



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHATRONIKOS, ROBOTIKOS IR SKAITMENINĖS GAMYBOS KATEDRA

Kristijonas Karbauskas

VARŽINIO SLĖGIO JUTIKLIO ILGAAMŽIŠKUMO TYRIMAI

RESEARCH OF RESISTIVE PRESSURE SENSORS DURABILITY

Baigiamasis magistro darbas

Mechatroninių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX053

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius 2022

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Mechanikos fakultetas Mechatronikos, robotikos ir skaitmeninės gamybos katedra		ISBN Egz. sk. Data-.....-.....	ISSN
Antrosios pakopos studijų Mechatroninių sistemų programos magistro baigiamasis darbas 4			
Pavadinimas Autorius Vadovas		Varžinio slėgio jutiklio ilgaamžiškumo tyrimai Kristijonas Karbauskas Andrius Dzedzickis	
Kalba: lietuvių			
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas varžinio slėgio jutiklio ilgaamžiškumas. Pateikiama varžinių slėgio jutiklių, pagrįstų laidžių polimerų kompozitais apžvalga ir literatūros apie juos analizė. Aptariami šiuo metu atlikti tyrimai panašiomis temomis, bei pateikiami jų rezultatai. Aprašomas tyrimui sukurtas bandymų stendas ir tyrimų metodika. Pateikiami tyrimo metu gauti rezultatai, suformuluotos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai. Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, eksperimentinis tyrimas, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 47 p. teksto be priedų, 30 iliustracijų, 1 lentelė, 34 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.			
Prasminiai žodžiai: slėgio jutiklis, kompozitas Velostat®, ilgaamžiškumas, ciklinė apkrova, pjezovaržinė medžiaga.			

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Mechanics Department of Mechatronics, Robotics and Digital Manufacturing		ISBN Copies No. Date-.....-.....	ISSN
Master Degree Studies Mechatronics Systems study programme Master Graduation Thesis 4			
Title Author Academic supervisor		Research of Resistive Pressure Sensors Durability Kristijonas Karbauskas Andrius Dzedzickis	
Thesis language: Lithuanian			
Annotation In the final master's thesis the durability of a resistive pressure sensor is analysed. A scientific literature review of resistive pressure sensors that are based on conducting polymer composites is presented. A review of research with similar topics and their results is presented. A comprehensive methodology was prepared and a test stand was created for this research. Results of the study are presented, conclusions drawn and proposals for future studies are made. Structure: introduction, literature review, experimental study, conclusions and proposals, references. Thesis consists of : 47 p. text without appendixes, 30 figures, 1 table, 34 bibliographical entries. Appendixes included separately.			
Keywords: pressure sensor, composite Velostat®, durability, cyclic load, piezoresistive material.			

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	5
SANTRUMPOS	7
ĮVADAS	8
1. LAIDŽIŲ POLIMERŲ KOMPOZITŲ VARŽINIAI SLĖGIO JUTIKLIAI	11
1.1. LPK slėgio jutiklių veikimo principai	11
1.2. LPK varžinių slėgio jutiklių gamybai naudojamos medžiagos	16
1.3. LPK paskirtys	20
1.4. LPK Velostat®	22
2. TYRIMO STENDO KŪRIMAS IR PRIIMTŲ SPRENDIMŲ PAGRINDIMAS	27
2.1. Tyrimo stendo kūrimas	27
3. EKSPERIMENTINIS JUTIKLIO ILGAAMŽIŠKUMO TYRIMAS IR REZULTATAI	30
3.1. Tyrimo metodika	30
3.2. Statistiniai skaičiavimai	30
3.3. Tyrimo rezultatų apžvalga ir pasiūlymai	32
IŠVADOS	41
LITERATŪRA	43
PRIEDAI	46

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Paprasčiausias LPK varžinis slėgio jutiklis ir jo struktūra	11
1.2 pav. LPK varžinio slėgio jutiklio veikimo principas	12
1.3 pav. Kitos galimos vieno jutimo elemento slėgio jutiklių konstrukcijos	13
1.4 pav. LPK slėgio jutiklių matrica	14
1.5 pav. Įtampos dalinimo grandinė ir darbo zonos skerspjūvis	15
1.6 pav. Anglies nanovamzdelių struktūros	17
1.7 pav. GO ir grafeno redukavimo iš grafito eiliškumas	18
1.8 pav. Grafeno gardelės struktūra	18
1.9 pav. Grafeno gavimas lazeriniu graviravimu	19
1.10 pav. Jutikliams naudojami LPK pavidalai	20
1.11 pav. a) Dėvimas slėgio jutiklis pulsui matuoti; b) Jutiklis, skirtas krūtinės poslinkiui matuoti kvėpavimo metu	21
1.12 pav. a) Slėgio jutimo matrica, skirta žmogaus padėčiai stebėti; b) Slėgio jutimo matrica, naudojama žmogaus sukuriama slėgiui įvairių pratimų metu įvertinti	22
1.13 pav. Velostat [®] laidus polimerinis kompozitas	23
1.14 pav. Velostat [®] medžiagos paviršiaus netobulumai	23
1.15 pav. Raumenų judesių atpažinimo apyrankės prototipas	24
1.16 pav. a) Pėdų slėgio pasiskirstymas; b) Slėgio proteze matavimo matrica	25
2.1 pav. Bandymų stendo mechaninė dalis	28
2.2 pav. Stendo elementų sąveikos struktūrinė schema	28
2.3 pav. Surinktas bandymų stendas	29
3.1 pav. Velostat [®] , apkraunamo 140 kPa, atsakas per 150 tūkst. ciklų	32
3.2 pav. Velostat [®] , apkraunamo 140 kPa, poslinkio jutiklio duomenys	33
3.3 pav. Velostat [®] , apkraunamo 140 kPa, pradinis padidintas atsakas	33
3.4 pav. Velostat [®] , apkraunamo 280 kPa, atsakas per 150 tūkst. ciklų	34
3.5 pav. Velostat [®] , apkraunamo 280 kPa, poslinkio jutiklio duomenys	35
3.6 pav. Velostat [®] , apkraunamo 280 kPa, pradinis padidintas atsakas	35

3.7 pav. Velostat [®] , apkraunamo 560 kPa, atsakas per 150 tūkst. ciklų; b) To paties bandymo poslinkio jutiklio duomenys	36
3.8 pav. Velostat [®] , apkraunamo 560 kPa, pradinis padidintas atsakas	37
3.9 pav. Velostat [®] jutiklių signalo prastėjimo pradžios ciklų skaičius	37
3.10 pav. Velostat [®] jutiklių signalo vidutinės minimalios varžos vertės suspaudimo metu, pagal ciklų skaičių.....	38
3.11 pav. Velostat [®] jutiklių signalo vidutinės maksimalios varžos vertės bandymo metu, pagal ciklų skaičių.....	39

SANTRUMPOS

CB – anglies suodžiai (angl. *Carbon Black*);

PDMS – polidimetilsiloksanas, silikono pagrindo elastomeras;

GO – grafito oksidas;

LPK – laidus polimero kompozitas;

CNT – anglies nanovamzdeliai (angl. *Carbon nano-tubes*).

IVADAS

Laidžių polimerų kompozitais pagrįsti jėgos / slėgio jutikliai turi daug potencialo pigių ir plačiai prieinamų jutiklių kūrimo sferoje. Tokiems jutikliams reikalingos patikimos medžiagos, kurias naudoti būtų naudinga ne tik dėl jų savybių, bet ir dėl kainos, nes jutiklių matmenys dažnai gali būti dideli. Dažnai slėgio jutikliai yra naudojami norint išmatuoti ar sekti slėgio pasiskirstymą įvairių formų plotuose, dėl to stambi šių jutiklių gamyba yra sudėtingai suderinama su daugybe paskirčių ir pritaikymo situacijų. Šiuo metu prieinami slėgio jutikliai nėra didelių matmenų, o dėl jų paprastos geometrinės formos ir nedidelio ploto, jų taikymas yra ribotas. Laidžių polimerų kompozitais pagrįstų jutiklių matricos yra sąlyginai pigūs didelio ploto slėgio pasiskirstymo tyrimo variantas, kurį galima pritaikyti daugeliui skirtingų projektų. Ypač tokie savadarbiai jutikliai yra naudojami mėgėjiškai elektronikai kurti ar moksliniams tyrimams. Vienas populiariausių ir prieinamiausių tokių polimerų yra Velostat® (dar žinomas kaip Linqstat). Velostat® yra polietileno ir anglies kompozitas, pasižymintis savybe keisti savo elektrinę varžą dėl mechaninių deformacijų. Būtent ši savybė ir leidžia kurti jutiklius naudojant šią medžiagą, kuri yra sąlyginai pigi, lyginant su alternatyvomis. Vis dėlto, kadangi ši medžiaga daugiausia yra naudojama mėgėjų elektronikoje arba nedidelės apimties tyrimuose, Velostat® medžiagos mechaninės savybės nėra pakankamai išsamiai išnagrinėtos mokslinėje literatūroje.

Šiame darbe siekiama eksperimentiniu tyrimu išnagrinėti Velostat® pagrindo jutiklio ilgaamžiškumą. Darbe siekiama nustatyti, kokį skaičių apkrovos ciklų gali atlaikyti jutiklis, kol jis nustos tinkamai funkcionuoti. Kadangi tyrimui naudojamas kuo paprastesnės konstrukcijos jutiklis, tikimasi, kad gautus rezultatus bus galima pritaikyti vertinant mažiausią tokio tipo slėgio jutiklių ilgaamžiškumą.

Tyrimo objektas

Tyrimo objektas – varžinis slėgio jutiklis, pagamintas naudojant spaudimui jautrią medžiagą – polietileno-anglies kompozitą Velostat®.

Darbo tikslai ir uždaviniai

Varžinio slėgio jutiklio ilgaamžiškumo tyrimų tikslas yra ištirti polietileno-anglies kompozito Velostat® slėgio jutiklio ilgaamžiškumą bei numatyti galimas jutiklio nuovargio kompensavimo galimybes. Norint įgyvendinti nustatytus tikslus reikia įvykdyti šiuos uždavinius:

- Atlikti mokslinės literatūros analizę, apžvelgti varžinius slėgio jutiklius, jų tyrimo metodus.

- Parengti tyrimo metodiką bei sukurti tyrimo stendą.
- Atlikti eksperimentinius jutiklio ilgaamžiškumo tyrimus, išanalizuoti gautus duomenis.
- Įvertinti jutiklio charakteristikų pokyčius, numatyti šių pokyčių kompensavimo galimybes.
- Suformuluoti išvadas ir pateikti rekomendacijas tolesniems tyrimams.

Temos naujumas

Jėgos / slėgio jutikliai ir jų veikimo principai yra gerai žinomi tiek industrijoje, tiek moksle. Vis dėlto dėl nuolatinio siekio mažinti gamybos kaštus ir kurti inovatyvius produktus, yra kuriamos įvairios naujos jutiklių konstrukcijos. Šių konstrukcijų veikimo principas dažniausiai nėra naujas, tačiau jiems gaminti naudojamų naujų medžiagų ypatingos savybės dažnai būna išsamiai neiširtos. Šiuo atveju jutiklio gamybai naudojamas polietileno ir anglies kompozitas Velostat® yra gerai žinomas ir naudojamas mėgėjų elektronikoje tačiau kompozito ilgaamžiškumo savybės aktualios Velostat® jutiklių tinkamumo plataus masto naudojimui nėra pakankamai išsamiai ištirtos mokslinėje aplinkoje.

Temos aktualumas

Jėgos / slėgio jutikliai, naudojančys polimerų mechaninių ir elektrinių savybių ryšius, siekiant matuoti slėgį, yra laisvai prieinami, tačiau jų įvairovė nėra didelė. Jutiklių kaina didėja priklausomai nuo jų dydžio, o prieinamų jutiklių forma riboja specifinės paskirties elektronikos gamybą. Kompozitas Velostat® patrauklus tuo, kad už prieinamą kainą bet kas gali pasigaminti jų specifinėms paskirtims pritaikytus jutiklius. Velostat® jutiklių pritaikymo įvairovė drabužių, medicinos, įvairių mechanizmų kūrimo srityse parodo šios medžiagos universalumą ir galimybes. Geriau suprantant medžiagos patvarumą ir į ją atsižvelgiant, atsiranda galimybė gaminti patikimesnius, aukštesnės kokybės jutiklius ir produktus. Būtent ši Velostat® jutiklių savybė yra viena svarbiausių siekiant įrodyti jo ilgalaikio naudojimo validumą, kadangi pats medžiagos pritaikymo potencialas jau įrodytas.

Tyrimo metodai

Sukūrus bandymo stendą buvo atliekami eksperimentiniai bandymai. Gauti duomenys buvo analizuojami ir lyginami su ankstesnių tyrimų duomenimis, atlikta rezultatų analizė, pateiktos išvados ir rekomendacijos.

Darbo aprobacija

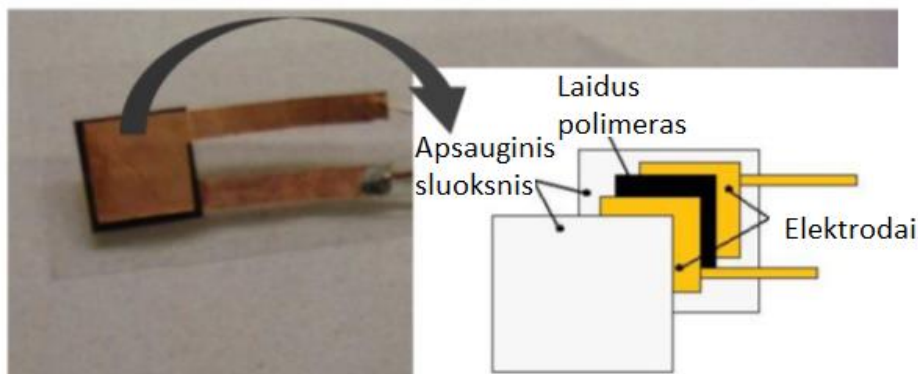
2022 balandžio 29 d. Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ buvo skaitytas pranešimas „Varžinio slėgio jutiklio ilgaamžiškumo tyrimai“ (A priedas).

