, pavyzdžiui aerodinaminio sparno, vėjo turbinos ar dujų turbinų mentės ir kiti. Kaip žinoma iš mokslinių šaltinių, srautų valdymą galima atlikti pasyviomis priemonėmis, tokiomis kaip aerodinaminio sparno geometrijos keitimas arba aktyviomis priemonėmis, kai naudojamas mažas energijos kiekis, keičiantis pūtimo/siurbimo srovę reaktyviniuose srovės generatoriuose. Nepaisant rezultatų, sistemos svoris, dydis, reagavimo laikas ir jėga riboja jų naudojimą ypač, kur erdvė yra labai maža. Todėl vis daugiau tyrimų atliekama su vykdykliais, kurių veikimas paremtas pjezoelektrinių medžiagų savybėmis. Pjezoelektrinės medžiagoms yra teikiama pirmenybė, nes jos pasižymi kompaktišku dydžiu, gali sukurti didelius poslinkius, tačiau reikalaujančius mažų energijos sąnaudų [8, 9].

3D spausdinimas – vienas iš efektyviausių, pažangiausių ir greičiausių technologijų, leidžiančių sukurti reikiamo dydžio detales, šio tyrimo atveju membraną, nereikalaujant didelių investicijų ir ilgo proceso. Spausdinimas yra objektų kūrimo procesas, tiesiogiai sluoksniuojant medžiagas viena ant kitos, kol gaunamas reikiamas produktas. 3D spausdinimas, kuriam nereikia jokių įrankių, žymiai sumažina pernelyg dideles išlaidas ir gamybos laiką [18].

Šis tyrimas leis pažinti pjezoelektrines membranas, kurtas 3D spausdinimo technologija. Supažindins su poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje galimybėmis, kas padės įvertinti jų pritaikymą aktyviame srautų valdyme.

### **Darbo hipotezė**

3D spausdinimo technologija leis greitai ir efektyviai atspausdinti membranas, kurios pasižymės pakankamai dideliu poslinkiu pirmame rezonansiniame dažnyje.

### **Darbo tikslas**

Sukurti ir ištirti membranas iš skirtingų medžiagų ir surasti tinkamiausią medžiagą, kuri leistų sukurti didžiausią poslinkį pirmame rezonansiniame dažnyje.

### **Darbo uždaviniai**

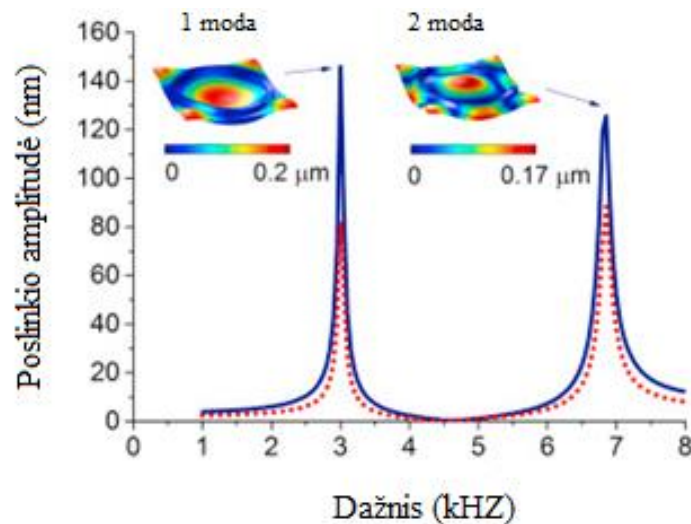
1. Sukurti membranas, spausdintas 3D spausdintuvu iš PLA, PC, ABS ir nailono.
2. Palyginti membranų, spausdintų iš skirtingų medžiagų, sukurtus poslinkius pirmame rezonansiniame dažnyje.
3. Ištirti, ar spausdinimo kryptis turi įtakos membranų poslinkiams pirmame rezonansiniame dažnyje.
4. Palyginti spausdintos pjezoelektrinės membranos ir rinkoje esančio pjezoelektrinio vykdyklio kainas.

## 1. Literatūros apžvalga

Šiuolaikiniame pasaulyje pjezoelektrinės medžiagos užima svarbią vietą srautų valdymo technologijų srityje, todėl yra atliekami reikšmingi tyrimai, padedantys tobulinti ir geriau suprasti pjezoelektrines medžiagas.

### 1.1. Pjezoelektrinės membranos

Mokslininkų D. Kuscer, T. Rojac, D. Belavičiaus ir kt. [1] atliktas tyrimas atskleidė, kad keraminių membranų poslinkius iš esmės reguliuoja sudėtingi integruoti elastingi ir pjezoelektrinių savybių turintys PZT elementai. Kietasis PZT turi didesnę standumą nei „minkštas“ PZT, tačiau pastarojo pjezoelektrinis atsakas yra geresnis. Norėdami iširti ir prognozuoti santykius tarp poslinkių, rezonansų, elastingių ir pjezoelektrinių savybių, mokslininkai sukūrė supaprastintą baigtinių elementų modelį vibracijos sistemoms. Iš 2 paveikslų matyti, kad sistema turi du rezonansinius režimus nuo 1 iki 8 kHz, panašių dažnių, t. y. 3 kHz ir 7 kHz, PZTNb ir PZTFe. Tačiau rezonanso režimų amplitudės yra didesnės PZTNb (atitinkamai 145 nm ir 125 nm pirmuoju ir antruoju režimu), nei PZTFe (atitinkamai 82 nm ir 88 nm pirmojo ir antrojo režimo atveju).



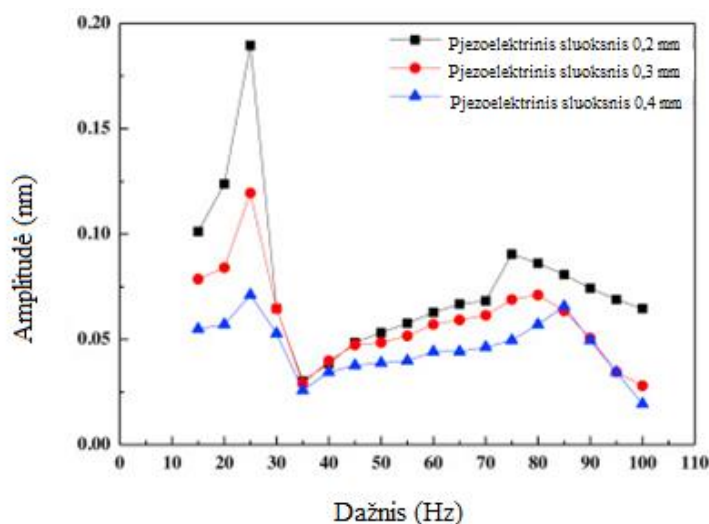
**1 pav.** Imituojamos membranos centro poslinkio amplitudės pirmojo ir antrojo vibracijos režimo dažnių diapazonu. Palyginami PZTFe (punkttyrinės linijos) ir PZTNb poslinkiai, suaktyvinti membranos kampuose [1]

Autoriai [1] pabrėžia, kad išmatuotas pirmasis rezonansinis dažnis buvo identiškas PZTNb (3 kHz) modeliui, bet šiek tiek didesnis PZTFe (matuojamas 3,5 kHz, palyginti su imituojamu 3 kHz). Išmatuoti antrojo rezonanso dažniai (5 kHz PZTNb ir 6,5 kHz PZTFe) buvo mažesni nei imituoti abiem mėginiams (7 kHz). Taip pat reikėtų pažymėti, kad išmatuotas vibracinės sistemos PZTNb (atitinkamai 3 kHz ir 5 kHz) rezonanso dažnis yra šiek tiek mažesnis nei PZTFe (atitinkamai 3,5 kHz ir 6,5 kHz). Šie pokyčiai nebuvo prognozuojami imitacijomis (abiem PZT imituoti dažniai yra 3 kHz ir 7 kHz). Šie sistemingi poslinkiai gali būti siejami su keliais parametrais, įskaitant nedidelius keraminės membranos storio pokyčius, geometriją, masę ir tipą.

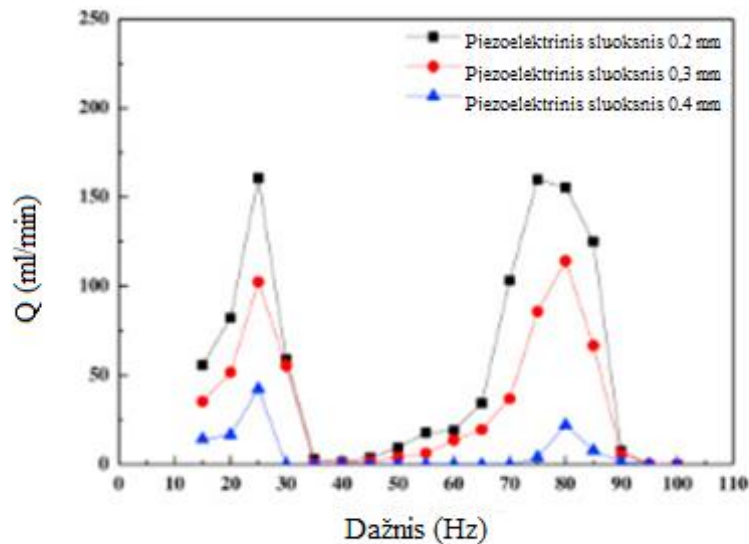
**1 lentelė.** Išmatuotos ir imituotos pirmojo ( $1 f_R$ ) ir antrojo rezonanso dažnio ( $2 f_R$ ) ir atitinkamos vibracijos amplitudės ( $d$ ) keraminėms plokštelėms su PZTFe ir PZTNb [1]

		<b>PZTFe</b>	<b>PZTNb</b>
<b>Matavimas</b>	1 $f_R$ (kHz)	3,5	3,0
	$d$ (nm)	25	300
	2 $f_R$ (kHz)	6,5	5,0
	$d$ (nm)	42	880
<b>Modeliavimas</b>	1 $f_R$ (kHz)	3,0	3,0
	$d$ (nm)	82	145
	2 $f_R$ (kHz)	7,0	7,0
	$d$ (nm)	88	125

H. K. Ma, R. H. Chen`as, ir Y. H. Hsu [2] atliko tyrimą, kurio metu pjezoelektrinių sluoksnių (PVDF) storis pagamintuose siurbliuose buvo 0,2 mm, 0,3 mm ir 0,4 mm. 2 paveiksle galima pastebėti, kad 0,2 mm storio pjezoelektriniai vykdikliai pasižymėjo didžiausia deformacijos amplitude, esant 15–100 Hz dažnių diapazonui. Didžiausia veikimo mechanizmo deformacijos amplitudė 0,19 mm buvo pasiekta esant mažam 25 Hz vibracijos dažniui. 3 paveiksle taip pat parodyti šių mikro siurblių vandens srauto matavimo rezultatai 15–100 Hz dažnių diapazonu. Didelio srauto pokyčio ir deformacijos amplitudės pokyčio 15–100 Hz dažnių diapazonu panašumas leido manyti, kad srautas buvo labai susijęs deformacijos amplitude. Siurblys su pjezoelektriniu vykdikliu (0,2 mm storio) iš tiesų davė didesnę srautą nei siurbliai su kitokiais pjezoelektrinių vykdiklių storiais.

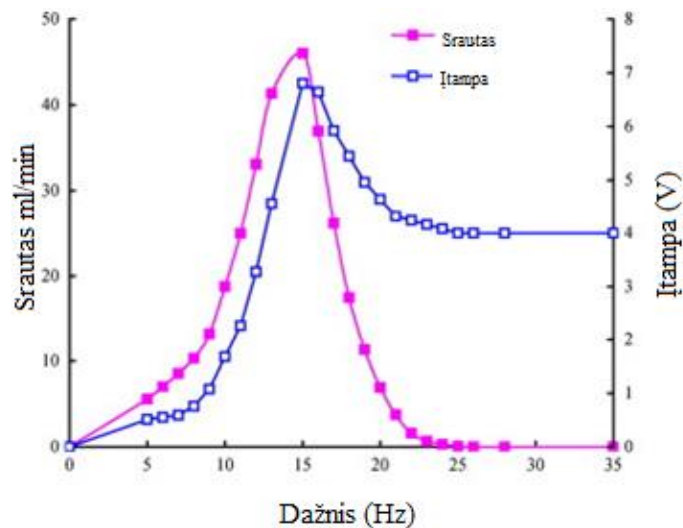


**2 pav.** Pjezoelektrinės vykdiklio deformacijos amplitudė (įtampa + -70 V) [2]



**3 pav.** Siurblių, turinčių skirtingą pjezoelektrinio sluoksnio storį, srautai (įtampa:  $\pm 70$  V) [2]

Rezonansinis dažnis yra viena iš pagrindinių siūlomo siurblio charakteristikų. Kaip parodyta 4 paveiksle, 0,2 mm pjezoelektrinio sluoksnio storio vykdyklių, esančių siurbliuose deformacijos amplitudė parodė dvi smailes esant 25 Hz ir 75 Hz dažniams. Siurblių su pjezoelektriniais vykdykliais (0,2 mm storio) išmatuoti srautai yra atitinkamai yra 161 ml/min ir 160 ml/min (4 pav.) esant 25 Hz ir 75 Hz dažniams, o nukrypimo amplitudės, pavaizduotos 3 paveiksle yra 0,19 mm ir 0,09 mm, esant 25 Hz ir 75 Hz ir vandeniui siurbimo kameroje [2].



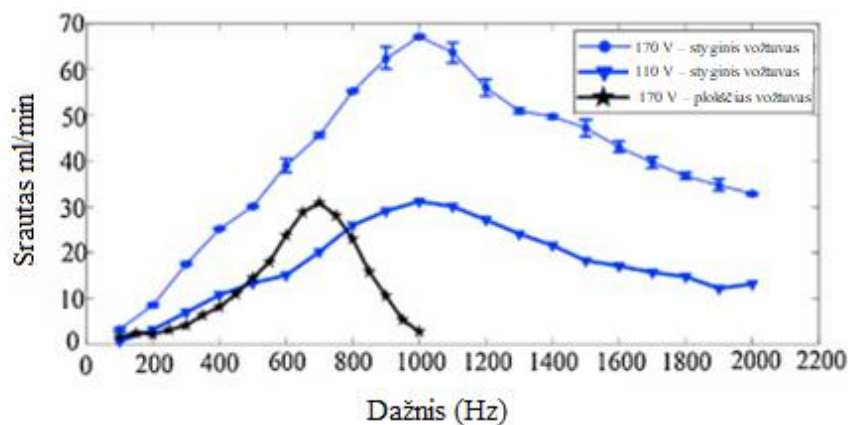
**4 pav.** Srauto ir įtampos priklausomybė nuo dažnio [3]

Z. Zhang`as, J. Kan`as, S. Wang`as ir kt. [3] atlikto tyrimą su PZT ir oro srovės generatoriumi, laipsniškai reguliuojant generatoriaus srautą ir išėjimo jutiklio įtampą, išbandant skirtingais veikimo dažniais ir fiksuota įtampa. Matuojant srauto greitį, slėgio skirtumas tarp įėjimo ir išleidimo angos yra išlaikomas nulinis, būtent todėl srauto greitis, lygus nuliniam slėgiui. 5 paveiksle parodytas santykis tarp išmatuoto srauto greičio ir siurblio išėjimo jutiklio įtampos, kai varomoji įtampa yra 200 V. Matyti, kad didėjant dažniui naujojo siurblio srauto pokyčiai yra



panašūs į klasikinių pjezoelektrinių siurblių. Siurblys veikia dažnių diapazonu nuo 0 Hz iki 26 Hz. Srovės greičio viršūnė stebima esant 15 Hz ir maksimalus srautas 45,98 ml/min. Tai optimalus siurblio darbo dažnis. Be to, jutiklio išėjimo įtampa taip pat keičiama kaip ir dažnis. Gaunama maksimali vertė 6,80 V esant 15 Hz dažniui. Vadinasi, kad pjezoelektrinė diafragma generuoja didžiausią deformaciją rezonansiniame dažnyje. Tačiau jutimo įtampa išlieka pastovi 4 V, kai srautas viršija 26 Hz.

Y. Jun Ren, Y. Ting Ma, D. Huang ir kt. [4] aprašo tyrimą, kai buvo naudojamas pjezoelektrinis diskas ir PMMA plokštės matmenys yra atitinkamai  $\phi 26,9 \text{ mm} \times 0,34 \text{ mm}$  ir  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , o PDMS plėvelės storis yra 0,1 mm. Eksperimentiškai buvo tiriamos priklausomybės nuo srauto greičio charakteristikos. Mikropompos su dvejomis įtampomis, t. y., 170 V ir 110 V, rezultatai parodyti 5 paveiksle. Diagrama rodo, kad didžiausias srautas yra maždaug 1 kHz dažnyje. Siurblio srautas padidėja tiesiškai ir pasiekia maksimalią 67,1 ml/min., esant 170 V įtampai esant nuliniam slėgiui, 2,5 kHz, siurblio sistema veikia tik 1 kHz dažnyje. Šis rezultatas gali atsirasti iš minkštos vožtuvo plokštės ir PMMA korpuso.

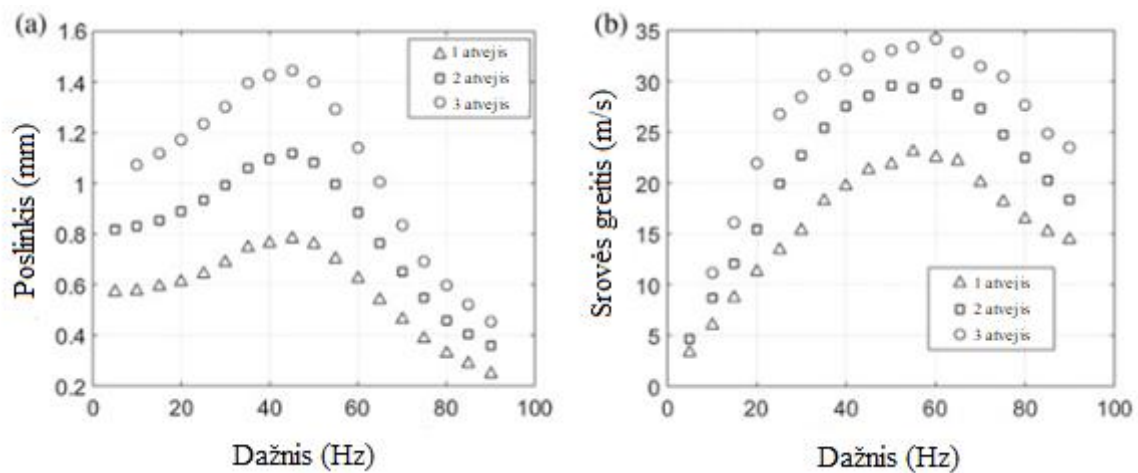


5 pav. Srauto priklausomybė nuo dažnio (esant dviem mikropompų tipams) [3]

Palyginimui, buvo pagaminta ir iširta mikropompa su plokščiu vožtuvu, pagamintu iš PDMS plonos plėvelės. Plokščio vožtuvo medžiaga ir dydis yra tokie patys kaip ir styginių vožtuvų plokštės. Mažų ir didelių stačiakampių skylių matmenys atitinkamai yra  $0,3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  ir  $3,2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ . Remiantis surinkta mikropompos su styginiais vožtuvais struktūra ir bandymo metodais, galima sukurti ir išbandyti mikropompą su plokščiais vožtuvais. 5 paveiksle taip pat parodytas dviejų tipų mikropompų srauto greičio palyginimas pagal 170 V sinusoidinę įtampą. Mikropompos su plokščiais vožtuvais pasiekė 30,9 ml/min maksimalų srautą apie 700 Hz. Palyginti su šiuo plokščiuoju vožtuvu, šiame tyrime siūloma styginių vožtuvas gali veikti geriau esant aukštam dažniui [4].

J. Jeyalingam ir M. Jabbar'o [5] eksperimentuose buvo suprojektuota 50 mm skersmens PZT diafragma, kurios skersmuo yra 48 mm. Vykdiklių mechanizmas turi angą, kurios skersmuo  $d = 2 \text{ mm}$ , aukštis  $h = 4,2 \text{ mm}$  ir turi  $H = 1,2 \text{ mm}$  aukščio ertmę. 6 paveikslėlyje pavaizduotas oro srauto generatoriaus dažnio atsakas, diafragmos piko ir didžiausio poslinkio atžvilgiu (6 pav. a) ir srauto greitis (6 pav. b). Įdomu tai, kad didžiausio srauto greičio veikimo dažnis nesutampa su didžiausiu diafragmos poslinkiu, kuris yra susijęs su didžiausiu ertmės tūrio pokyčiu. Didžiausias srovės greitis matuojamas esant 55 Hz (1 atvejis) ir 60 Hz (2 ir 3 atvejai), o didžiausias poslinkis visais atvejais yra matuojamas esant 45 Hz. Be to, diafragmos piko ir piko poslinkis rodo linijinį

proporcingumą įvesties įtampai (6 pav. a), o didėjančio įtampos įvedimo metu padidėja didžiausio srauto greitis (6 pav. b) [5].