1. LAIDŽIŲ POLIMERŲ KOMPOZITŲ VARŽINIAI SLĖGIO JUTIKLIAI

Laidžių polimerų kompozitų (LPK) varžiniai slėgio jutikliai – tai varžiniai slėgio jutikliai, kurių konstrukcijoje kaip spaudimui jautri medžiaga, naudojami LPK. Šie kompozitai, priklausomai nuo pridėto jėgos sukeltų deformacijų dydžio, keičia savo varžą. Ši savybė ir medžiagų kaina leidžia kurti įvairių formų ir paskirčių slėgio jutiklius už prieinamą kainą. LPK jutikliai plačiai naudojami spaudimo slėgiui matuoti, kadangi gali būti gaminami plonų ir lengvų plėvelių pavidalu. Šios polimerų kompozitų plėvelės yra atsparios cheminiam poveikiui, lengvai deformuojasi bei gerai atlaiko perkrovas. LPK jutikliais galima matuoti tiek statines, tiek dinamines apkrovas (Tihak ir Bošković, 2019; Dzedzickis et al., 2020). Vis dėlto LPK jutikliai pasižymi netiesiškumu, histereze, o dėl medžiagos nehomogeniškumo, matavimų pakartojamumas nėra geras. Medžiagos nuovargis ir lėtas atsistatymas po deformacijos keičia jutiklių pradines savybes ir gali daryti įtaką jutiklio matavimams. Kadangi šios medžiagos deformuojasi ne tik spaudimo taške, o ir aplink jį ir dažnai yra laidžios visomis kryptimis, matavimų rezultatai gali būti iškreipiami. Dėl išvardytų priežasčių, LPK slėgio jutikliai nėra tinkami tiksliam slėgio matavimui, bet turi daug potencialo būti naudojami slėgio vaizdavimo paskirtyse (Dzedzickis et al., 2020).

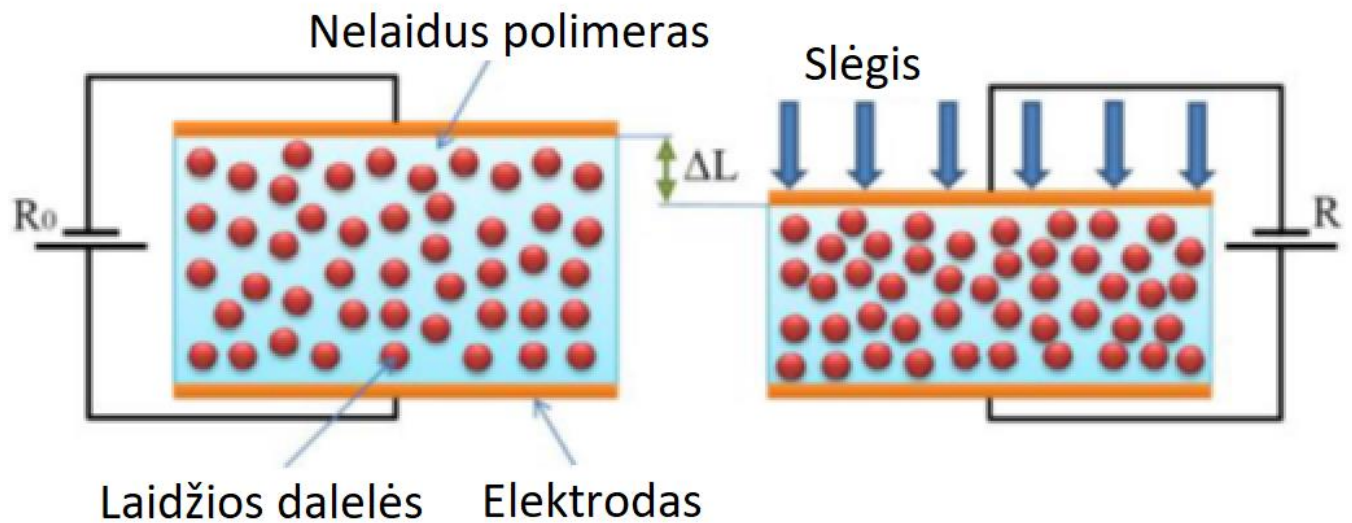
1.1. LPK slėgio jutiklių veikimo principai

Pati paprasčiausia LPK slėgio jutiklio konstrukcija yra sudaryta iš laidaus polimero kompozito sluoksnio, kuris yra įterptas tarp dviejų elektrodų sluoksnių (1.1 pav.). Sluoksnių pozicija išlaikoma jutiklį iš abiejų pusių padengiant kito nelaidaus polimero plėvele (Kalantari, Dargahi, Kövecses, Mardasi & Nouri, 2011). Geriausia, kad dengianti plėvelė būtų panašių mechaninių savybių kaip laidus polimero kompozitas.



1.1 pav. Paprasčiausias LPK varžinis slėgio jutiklis ir jo struktūra (Kalantari et al., 2011)

Suspaudus jutiklį, LPK suspenduotos elektrai laidžios dalelės suartėja viena su kita ir pradeda elektriškai sąveikauti. Tarp laidžių dalelių atsiranda elektrai laidūs tinklai, kompozito varža sumažėja ir pro jutiklį gali tekėti srovė. Šis veikimo principas pavaizduotas 1.2 paveiksle.



1.2 pav. LPK varžinio slėgio jutiklio veikimo principas (Kalantari et al., 2011)

Toks laidžių kompozitų laidumo pokytis aiškinamas dviem efektais:

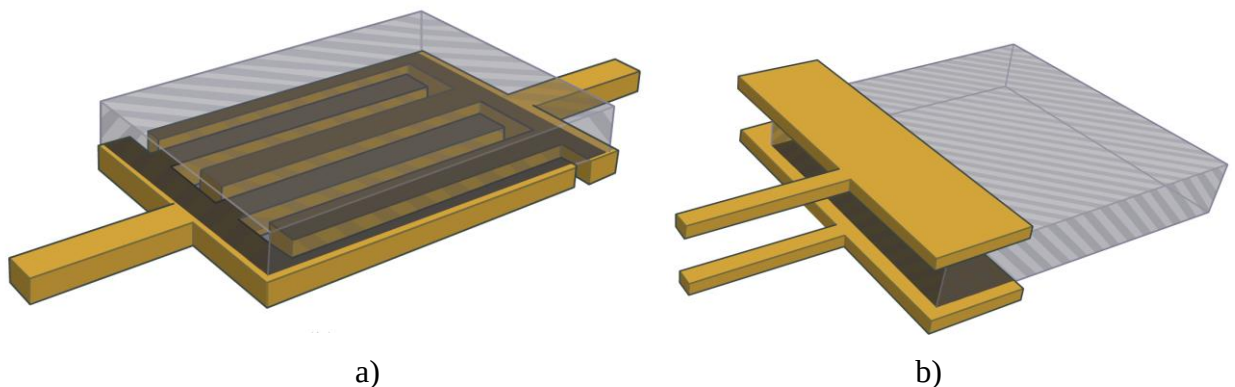
- **Perkoliacija** – tai elektrai laidžių tinklų susidarymas kompozite, kai laidžios dalelės dėl kompozito deformacijos pradeda kontaktuoti ir medžiaga pereina iš izoliatoriaus į laidininką (Ambrosetti, Balberg, & Grimaldi, 2010). Svarbus perkoliacijos rodiklis kompozituose yra perkoliacijos slenkstis – tai mažiausias priemaišų kiekis kompozito struktūroje, kurį perkopus nebėra žymaus pokyčio kompozito elektrinėms savybėms (Dzedzickis et al., 2020).
- **Tuneliavimas** – tai laidžių dalelių elektrinis sąveikavimas, kai laidžios dalelės deformuotame kompozite nekontaktuoja, tačiau tarp jų gali judėti elektronai (Ambrosetti et al., 2010).

Dažniausiai vienas iš minėtų efektų bus dominuojantis. Tai lemia laidžių dalelių tankis, forma, dydis, elektrinis laidumas ir kitos savybės. Perkoliacija labiau pasireiškia kai kompozito laidžių dalelių dydis yra mikronų eilės, tuo tarpu mažėjant dalelių dydžiui iki nanoeilės, labiau pasireiškia tuneliavimo efektas. Bandymai modeliuoti kompozitų laidumo ir priemaišų tankio priklausomybės rodo, kad geriausiai eksperimentinius duomenis atitinka kombinuotas tuneliavimo-perkoliacijos modelis. Tai reiškia, kad nė vienas efektas negali išsamiai apibūdinti kompozito laidumo, kadangi keičiantis

kompozito dalelių tankiui, laidumo mechanizmai taip pat keičiasi (Castellino, Chiolerio, Shahzad, Jagdale & Tagliaferro, 2014; Ambrosetti et al., 2010). Žinant koks laidumo mechanizmas dominuoja kompozite ir tai įvertinus, galima kurti tokias jutiklių konstrukcijas, kurios geriau išnaudotų laidumo mechanizmą (Giovanelli & Farella, 2016).

LPK slėgio jutikliai dažniausiai gaminami naudojant kompozitus plėvelės formoje arba apliejant jutiklio elektrodus kompozitu. Pati paprasčiausia šių slėgio jutiklių konstrukcija jau buvo aptarta anksčiau (žr. 1.1 pav.). Siekiant pagerinti jutiklių jautrumą deformacijoms ar kitas savybes, gali būti naudojamos ir kitos jutiklių konstrukcijos. Tokias konstrukcijas galima suskirstyti į dvi grupes: vieno jutimo elemento ir jutimo elementų matricos. Vieno jutimo elemento jutikliai moksliniuose tyrimuose, be paprastos jutiklio struktūros dažniausiai būna (Giovanelli & Farella, 2016):

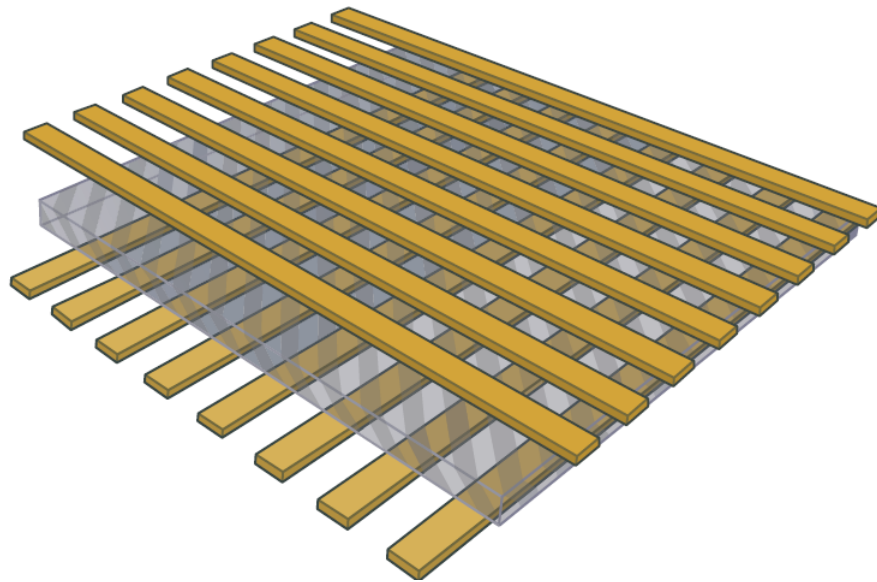
- Sluoksniuotos konstrukcijos.
- Šukų formos elektrodų, kurie yra aplieti LPK konstrukcijos (1.3 pav. a):
 - mažesnis jutiklio storis;
 - mažesnis kiekis elektrodo medžiagos.
- Kraštinio elektrodo konstrukcijos (1.3 pav. b):
 - didesnis lankstumas;
 - mažesnis jautrumas.



1.3 pav. Kitos galimos vieno jutimo elemento slėgio jutiklių konstrukcijos: a) šukų formos elektrodų su aplietu LPK konstrukcija, b) kraštinio elektrodo konstrukcija (Giovanelli & Farella, 2016)

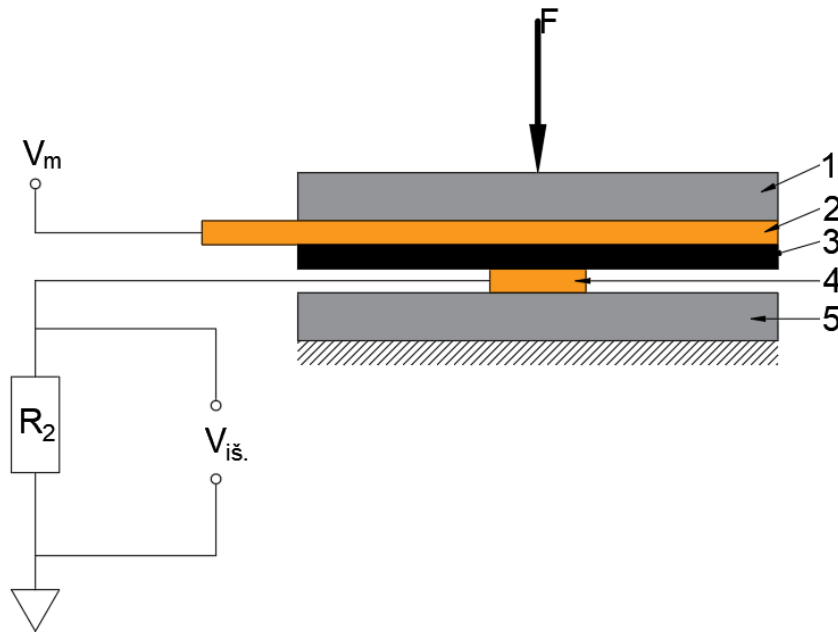
Svarbu paminėti, kad gaminant vieno jutimo elemento jutiklius, kai elektrodai nėra apliejami kompozitu, svarbu išlaikyti sluoksnių tarpusavio poziciją. Tai svarbu, nes judant jutiklio sluoksniams gali kisti jų paviršiaus varža ir taip daryti įtaką jutiklio darbui. Norint to išvengti, elektrodai prie LPK plėvelių gali būti klijuojami naudojant klijus aplink jutimo zoną.

Jutimo elementų matricos yra sudarytos iš daug tarpusavyje sujungtų jutimo elementų. LPK sluoksnis iš abiejų pusių yra padengiamas elektrodo juostelėmis, viena pusė horizontaliai, kita vertikaliai kompozito atžvilgiu. Tokios matricos leidžia sudaryti spaudimo slėgio žemėlapi. Šios matricos gali būti priderinamos prie matuojamo objekto kontūro ir formos, yra lanksčios ir gali būti gaminamos didelių matmenų. Kadangi kompozitas esantis tarp elektrodų deformuojasi ir papildomu plotu aplink spaudimo pridėjimo vietą, kai kurie iš tikro nespaudžiami matricos taškai gali tapti laidūs, kas kartu iškreipia slėgio vaizdą. Tai dažniausiai sprendžiama matricos kalibravimu arba gaunamus duomenis apdorojant specialiais algoritmais. (Giovanelli & Farella, 2016; Dzedzickis et al., 2020).



1.4 pav. LPK slėgio jutiklių matrica (Giovanelli & Farella, 2016)

LPK varžiniai slėgio jutikliai yra patogūs naudoti ir dėl jų nesudėtingos sąsajos su informacijos rinkimo įranga. Mokslinėje literatūroje tokiems jutikliams tirti dažniausiai naudojamas įtampos daliklis (1.5 pav.) ir ADC signalo keitiklis.



1.5 pav. Įtampos dalinimo grandinė ir darbo zonos skerspjūvis: 1) Stendo svertas; 2) Viršutinis elektrodas; 3) Velostat® bandinys; 4) Apatinis elektrodas; 5) Stendo korpusas

Turint grandinės išėjimo įtampos $V_{iš}$ duomenis, jutiklio varžą R_1 galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$V_{iš} = \frac{R_2}{R_j + R_2} \cdot V_m; \quad (1)$$

Pertvarkius lygtį gaunama varžos R_j išraišką:

$$R_j = R_2 \cdot \left(\frac{V_m}{V_{iš}} - 1 \right). \quad (2)$$

čia: R_j – LPK sluoksnio kintamoji varža, Ω ; R_2 – žinoma varža užpildanti įtampos dalinimo grandinę, Ω ; V_m – grandinės maitinimo įtampa, V; $V_{iš}$ – grandinės išėjimo įtampa, V.

Duomenų rinkimas matricoje yra šiek tiek sudėtingesnis nei vieno elemento jutikliuose. Matrica yra skenuojama po vieną įjungiant horizontalias eiles ir nuskaitant varžą kiekvienoje sandūroje su vertikaliomis eilėmis (Giovanelli & Farella, 2016). Pagal gautas varžos vertes, naudojant kompiuterines programas ir algoritmus galima sudaryti slėgio žemėlapi, kurio pavyzdys pateikiamas 1.12 paveiksle.

1.2. LPK varžinių slėgio jutiklių gamybai naudojamos medžiagos

Kaip buvo aptarta prieš tai, LPK varžinių slėgio jutiklių konstrukciją sudaro nedaug skirtingų komponentų – laidus polimero kompozitas, elektrodai ir pagal taikymą gali būti naudojamas papildomas tvirtinimo/apsauginis sluoksnis. Vis dėlto, varijuojant šių sudedamųjų dalių medžiagas ir jų sudėtį, galima gaminti specifiniams poreikiams pritaikytus slėgio jutiklius, pagerinti jutiklio mechanines bei elektrines savybes ir sumažinti kainą. Šiame poskyryje pateikiama trumpa šio tipo jutikliams naudojamų medžiagų apžvalga.

Laidūs polimerų kompozitai

Laidūs polimerų kompozitai yra gaminami polimerą impregnuojant arba padengiant elektrai laidžiomis mikro- ir nanodalelėmis. Šios dalelės gali būti metalinės ir nemetalinės. Kadangi LPK varžiniams slėgio jutikliams naudojamų laidžių dalelių įvairovė yra didelė, šiame darbe aptariamos dažniausiai naudojamos nemetalinės priemonės, o tiksliau anglinės priemonės.

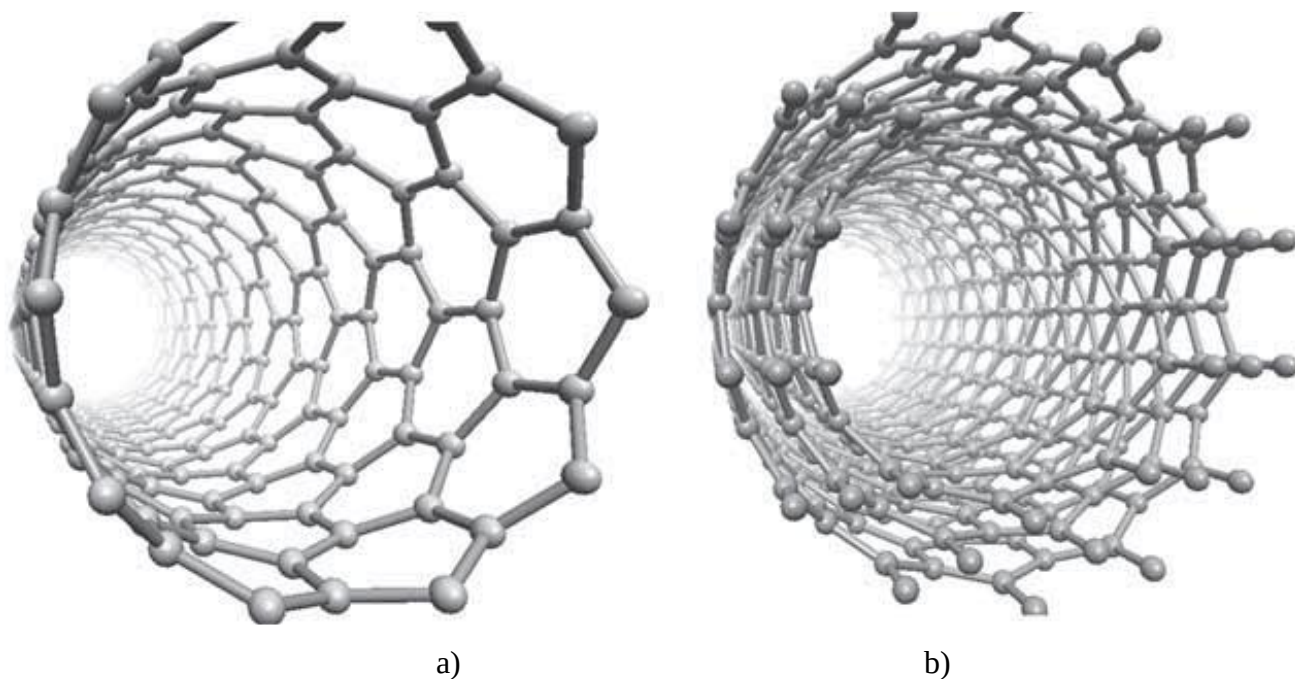
LPK gamyboje naudojamos anglies priemonės

Anglės medžiagos yra labai populiarios lanksčių varžinių slėgio jutiklių gamyboje, dėl puikaus laidumo, cheminio stabilumo, dalelių formų įvairovės ir sąlyginai mažos kainos lyginant su metalinėmis priemonėmis (Liu et al., 2021). Šiems jutikliams dažniausiai naudojamos anglės medžiagos yra:

- Anglės nano vamzdeliai;
 - vienasieniai;
 - daugiasieniai.
- Grafitas.
- Grafenas.
- Anglės suodžiai.

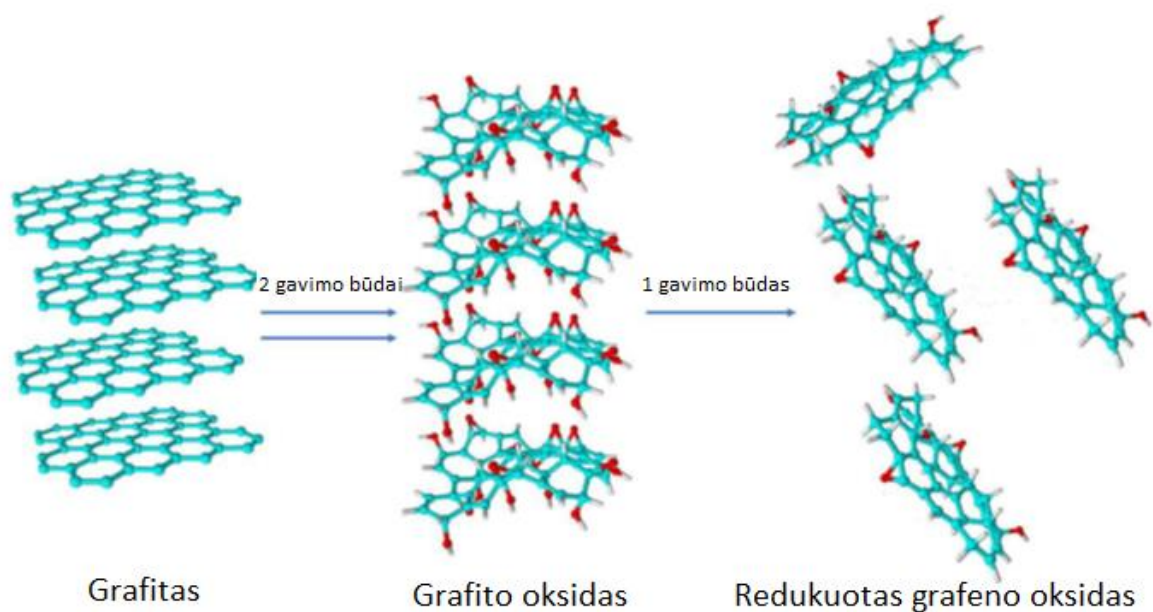
Anglės nanovamzdeliai (angl. CNT – *carbon nanotubes*) – tai nanometrinių matmenų tuščiaavidurė, cilindrinės struktūros anglės alotropinė atmaina, sudaryta iš šešiakampių anglės molekulių tinklo. CNT pasižymi aukštu atsparumu tempimui, puikiu elektriniu laidumu, dideliu paviršiaus plotu, cheminiu ir terminiu stabilumu. CNT skirstomi į dvi grupes, vienasienius (1.6 pav. a) ir daugiasienius (1.6 pav. b). Vienasieniai CNT gaunami susukant vieną sluoksnį grafeno gardelės į tuščiaavidurį 0,4 – 3 nm skersmens cilindrą. Daugiasieniai CNT yra sudaryti iš kelių koncentrinų grafeno gardelės cilindrų,

kurių skersmuo yra nuo 2 iki 100 nm. CNT gaminami cheminio nusodinimo iš garų fazės (CVD) būdu, lankinės iškrovos būdu arba lazerine abliacija ir kt (Yee et al., 2019; Karimi et al., 2015).



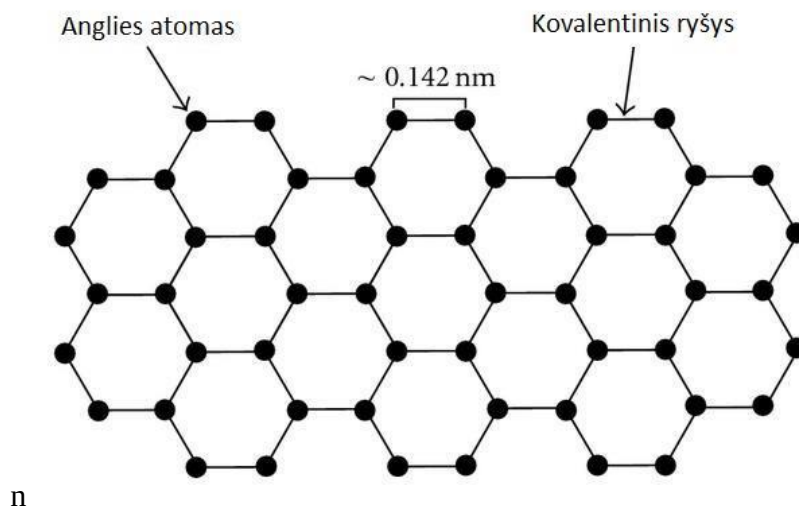
1.6 pav. Anglies nanovamzdelių struktūros: a) vienasienis, b) trisienis (Karimi et al., 2015)

Grafitas yra sluoksniuotas anglies kristalas, kurį sudaro lygiagretūs grafeno sluoksniai. Grafitas yra anizotropinė medžiaga, naudojama gerinti polimerų elektrinį ir šiluminį laidumą, bei antistatines savybes. Natūralios grafito dalelės gana sunkiai pasiskirsto polimeruose, todėl siekiant geresnio pasiskirstymo, natūralus grafitas yra oksiduojamas, termiškai išplečiamas ar kitaip modifikuojamas (Kausar, 2019). Vis dėlto LPK moksliniuose tyrimuose grafitas dažniau naudojamas kaip pradinė medžiaga iš kurios tyrėjai gamina redukuotą grafito oksidą (GO) arba redukuotą grafeną. Taip yra todėl, nes grafitas yra daug pigesnis nei GO ar grafenas.