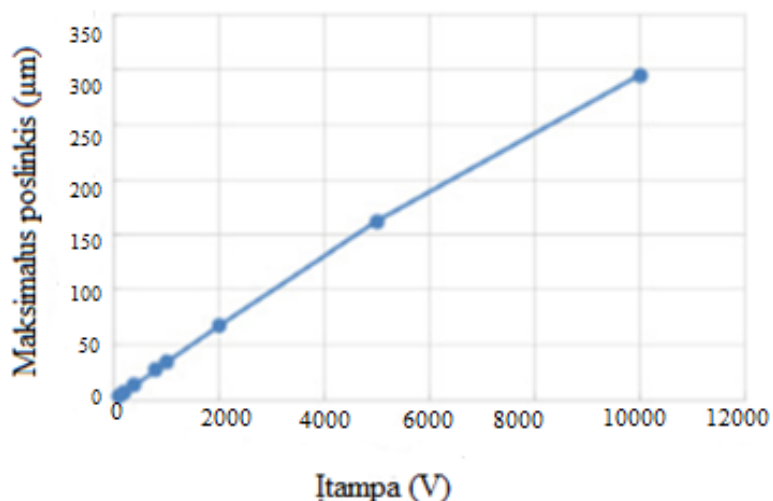
**6 pav.** Oro srovės generatoriaus dažnio įtaka (a) diafragmos poslinkiui ir srovės greičiui (b) [5]

Y. Guan ir X. Li [6] pabrėžia, kad medžiagai, iš kurios pagamintas pjezoelektrinis keitiklis, reikia aukšto patikimumo, plataus dažnio atsako diapazono ir tiesinio atsako į taikomą įtampą, tuo tarpu esant pakankamai mažoms sąnaudoms. Šiame tyrime buvo pasirinkta PZT-5H pjezoelektrinė keraminė plokštė. Pjezoelektrinis keitiklis susideda iš trijų dalių: PZT pjezoelektrinės keramikos, jungiamojo sluoksnio ir žalvarinio pagrindo. Priklausomai nuo siurblio kameros matmenų, buvo naudojami trys skirtingi pjezoelektriniai vykdikliai, kurių išorinis skersmuo (buvo naudojami vario pagrindai) yra 12, 15 ir 20 mm, parametrai aprašyti 2 lentelėje.

**2 lentelė.** Pjezoelektrinio vykdiklio parametrai [6]

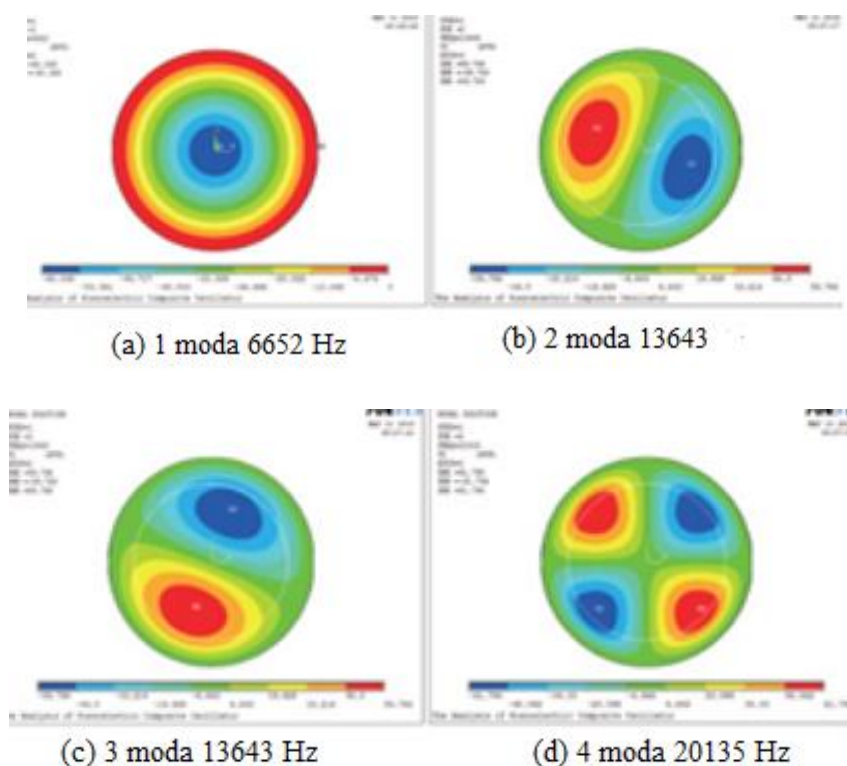
Parametras	Reikšmė
Pjezoelektrinio sluoksnio skersmuo D (mm)	9; 11,3; 15
Pjezoelektrinio sluoksnio storis t (mm)	0,05; 0,20; 0,25
Vario sluoksnio skersmuo d (mm)	12, 15, 20
Vario sluoksnio storis T (mm)	0,12; 0,37; 0,47
Siurblio ertmės gylis (mm)	0,03
Rezonansinis dažnis (kHz)	5,3±0,5; 10±0,5; 7,2±0,5
Varža (Ω)	500, 300, 300
Talpa (nF)	15±30%; 9±30%; 12±30%

Didžiausias poslinkis yra 12 mm išorinio skersmens keitiklio centrinėje dalyje yra parodytas 8 paveiksle. Didžiausias poslinkis yra tiesiogiai proporcingas 2000 V įtampai. Tačiau maksimalus poslinkis pasiekiamas pamažu. Mikropompos srautas ir slėgis rodo tas pačias tendencijas kaip ir didžiausias poslinkis tomis pačiomis sąlygomis. Kai pjezoelektrinis keitiklis, kurio skersmuo yra 12 mm, veikiamas 100 V, mikropompos užtikrina didžiausią našumą dėl mažesnio keitiklio skersmens ir didesnio lankstumo. Didžiausias srautas ir slėgis yra atitinkamai 150 μl/min ir 346 Pa [6].



7 pav. Poslinkio priklausomybė nuo įtampos [6]

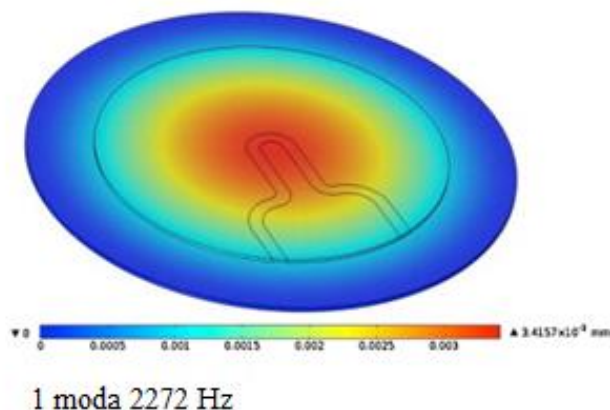
Buvo atliktas modeliavimas siekiant nustatyti pradinę pjezoelektrinių keitiklių konfigūraciją, režimai yra parodyti 8 pav. [6].



8 pav. Pjezoelektrinio keitiklio modeliavimo rezultatai [6]

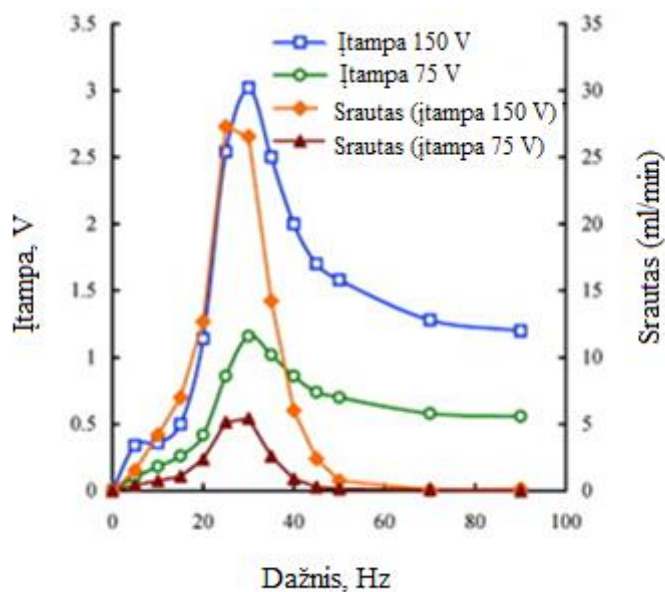
Z. Zhang`as, J. Kan`as, G. Cheng`as ir kt. [7] pastebi, kad norint prognozuoti diafragmos veikimą prieš montavimą, turėtų būti atliekamas baigtinių elementų modeliavimas. Galutinių elementų modelis diafragmoje parodytas 10 paveiksle. Diafragma yra užfiksuojama visuose kraštuose, kad suformuotų uždara siurblio kamerą. Norint stebėti įtampos ir deformacijos priklausomybę, diafragma veikama 100 V įtampa. Baigtinių elementų modeliavimas naudojamas struktūros

komponento vibracijos charakteristikoms nustatyti, kai jos yra projektuojamos. Pirmasis pjezoelektrinės diafragmos modelis parodytas 9 paveiksle.



9 pav. Savaiminio jutimo diafragmos FEM modeliavimas [7]

Naudotų mikropompų apvalkalas ir korpusas yra pagaminti iš polimetilmetakrilato (PMMA) 40 mm × 40 mm × 5,5 mm. Išleidimo anga ir įleidimo vamzdis turi tokį patį 7 mm skersmenį. Sklendės formos vožtuvai, pagaminti iš gumos, naudojami įleidimo ir išleidimo vožtuvams, kurių dydis yra vienodas - 10 mm × 0,5 mm. Sumontavus vožtuvus ir pjezoelektrinę diafragmą, įrengiama siurblio kamera [7].



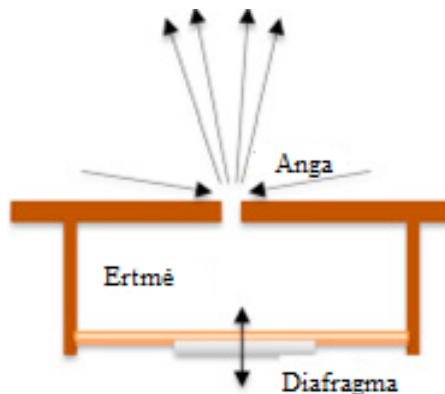
10 pav. Santykis tarp srauto ir jutimo įtampos bei sužadinimo dažnio esant 75 V ir 150 V [7]

Pjezoelektrinės mikropompos gali veikti nuo 0 Hz iki 50 Hz (10 pav.). Srautas yra artimas nuliui, kai dažnis yra didesnis nei 50 Hz. Srauto pokytis atsižvelgiant į dažnį yra gana akivaizdus. Yra tik vienas optimalus mikropompos dažnis, kad būtų pasiektas maksimalus srautas, atitinkamai 5,42 ml/min ir 26,55 ml/min esant 75 V – 150 V sužadinimo įtampai. Optimalus dažnis yra artimas 30 Hz. Įtampa, kuri keičiama kaip ir dažnis, yra maksimali. Vadinasi, kad pjezoelektrinė diafragma

generuoja didžiausią deformaciją šiame dažnio taške, t. y. jo rezonansinį dažnį. Jutiklio įtampa beveik nekinta, kai dažnis yra didesnis nei 50 Hz [7].

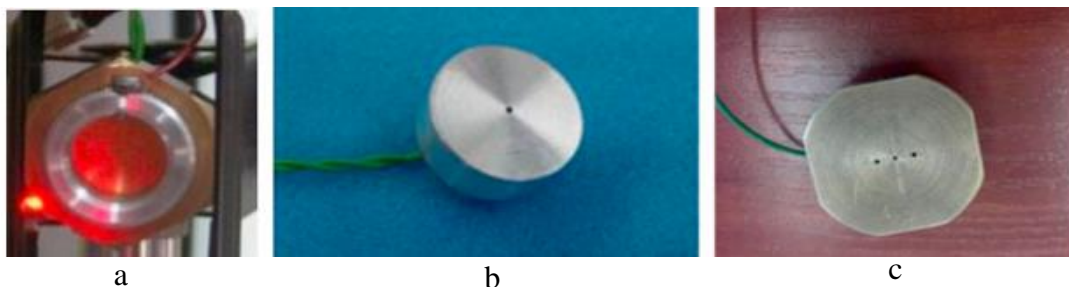
## 1.2. Oro srovės generatoriaus

Aktyvus srauto valdymas gana dažnai susijęs su keliais inžineriniais pritaikymais, pvz. aerodinaminio sparno, vėjo turbinos ar dujų turbinų mentės ir kiti išlenkti paviršiai. Kaip žinoma iš mokslinių šaltinių, srauto valdymą galima atlikti pasyviomis priemonėmis, tokiomis kaip aerodinaminio sparno geometrijos keitimas, taip keičiant slėgio gradientą, arba aktyviomis, kurioms nereikia didelių energijos kiekių tam, kad pakeisti pūtimo/siurbimo srovę. Tačiau vis daugiau tyrimų atlikta su vykdikliais, kurių veikimas paremtas pjezoelektrikų veikimų [8].

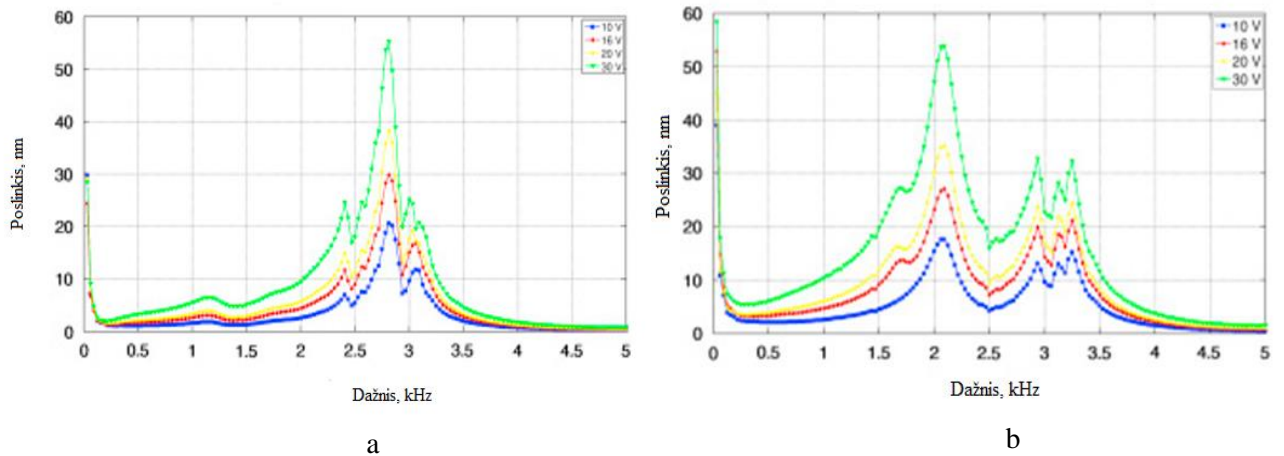


11 pav. Oro srauto generatoriaus schema [8]

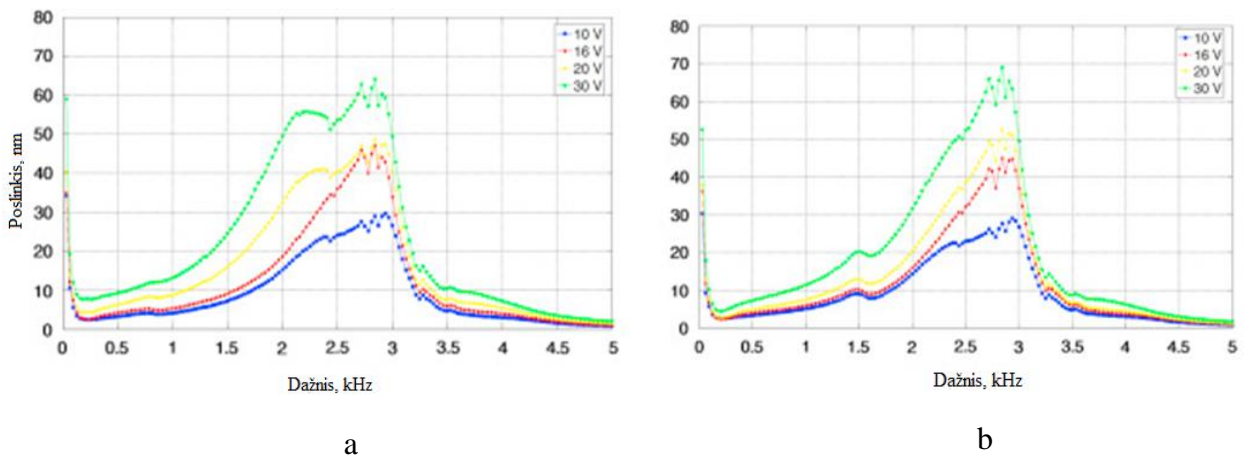
Pjezoelektrinės medžiagos yra teikiama pirmenybė, nes jos pasižymi kompaktišku dydžiu, gali sukurti didelius poslinkius, tačiau reikalauja mažai energijos. Autoriai pažymi, kad eksperimentinės analizės metu buvo pristatyti keturi oro srauto generatorių dizainai. Pagaminta 27 mm skersmens pjezoelektrinė diafragma buvo sužadinta sinusoidinės įtampos signalu ir buvo tvirtai pritvirtinta sintetinio reaktyvinio generatoriaus kameroje. Oro srauto generatoriaus angų skaičius vienoje ertmėje buvo 1 arba 3 (skersmuo 1 mm), o atstumas tarp angų yra 4 mm. Ertmės tūris priklausė nuo ertmės aukščio, kuris svyravo nuo 0,5 mm iki 1,5 mm. Svarbu paminėti, kad srauto generatoriaus dizainas grindžiamas reikalavimu pasiekti maksimalų srovės intensyvumą su minimalia įėjimo energija. Todėl srauto generatorių žadinantis dažnis turėtų atitikti jo rezonansinį dažnį. Štai kodėl buvo svarbu išanalizuoti kiekvieną atskirą dizainą ir rasti geriausią visos sistemos sprendimą [8].



12 pav. Eksperimento įranga: a) pjezoelektrinė diafragma įtaisyta į sintetinio oro srauto generatoriaus kamerą; b) sintetinio oro srauto generatorius su viena anga; c) sintetinis oro srauto generatorius su 3 angomis [8]



**13 pav.** Pjezoelektrinės membranos poslinkio priklausomybė nuo dažnio; a – sintetinio oro srauto generatorius su 1 anga, 0,5 mm ertme; b – sintetinio oro srauto generatorius su 3 angomis, 0,5 mm ertme [8]

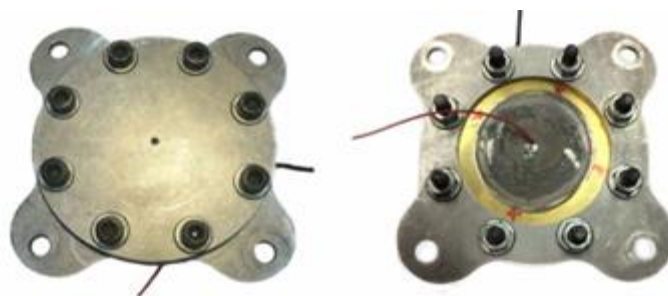


**14 pav.** Pjezoelektrinės membranos poslinkio priklausomybė nuo dažnio; a – sintetinio oro srauto generatorius su 1 anga, 1,5 mm ertme; b – sintetinio oro srauto generatorius su 3 angomis, 1,5 mm ertme [8]

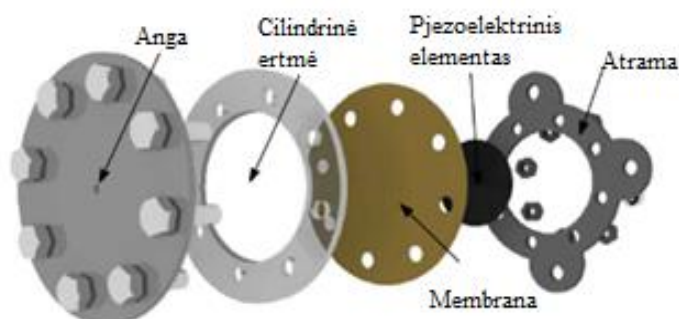
Sintetinio oro srauto generatoriaus schema pateikta 12 paveiksle – prietaisą galima suskirstyti į tris pagrindines dalis - ertmę, diafragmą ir angą. Visų šių dalių matmenys ir medžiagų charakteristikos smarkiai paveikė sintetinio oro srauto generatoriaus amplitudės ir dažnio charakteristikas [8].

Mokslininkai M Chiatto, F. Capuano, G. Coppola ir kt. [9] sukūrė fizinį modelį, kuris buvo patikrintas pagal sistemingus eksperimentinius bandymus, atliktus su trimis įmonėje pagamintais vykdikliais. Tipinio įtaiso eskizas pateiktas 15 ir 16 paveiksluose. Naudoti vykdikliai, kurių vieno membrana buvo pagaminta iš žalvario, o likusios dvi membranos aliumininės. Pagrindinės charakteristikos yra storis, kuris žalvarinei membranai buvo lygus 0,4 mm, aliumininėms po 0,25 mm; skersmuo – žalvarinei membranai buvo 41 mm, o membranoms iš aliumininio 41 ir 80 mm. Naudotų pjezoelektrikų skersmuo buvo 31,8 mm, o storis 0,191 mm. Ertmės skersmuo 41 mm (vienai aliumininei ir žalvarinei membranoms) ir 80 mm (kitai aliumininei membranai). Ertmės aukštis buvo 1,5 mm (naudota žalvarinė membrana), 2 mm (naudota aliumininė membrana) ir 5 mm (naudota aliumininė membrana). Angos skersmuo 2 mm ir 5 mm, ertmės aukštis buvo 2 mm. Išorinis žalvario vykdiklio trimatis vaizdas parodytas 16 pav., pabrėžiant jo

modulinę struktūrą, leidžiančią nepriklausomus ertmės skersmens ir aukščio, angos skersmens ir pjezoelektrinės diafragmos variantus. Naudota epoksidinė dervą, kad pjezoelektrinis elementas būtų sujungtas su membranomis.



**15 pav.** Sintetinis oro srovės generatorius, veikiantis dėl pjezoelektrinio elemento; kairėje – vaizdas iš viršaus; dešinėje – vaizdas iš apačios, kur matoma membrana ir pjezoelementas [9]



**16 pav.** Sintetinis oro srauto generatorius [9]

### 1.3. 3D spausdinimas

Pasak mokslininkų N Shahrubudin, R. Ramlan ir L. Te Chuan`o [10] 3D spausdinimas, palyginus su tradiciniu apdirbimu, yra objektų kūrimo procesas, veikiantis tiesiogiai sluoksniuojant medžiagas viena ant kitos, kol gaunamas reikiamas produktas. Sluoksniuojama įvairiais būdais, atsižvelgiant į naudojamą technologiją. Ši technologija leidžia spausdinti sudėtingus komponentus, dėl to gamybos procesas nereikalauja jokių papildomų išlaidų. 3D spausdinimas, kuriam nereikia jokių įrankių, žymiai sumažina pernelyg dideles išlaidas ir gamybos laiką. Spausdinimo procesas paprastai prasideda sukuriant 3D skaitmeninį modelį. Šį modelį galima sukurti naudojant bet kurią 3D programinę įrangą arba nuskaitant gaminį naudojant 3D skaitytuvą. Tuomet modelis sluoksniuojamas į dalis ir paverčiamas 3D spausdintuvui suprantamu failu. 3D spausdintuvu apdorota medžiaga yra sluoksniuota pagal sukurtą dizainą [10,18].

Yra daugybė būdų sluoksniams atspausdinti, kad būtų gautas baigtas produktas. Kai kurie būdai skystina medžiagą arba ją tiesiog suminkština, kad susidarytų sluoksniai, tuo tarpu kiti naudoja didelio galingumo UV lazerį fotopolimerui sukietinti. Kelios 3D spausdinimo technologijos, kurios šiais laikais yra plačiausiai naudojamos yra: [11,12,18]:

- 1) Stereolitografija (SLA)
- 2) Lydžios masės formavimas (FDM)
- 3) Selektyvus kietinimas lazeriu (SLS)
- 4) Laminuotų objektų gamyba (LOM)
- 5) Skaitmeninis šviesos apdorojimas (DLP)

Kaip parodyta 17 paveiksle, pats pirmasis 3D spausdinimo objekto žingsnis yra objekto modelio sudarymas naudojant CAD programinę įrangą [3]. Modelis apibūdina objekto geometrines savybes. Tada CAD failas konvertuojamas į STL failo formatą. Šis failo formatas nustato pradinio CAD modelio išorinius uždarus paviršius. Į STL failą taip pat įtraukiami kiekvieno atskiro sluoksnio duomenys, kurie yra naudojami sluoksnių skaičiavimams. STL failas išsiunčiamas į 3D spausdintuvą, o spausdintuvas yra nustatomas prieš kuriant procesą. Kartais spausdinta dalis nuimama ir siunčiama apdirbti. Dažnai objektas jau yra paruoštas pritaikymui [11].

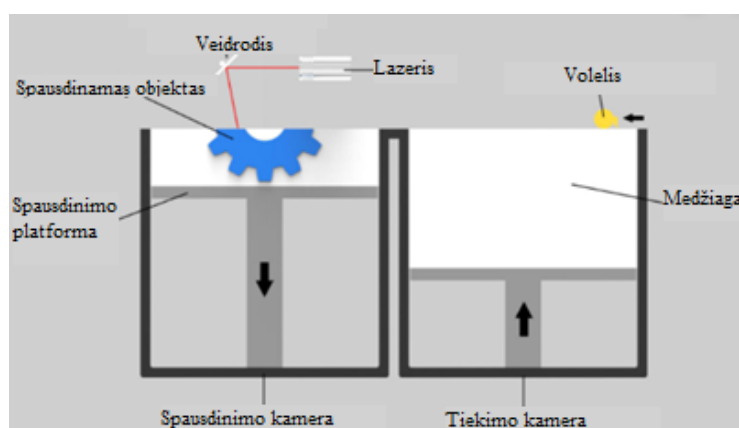


17 pav. 3D spausdinimo procesas (nuo modelio sukūrimo iki atspausdinto objekto) [11]

### 1.3.1. Selektivus kietinimas lazeriu

Autoriai A. Damanhuri`s, A. Hariri, M. Fauadi`s ir kt. [13] pabrėžia, kad viena iš šiuolaikinių 3D spausdinimo technologijų yra selektivus kietinimas lazeriu (SLS). Šio proceso metu mažos plastiko, keramikos ar stiklo dalelės sujungiamos kaitinant didelio galingumo lazerio spinduliu.

Selektyvusis kietinimas lazeriniu (SLS) yra gamybos procesas paremtas miltelių kietinimo technologija, paprastai skirtas greitam prototipų formavimui ir įrankių paruošimui. Lazerio spindulys, nepertraukiamai ar impulsiskai naudojamas kaip šilumos šaltinis sujungti miltelius iš anksto nustatytoms formoms. Po pirmojo sluoksnio nuskaitymo ant jo nusėda antras burių miltelių sluoksnis ir procesas kartojamas iš apačios į viršų, kol detalė pabaigiama [13,14].



18 pav. Selektivaus kietinimo lazeriu schema [13]

Pasak D. G. Bekas, Y. Hou, Y. Liu ir kt. [14], ši technologija paremta mišinio komponentų chemine reakcija naudojant selektyvųjį lazerio lydymą, tiesioginį metalo lazerinį kietinimą arba tiesioginį metalo perlydymą lazeriu.



Lazerinis kietinimas vyksta per labai trumpą laiko tarpą – milisekundžių tikslumu. Milteliai jungiasi dėl to, kad pirmiausia ištirpsta žemos lydymosi temperatūros komponentai arba visiškai ištirpsta visa masė. Kietinimas išlydant dalį miltelių yra labiausiai paplitusi praktika ir atliekama naudojant miltelių sistemas sudarytas iš žemo ir aukšto lydymosi temperatūros komponentų derinio. Tokiu atveju lazerio spinduliuotė kaitina miltelius, sukeldama tik žemos lydymosi temperatūros kietosios medžiagos lydymąsi, kuri vėliau lydydamasi jungiasi su aukštos lydymosi temperatūros komponentais [14,15,18].

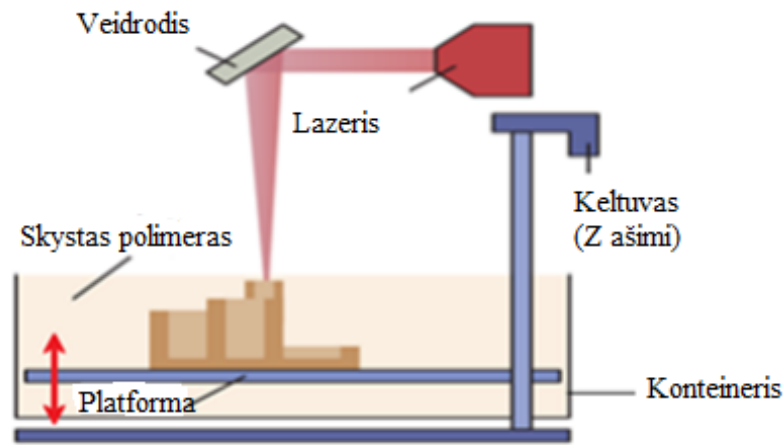


**19 pav.** Selektivaus kietinimo lazeriu modelis [23]

Vienas iš pagrindinių selektivaus kietinimo lazeriu pranašumų yra tas, kad jam nereikia jokių sudėtingų dalių struktūros palaikymo, kurio reikia tiek stereolitografijai, tiek lydžios masės formavimui. Kadangi spausdinama dalis guli ant miltelių pavidalo medžiagos pagrindo, nereikia jokių atramų. Šis pranašumas padeda sutaupyti medžiagų ir sumažina gamybos sąnaudas. Taip pat atspausdintos detalės nereikalauja didelio apdirbimo. Be to, selektyvus kietinimas lazeriu gali spausdinti geometrines figūras, kurių negalima atspausdinti naudojant kitą 3D spausdinimo metodą. Naudojant selektyvų kietinimą lazeriu, taip pat galima atspausdinti dalis su sudėtingais vidiniais elementais, todėl nėra problemų nuimti atramas ir sugadinti dalį. Dėl to sutaupomas laikas. Selektivių kietinimu lazeriu spausdintos dalys paprastai yra labai patvarios ir tvirtos. Ši technologija jau dabar konkuruoja su tradicinėmis technologijomis, pavyzdžiui, liejimo formomis, ir jau naudojama daugelyje pramonės šakų, pavyzdžiui, automobilių ir kosmoso. SLS gaminamos dalys gali būti iš įvairių medžiagų, tokių kaip plastikas, stiklas ir keramika, o tobulėjant technologijoms galima naudoti net metalą [15,16,18].

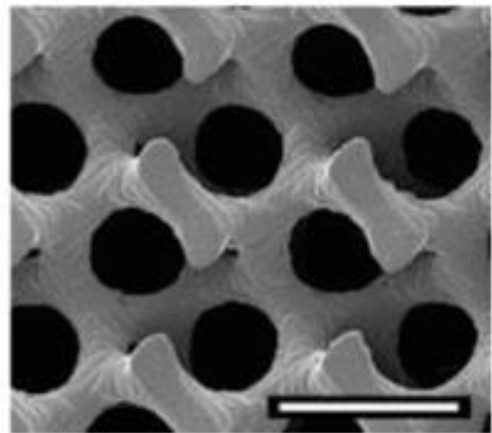
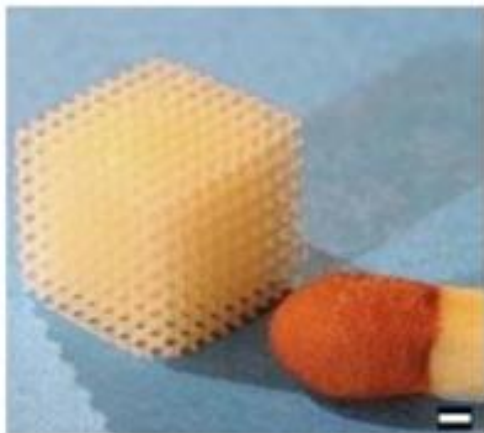
### **1.3.2. Stereolitografija**

Stereolitografija (SLA) yra pripažinta kaip originalus 3D spausdinimo procesas. SLA dažniausiai yra skirtas kurti modelius, prototipus ir šablonus. Tai yra taip pat lazerio veikimu paremtas procesas, tik šiuo atveju yra naudojamas ultravioletinis lazeris ir skysto fotopolimero indas dalims kurti. Lazerio spindulys pažymi kuriamos detalės taškus ant skysto polimero paviršiaus. Dėl ultravioletinio lazerio, atomų grandinės, esančios fotopolimero inde, susijungia ir polimeras sukietėja labai tiksliai [17].



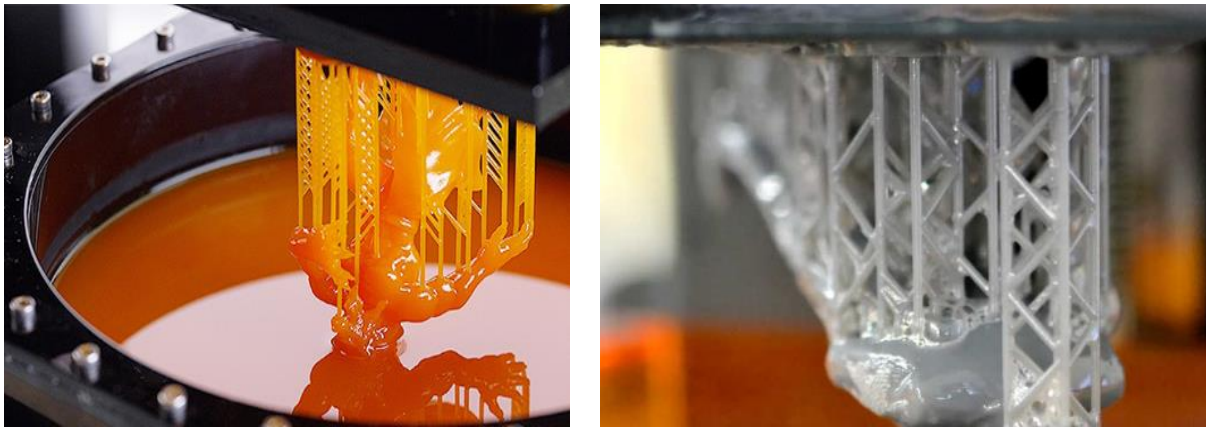
**20 pav.** Stereolitografijos procesas [17]

19 paveiksle parodytas SLA procesas. Indo vidus yra pripildytas polimeru, o taip pat indo viduje yra judanti platforma. Lazerio spindulys yra nukreiptas ties X-Y ašimi per viršutinį polimero paviršių, atsižvelgiant į įvestus duomenis į spausdintuvą. Fotopolimeras kietėja tiksliai ten, kur lazeris atsitrenkia į paviršių. Kai vienas sluoksnis yra baigtas, cisternos platforma šiek tiek pažemėja Z ašies kryptimi, o tada nustatomas antras sluoksnis. Šis procesas tęsiasi tol, kol visas objektas bus atspausdintas, o platforma iškelta iš talpyklos, kad ją būtų galima pašalinti. Stereolitografija reikalauja naudoti atramines konstrukcijas, kurios pritvirtinamos prie platformos, kad būtų išvengta deformacijos dėl sunkio jėgos. [18].



**21 pav.** Stereolitografijos būtų atspausdinti objektai (500  $\mu\text{m}$ ) [18]

Stereolitografijos proceso išlaidos yra gana didelės. Įprasta sistema gali kainuoti apie 250 000 USD, o didelės sistemos - beveik milijoną dolerių. Be to, masinės gamybos sistemos turi turėti gerą vėdinimo sistemą, nes gamybos proceso metu susidaro dūmai, o fotopolimero laikymui reikalinga kontroliuojama aplinka. Be to, fotopolimerai taip pat yra gana brangūs. Daugeliu atvejų pagamintos dalys turi būti perdirbtos ir nušlifuotos [19].

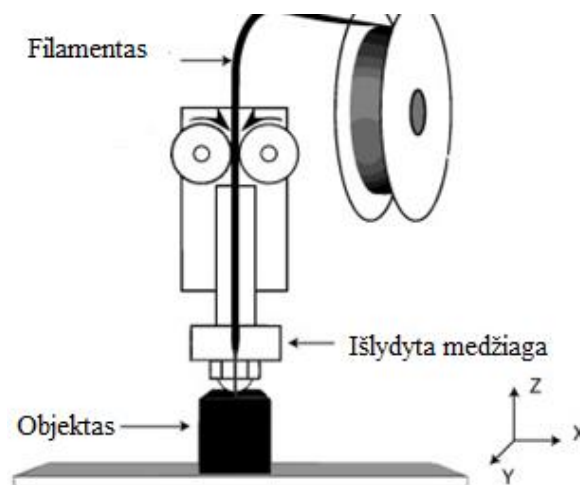


22 pav. Stereolitografijos procesas [24, 25]

Stereolitografija dažniausiai naudojama prototipams kurti, nes ji reikalauja mažiau laiko ir yra palyginti pigesnė, su kitais prototipų kūrimo metodais. Nepaisant to, SLA procesui reikalingos kai kurių dalių palaikomosios struktūros, daugiausia toms detalėms, kurios turi iškyšas. Apdorojant šias struktūras reikia rankiniu būdu atskirti laikymo struktūras. Vėlesni apdirbimo procesai taip pat apima cheminę vonią detalei išvalyti ir laikymą džiovyklėje, kad polimeras visiškai sukietėtų. SLA yra vienas tiksliausių 3D spausdinimo procesų, pasižymintis puikia paviršiaus apdaila ir lygesniu paviršiumi nei dauguma kitų greito prototipų kūrimo būdų. Lygus paviršius reikalingas aukšto tikslumo detalėms gaminti. Be to, dalys gali būti atspausdintos per labai trumpą laiką, atsižvelgiant į jų dydį ir formą. 22 paveiksle pavaizduotos kai kurios detalės, atspausdintos naudojant SLA [17-19].

### 1.3.3. Lydžios masės formavimas

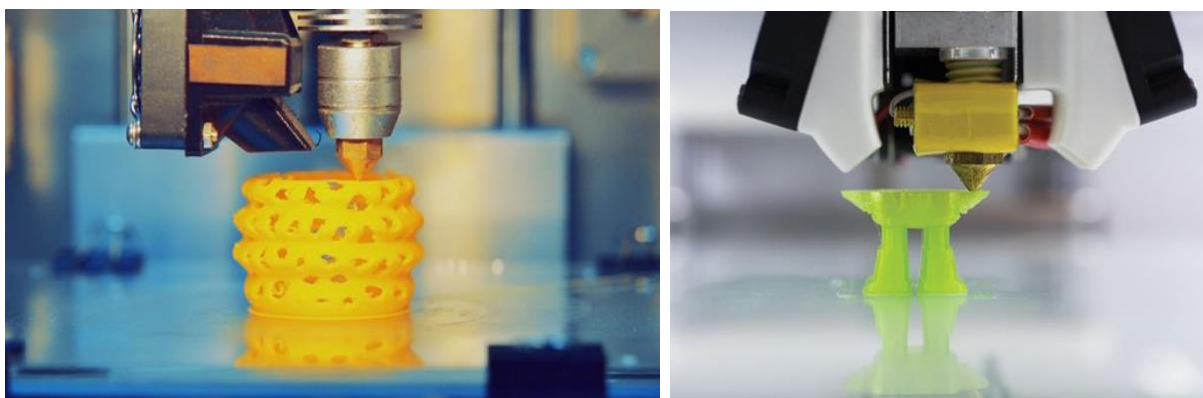
Lydžios masės formavimo (FDM) procesas yra technologija, horizontaliai liejanti termoplastinę medžiagą, tokią kaip ABS ir PLA (dvi dažniausiai naudojamos medžiagos). Medžiaga yra liejama iš purkštuko galvutės, sluoksniuojant medžiagos sluoksnius. Filamentas yra suminkštinamas ir išlydomas aukštesnėje nei lydymosi temperatūra, suskystėjusi medžiaga yra išstumiamą per purkštuką, kaip vientisas pluoštas [20].



23 pav. Lydžios masės formavimo proceso schema [18]

Lydzios masės formavimo (FDM) metu gali tecti spausdinti palaikančias konstrukcijas, kurios vėliau turėtų būti lengvai pašalinamos struktūros. Po objekto spausdinimo, formavimo, konstrukcinės priemonės rankiniu būdu pašalinamos, juos nuimant nuo detalės paviršiaus, o pastarosios ištirpinamos vandens ir tirpiklio tirpale, kuris nesąveikauja su detalės konstrukcine medžiaga [21].