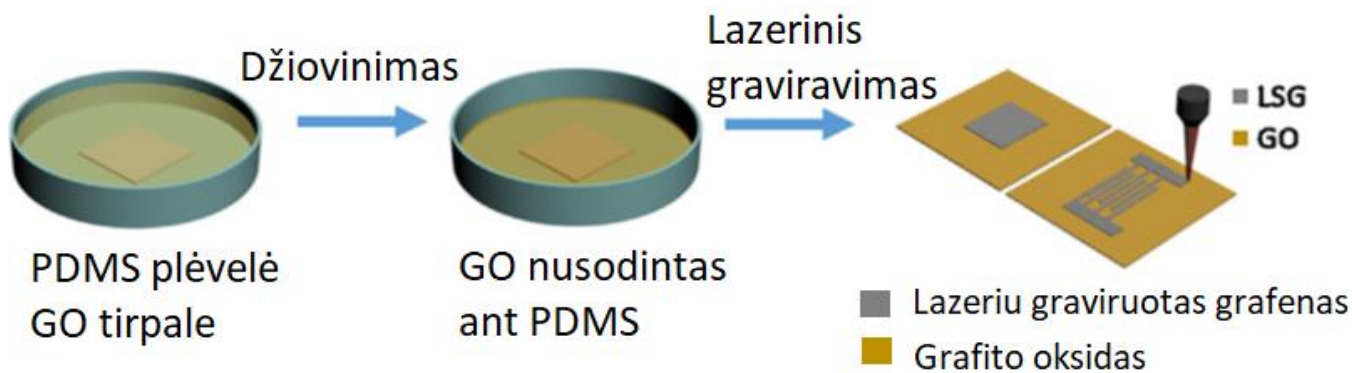


1.7 pav. GO ir grafeno redukavimo iš grafito eiliškumas (Muzyka et al., 2018)

Grafenas – dvimatis vieno atomo storio anglies sluoksnis, kurio atomai išsidėstę heksagonine struktūra (1.8 pav.). Grafenas pasižymi geru elektriniu laidumu, lankstumu bei geromis šiluminėmis savybėmis (Ivaškevičiūtė, 2018). Moksliniuose LPK varžinių slėgio jutiklių tyrimuose grafenas gali būti išgaunamas lazeriu apdirbant grafito oksidą arba tam tikrus polimerus (Zhu et al., 2018; (Zhu, Cai, Ding, Pan, & Wang, 2019; Lin, 2014). 1.9 paveiksle pavaizduotas GO nusodinimo ant polimero ir lazerinio redukavimo į grafeną procesas. Taip gaunamas plonas elektrai laidus grafeno sluoksnis polimero paviršiuje, tai atveria galimybių kurti, ne tik itin plonus jutiklius, bet ir labai ploną elektroniką.



1.8 pav. Grafeno gardelės struktūra (Ivaškevičiūtė, 2018)



1.9 pav. Grafeno gavimas lazeriniu graviravimu (Zhu et al., 2018)

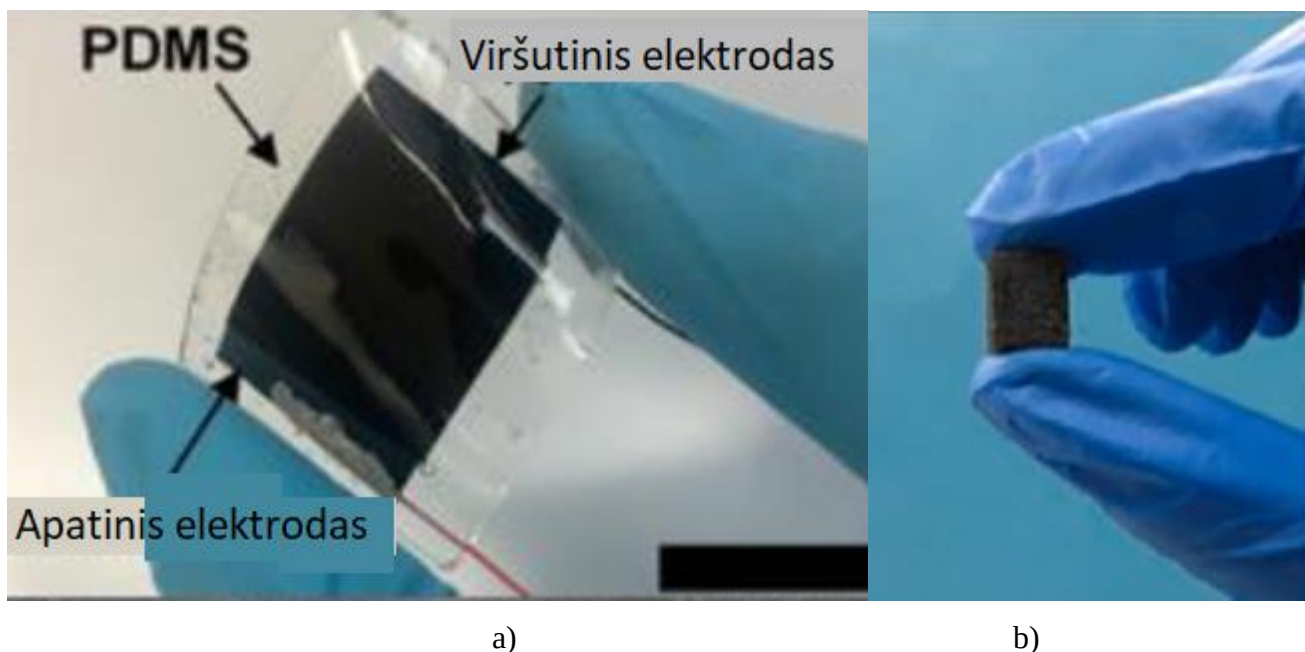
Didelio paviršiaus ploto suodžiai (angl. CB – *carbon black*) yra grynos anglies nanodalelės, gaunamos pirolizės arba nepilno angliavandenilių sudegimo metu. Terminas „suodžiai“ gali būti šiek tiek klaidinantis, kadangi CB turi didesnį kiekį elementinės anglies ir aiškiau apibrėžtas savybes. CB pasižymi dideliu elektriniu laidumu, LPK, kuriuose yra CB turi žemą perkoliacijos slenkstį. CB yra naudojamas gumos, polimerų, baterijų, superlaidininkų ir jutiklių gamyboje, taip pat naudojamas kaip pigmentas (Yee et al., 2019; Tretjak, 2017). Lyginant su kitomis anglies nanodalelėmis CB yra pigus ir plačiai prieinamas, o laidūs kompozitai gaminami naudojant CB jau seniai naudojami kaip antistatinės elektronikos pakavimo medžiagos. Dėl šių priežasčių CB turi didelį potencialą pigių varžinių jutiklių gamyboje.

LPK varžinių slėgio jutiklių tyrimuose daugiausia dėmesio skiriama CNT ir grafeno naudojimui. Šias dalelės dėl savo formos, elektrinių ir mechaninių savybių renkasi daug tyrėjų. Vis dėlto šių anglies nanodalelių naudojimas jutikliams pagrinde apsiriboja tik tiriamąja veikla, kadangi dėl jų kainos jas naudoti masinėje gamyboje yra per brangu. Tuo tarpu labiau prieinamas CB ir jau rinkoje egzistuojantys juo pagrįsti LPK šiuo metu turi daugiau galimybių praktiniam taikymui.

LPK gamyboje naudojami polimerai

Polimerų, naudojamų LPK gamybai, įvairovė yra didelė, kadangi LPK kūrimas ir tyrimai yra sparčiai besivystanti sritis, dėl to nuolatos išbandomi nauji polimerų ir laidžių dalelių mišiniai. Polimero parinkimas LPK gamybai yra tiek pat svarbus, kiek ir laidžių dalelių. Siekiant geriausių mechaninių ir elektrinių LPK mišinių savybių, parenkant polimero ir laidžių dalelių kombinaciją, reikia užtikrinti gerą dalelių sąveiką su polimero struktūra, gerą pasiskirstymą polimere bei stiprių ir laidžių tinklų susidarymą. LPK tyrimuose dažnai naudojami polimerai yra: poliesteris, polipropilenas (PP), termoplastinis

poliuretanas (TPU), polietilenas (PE), poliamidas (PI), PDMS, epoksidinės dervos ir kt. (Li et al., 2019). Jutiklių tyrimuose naudojami polimerai dažniausiai yra plėvelės formos (1.10 pav. a), dėl jų lengvumo, lankstumo ir matmenų laisvumo (Yee et al., 2019), tačiau daugėja ir kempinės pavidalo jutiklių (1.10 pav. b) kompozitų tyrimų (Zhai et al., 2019). Vis dėlto dauguma šių LPK šiuo metu nėra gaminami masiškai, o jų sudedamosios dalys yra brangios.



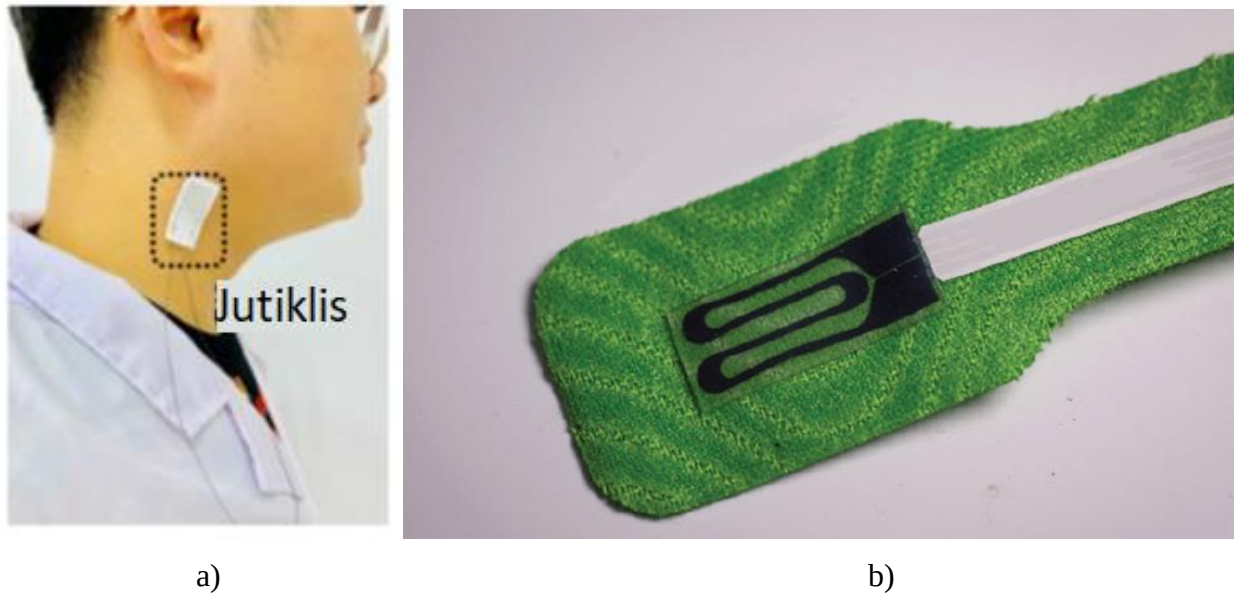
1.10 pav. Jutikliams naudojami LPK pavidalai: a) plėvelės pavidalo kompozitas, b) kempinės pavidalo kompozitas (Xu et al., 2018; Zhai et al., 2019)

Mokslinėje literatūroje apie LPK jutiklius dažniausiai vyrauja savadarbių kompozitų tyrimai. Kaip minėta anksčiau, dažnai tiriamus kompozitus sudaro sąlyginai naujos ir brangios medžiagos, todėl tyrimų radiniai dažnai negali būti pritaikomi pramonėje. Tuo tarpu išsamios informacijos apie jau rinkoje prieinamus kompozitus trūksta.

1.3. LPK paskirtys

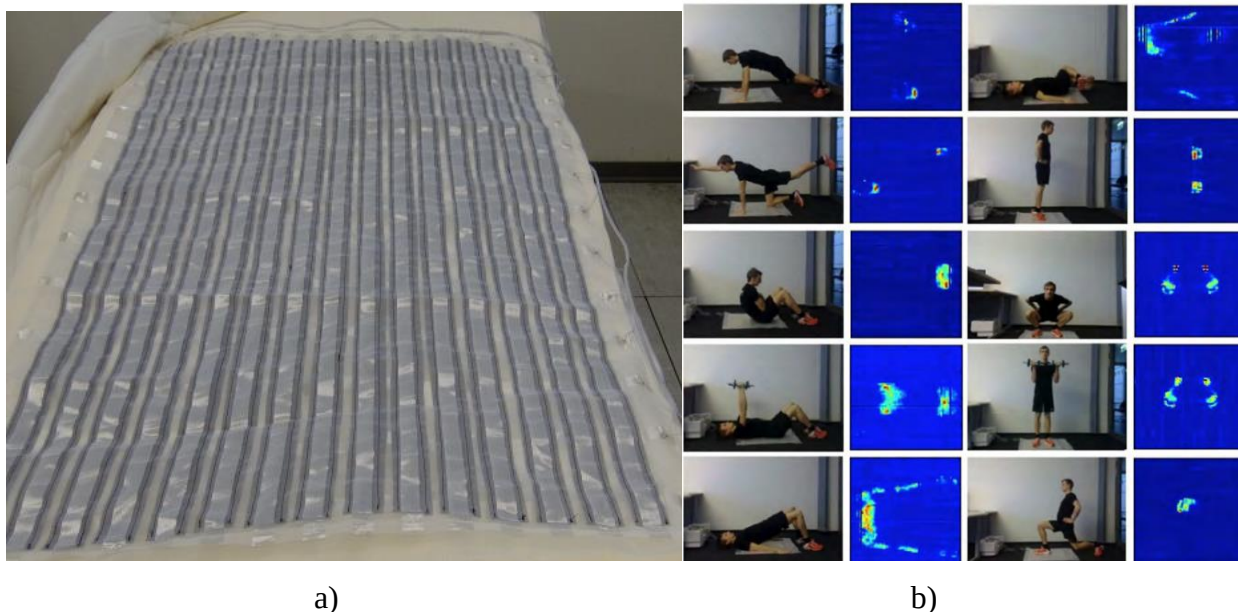
LPK varžinių slėgio jutiklių sąlyginai nesudėtingas veikimo principas, kompozitų mechaninės, elektrinės ir cheminės savybės bei kaina, atveria daug galimybių kurti lanksčius, įvairioms paskirtims pritaikomus jutiklius. Tokie slėgio jutikliai gali būti naudojami slėgio, pridėtos jėgos ar deformacijų įvertinimui mechatronikoje ir robotikoje (Wang, Yu, Cui, & Li, 2021), biomedicinoje (Stassi, Cauda, Canavese, & Pirri, 2014) ir kitose srityse. Hu et al. (2020) tyrime varžinius slėgio jutiklius naudojo

žmogaus pulso matavimui. Pegan et al. (2016) tyrime sukurtas varžinis slėgio jutiklis buvo naudojamas matuoti krūtinės poslinkiui kvėpavimo metu.