Autoriai J. Skowrya, K. Pietrzak`a, M. A. Alhnan`as ir kt. [21] pažymi, kad nors pagrindinis lydzios masės formavimo principas yra gana aiškus, spausdinimo parametrai (filamento padavimo greitis, ekstruzijos plotis, spausdinimo greitis ir sluoksnio storis) yra susiję, nes lydzios masės formavimo sistemos greitis priklauso nuo padavimo greičio, o pastarasis taip pat priklauso nuo greičio, kuriuo galima išlydyti medžiagą ir tiekti ją per purkštuką [22].



24 pav. 3D spausdinimas lydzios masės formavimo būdu [26, 27]

Pasak S. Jasveer`as ir kt. [18] lydzios masės formavimas yra patikimas procesas, kuriam šiuo metu reikia nedidelių pradinių investicijų, taip pat naudojamos santykinai pigios medžiagos. Jis gali būti naudojamas mažose patalpose, trumpą laiką gaminant detales su plonomis sienomis, paliekant mažai atliekų (ribojant laikančiąsias konstrukcijas) ir suteikiant galimybę tame pačiame objekte ar sluoksnyje naudoti skirtingas medžiagas ar spalvas. Neigiama pusė yra, kad medžiagų, kurios gali būti naudojamos, lydymosi temperatūra turi būti žema, o jei dalims reikalingos atramos, jos turės nelygų paviršių ir grubią išvaizdą, todėl paviršiaus estetikai pagerinti prireiks daug laiko reikalaujančio rankų darbo.

3 lentelė. 3D spausdinimo technologijų palyginimas [18]

	SLA	FDM	SLS
<b>Taikymas</b>	Puikiai tinka įvairioms formoms išgauti Geriausias vandeniui atsparios medžiagos gaminimo procesas	Tinka prototipų kūrimui Galimas paprastas naudojimas butyje	Idealiai tinka įvairių paskirčių dalims gaminti Tinka sudėtingos formos objektams gaminti Atsparus karščiui ir chemikalams
<b>Tikslumas</b>	Tiksliausias spausdinimo procesas	Tikslus ir patikimas spausdinimas	Nelabai patikimas
<b>Medžiagos</b>	ABS Pusiaus lanksčios medžiagos	Termoplastikai	Nailonas

	<b>SLA</b>	<b>FDM</b>	<b>SLS</b>
<b>Paviršiaus kokybė</b>	Puikus paviršiaus apdirbimas	Standartinis paviršius	Standartinis paviršius
<b>Apdirbimas po spausdinimo</b>	Reikalauja papildomo apdirbimo po spausdinimo, reikia pašalinti palaikančiąsias struktūras	Reikalauja papildomo apdirbimo po spausdinimo, reikia pašalinti palaikančiąsias struktūras	Nereikalauja jokių palaikančiųjų struktūrų, dėl to nereikia papildomų procedūrų po spausdinimo

Apibendrinus literatūros duomenis, galima teigti, kad aktyvus srauto valdymas šiuo metu yra labai svarbi tyrimų sritis, gana dažnai susijusi su inžineriniais pritaikymais. Vis daugiau tyrimų atlikta su vykdikliais, kurių veikimas paremtas pjezoelektrinių medžiagų savybėmis. Pjezoelektrinės medžiagoms yra teikiama pirmenybė, nes jos pasižymi kompaktišku dydžiu, gali sukurti didelius poslinkius, tačiau reikalaujančius mažai energijos. 3D spausdinimas – vienas efektyviausių, pažangiausių ir greičiausių technologijų, leidžiančių sukurti reikiamo dydžio detales, nereikalaujant didelių investicijų ir ilgo proceso.

## 2. Metodinė dalis

Eksperimento metu buvo atspausdinta aštuonios 35 mm skersmens ir 0,5 mm storio membranų iš polilaktido (PLA), akrilnitrilo, stireno ir polibutadieno kopolimero (ABS), polikarbonato (PC) ir nailono. Medžiagos pasižymi skirtingomis savybėmis: PLA – didžiausiu tankiu, PC – turintis didžiausią stiklėjimo temperatūrą, stiprumo ribą lenkiant, lenkimo modulį. Tuo tarpu, nailonas pasižymi mažiausia stiklėjimo temperatūra, tamprumo ir lenkimo moduliu, tačiau medžiagų charakteristikoje nurodyta, kad jis pasižymi didžiausiu pailgėjimu iki takumo ribos ir pailgėjimu iki trūkimo. Medžiagų charakteristikos aprašytos 4 lentelėje [29].

**4 lentelė.** Naudotų termopolimerų fizikinės ir mechaninės savybės [29]

Medžiaga	Tankis	Stiklėjimo temperatūra	Tamprumo modulis	Stiprumo riba lenkiant	Lenkimo modulis	Pailgėjimas iki takumo ribos	Pailgėjimas iki trūkimo, %
PLA	1,24	60	2346,5	103	3,150	3,3	5,2
ABS	1,10	—	1618,5	70,5	2070	3,5	4,8
PC	1,18-1,20	112	2134	111	2410	—	6,4
Nailonas	1,14	50	579	24	263,5	20	210

Membranoms spausdinti naudotas Ultimaker 2+ spausdintuvas, veikiantis pagal lydžios masės formavimo technologiją. Spausdintuvo charakteristikos pateiktos 5 lentelėje.



**25 pav.** Naudotas Ultimaker 2+ spausdintuvas [28]

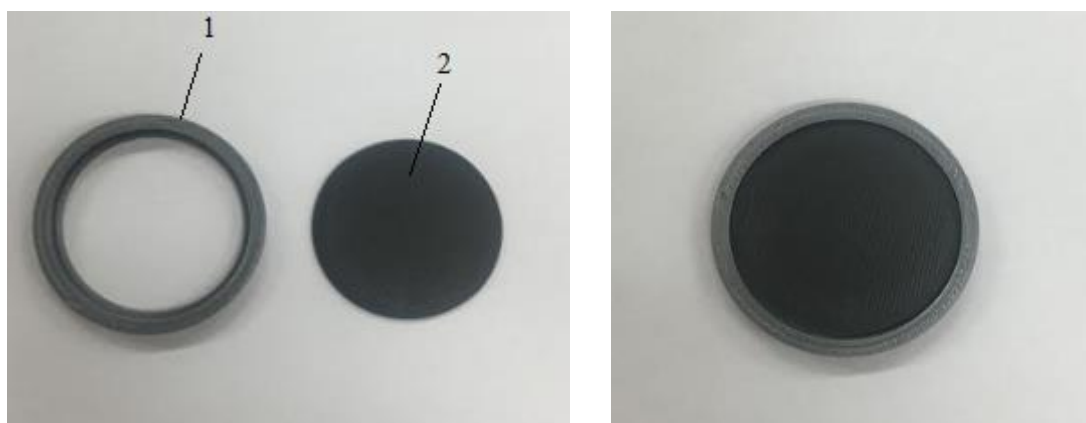
**5 lentelė.** Ultimaker 2+ spausdintuvo charakteristikos [28]

Spausdintuvo charakteristikos		
Platformos matmenys	223 × 223 × 205	
Sluoksnio storis	Purkštukas	Spausdinamo sluoksnio storis
	0,25	150-60 μm
	0,4	200-20 μm
	0,6	400-20 μm
	0,8	600-20 μm
XYZ raiška	12,5 12,5 5 μm	
Spausdinimo greitis	< 24 mm <sup>3</sup> /s	

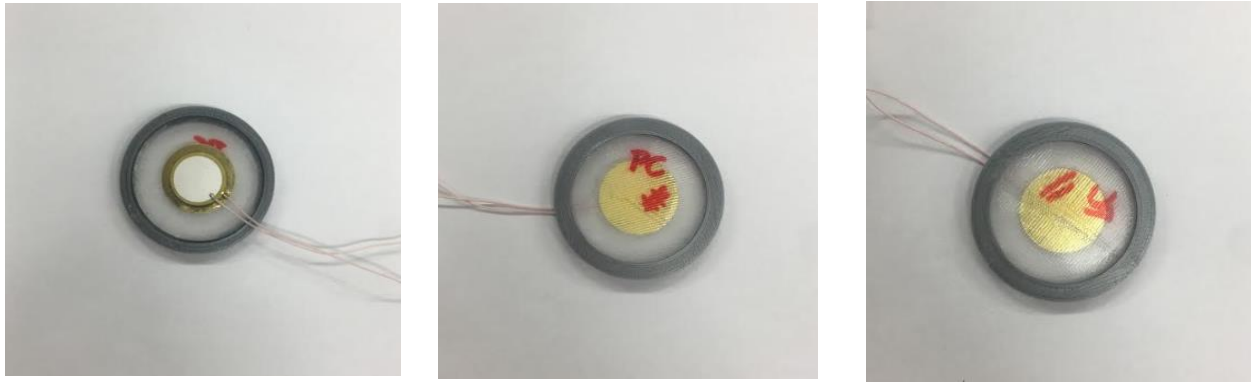
Membranos modelis sukurtas naudojantis Solidworks programa, vėliau sukurtas STL formato modelis, kuris yra pritaikytas spausdinimui. Spausdinti membranos buvo naudotas 0,25 purkštukas, parinktas sluoksnio aukštis 0,1 mm, modelis padalintas į penkis sluoksnius. Su kiekviena medžiaga atspausdintos dvi membranos. Parinktos dvi spausdinimo kryptys: kryžiuojant ir lygiagrečiai (užpildo linijų kryptys 45° ir 90°), naudotas 100% užpildymas. Spausdinant PLA naudotas 50 mm/s greitis, likusioms medžiagoms 45 mm/s. Spausdinimo temperatūra kito nuo 200 iki 270 °C, o platformos temperatūra spausdinimo metu kito nuo 60 iki 107 °C. Spausdinimo duomenys pateikti 6 lentelėje.

**6 lentelė.** Spausdinimo charakteristikos

Medžiaga	Spausdinimo temperatūra, °C	Platformos temperatūra, °C	Sluoksnio aukštis, mm	Spausdinimo greitis, mm/s	Perimetro linijų skaičius	Užpildo linijų kryptis	Užpildymas, %
PLA	200	60	0,1	50	3	45° ir 90°	100
ABS	230	80		45			
PC	270	107		45			
Nailonas	245	60		45			



**26 pav.** Atspausdintas laikiklis (1) ir membrana (2)

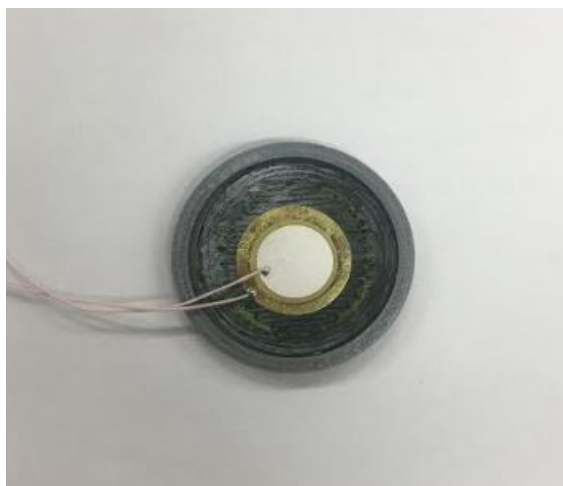


**27 pav.** Į laikiklį įtvirtinta membrana; čia 1- pjezoelektrinis vykdiklis; 2 – įtvirtinta polikarbonato kryžiuotai spausdinta membrana su pjezoelektriniu vykdikliu; 3 – įtvirtinta polikarbonato lygiagrečiai spausdinta membrana su pjezoelektriniu vykdikliu

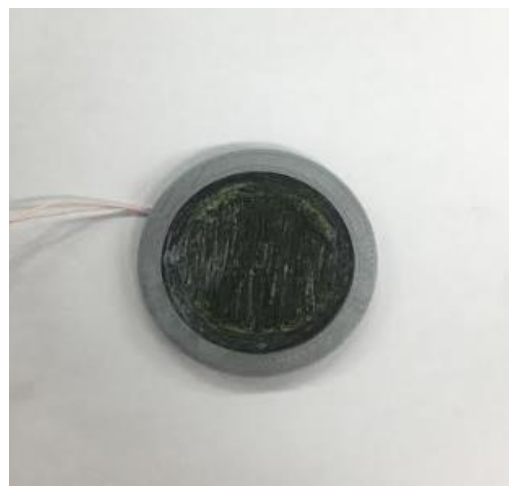
Taip pat buvo atspausdinta membrana iš PLA ir anglies pluošto, tačiau jos spausdinimas ir struktūra skyrėsi nuo kitų membranų. PLA kompozito sudėtyje naudotas kaip matrica. Šis kompozitas buvo spausdintas su modifikuotu Mecreator 2 spausdintuvu.

**7 lentelė.** Kompozitinio bandymo spausdinimo parametrai

Parametrai:	
Spausdinimo greitis:	1 mm/s
Plastiko (padavimo) procentas:	70 %
Atstumas tarp spausdinimo linijų:	1,2 mm
Sluoksnio aukštis:	0,3 mm
Sluoksnių skaičius:	2



a

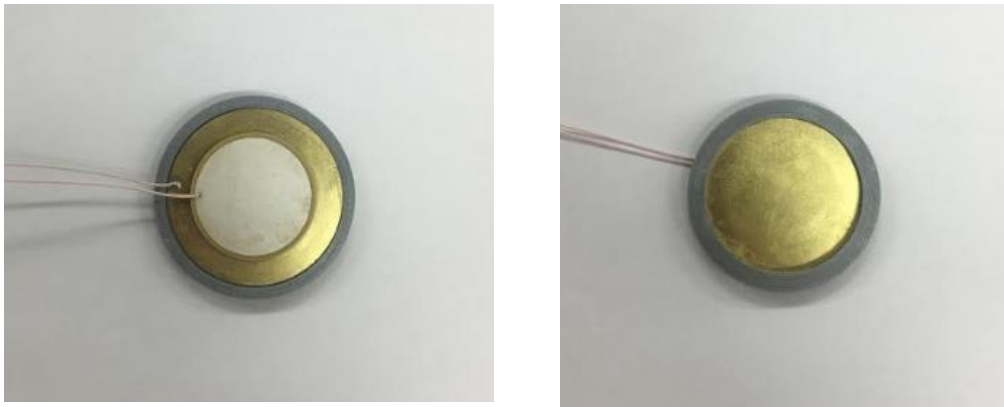


b

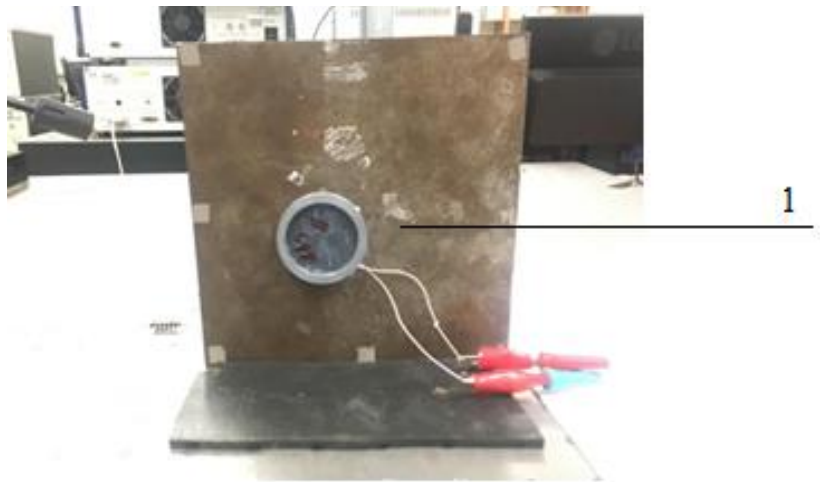
**28 pav.** Kompozitinė membrana (a – membrana su pjezoelektriniu vykdikliu; b – membrana įtvirtinta laikyklyje)

Palyginimui buvo pamatuotas pirktas pjezoelektrinio vykdiklio, įtaisyto laikyklyje poslinkiai.

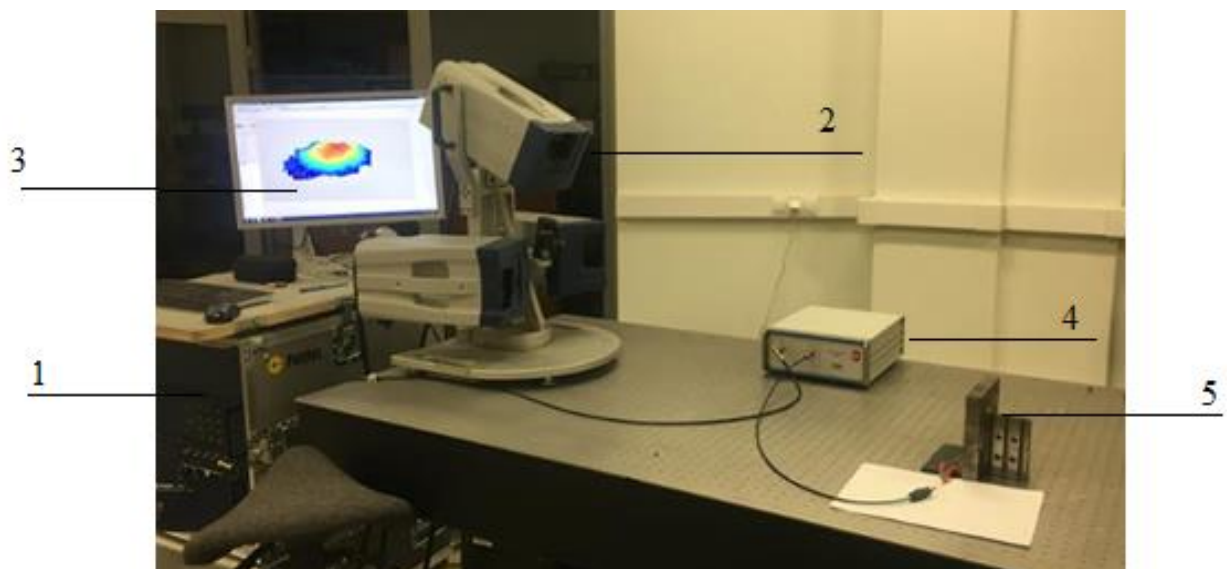




**29 pav.** Pjezoelektrinis vykdiklis įtvirtintas laikikyje



**30 pav.** Matavimams paruoštas bandinys (1 – membrana pritvirtinta laikikyje, su pjezoelektriniu vykdkliu)



**31 pav.** Matavimų stendas Polytec 3D lazerinis vibrometras: 1 – signalų generatorius; 2 – trys skanavimo kameros skirtos 3D virpesių matavimams; 3 – valdymo vienetas; 4 – stiprintuvas P200; 5 – bandinio vieta

Tam, kad nustatyti virpesių modų formas ir poslinkio amplitudes visame membranos paviršiuje, buvo naudojama eksperimentinė įranga pavaizduota 32 paveiksle. Ji susideda iš: programuojamo signalų generatoriaus (TTi TGA4121 atsiktinių funkcijų generatorius 40MHz, aukštos įtampos stiprintuvas (1 kHz - 150 kHz dažnių zona), Polytec lazerinio vibrometro (dažnis iki 1.5 MHz, poslinkių matavimų diapazonas mažesnis už 1 nm) ir kompiuterio su instaliuota PSV 8.8 programa.