1.11 pav. a) Dėvimas slėgio jutiklis pulsui matuoti (Hu et al., 2020), b) Jutiklis, skirtas krūtinės poslinkiui matuoti kvėpavimo metu (Pegan et al., 2016)

LPK plėvelės dėl savo lankstumo yra labai patogios kurti slėgio jutimo matricas. Šios matricos gali būti naudojamos įvertinti žmogaus pėdų sukuriamą slėgį stovint arba vaikstant, tai palengvintų ortopedinių problemų diagnozavimą. Carbonaro et al. (2021) tyrime naudota matrica, skirta įvertinti žmogaus padėties miego metu sukuriamą slėgį pateikiama 1.12 a paveiksle. Cheng, Sundholm, Zhou, Hirsch & Lukowicz (2016) tyrimo metu naudota matrica, kuria buvo matuojamas žmogaus sukuriamas slėgis įvairių pratimų metu.

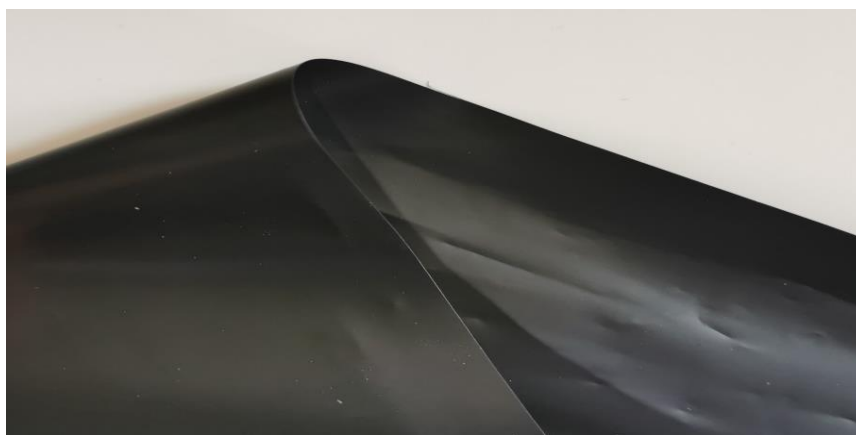


1.12 pav. a) Slėgio jutimo matrica, skirta žmogaus padėčiai stebėti (Carbonaro et al., 2021); b) Slėgio jutimo matrica, naudojama žmogaus sukuriamam slėgiui įvairių pratimų metu įvertinti (Cheng et al., 2016)

Laidžių polimerų kompozitų slėgio matavimo matricos gali suteikti vertingos informacijos, kurią galima naudoti traumų diagnozavimui ar prevencijai, spaudžiančių kūnų atpažinimui ir pan.

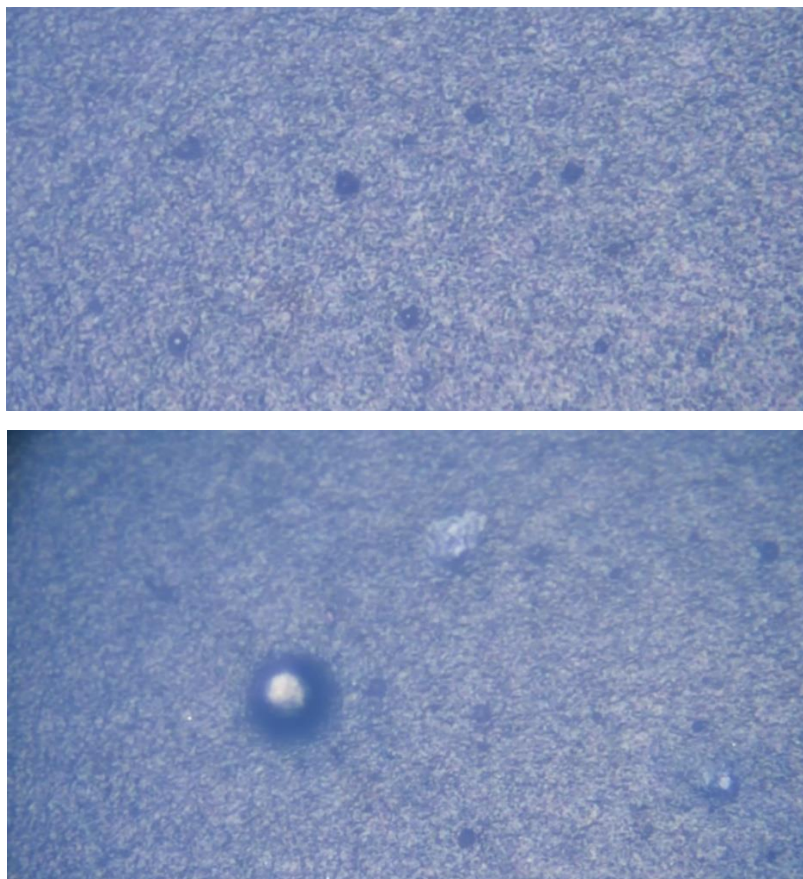
1.4. LPK Velostat®

Jutikliai ar jų matricos, kurių konstrukcijoje naudojamas Velostat® (1.13 pav.), dėl jo kainos ir prieinamumo, gali būti pigesni ir didesni, nei kitos anglimi pagrįstos polimerų alternatyvos. Taip yra, kadangi šiuo metu Velostat® yra vienas iš nedaugelio laidžių anglies polimerų, kurie yra prieinami. Beveik visi anglimi pagrįsti LPK nėra masiškai gaminami, o jų sudedamosios dalys kainuoja 2–3 kartus daugiau nei Velostat®. Taip pat dėl savo sudėties Velostat® pasižymi geru cheminiu stabilumu bei tokiomis mechaninėmis savybėmis kaip lankstumas (Dzedzickis et al., 2020).



1.13 pav. Velostat® laidus polimerinis kompozitas

Velostat® medžiagos paviršiuje esantys netobulumai (1.14 pav.), tokie kaip anglies dalelių sankaupos, įdubimai ar kiti mechaniniai pažeidimai, gali daryti įtaką medžiagos ilgaamžiškumui. Minėti netobulumai apkrovos metu gali plisti ir pažeisti kompozito plėvelę, dėl to pasikeistų kompozito laidumas, o gaunami matavimai staigiai pakistų. Į tai reiktų atsižvelgti kuriant jutiklius su šia ir panašiomis medžiagomis.

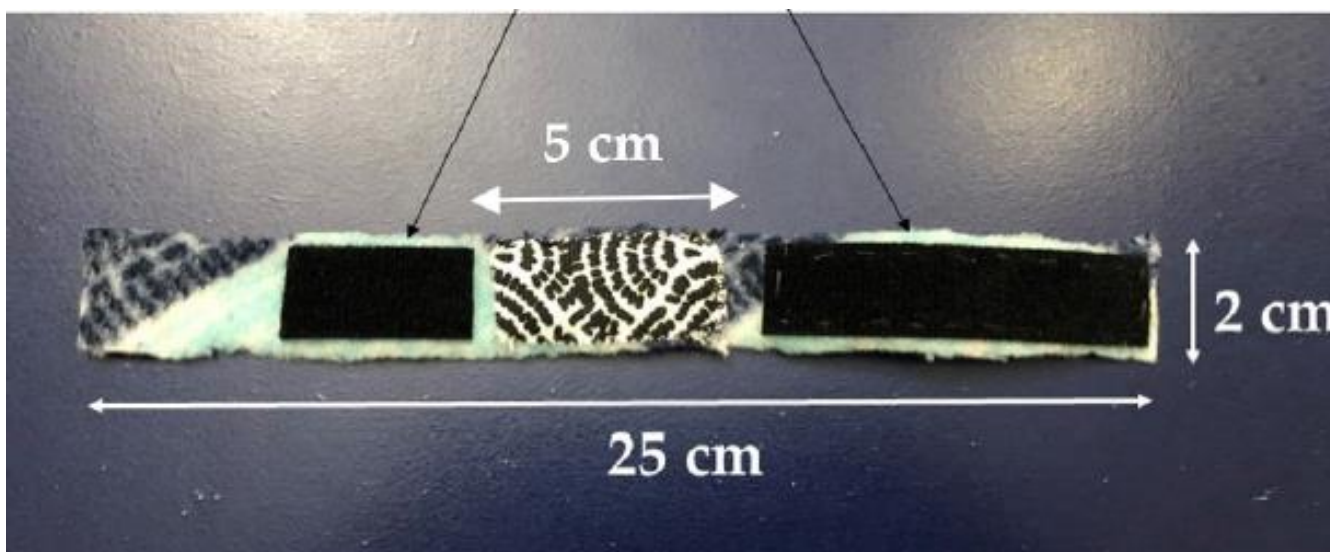


1.14 pav. Velostat® medžiagos paviršiaus netobulumai

Velostat[®], kaip ir dauguma kitų LPK lyginant su įprastais, stabilesnių mechaninių savybių jėgos jutikliais, pasižymi prastesniu tiesiškumu, tikslumu, atkartojamumu ir histereze. Norint pagerinti šias savybes kartu rekomenduojama taikyti signalo apdorojimo metodus, tiek analoginius, tiek skaitmeninius. Vis dėlto, priklausomai nuo paskirties, kurioje tokie jutikliai naudojami, perteklinis ar neteisingas signalo apdorojimas gali iškreipti duomenų rinkimą ar jam trukdyti. Taikant neteisingus metodus galima pašalinti svarbią informaciją, todėl filtravimo įrankiai turėtų būti parenkami priklausomai nuo siekiamo tikslo.

Vieno jutimo elemento Velostat[®] jutikliai

Pačią paprasčiausią Velostat[®] jutiklių konstrukciją sudaro du elektrodai, tarp kurių yra Velostat[®] sluoksnis ir koks nors apsauginis/sutvirtinantis sluoksnis (1.1 pav.). Tokie pavieniai jutimo elementai naudojami kai tyrimams reikalingi mažų matmenų jutikliai. Tokie jutikliai gali būti naudojami atskirų taškų ant kūno slėgiui matuoti, pavyzdžiui, pasirinktų pėdos taškų sukuriamas slėgis vaikstant (Bucinskas et al., 2021). Taip pat pavieniai Velostat[®] jutikliai gali būti naudojami valdyti įvairius įrenginius. Dontha et al., (2022) darbe Velostat jutikliai buvo naudojami kurti kompiuterinių žaidimų valdymo būdus neįgaliesiems (1.15 pav.). Svarbus Velostat pranašumas šiam pritaikymui buvo jo jautrumas mažo dydžio jėgoms.

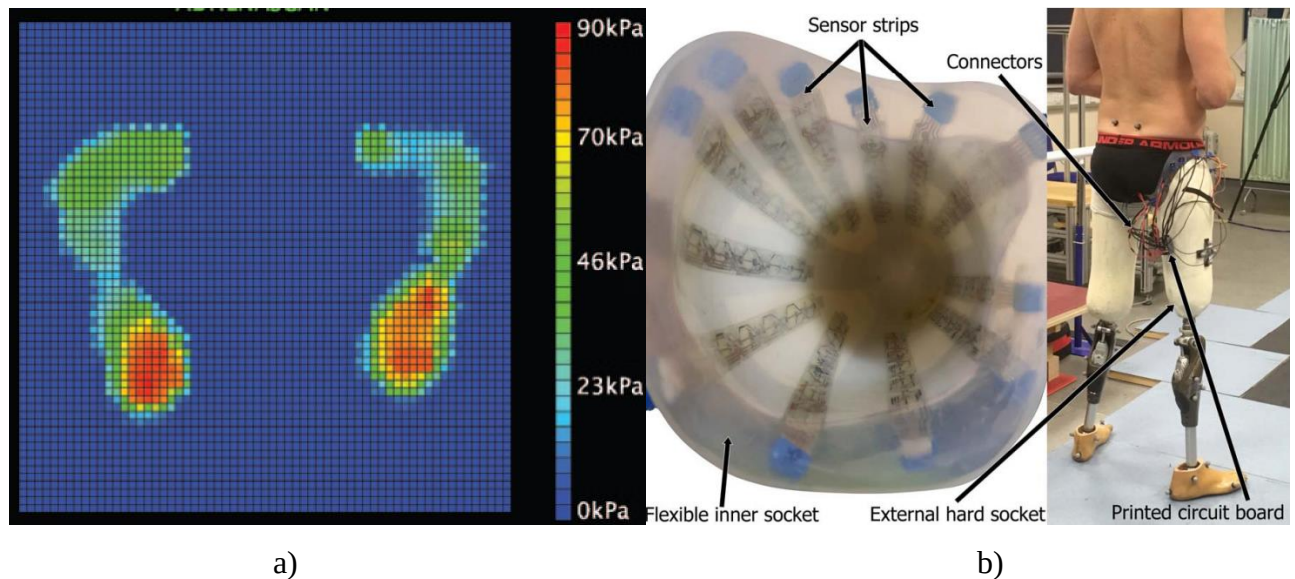


1.15 pav. Raumenų judesių atpažinimo apyrankės prototipas (Dontha et al., 2022)

Velostat[®] slėgio matavimo matricos

Kadangi Velostat[®] yra gana pigus kompozitas, jį populiariau naudoti moksliniuose tyrimuose, kuriuose reikalingos lanksčios jutiklių matricos. Kompozito kaina leidžia pigiai kurti prototipus ir gaminti didelių matmenų slėgio matavimo matricas. Matricos pagamintos iš Velostat[®], naudojamos

matuoti slėgio pasiskirstymą įvairiose kūno vietose, kūnų sukuriama slėgį ant paviršių ir pan. Naudojant šias matricas galima gauti daug naudingos informacijos apie kūnų sąveiką, ypač bioinžinerijoje. Suprpto, Setiawan, Zakaria, Adiprawita & Supartono (2017) tyrime, naudojant Velostat® buvo sukurta slėgio jutimo matrica, kuria buvo matuojamas slėgio pasiskirstymas pėdose (1.16 pav. a). Hopkins, Vaidyanathan, McGregor (2020) savo darbe sukūrė matricą, skirtą matuoti slėgį protezuose, naudodami 12 jutiklių juostų, kuriose buvo po 12 jutimo taškų (1.16 pav. b).