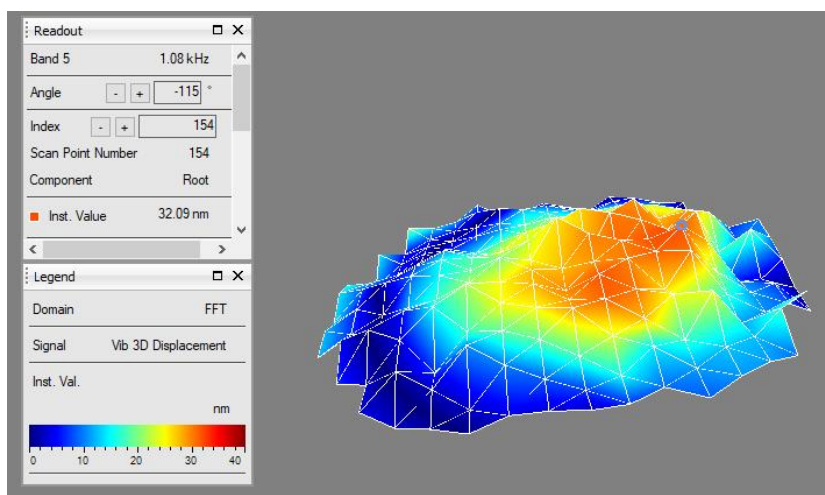
### 3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Eksperimento metu buvo ištirtos iš keturių skirtingų medžiagų spausdintos membranos. Prie visų šių membranų klijuoti 21 mm skersmens pjezoelektriniai vykdikliai, sudaryti iš žalvarinės plokštelės ir pjezoelektrinės keramikos. Lydžios masės formavimo technologijos būdu gamintos membranos buvo spausdintos dvejomis kryptimis (lygiagrečiai, kai spausdinimo kryptis yra  $90^\circ$  ir kryžiuotai –  $45^\circ$  spausdinimo kryptis). Prie šių membranų buvo pritvirtinti pjezoelektriniai vykdikliai, šios sistemos (vėliau vadinamos pjezoelektrine membrana) veiktos 5 V ir 10 V įtampoms. Ištirtos membranų rūšys:

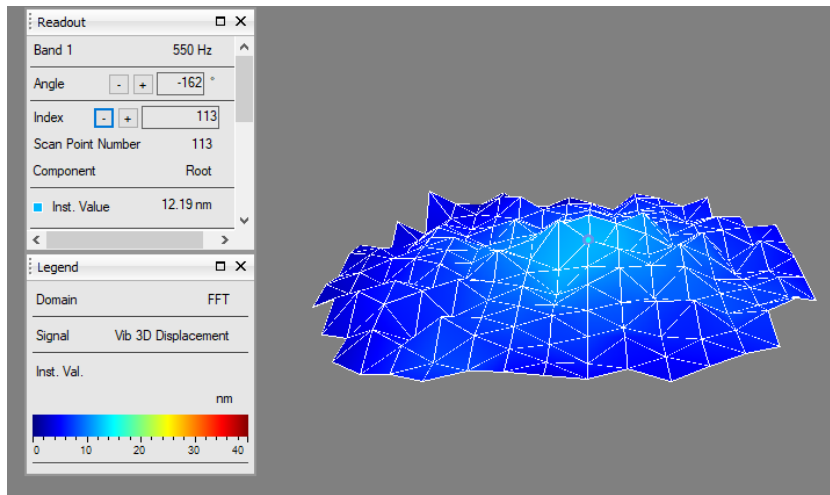
1. Lygiagrečiai spausdinta:
  - Veikta 5 V įtampa: PLA, PC, ABS, nailonas.
  - Veikta 10 V įtampa: PLA, PC, ABS, nailonas.
2. Kryžiuotai spausdinta:
  - Veikta 5 V įtampa: PLA, PC, ABS, nailonas.
  - Veikta 10 V įtampa: PLA, PC, ABS, nailonas.

Taip pat buvo atspausdinta membrana iš anglies pluošto ir PLA, kuri veikta 5 V ir 10 V įtampa. Palyginimui buvo pamatuoti pirktos, pramoniniu būdu gaminto pjezoelektrinio vykdiklio, sudaryto iš žalvarinės membranos ir pjezoelektriko, poslinkiai. Šio pjezoelektrinio vykdiklio poslinkiai gauti, veikiant vykdiklį tomis pačiomis įtampomis kaip ir kitas, spausdintas membranas.

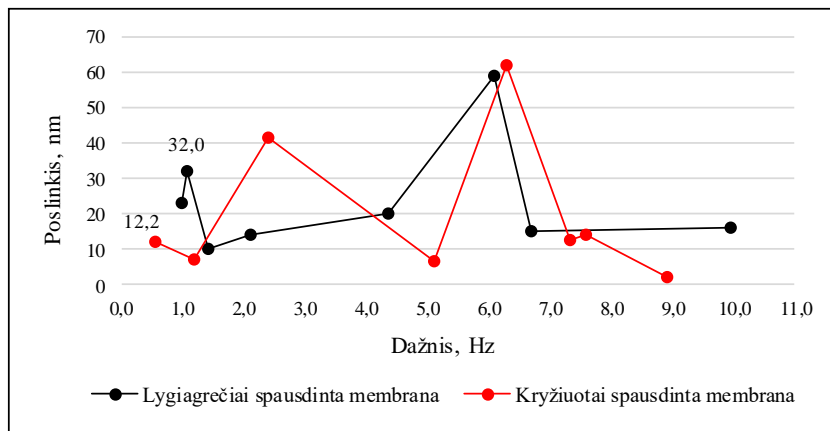
Eksperimento metu nustatyta, kad lygiagrečiai spausdintą membraną iš polikarbonato (PC), veikiant 5 V įtampa, pirmoji moda stebima esant 1,08 kHz dažniui (32 pav.), tuo metu galima stebėti membranos poslinkį, kuris yra apie 32 nm. Lygiagrečiai spausdintos polikarbonato membranos didžiausias poslinkis stebimas esant 6,08 kHz dažniui ir yra lygus 53,8 nm. Tuo tarpu, kryžiuotą membraną spausdintą iš polikarbonato, veikiant 5 V įtampa, pirmoji moda stebima esant 550 Hz dažniui ir yra sukuriamas tik apie 12,2 nm poslinkis (33 pav.). Šiuo atveju, didžiausias poslinkis (61,58 nm) yra esant 6,28 kHz dažniui. Pažymėtina, kad lyginant lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintas membraną veikiant 5 V įtampa, lygiagrečiai membrana pasižymėjo didesniu poslinkiu pirmame rezonansiniame dažnyje, kuris buvo beveik net 3 kartus didesnis ir lygus 32 nm (34 pav.).



32 pav. PC lygiagrečiai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa

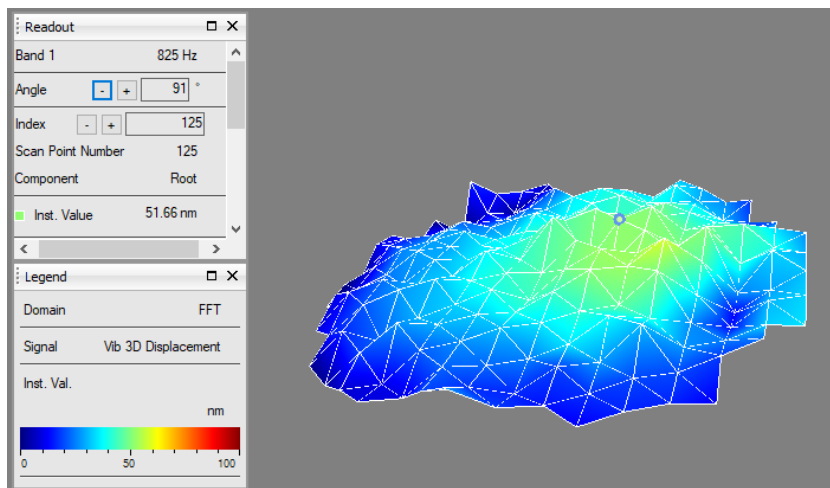


33 pav. PC kryžiuotai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa

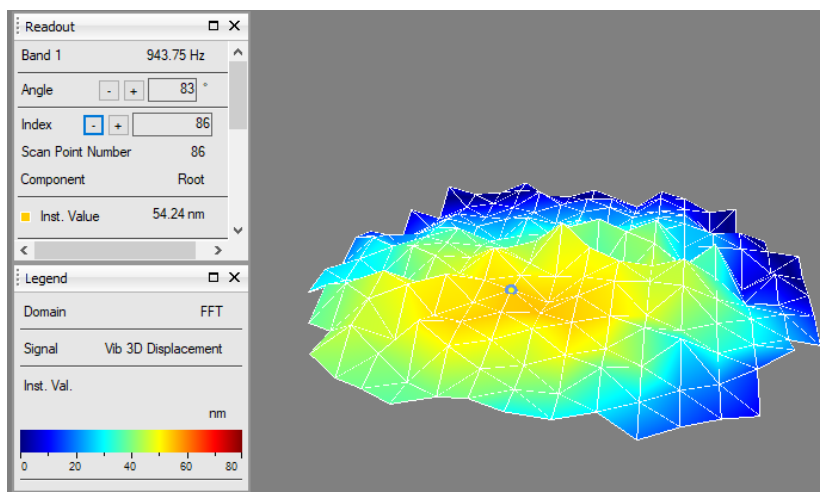


34 pav. PC lygiagrečiai ir kryžiuotai spaudintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 5 V įtampa

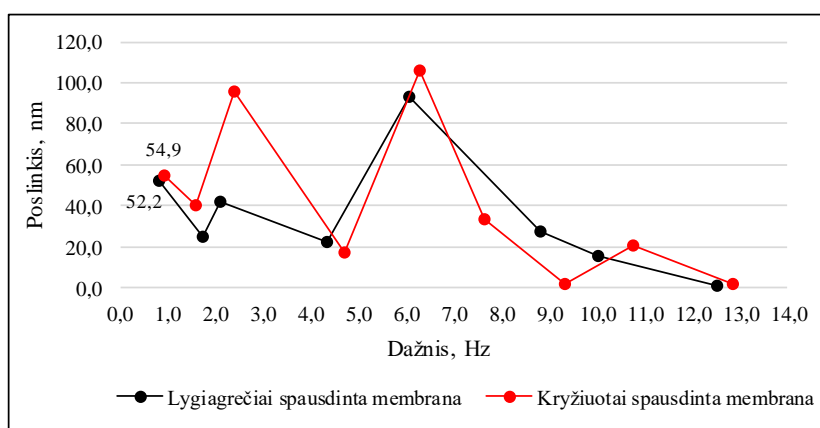
Nustatyta, kad lygiagrečiai spaudintos membranos iš polikarbonato, veikiamos 10 V įtampa, pirmoji moda pastebima esant 825 Hz dažniui, šios membranos poslinkis yra 52,2 nm (35 pav.), o didžiausias poslinkis stebimas esant 6,06 kHz dažniui ir yra lygus 93,2 nm. Išmatavus kryžiuotai spaudintą membraną, nustatytas poslinkis yra 54,9 nm esant 943,75 Hz dažniui (36 pav.), o didžiausias poslinkis yra 105,6 nm, kai dažnis yra 6,29 kHz.



35 pav. PC lygiagrečiai spaudintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa

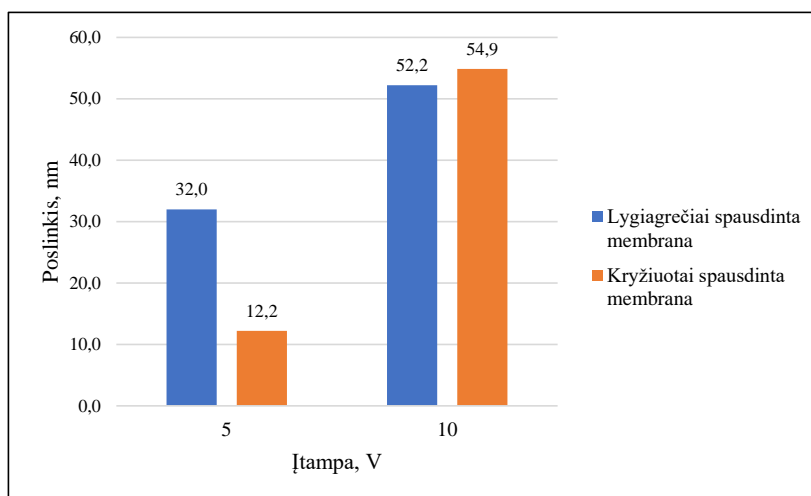


36 pav. PC kryžiuotai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa.



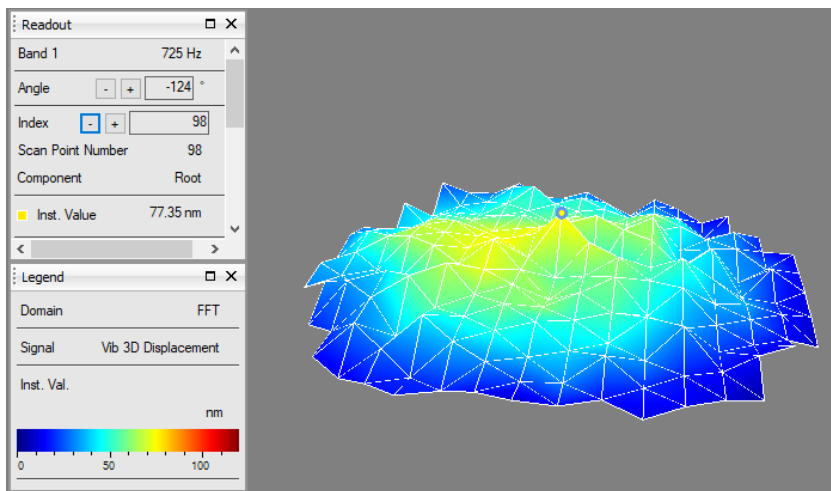
37 pav. PC lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 10 V įtampa

Membranas veikiant 10 V įtampa, lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintų membranų poslinkiai pirmame rezonansiniame dažnyje buvo labai panašūs. Lygiagrečiai spausdintos membranos poslinkis – 52,2 nm, o kryžiuotai – 54,9 nm (37 pav.). Visos polikarbonato membranos veiktos 10 V įtampa sukūrė didesnę poslinkį (38 pav.), nei veiktos 5 V įtampa.



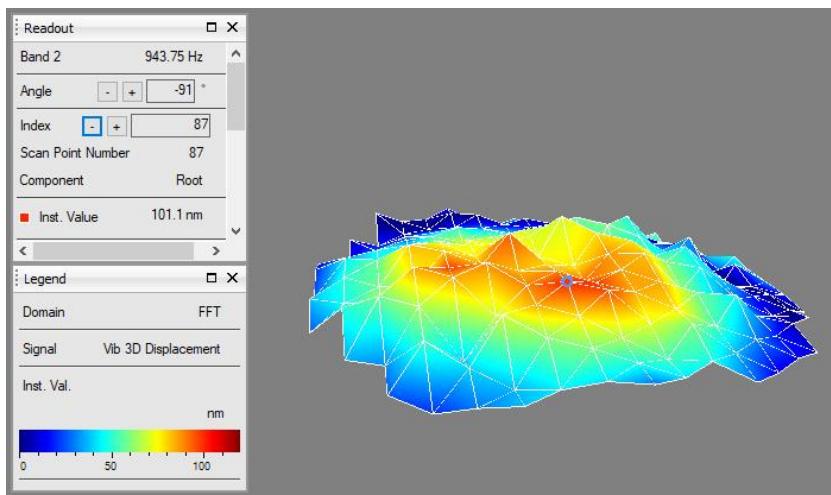
38 pav. Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš PC spausdintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtampos palyginimas

Išmatavus membranos spausdintos iš akrilnitrilo, butadieno ir stireno termopolimero (ABS) poslinkius, kai spausdinimo kryptis buvo lygiagreči, pastebėta, kad 1 modos poslinkis yra 77,4 V, kai membrana yra veikiamą 5 V įtampa ir esant 725 kHz dažniui (39 pav.). Akrilnitrilo, butadieno ir stireno termopolimero didžiausias poslinkis stebimas esant 5,56 kHz dažniui ir yra lygus 82,0 nm.



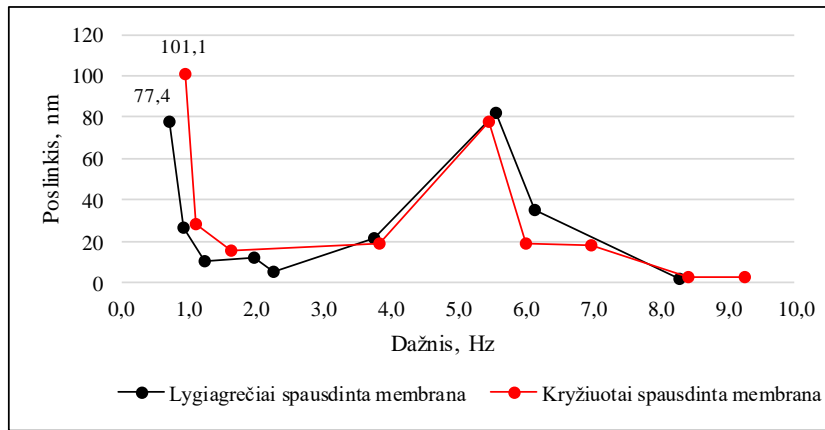
**39 pav.** ABS lygiagrečiai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5V įtampa

Tuo tarpu, išmatavus kryžiuotai spausdintos membranos iš akrilnitrilo, butadieno ir stireno termopolimero (ABS) poslinkius, 1 moda pastebima esant 934,75 Hz įtampai, o šiame dažnyje poslinkis yra lygus 101,1 nm (40 pav.). Šiuo atveju, tai buvo didžiausias poslinkis, koks buvo pastebėtas veikiant ABS kryžiuotai spausdintą membraną 5 V įtampa.



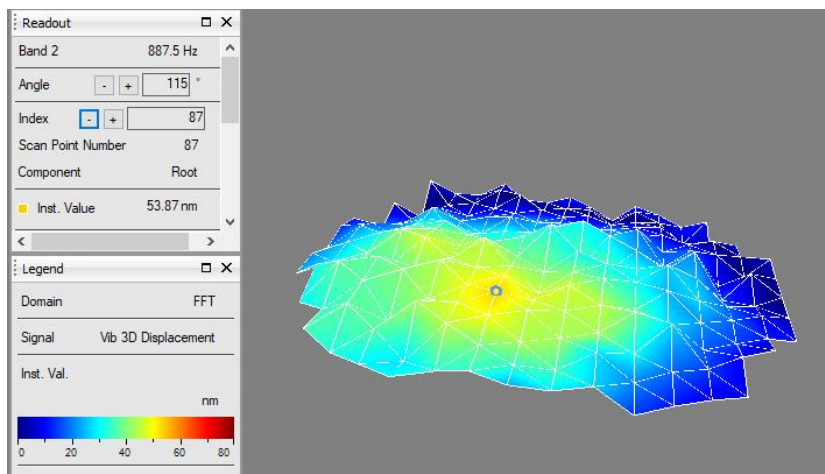
**40 pav.** ABS kryžiuotai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa

Palyginus poslinkius matomus lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintas iš akrilnitrilo, butadieno ir stireno termopolimero membranas, veikiant 5 V įtampa, pastebima, kad pirmosios modos poslinkis yra 101,1 nm, membranos, kurios spausdinimo kryptis buvo 45° (kryžiuotai), nei tos membranos, kurios spausdinimo kryptis buvo 90° (lygiagrečiai) – 53,9 nm. Kryžiuotai spausdintos membranos poslinkis šiuo atveju buvo beveik du kartus didesnis, nei lygiagrečiai spausdintos (41 pav.).



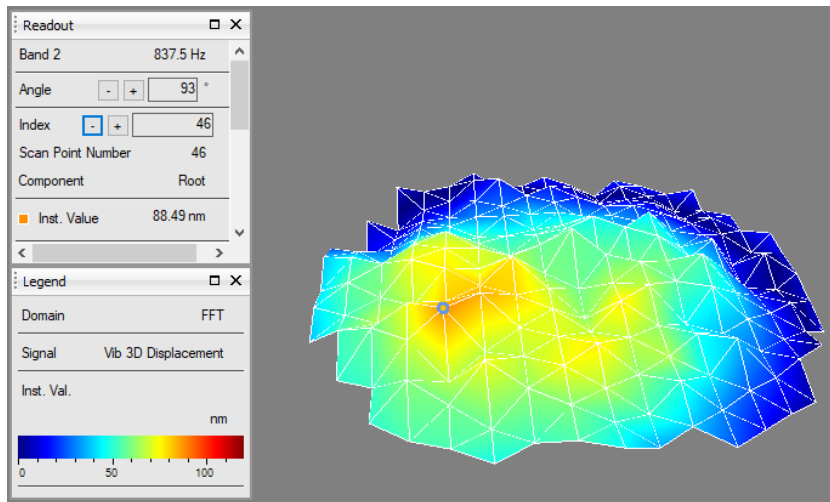
**41 pav.** ABS lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 5V įtampa

Tuomet ištyrus akrilnitrilo, butadieno ir stireno termopolimero lygiagrečiai spausdintą membraną, ją veikiant 10 V įtampa, poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, kai šis yra lygus 887,5 Hz, yra apytiksliai 53,9 nm (42 pav.). Didžiausias poslinkis lygiagrečiai spausdintai membranai iš ABS buvo 78,4 nm ir šis poslinkis matomas esant 5,46 kHz.

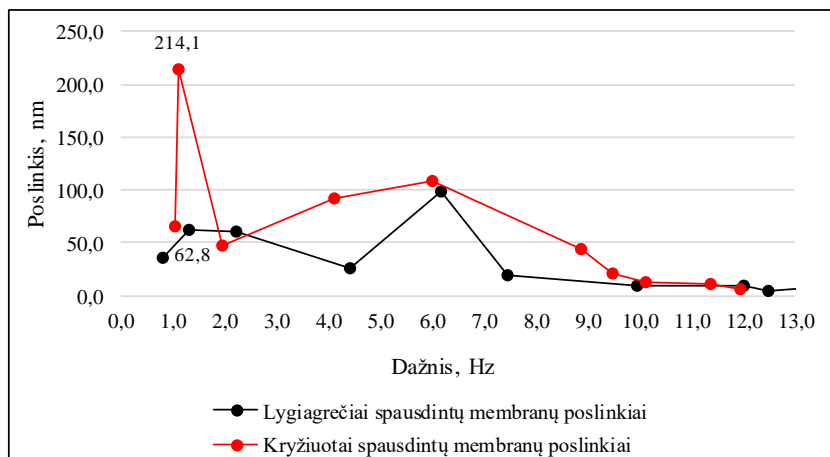


**42 pav.** ABS lygiagrečiai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa

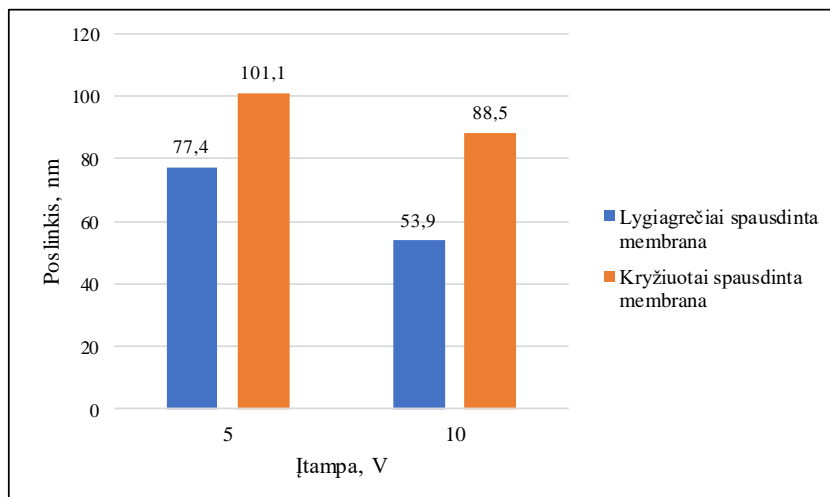
Tuo tarpu, veikiant kryžiuotai spausdintą membraną iš ABS 10 V įtampa, pirmosios modos matomas poslinkis yra 88,5 nm, esant 837,5 Hz dažniui (43 pav.). Didžiausias poslinkis taip pat buvo stebėtas pirmame rezonansiniame dažnyje. Šiuo atveju galima teigti, kad didesnis poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje yra matomas taip pat kryžiuotai spausdintoje membranoje (88,5 nm), nei lygiagrečiai spausdintoje (53,9 nm). Rezultatų palyginimas pateiktas 44 paveiksle. Lyginant poslinkius išgautus membranose, paaiškėjo, kad 5 V įtampa veiktos membranos pirmame rezonansiniame dažnyje pasižymėjo didesniu poslinkiu, atitinkamai 77,4 nm ir 101,1 nm, o veikiant 10 V įtampa poslinkiai buvo tik 53,9 nm ir 88,5 nm (45 pav.).



43 pav. ABS kryžiuotai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa



44 pav. ABS lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 10V įtampa

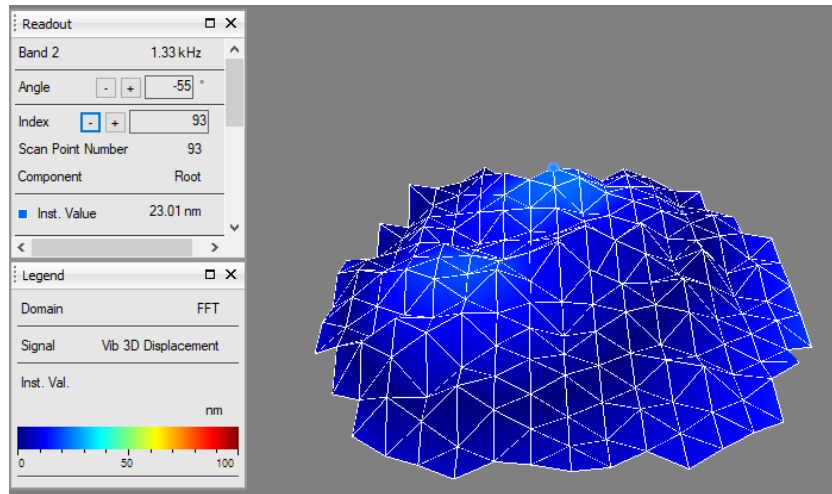


45 pav. Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš ABS spausdintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtamos palyginimas

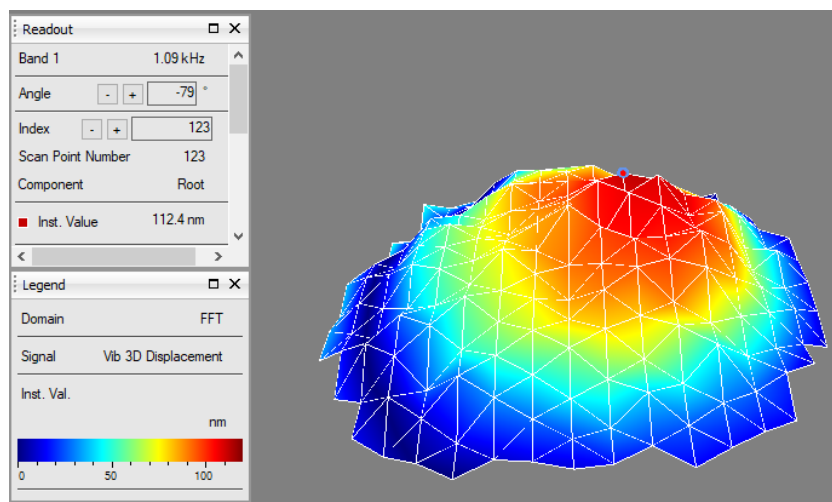
Eksperimento metu ištyrus lygiagrečiai spausdintą membraną iš poliaktido (PLA), veikiant ją 5 V įtampa, 1 moda stebima esant 1,33 kHz, o poslinkis yra apie 23,0 nm (46 pav.). Šios membranos didžiausias poslinkis yra lygus apie 37,8 nm, kai dažnis yra 6,24 kHz. Kryžiuotai iš poliaktido



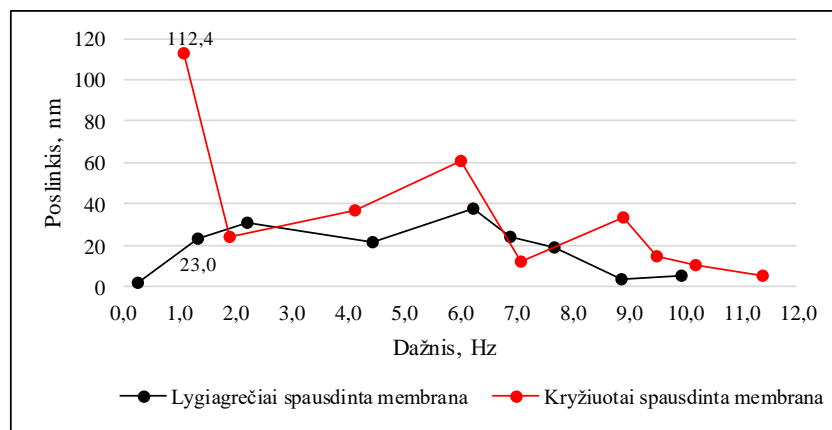
spausdintai membranai išmatavus 1 modos poslinkį, veikiant 5 V įtampai, pastebėta, kad pirmame rezonansiniame dažnyje (1,09 kHz) šis yra net 112,4 nm (47 pav.), kas kartu buvo ir šios membranos didžiausias matomas poslinkis. Taigi, akivaizdu, kad kryžiuotai spausdinta membrana pasižymėjo beveik tris kartus didesniu poslinkiu pirmame rezonansiniame dažnyje (112,4 nm), nei lygiagrečiai spausdinta membrana (23 nm). Rezultatų palyginimas pateiktas 48 paveiksle.



46 pav. PLA lygiagrečiai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5V įtampa

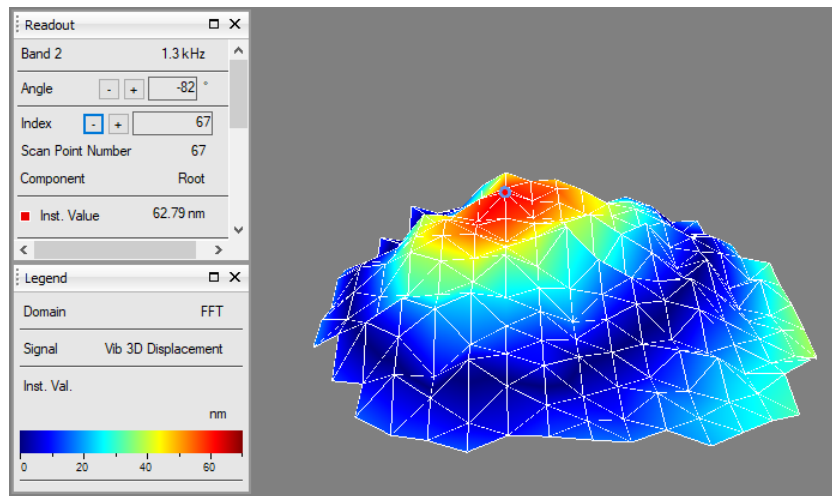


47 pav. PLA kryžiuotai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 5 V įtampa



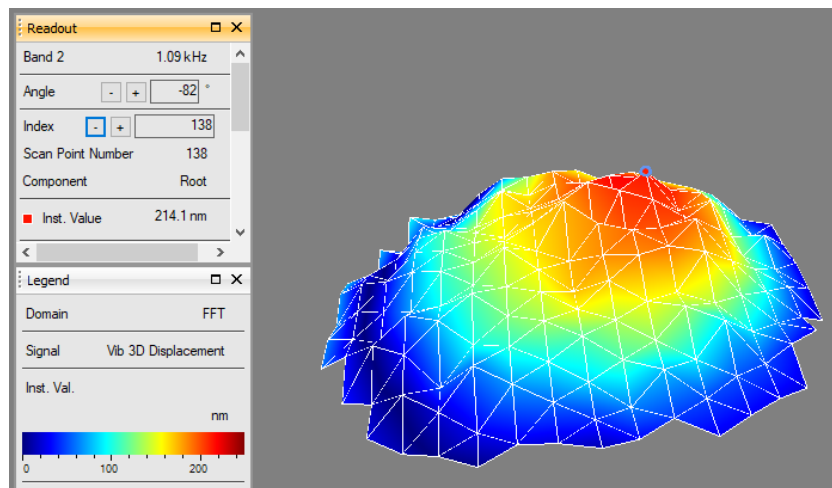
48 pav. Iš PLA spausdintų membranų poslinkių kreivės, veikiant jas 5 V įtampa

Panaši tendencija matyti ir ištyrus PLA membranas, jas veikiant 10 V įtampa. Lygiagrečiai spausdintos membranos poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, kai šis yra lygus 1,33 kHz yra apytiksliai 62,8 nm (49 pav.). Didžiausias apytiksliai 99,0 nm poslinkis stebėtas esant 6,17 kHz dažniui.



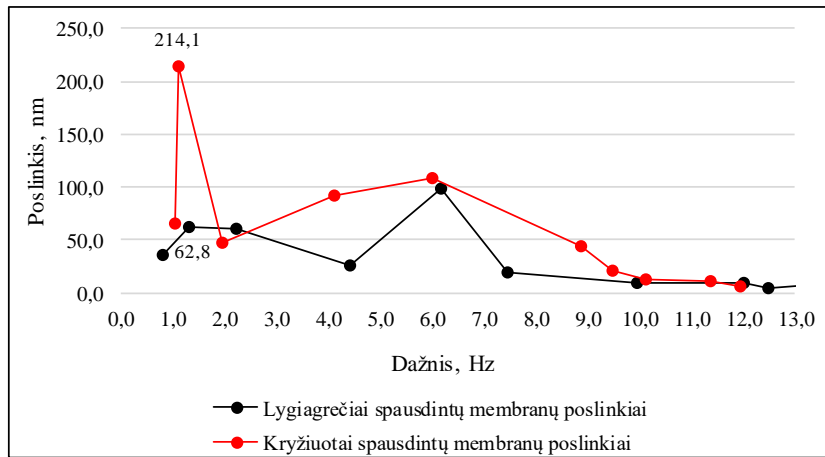
**49 pav.** PLA lygiagrečiai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10V įtampa

Kaip ir veikiant membraną 5 V įtampa, taip ir veikiant 10 V įtampa kryžiuotai spausdinta membrana pasižymėjo ypatingai dideliu poslinkiu, kuris pirmame rezonansiniame dažnyje (1,09 kHz) buvo net 214,1 nm (50 pav.), tai taip pat buvo didžiausias poslinkis, gautas matuojant šios membranos poslinkius įvairiuose dažniuose.

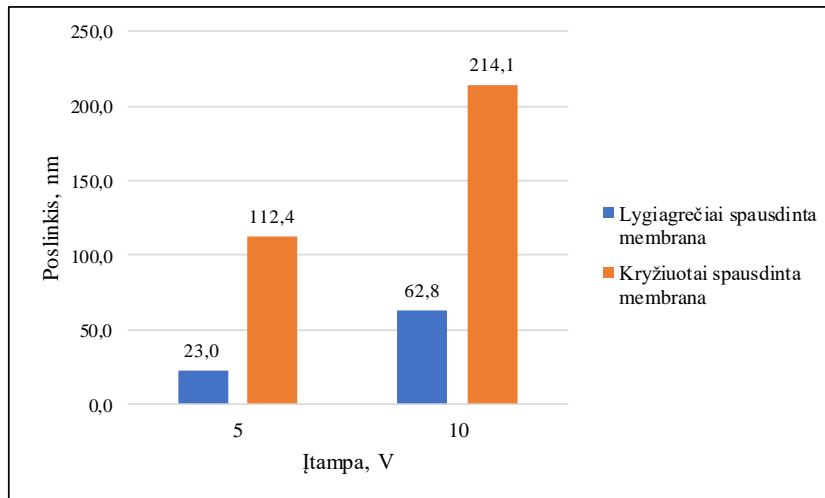


**50 pav.** PLA kryžiuotai spausdintos membranos 1 moda, veikiant membraną 10 V įtampa

Kaip matyti iš 51 paveikslo, 10 V įtampa veikta kryžiuotai spausdinta membrana pasižymėjo beveik 3,5 karto didesniu poslinkiu, nei lygiagrečiai spausdinta. Šiuo atveju, membranos veiktos 10 V įtampa sukūrė didesnius poslinkius pirmame rezonansiniame dažnyje – 62,8 nm ir 214,1 nm, o 5 V veiktos membranos tik 23 nm ir 112, 4 nm (52 pav.).

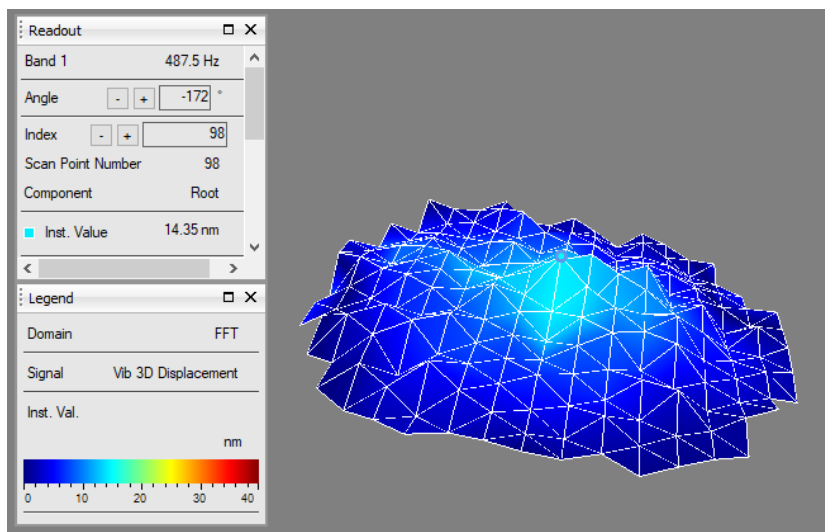


51 pav. Iš PLA spausdintų membranų poslinkių kreivės, veikiant jas 10 V įtampa



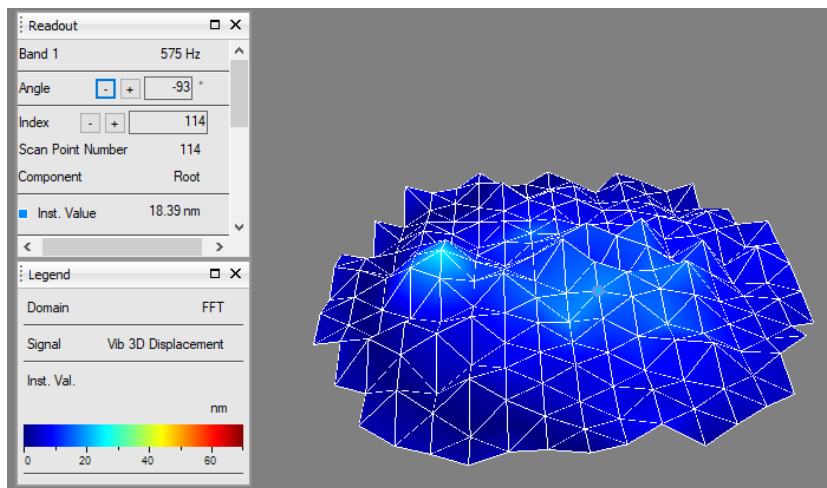
52 pav. Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš PLA spausdintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtampos palyginimas

Ištirus membranas iš nailono, kurios buvo veikiamos 5 V įtampa, lygiagrečiai spausdintos membranos poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, kai šis buvo apie 487 kHz yra apytiksliai 14,4 nm (53 pav.), o didžiausias poslinkis 25,1 nm stebimas esant 5,66 kHz dažniui.

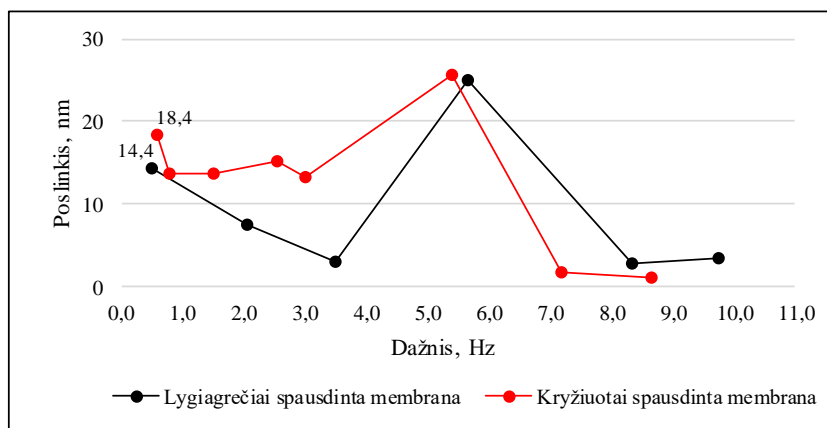


53 pav. Nailono lygiagrečiai spausdinta membrana, veikiant membraną 5 V įtampa

Ta pačia įtampa veikiant ir iš nailono kryžiuotai spausdintą membraną 1 modos poslinkis (apie 18,4 nm) stebimas esant 575 kHz dažniui, o didžiausias poslinkis (25,7 nm) yra esant 5,41 kHz (54 pav.). Ir šiuo atveju membranų poslinkiai buvo labai artimi (55 pav.), tačiau kryžiuotai spausdinta membrana pirmame rezonansiniame dažnyje pasižymėjo nežymiai didesniu poslinkiu atitinkamai 14,4 nm (lygiagrečiai spausdinta) ir 18,4 nm (kryžiuotai spausdinta).