1.16 pav. a) Pėdų slėgio pasiskirstymas (Suprpto et al., 2017); b) Slėgio proteze matavimo matrica (Hopkins et al., 2020)

LPK cikliniai tyrimai

Šiuo metu nėra atlikta daug tyrimų, kuriuose būtų įvertintas LPK, o ypač Velostat® ilgaamžiškumas. Dauguma tyrimų, kuriuose atliekami LPK ciklinių apkrovų bandymai, apsiriboja nedideliais apkrovos ciklų skaičiais ir yra apkraunami sąlyginai nedidelėmis jėgomis. Tokie tyrimai gali būti naudingi siekiant įvertinti naudojamos medžiagos atsako atkartojamumą ir trumpalaikį stabilumą, tačiau yra per trumpi, kad įvertintų kiek ilgai jutiklis bus tinkamas naudoti. Panašių tyrimų palyginimas pateikiamas 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Panašių tyrimų rezultatai

Naudota laidži medžiaga	Medžiagos forma	Naudotas slėgis	Tyrimo metu naudotas ciklų skaičius, tūkst.	Šaltinis
Velostat®	Plėvelė	140, 280 ir 560 kPa	150	Šis darbas
VACNT	Nusodinta ant silikono	200 kPa	10	(Zhang et al., 2020)
Modifikuoto grafito ir poliuretano kompozitas	Plėvelė	Iki 10 kPa	Iki 2	(He et al., 2017)
Grafenas	Plėvelė	28 Pa	4	(Zhu et al., 2019)
Grafenas	Nusodintas ant popieriaus	Iki 10 kPa	0,3	(Tao et al., 2017)
Anglies suodžiai	Nusodinti ant silikono	2,5 kPa	1,5	(Hu et al., 2020)

Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo atlikta literatūros apie laidžius polimerų kompozitus apžvalga. Apžvalgoje apibrėžiami LPK ir jų veikimo principai. Kadangi tyrimo objektas yra anglimi pagrįstas LPK, buvo atlikta įvairių anglies formų, naudojamų LPK gamybai, apžvalga, kurioje pateikiami išsamūs kiekvienos anglies formos apibūdinimai. Taip pat šiame skyriuje aptariami įvairūs būdai, kuriais LPK naudojami jėgos, slėgio ar deformacijų jutimui įvairiose paskirtyse. Pateikiamos dažniausiai naudojamos šių jutiklių konstrukcijos ir aptariamos jų panaudojimo galimybės. Buvo aptarta Velostat® medžiaga, jos sudėtis, bei pranašumai ir trūkumai lyginant su kitomis anglies formomis pagrįstais LPK. Pateikti pavyzdžiai, kaip ši medžiaga naudojama mokslinėje veikloje. Apžvelgus iki šiol atliktus panašius tyrimus, nustatyta, kad juose naudotos apkrovos ir bandymų trukmės nėra pakankamos, kad būtų galima įvertinti ilgalaikio laidžių polimerų naudojimo galimybes.

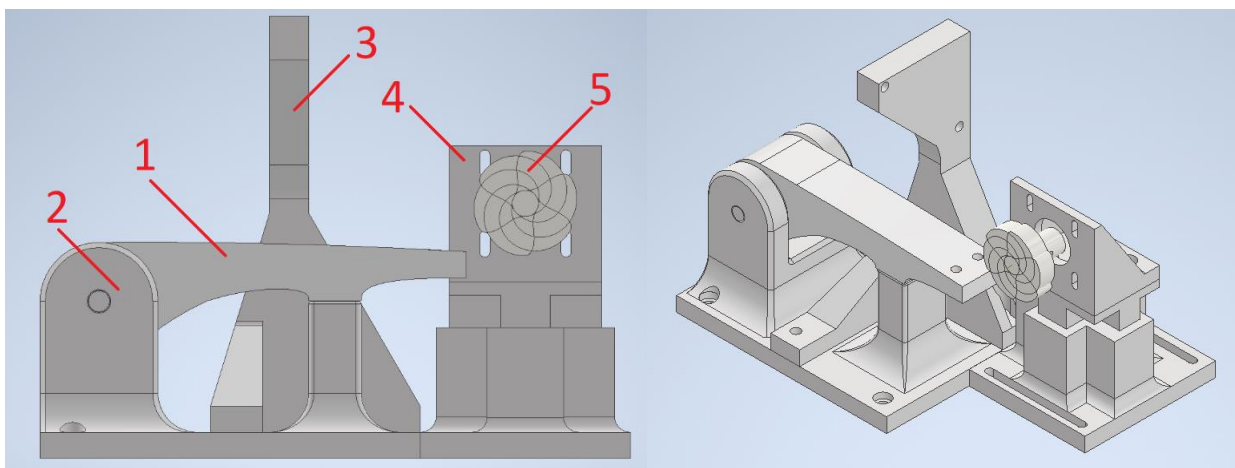
2. TYRIMO STENDO KŪRIMAS IR PRIIMTŲ SPRENDIMŲ PAGRINDIMAS

Šiame skyriuje pateikiama tyrimo stendo, naudojamo bandymams atlikti, konstrukcija bei veikimo principo paaiškinimas.

2.1. Tyrimo stendo kūrimas

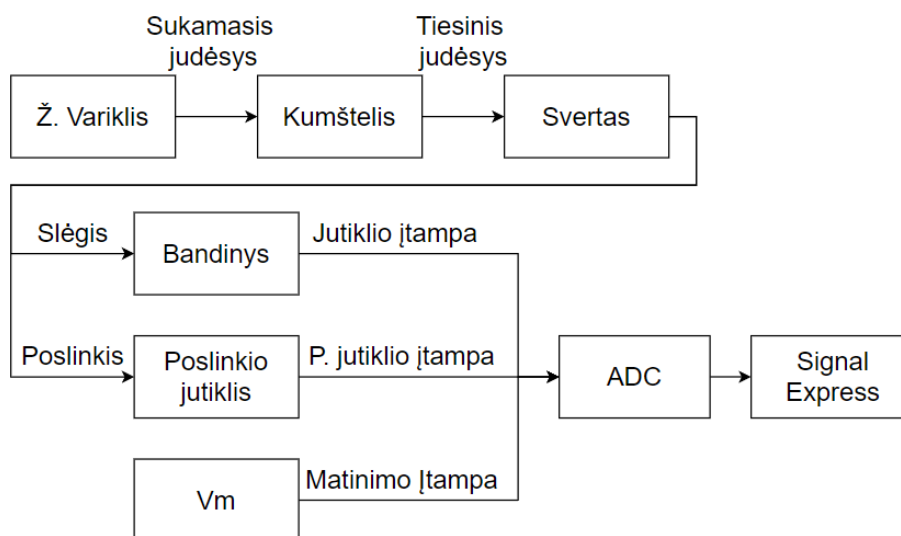
Pagrindinis reikalavimas kuriamam tyrimo stendui buvo bent 10 Hz suspaudimo dažnis, kuris parinktas atsižvelgiant į informacijos apie tiriamos medžiagos ilgaamžiškumą trūkumą, bei panašiuose tyrimuose naudotus dažnius, kurie buvo žemi, dėl to apkrovos ciklų skaičius irgi buvo mažas. Iki šiol atlikti Velostat® bandymai apsiribodavo kelių tūkstančių ciklų bandymais, kurių metu medžiagos savybės pakisdavo nežymiai. Atsižvelgiant į tai buvo nuspręsta, kad bandymams gali prireikti didelio skaičiaus ciklų ir stendas turėtų dirbti bent nurodytu dažniu, kad atskiri bandymai neužtruktų per ilgai. Norint atitikti dažnio reikalavimą, buvo atlikta galimų jėgos perdavimo mechanizmų apžvalga ir buvo apsisauta ties sverto tipo stendu, varomu žingsninio variklio su kumšteliu. Kumšteliui (2.1 pav. 5) besisukant jis spaudžia prie sverto (2.1 pav. 1) pritvirtintą metalinę plokštelę (nevaizduojama) ir taip dėl sverto formos perduodama jėga medžiagai, kuri yra tarp stendo korpuso (2.1 pav. 2) ir sverto. Stendo korpusas, svertas, poslinkio jutiklio stovas bei kumštelis buvo atspausdinti naudojant 3D spausdintuvą, tai leido greitai keisti stendo konstrukciją, kol buvo pasiektas priimtinas variantas. Keičiant kumštelio formą, poziciją ir sukimosi greitį, galima padidinti arba sumažinti bandymų dažnį, pridedamos jėgos dydį ir jėgos pridėjimo laiką neprarandant variklio sukimo momento, todėl sukurtas stendas gali būti nesudėtingai pritaikomas esant įvairiems bandymų režimams. Šiame tyrime naudotas šešių darbo zonų kumštelis, kuris buvo sukamas 200 aps./min. greičiu, dėl to bandymai buvo atliekami 20 Hz ciklų dažniu.

Parinktas variantas ne tik pigesnis nei alternatyvūs jėgos perdavimo būdai, bet taip pat leidžia lengvai reguliuoti bandymų dažnį, bei pridedamą jėgą. Taip pat siekiant išmatuoti medžiagos poslinkį buvo naudojamas poslinkio jutiklis LAT 61 K 30/8 IUPN, kuriam tvirtinti buvo naudojamas stovas (2.1 pav. 3). Surinkto stendo vaizdas pateikiamas 2.3 paveiksle.



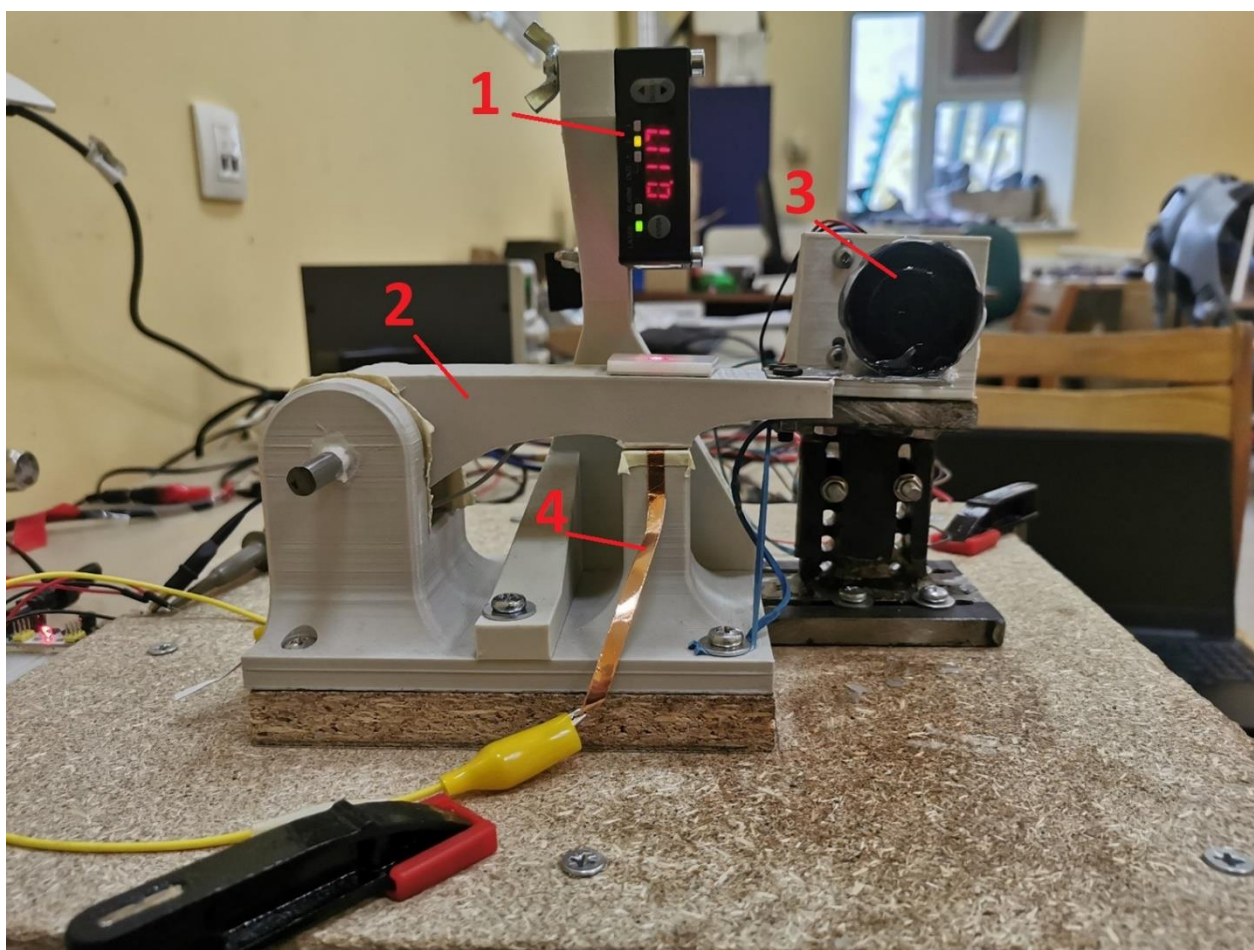
2.1 pav. Bandymų stendo mechaninė dalis: 1) svertas; 2) korpusas; 3) poslinkio jutiklio stovas; 4) žingsninio variklio stovas; 5) kumštelis

Stendo elektrinę dalį sudaro variklio valdymo grandinė ir duomenų rinkimo sistema. Varikliui valdyti pasirinkta naudoti DRV8825 variklių valdiklį ir ARDUINO mikrovaldiklį, kuriuo valdomas variklio greitis ir sukimosi kryptis. Duomenų rinkimo sistemą sudaro Velostat[®] jutiklio maitinimo ir įtampos pokyčio matavimo grandinė, poslinkio jutiklis ir duomenų rinkimo įrenginys NI USB-4432. Duomenims rinkti naudojama NATIONAL INSTRUMENTS programos LABVIEW modulis „SignalExpress 2013“. Stendo struktūrinė schema, kuria vaizduojamas skirtingų sistemos dalių sąveika, pateikiama 2.2 paveiksle.