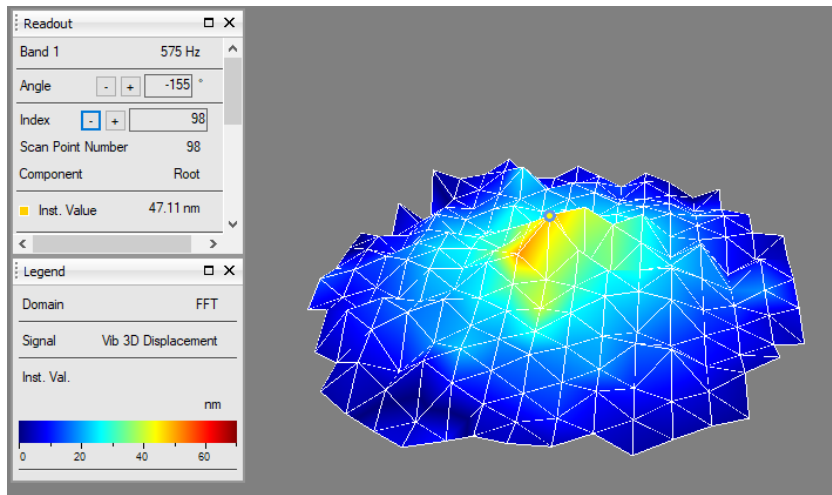


54 pav. Nailono kryžiuotai spausdinta membrana, veikiant membraną 5 V įtampa

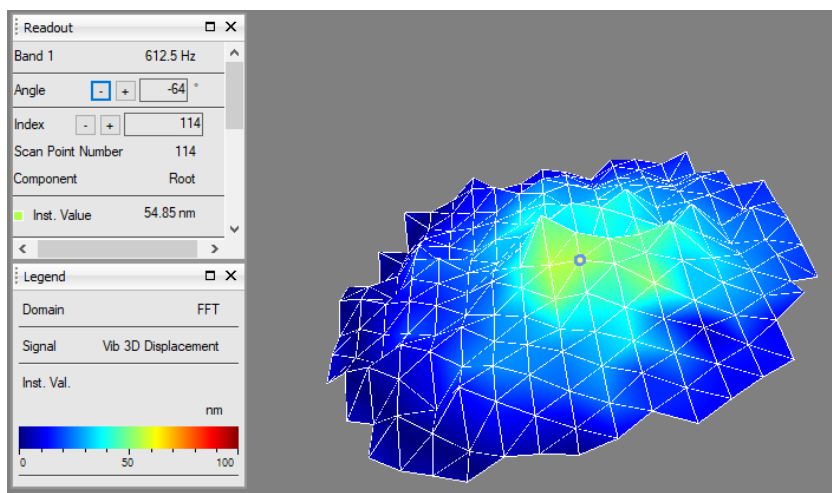


55 pav. Nailono lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 5 V įtampa

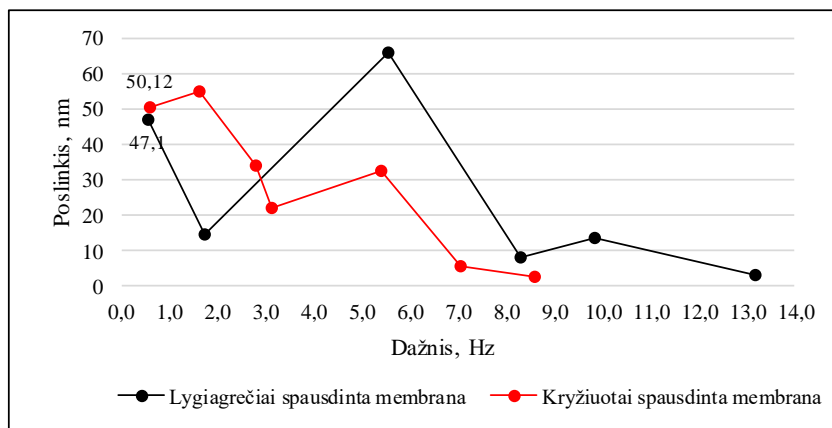
Nailono membranas veikiant 10 V įtampa, lygiagrečiai spausdintai membranai 1 moda stebima esant 575 Hz, tame dažnyje poslinkis yra apie 65,85 nm (56 pav.), o didžiausias poslinkis (65,9 nm) yra esant 5,56 kHz dažniui. Kryžiuotai spausdintos membranos poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje (1,61 kHz) yra 54,9 nm (57 pav.), o didžiausias poslinkis (79,4 nm) stebimas esant 5,39 kHz dažniui. 58 paveiksle lyginant kryžiuotai ir lygiagrečiai spausdintas membranas iš nailono, pastebima, kad didesnę poslinkį galima matyti taip pat membranoje, kurios spausdinimo kryptis  $45^\circ$  (50,1 nm) nei, kai spausdinimo kryptis  $90^\circ$  (47,1 nm). Šiuo atveju, membranos veiktos 10 V įtampa pirmame rezonansiniame dažnyje pasižymėjo žymiai didesniu poslinkiu, nei veiktos 5 V įtampa (14,4 nm ir 18,4 nm – lygiagrečiai spausdintų membranų poslinkiai ir 47,1 nm ir 50,1 nm – kryžiuotai spausdintų membranų poslinkiai (59 pav.).



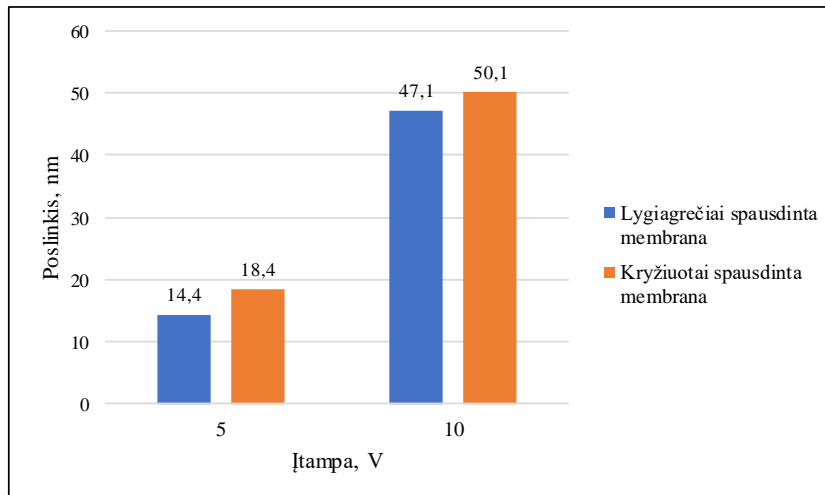
56 pav. Nailono lygiagrečiai spausdinta membrana, veikiant membraną 10 V įtampa



57 pav. Nailono kryžiuotai spausdinta membrana, veikiant membraną 10 V įtampa

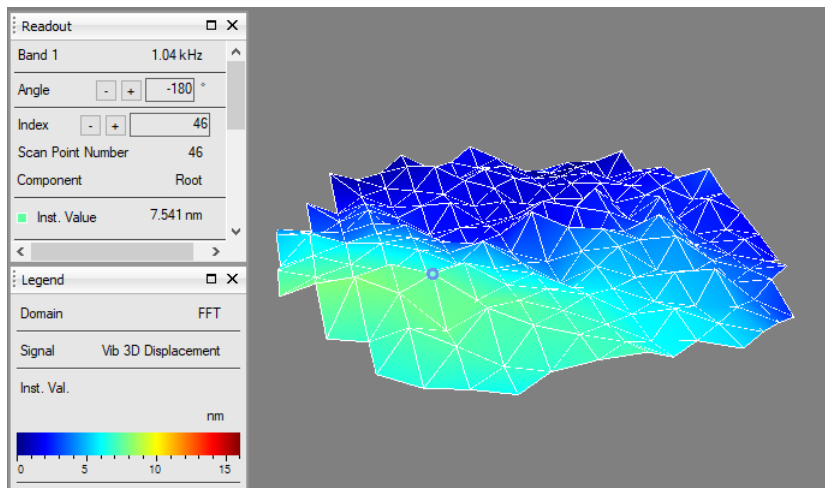


58 pav. Nailono lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintų membranų poslinkių kreivės, membranas veikiant 10 V įtampa

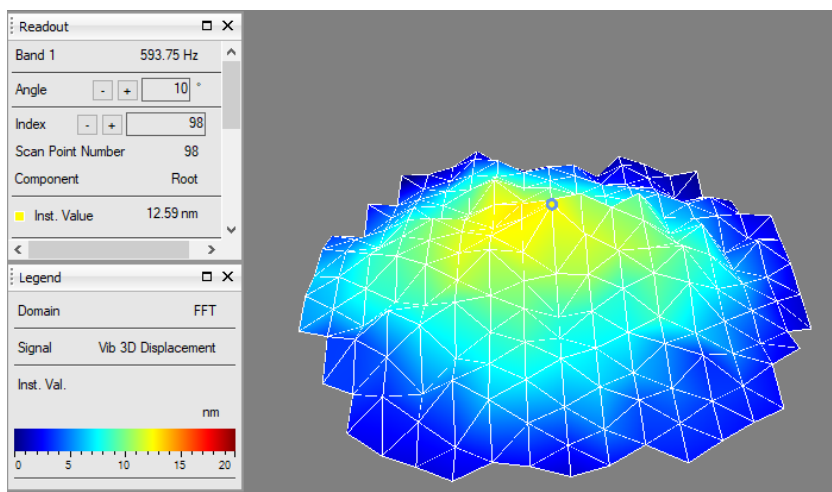


**59 pav.** Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš nailono spausdintų membranų poslinkiai, priklausomybės nuo įtampos palyginimas

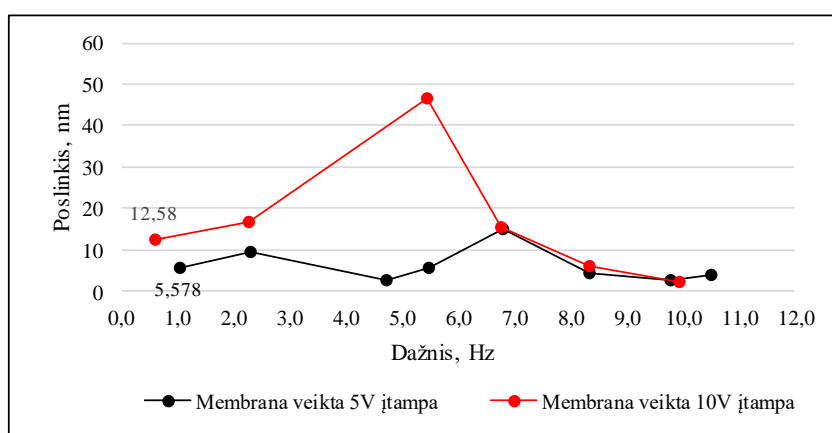
Ekspertas buvo atliktas ir su iš PLA ir anglies pluošto spausdintu kompozitu. Veikiant kompozitą 10 V įtampa, 1 moda stebima esant 593,75 Hz dažniui, poslinkis – 12,59 nm (61 pav.). Tuo tarpu, veikiant kompozitą 5V įtampa, poslinkis yra tik 7,541 nm, esant 1,04 kHz dažniui (60 pav.). Šiuo atveju kompozito pirma moda yra gan neaiški, labiau banguojanti per visą paviršių, tai galima aiškinti tuo, kad kompozito spausdinimas, iš dalies skyrėsi nuo kitų membranų, dėl ko jo paviršius buvo mažiau lygus. 62 paveiksle pateiktas membranos veiktos 5 V įtampa ir 10 V įtampa poslinkių palyginimas. Akivaizdu, kad veikiamo 10 V įtampa membranos poslinkis buvo daugiau nei 2 kartus didesnis.



**60 pav.** Kompozito poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant kompozitą 5 V įtampa

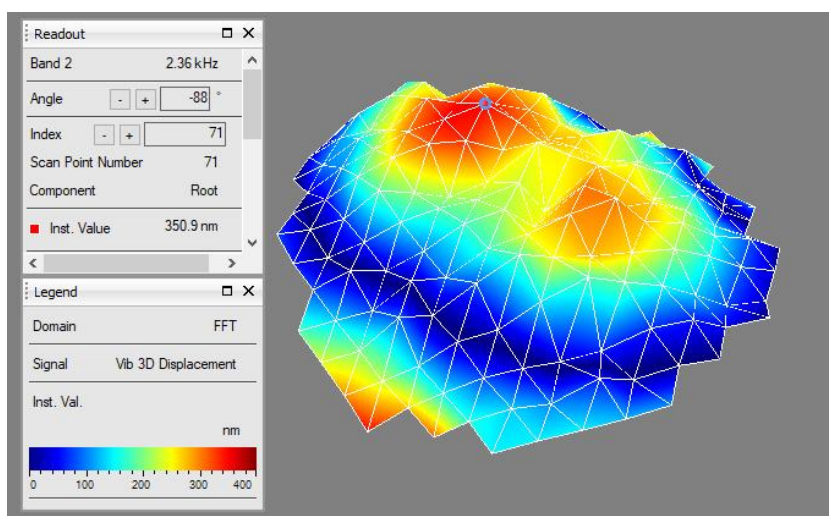


61 pav. Kompozito poslinkis 1 modeje, veikiant kompozitą 10 V įtampa

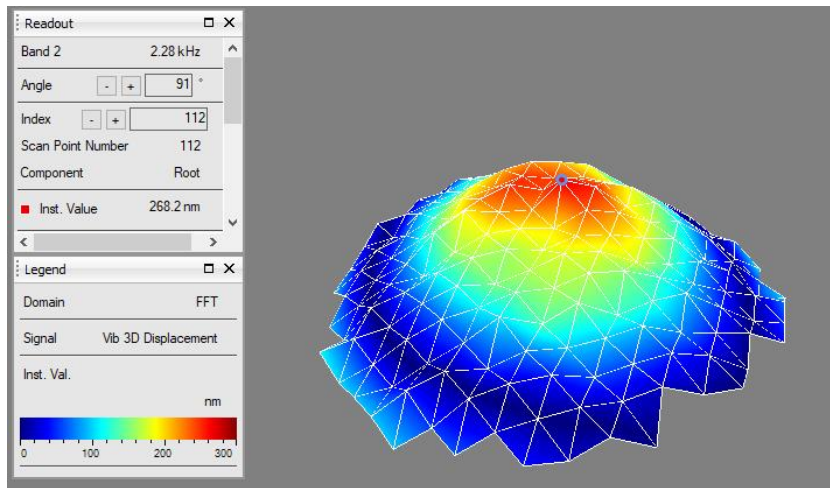


62 pav. Membranos spausdintos iš kompozito poslinkių kreivės

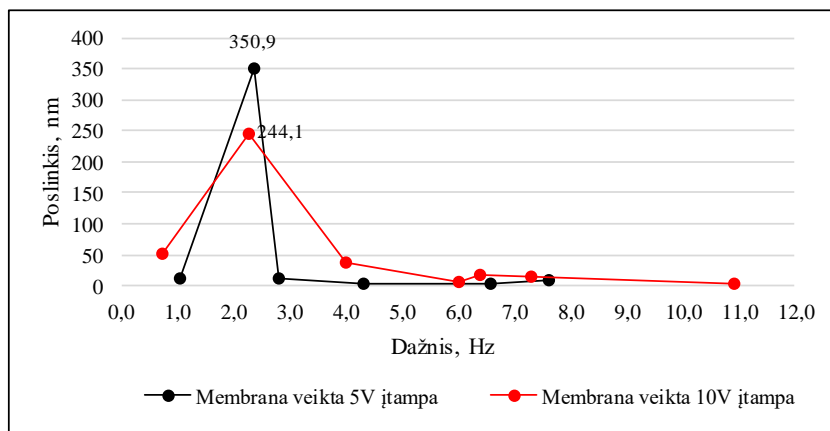
Palyginimui buvo atliktas poslinkio matavimas gaminamam pramonėje, pirktam pjezoelektriniam vykdikliui, sudarytam iš žalvarinės membranos ir pjezoelemento. Veikiant pjezoelektrinį vykdiklį 5 V įtampa, pirmame rezonansiniame dažnyje poslinkis yra net 413,1 nm, esant 2,36 kHz (63 pav.), tačiau veikiant 10 V įtampa, poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje yra mažesnis – 268,2 nm, esant 2,28 kHz dažniui (64 pav.).



63 pav. Pjezoelektrinio vykdiklio poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, kai įtampa 5 V

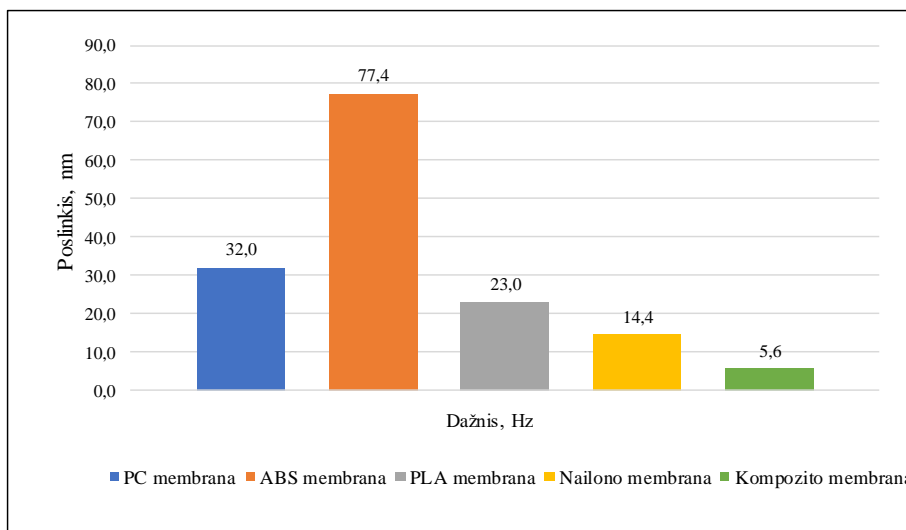


64 pav. Pjezoelektrinio vykdiklio poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, kai įtampa 10 V



65 pav. Pjezoelektrinio vykdiklio poslinkių kreivės

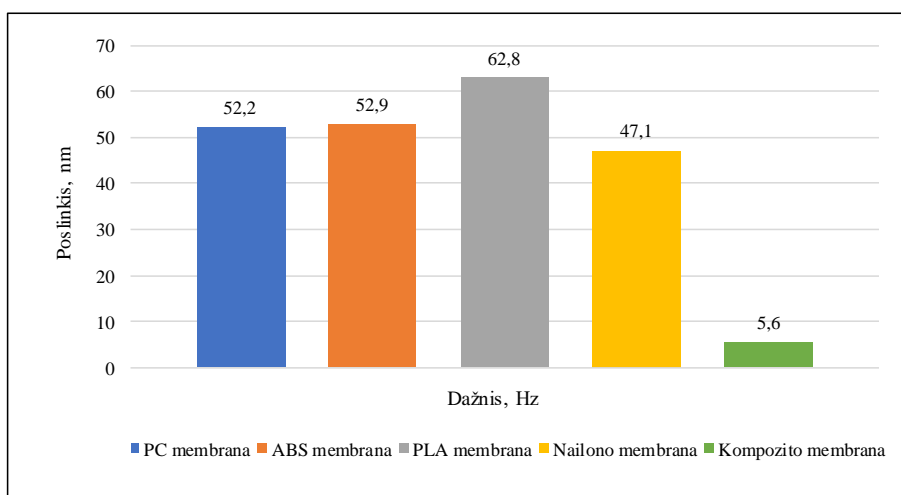
66 paveiksle palyginus visų membranų, spausdintų iš PC, ABS, PLA, nailono ir kompozitinę membraną, kai šios yra spausdintos 90° kryptimi, matoma, kad kai membranos yra veikiamos 5 V įtampa, didžiausias poslinkis stebimas ABS membranoje (77,4 nm.).



66 pav. Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant lygiagrečiai spausdintas membranas 5V įtampa palyginimo grafikas

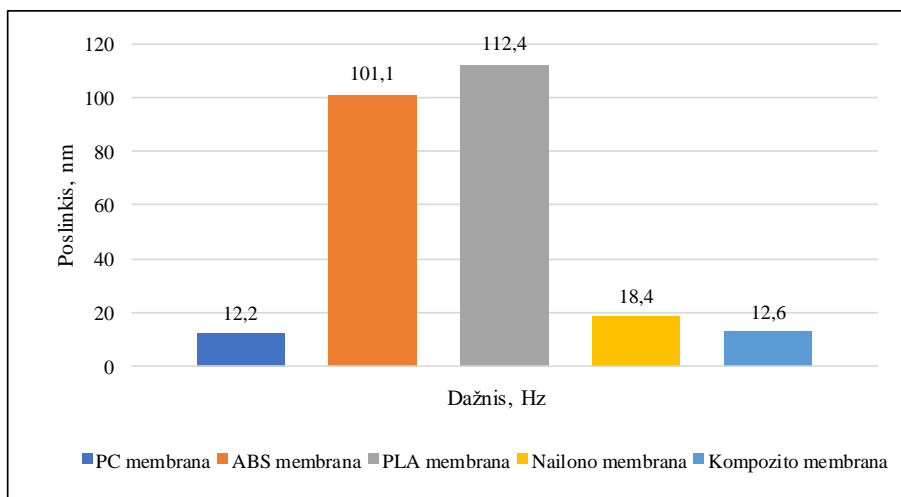


Tačiau, 67 paveiksle palyginus membranų poslinkius, kai jos yra veikiamos 10 V įtampa, matoma, kad didžiausiu poslinkiu pasižymi PLA membrana (62,8 nm.).

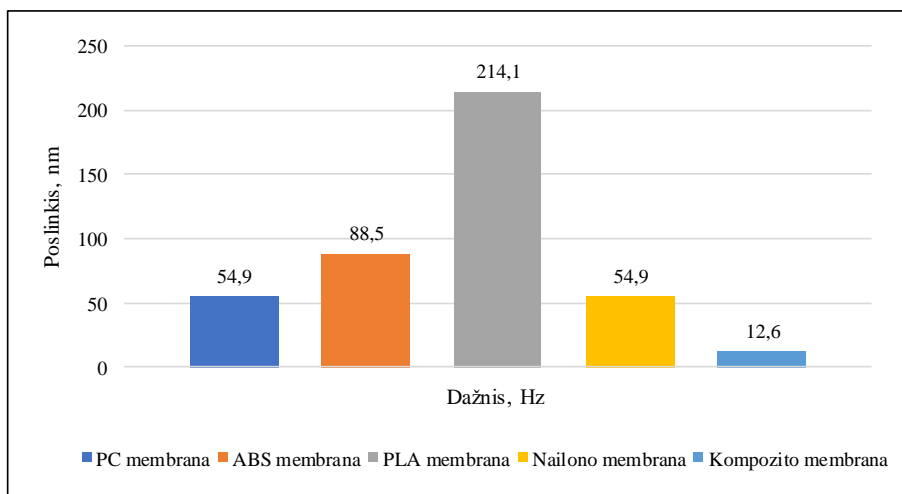


**67 pav.** Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant lygiagrečiai spausdintas membranas 10 V įtampa palyginimo grafikas

Lyginant membranas (68 pav.), kai šios yra spausdintos 45° kryptimi ir jos yra veiktos 5 V įtampa, galima pastebėti, kad didžiausiu poslinkiu pasižymėjo PLA membrana (112,4 nm). Taip pat veikiant membraną 10 V (69 pav.), didžiausias poslinkis stebėtas irgi PLA membranoje (214,1 nm). Šiuo atveju, membranos poslinkis buvo didžiausias iš visų visomis kryptimis spausdintų ir abejomis įtampomis veiktų membranų poslinkių.

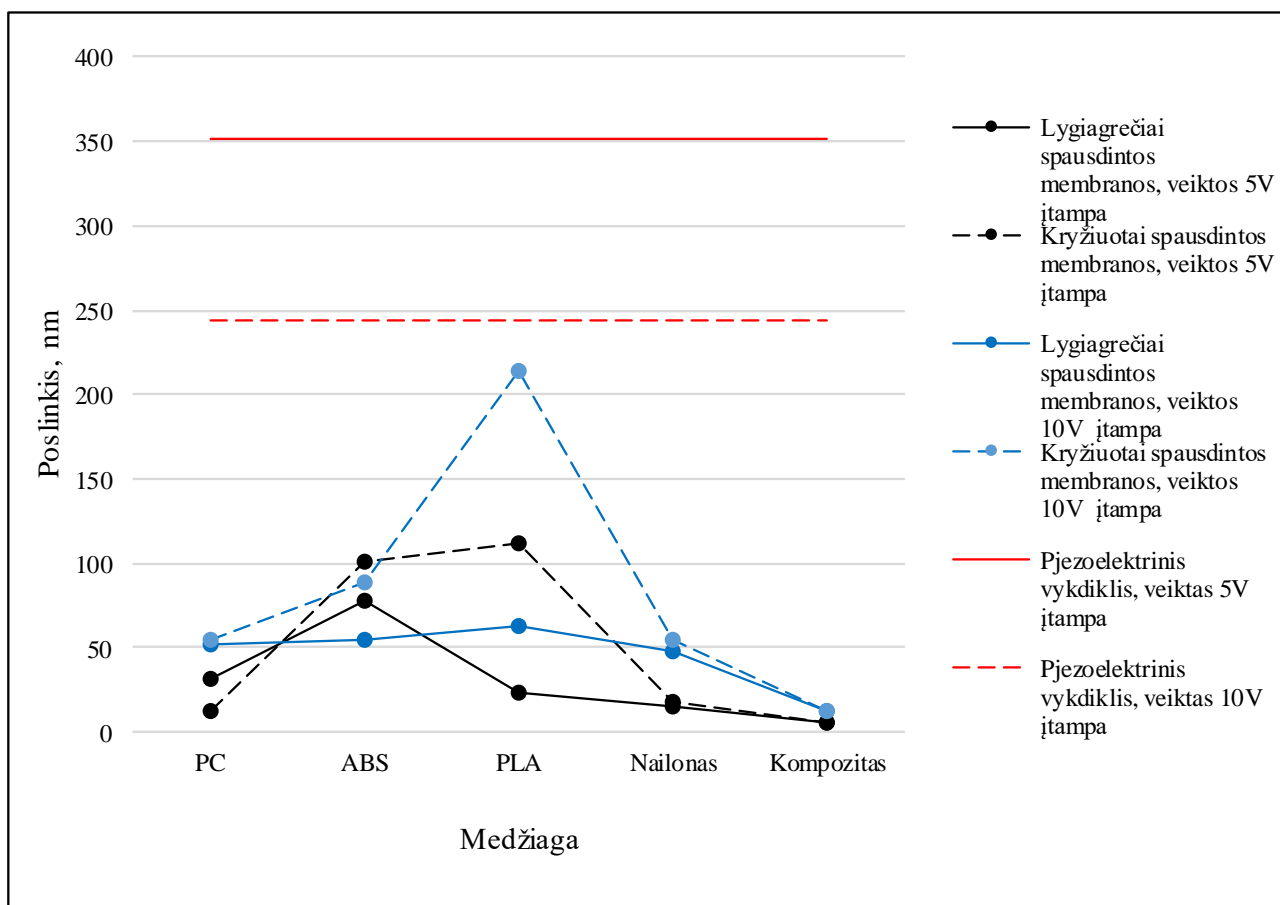


**68 pav.** Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant kryžiuotai spausdintas membranas 5 V įtampa palyginimo grafikas



**69 pav.** Poslinkių pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant kryžiuotai spausdintas membranas 10 V įtampa palyginimo grafikas

Palyginus gautus rezultatus su pirktu pjezoelektrinio vykdiklio gautais poslinkiais pirmame rezonansiniame dažnyje, akivaizdu, kad PC, ABS, nailono, kompozito membranų išgauti poslinkiai buvo gerokai mažesni už pjezoelektrinio vykdiklio. Nors PLA lygiagrečios membranos poslinkis neprilygo pjezoelektrinio vykdiklio sukurtam poslinkiui, tačiau PLA kryžminė membrana buvo labai netoli pjezoelektrinio vykdiklio poslinkio (70 pav.).



**70 pav.** Membranų poslinkių kreivės (lyginant su pjezoelektrinio vykdiklio poslinkiu)

Apibendrinus gautus rezultatus, nustatyta, kad iš polikarbonato, akrilnitrilo, butadieno ir stireno termopolimero ir nailono, lygiagrečiai ir kryžiuotai spausdintų membranų poslinkiai skyrėsi tik nežymiai. Tačiau, iš polilaktido  $90^\circ$  kryptimi spausdintos membranos poslinkis pirmame rezonansiniame dažnyje, veikiant 5 V ir 10 V įtampa buvo gerokai didesnis, atitinkamai 112,4 nm ir 214,1 nm, nei spausdintos  $45^\circ$  kryptimi. Iš poliaktido spausdinta ir 10 V įtampa veikta membrana vienintelė beveik pasiekė piršto pjezoelektrinio vykdiklio poslinkį pirmame rezonansiniame dažnyje.

#### 4. Ekonominė dalis

Norint apskaičiuoti 3D spausdintuvu spausdintų membranų savikainą, buvo pasvertos atspausdintos membranos. Visos membranos yra 0,5 mm storio ir 35 mm skersmens. Brangiausios naudotos medžiagos yra PC ir nailonas, kurių kaina yra 65,95 € už 90 m ilgio, 750 g svorio ir 2,85 mm skersmens filamentu giją. ABS ir PLA kaina kiek mažesnė. Tokio pat ilgio, svorio ir skersmens filamentu gijos kaina yra 41,75 €. Naudotų filamentų duomenys pateikti 8 lentelėje [30].

**8 lentelė.** Naudotų filamentų duomenys [30]

Medžiaga	Skersmuo, mm	Filamento ilgis, m	Filamento svoris, g	Kaina, €
PC	2,85	90	750	65,95
ABS	2,85	90	750	41,75
PLA	2,85	90	750	41,75
Nailonas	2,85	90	750	65,95

Spausdintų membranų svorių duomenys pateikti 9 lentelėje. Sunkiausia yra iš ABS lygiagrečiai spausdinta membrana, kurios svoris yra 0,61 g. Iš tos pačios medžiagos kryžiuotai spausdinta membrana yra šiek tiek lengvesnė – 0,54 g. Lygiagrečiai ir kryžiuotai iš PC spausdintos membranos yra 0,57 g svorio, o iš PLA yra 0,54 g. Iš nailono lygiagrečiai spausdintos membranos svoris yra 0,52 g, o kryžiuotai – 0,51 g.

**9 lentelė.** Membranų duomenys

Medžiaga	Spausdinimo kryptis	Membranos svoris, g	Vidutinis membranos svoris, g
PC	90 °	0,57	0,57
	45 °	0,57	
ABS	90 °	0,56	0,59
	45 °	0,61	
PLA	90 °	0,54	0,54
	45 °	0,54	
Nailonas	90 °	0,52	0,52
	45 °	0,51	

Apskaičiuotas vidutinis membranų svoris skirtingų medžiagų membranoms, remiantis 4.1 formule. Rezultatai pateikti 9 lentelėje.

$$\text{Vidutinis membranų svoris} = \frac{LS + KS}{2}, g \quad (4.1)$$

čia: LS – lygiagrečiai spausdintos membranų svoris (g), KS – kryžiuotai spausdintos membranų svoris (g)

Remiantis vidutiniais membranų svoriais (9 lentelė) ir viso filamentu ritės kaina bei svoriu (8 lentelė), apskaičiuota vidutinė membranų kaina (4.2 formulė). Rezultatai pateikti 10 lentelėje.

$$X = \frac{K \times s}{S}, \text{ €} \quad (4.2)$$

čia: X – vidutinė kaina (€), s – spausdintos membranos svoris (g), S – filamento ritės svoris (g), K – filamento ritės kaina (€)

**10 lentelė.** Vidutinė membranų kaina

Medžiaga	Vidutinė kaina, €
PC	0,05
ABS	0,03
PLA	0,03
Nailonas	0,05

Galima teigti, kad pigiausios membranos yra iš akrilnitrilo, stireno ir polibutadieno kopolimero ir polilaktido (vidutinė vertė apie 0,03 €). Membranos iš polikarbonato ir nailono yra šiek tiek nežymiai brangesnės – vidutinė vertė yra apie 0,05 € (10 lentelė).

Gaminant pjezoelektrinį vykdiklį, prie membranos yra pritvirtinama ir pjezoelektrinė keramika. Šiuo atveju, pjezoelektrinės keramikos vertė rinkoje yra apie 0,01 €. Pjezoelektrinės keramikos, kartu su atspausdinta membrana vykdiklio kaina būtų apytiksliai 0,04 € – 0,06 €, atsižvelgiant į naudotą medžiagą membranai spausdinti. Palyginimui, rinkoje pjezoelektrinis vykdiklis, sudarytas iš žalvarinės membranos ir pjezoelektrinės keramikos, kainuoja apytiksliai 0,10 €.

Taigi, nors kainų skirtumas nėra labai didelis, tačiau šiuo atveju membrana spausdinta 3D spausdintuvu pasižymi papildomais privalumais. Vienas pagrindinių privalumų yra galimybė lanksčiai rinktis membranų matmenis, nes 3D spausdinimo technologija leidžia gaminti įvairiausio storio, skersmens membranas. Gamybos procesas trunka labai trumpai. Viskas ko reikia, tai tik susiprojektuoti detalę, o spausdinimo procesas trunka apie 10 minučių. Ši vykdiklių gamybos technologija taip pat pasižymi galimybe rinktis iš didelio spektro medžiagų, nereikalaujant didelių investicijų prisitaikyti prie besikeičiančios paklausos. Šiuo metu rinkoje yra platus pasirinkimas medžiagų, tinkamų 3D spausdinimui.

## 5. Rekomendacijos

Norint padidinti bandymų pakartojamumą, rezultatų patikimumą ir siekiant tyrimo įvairumo rekomenduojama atlikti veiksmus tyrimo srityje:

1. Sukurti membranas su labiau varijuojančiais storiais, taip siekiant išsiaiškinti poslinkio priklausomybę nuo membranos storio.
2. Atlikti tyrimus su įvairesnėmis įtampomis, kurios veiktų membranas, kas padėtų nustatyti įvairesnę ir patikimesnę membranų poslinkių priklausomybę nuo įtampos.
3. Vietoje pjezoelektrinio vykdiklio naudoti pjezoelektrinę keramiką ir nustatyti jos įtaką poslinkiams.
4. Palyginti ne tik membranų poslinkius, bet ir vibracijų greitį bei pagreitį.
5. Membranų spausdinimui panaudoti kitus 3D spausdinimo metodus.

## Išvados

1. Naudojant lydžios masės formavimo 3D spausdinimo technologiją buvo atspausdinto 8 membranos iš polikarbonato, akrilnitrilo, butadieno ir stireno termopolimero, polilaktido ir nailono. Spausdinant buvo pasirinktos skirtingos membranų spausdinimo kryptys – spausdinta 90° (lygiagrečiai membranų spausdinimo kryptis) arba 45° (kryžiuota membranų spausdinimo kryptis) kryptimis. Spausdintų membranų skersmuo – 35 mm, storis – 0,5 mm. Papildomai atspausdinta membrana iš kompozito sudaryto iš PLA ir anglies pluošto.
2. Didžiausią poslinkį pirmame rezonansiniame dažnyje pasiekė iš polilaktido (PLA) spausdinta membrana. 45° spausdinimo kampu spausdinta membrana, veikiamą 5 V įtampa pasiekė net 112,4 nm, o veikiamą 10 V įtampa net 214,1 nm, tuo tarpu kitų membranų poslinkiai buvo mažesni. Palyginus membranos poslinkį su pirktu pjezoelektrinio vykdiklio poslinkiais, galima pastebėti, kad spausdinta membrana nedaug nusileidžia pirktam vykdikliui.
3. Vertinant spausdinimo krypties įtaką, lygiagrečiai spausdintų membranų poslinkių diapazonas buvo nuo 14,4 nm iki 77,4 nm, o kryžiuotai spausdintų – 12,2 nm iki 101,1 nm, veikiant 5 V įtampa. Lygiagrečiai spausdintų membranų poslinkių diapazonas svyravo nuo 52,2 nm iki 62,8 nm ir kryžiuotoms – nuo 50,1 nm iki 214,1 nm, veikiant membranas 10 V įtampa. Visais atvejais, išskyrus polikarbonato membranas veikiamas 5 V įtampa, kryžiuotų membranų poslinkiai buvo didesni.
4. Pjezoelektrinės keramikos, kartu su atspausdinta membrana vykdiklio kaina būtų apytiksliai 0,04 € – 0,06 €, atsižvelgiant į naudotą medžiagą membranai spausdinti. Rinkoje pjezoelektrinis vykdiklis, sudarytas iš žalvarinės membranos ir pjezoelektrinės keramikos, kainuoja apytiksliai 0,10 €. Tačiau, membrana spausdinta 3D spausdintuvu pasižymi papildomais privalumais: galimybe lanksčiai rinktis membranų matmenis, trumpas gamybos procesas, didelis medžiagų pasirinkimas.

## Literatūros sąrašas

1. KUSCER, Danjela, et al. Integrated piezoelectric vibration system for fouling mitigation in ceramic filtration membranes. *Journal of membrane science*, 2017, 540: 277-284.
2. MA, H. K.; CHEN, R. H.; HSU, Y. H. Development of a piezoelectric-driven miniature pump for biomedical applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 234: 23-33.
3. ZHANG, Zhonghua, et al. Flow rate self-sensing of a pump with double piezoelectric actuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 41.1-2: 639-648.
4. REN, Yi Jun, et al. Elastic string check valves can efficiently heighten the piezoelectric pump's working frequency. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 244: 126-132.
5. JEYALINGAM, Jonne; JABBAL, Mark. Experimental investigation of the aeroacoustics of synthetic jet actuators in quiescent conditions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 280: 52-60.
6. GUAN, Yanfang; LI, Xiang. Analysis of Vibrational Performance of A Piezoelectric Micropump with Diffuse/Nozzle Microchannel. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2018, 1.2: 138-144.
7. ZHANG, Zhonghua, et al. A piezoelectric micropump with an integrated sensor based on space-division multiplexing. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 203: 29-36.
8. RIMASAUSKIENE, R., et al. Experimental research of the synthetic jet generator designs based on actuation of diaphragm with piezoelectric actuator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 50: 607-614.
9. CHIATTO, Matteo, et al. LEM characterization of synthetic jet actuators driven by piezoelectric element: A review. *Sensors*, 2017, 17.6: 1216.
10. SHAHRUBUDIN, N.; LEE, T. C.; RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 2019, 35: 1286-1296.
11. VALINO, Arnaldo D., et al. Advances in 3D Printing of Thermoplastic Polymer Composites and Nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, 2019, 101162.
12. POSTIGLIONE, Giovanni, et al. Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 76: 110-114.
13. DAMANHURI, Amir Abdullah Muhamad, et al. Indoor Air Concentration from Selective Laser Sintering 3D Printer using Virgin Polyamide Nylon (PA12) Powder: A Pilot Study. *International Journal of Integrated Engineering*, 2019, 11.5: 140-149.
14. BEKAS, D. G., et al. 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 107540.
15. PAUL, Ratnadeep; ANAND, Sam. Process energy analysis and optimization in selective laser sintering. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31.4: 429-437
16. SHIRAZI, Seyed Farid Seyed, et al. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and technology of advanced materials*, 2015, 16.3: 033502.
17. KERNS, Jeff. What's the Difference Between Stereolithography and Selective Laser Sintering?. *Machine Design*, 2015, 23.
18. JASVEER, Shiwpuasad; JIANBIN, Xue. Comparison of different types of 3D printing technologies. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 2018, 8.4: 1-9.



19. LIN, Dong, et al. 3D stereolithography printing of graphene oxide reinforced complex architectures. *Nanotechnology*, 2015, 26.43: 434003.
20. DUDEK, P. F. D. M. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, 58.4: 1415-1418.
21. SKOWYRA, Justyna; PIETRZAK, Katarzyna; ALHNAN, Mohamed A. Fabrication of extended-release patient-tailored prednisolone tablets via fused deposition modelling (FDM) 3D printing. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2015, 68: 11-17.
22. OKWUOSA, Tochukwu C., et al. A lower temperature FDM 3D printing for the manufacture of patient-specific immediate release tablets. *Pharmaceutical research*, 2016, 33.11: 2704-2712.
23. 3D logics: *Methods of 3D printing*. 2018 [žiūrėta 2019-11-30]. Prieiga per: <https://3dlogics.com/blog>
24. All3DP: *SLA 3D Printing (Stereolithography) – Simply Explained*. 2019 [žiūrėta 2019-12-01]. Prieiga per: <https://www.3dnatives.com/en/stereolithography-explained100420174/>
25. Manufacturingglobal: *Covestro partners with Carbon on 3D printing resin*. 2019 [žiūrėta 2019-11-19]. Prieiga per: <https://www.manufacturingglobal.com/technology/covestro-partners-carbon-3d-printing-resin>
26. 3ders.org: *New research project by MIT and Binghamton could make FDM 3D printing a whole lot faster*. 2017 [žiūrėta 2019-11-29]. Prieiga per: <https://www.3ders.org/articles/20170405-new-research-project-could-make-fdm-3d-printing-a-whole-lot-faster.html>
27. Sculpteo: *FDM vs. SLA vs. SLS: Battle of the 3D technologies* 2017 [žiūrėta 2019-11-30]. Prieiga per: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/05/15/fdm-vs-sla-vs-sls-vs-clip-battle-of-the-3d-technologies/>
28. Ultimaker: *Ultimaker 2+ series* [žiūrėta 2019-11-15]. Prieiga per <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-2-plus>
29. Ultimaker: *The properties you need for ground-breaking applications* [žiūrėta 2019-11-16]. Prieiga per <https://ultimaker.com/materials>
30. Gaminu: *Ultimaker plastikas* [žiūrėta 2019-12-01]. Prieiga per <https://gaminu.com/lt/>