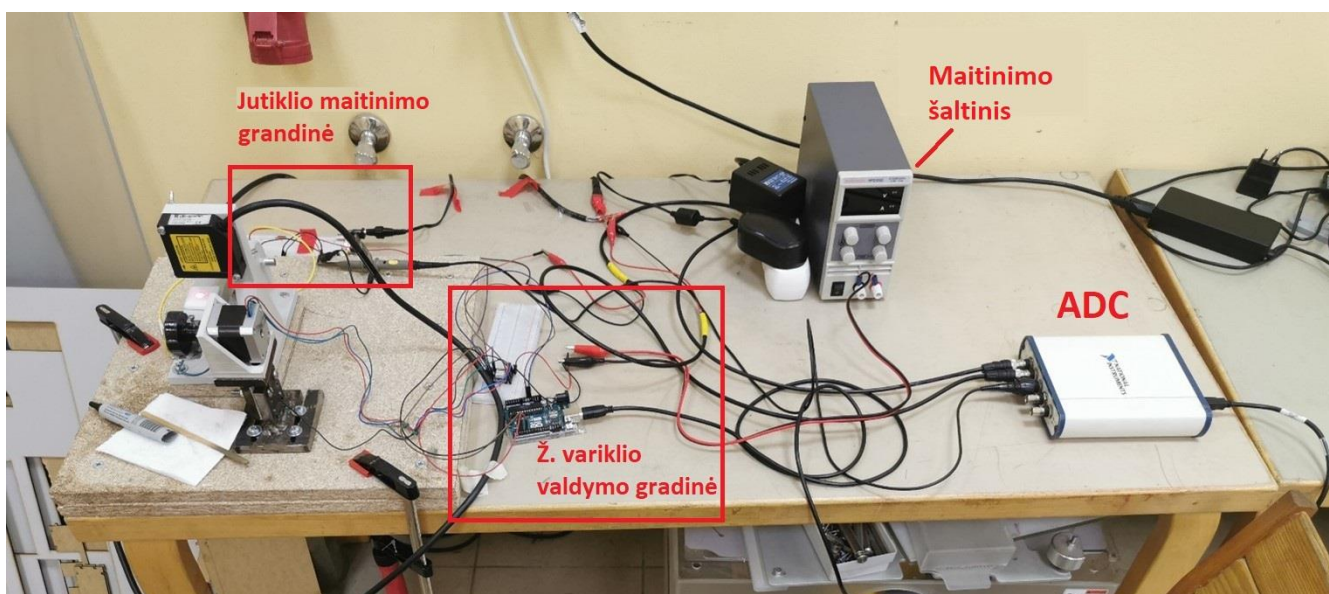


2.2 pav. Stendo elementų sąveikos struktūrinė schema

Bendras surinkto stendo vaizdas pateikiamas 2.3 paveiksle.



a)



b)

2.3 pav. Surinktas bandymų stendas; a) bandymo stendo darbinė dalis: 1) poslinkio jutiklis; 2) svertas; 3) kumštelis; 4) apatinis elektrodas; b) stendo valdymo dalis

3. EKSPERIMENTINIS JUTIKLIO ILGAAMŽIŠKUMO TYRIMAS IR REZULTATAI

3.1. Tyrimo metodika

Prieš atliekant tyrimus buvo suderinamas stendas, t. y. slėgis, kuriuo apkraunama medžiaga. Tai buvo atliekama apkraunant svertą svoriu, kuris sukuria bandymui naudojamą slėgį ir stebint maksimalią jutiklio įtampą apkrovimo momentu. Toliau kumštelis buvo nustatomas į tokią poziciją, kad žemiausiame paspaudimo taške jutiklio įtampa sutaptų su įtampa nuo parinkto svorio. Bandymo metu kumštelis nuolatos tepamas teflono pagrindo tepalu, kuris nereaguoja su kumštelio medžiaga, siekiant sumažinti duomenų rinkimui keliamus triukšmus dėl trinties.

Pirmieji bandymai buvo atlikti naudojant 140 kPa slėgį. Pirmųjų bandymų tikslas buvo rasti skaičių ciklą, po kurių medžiagos perduodama įtampa, o tuo pačiu ir savybės aiškiai pakinta. Tolesni bandymai atliekami siekiant rasti tikslesnę medžiagos savybių pasikeitimo ribą ir kokią įtaką medžiagos nuovargiui daro naudojamas slėgis. Tolesniems tyrimams buvo naudojami 280 kPa ir 560 kPa slėgiai. Su kiekvienu slėgiu buvo atlikta po 7 bandymus. Atlikus tyrimus, gauti duomenys buvo apdorojami „Origin 9.1“ programiniu paketu.

Tyrimui naudojamas 0,1 mm storio Velostat[®] lapas, kuris buvo padalintas į bandinius. Karpant bandinius, buvo vengiama transportavimo metu atsiradusių medžiagos pažeidimų, tokių kaip medžiagos susiglamžymas, įspaudos ir pan.

3.2. Statistiniai skaičiavimai

Atlikus bandymus, naudojamiems Velostat[®] charakteristikų parametrų buvo atliekami statistiniai skaičiavimai naudojant koreliacinę – regresinę analizę, kuria buvo gautos rezultatų paklaidos su 0,95 patikimumu. Reikalingi statistiniai dydžiai buvo apskaičiuojami pagal metodiką pateiktą Cowan (1998).

Koreliacinėje – regresinėje analizėje, absoliutinė matavimo paklaida yra apibrėžiama kaip skirtumas tarp išmatuoto dydžio m_v ir tikrosios matavimo vertės r_v (Bučinskas et al., 2021):

$$\Delta m_v = m_v - r_v; \quad (3)$$

Išmatuotas dydis m_v turi tikimybę atvaizduoti tikrąją matavimo vertę, kai matuojamo dydžio matavimas atliekamas n kartų. Matavimų aritmetinis vidurkis $\overline{m_v}$ apskaičiuojamas pagal formulę (Bučinskas et al., 2021):

$$\overline{m_v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{vi} = \frac{m_{v1} + m_{v2} + \dots + m_{vn}}{n}; \quad (4)$$

Absoliutinė matavimo paklaidą sudaro sisteminės ir atsitiktinės paklaidos. Šioje koreliacinėje – regresinėje analizėje įvertinamos tik atsitiktinės paklaidos, kadangi laikoma, kad matavimui naudojamų įrenginių sukuriamos sisteminės paklaidos neturi didelės įtakos matavimo rezultatams. Įvertinti atsitiktinę paklaidą, reikia apskaičiuoti vidutinę kvadratinę paklaidą σ kiekvienam matavimui (Bučinskas et al., 2021):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_v - \overline{m_v})^2}{n-1}}; \quad (5)$$

Vidutinis nuokrypis S_{vn} apskaičiuojamas pagal formulę:

$$S_{vn} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad (6)$$

Toliau atsitiktinė paklaida apskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta m_{v,n,P} = S_c \cdot S_{vn}; \quad (5)$$

čia: S_c – t skirstinio vertė parenkama iš lentelės pagal matavimų skaičių ($n - 1$) ir patikimumo lygmenį ($\alpha = 0,95$). Apskaičiavus atsitiktinę paklaidą, galutinis matavimo rezultatas išreiškiamas matavimo vidurkio ir atsitiktinės paklaidos suma (Bučinskas et al., 2021):

$$\overline{m_v} \pm \Delta m_{v,n,P}. \quad (5)$$

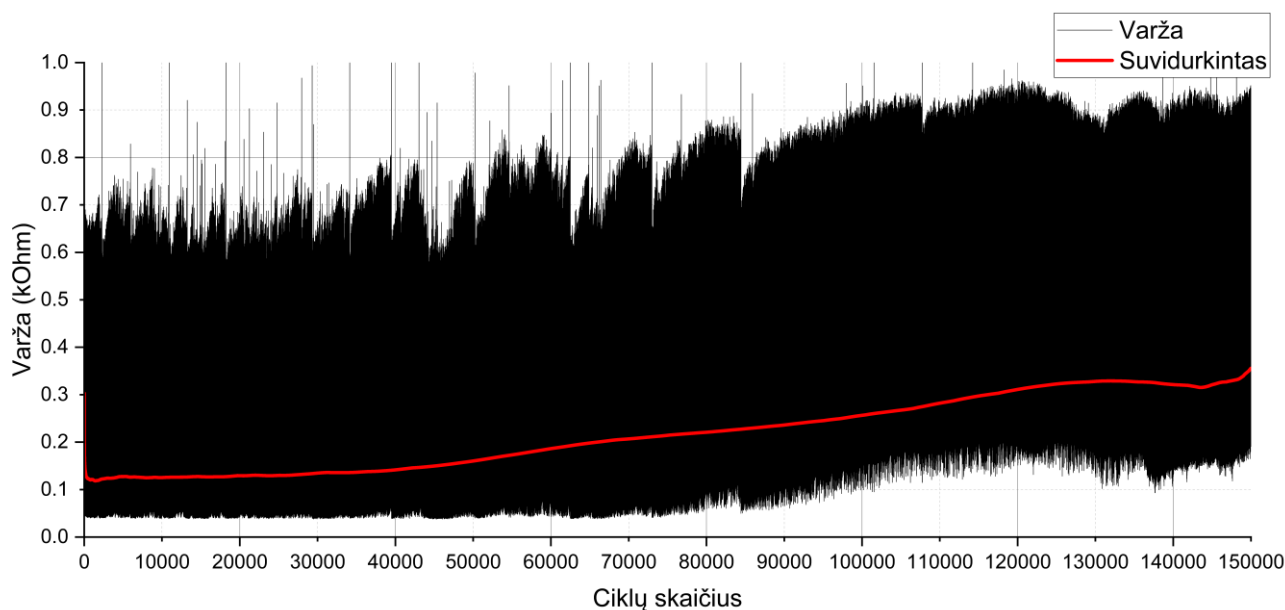
Apskaičiuotos matavimų paklaidos pateikiamos rezultatų grafikuose.

3.3. Tyrimo rezultatų apžvalga ir pasiūlymai

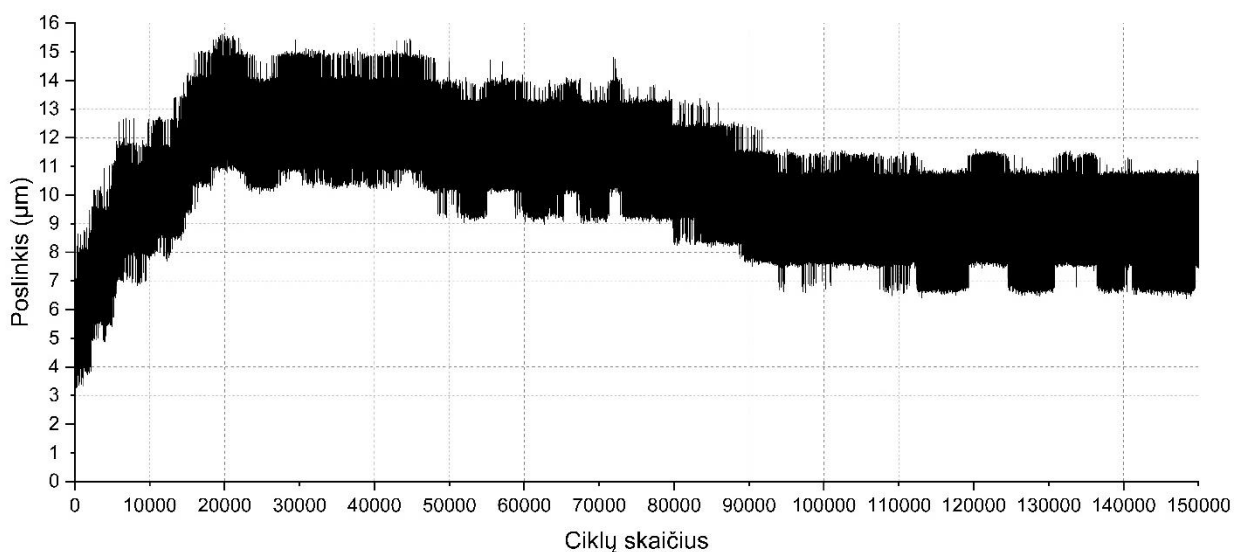
Atlikus pradinį bandymą, pagal išmatuotas jutiklių įtampas buvo apskaičiuotos jutiklio varžos kitimo ir poslinkio kitimo priklausomybės nuo ciklų skaičiaus.

140 kPa bandymų rezultatai

140 kPa slėgiu, 20 Hz dažniu apkrautas jutiklis veikė stabiliai vidutiniškai $67,8 \pm 6,93$ tūkstančius apkrovos ciklų. Po šio ciklų skaičiaus, jutiklio minimali varža žemiausiame suspaudimo taške pradeda kilti, tai matoma 3.1 paveiksle. Bandymų pradžioje minimali varža vidutiniškai siekia apie 40 Ω , o pabaigoje apie 200 Ω . Toks laidumo sumažėjimas gali vykti dėl tokių Velostat® mechaninių savybių, kaip viskoelastiškumas ir valkšnumas bei dėl laidžių dalelių persistūmimo. Spaudžiant tik 25 mm² plotą, laikui bėgant laidžios dalelės gali būti perstumiamos aplink spaudžiamą medžiagos vietą, dėl to sumažėja laidumas spaudžiamoje medžiagos zonoje. Toks medžiagos elgesys, galėtų paaiškinti 3.2 paveiksle, poslinkio grafike matomą poslinkio sumažėjimą, kadangi perstumta medžiaga susikaupė aplink spaudžiamą vietą ir po truputį pradėtų trukdyti viršutiniam elektrodui visiškai nusileisti į anksčiau spaus tą medžiagos zoną.

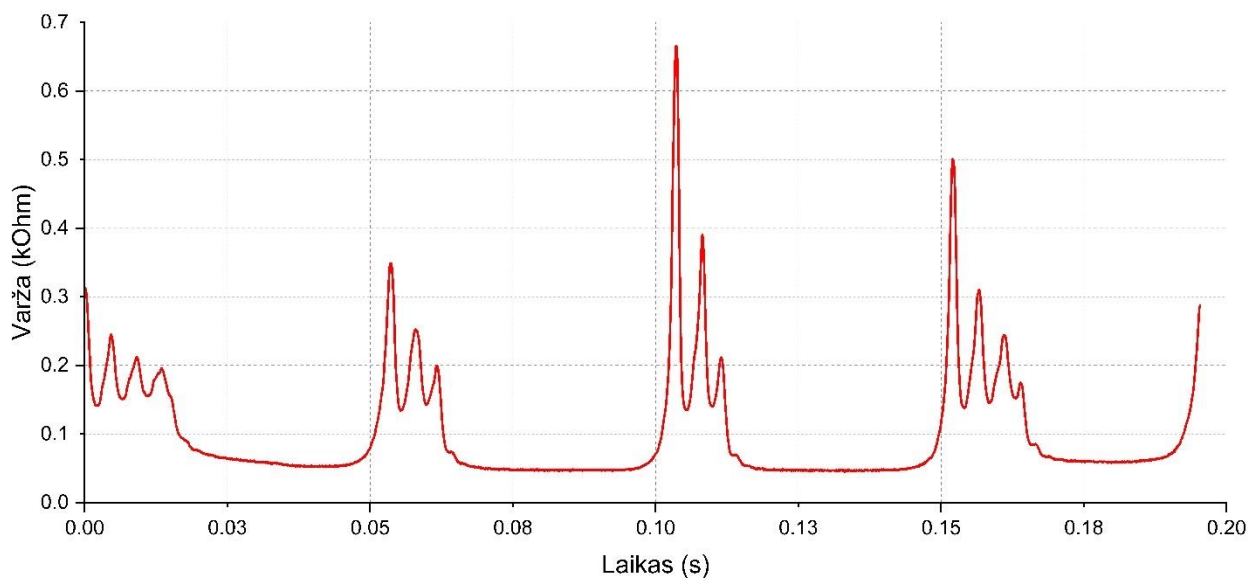


3.1 pav. Velostat®, apkraunamo 140 kPa, atsakas per 150 tūkst. ciklų



3.2 pav. Velostat®, apkraunamo 140 kPa, poslinkio jutiklio duomenys

Kelių pradinių apkrovimo ciklų atsako padidintas vaizdas pateikiamas 3.3 paveiksle. Jame matoma, kaip buvo apkraunamas jutiklis.

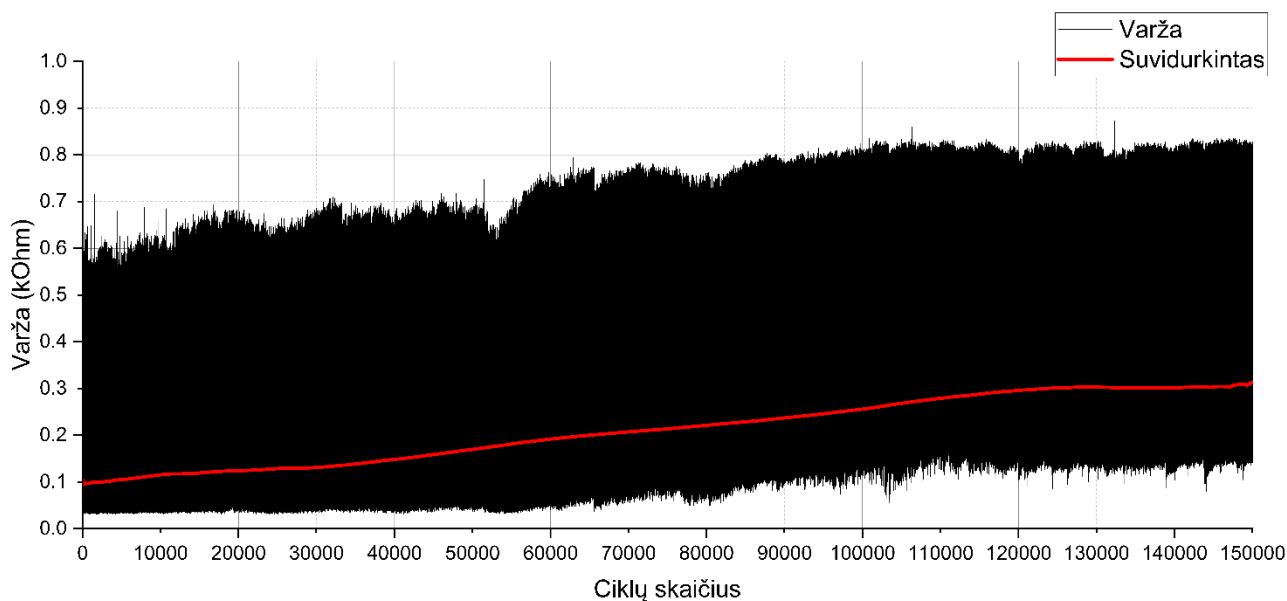


3.3 pav. Velostat®, apkraunamo 140 kPa, pradinis padidintas atsakas

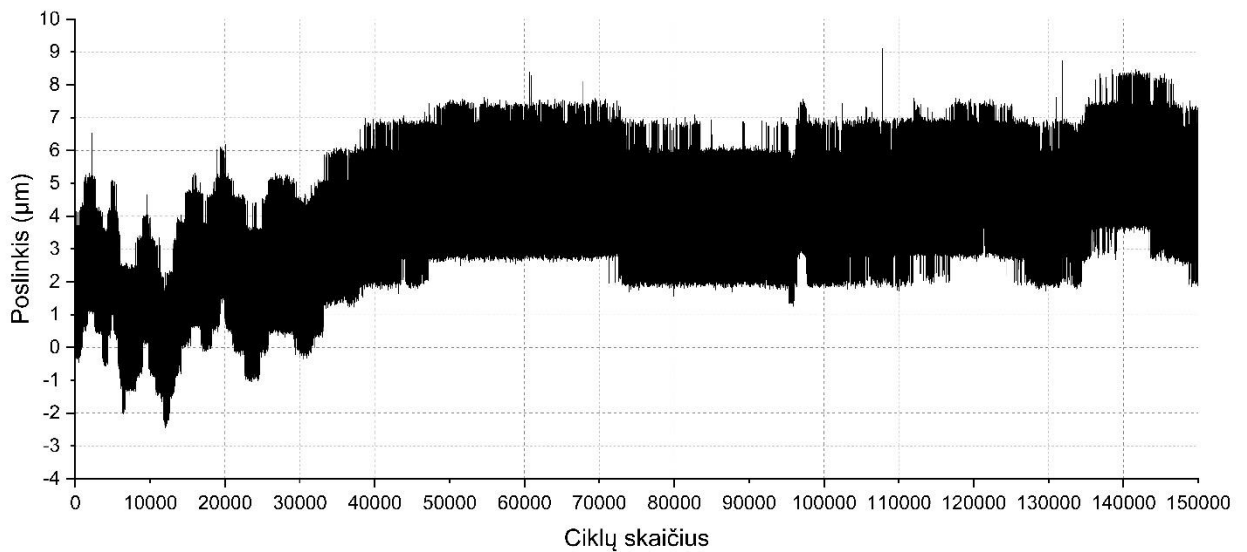
Pradinis padidintas jutiklio atsakas apkrovos metu yra gana tolygus.

280 kPa bandymų rezultatai

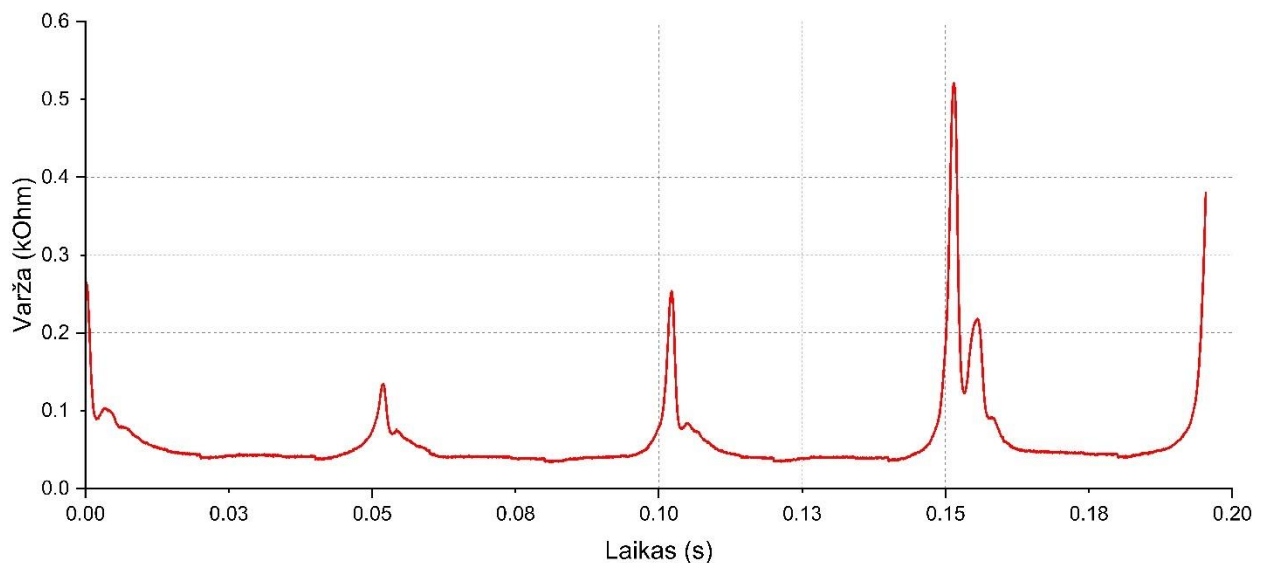
Bandymų su 280 kPa slėgiu metu, Velostat® demonstravo panašų elgesį, kaip ir ankstesnių tyrimų metu (3.4 pav.). Vienintelis skirtumas viso signalo grafike – sumažėjęs ciklų skaičius iki atsako kitimo pradžios. Šiuo atveju, atsako prastėjimas prasidėdavo vidutiniškai ties $56,8 \pm 5,09$ tūkst. ciklų. Jutiklio pradinio ciklo vaizde, kuris pateikiamas 3.6 paveiksle, galima pastebėti, kad jutiklio pasiekiamą minimali varža dėl didesnės jėgos yra mažesnė. Lyginant bandymo pradžią ir pabaigą, varža dėl 280 kPa apkrovos išaugo apie 4 kartus. Toks mažesnis atsako pokytis galėtų būti aiškinamas tuo, kad aplink darbo zoną išsispaudusi medžiaga negali pasipriešinti didesniam slėgiui taip pat, kaip 140 kPa bandymų metu ir todėl varžos padidėjimas nėra toks staigus. Tą patį galime pastebėti ir lyginant abiejų bandymų varžos kitimo duomenis. Varžos kitimas po stabilaus darbo ciklų skaičiaus vyksta lėčiau, nei bandymuose su 140 kPa slėgiu.



3.4 pav. Velostat®, apkraunamo 280 kPa, atsakas per 150 tūkst. ciklų



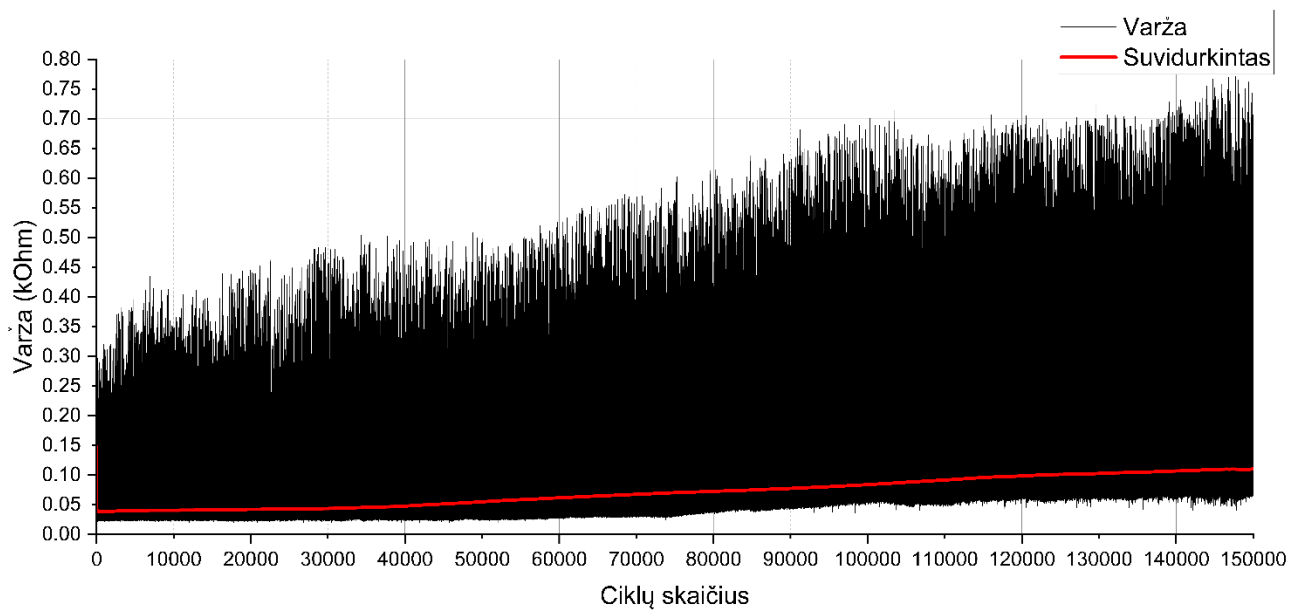
3.5 pav. Velostat®, apkraunamo 280 kPa, poslinkio jutiklio duomenys



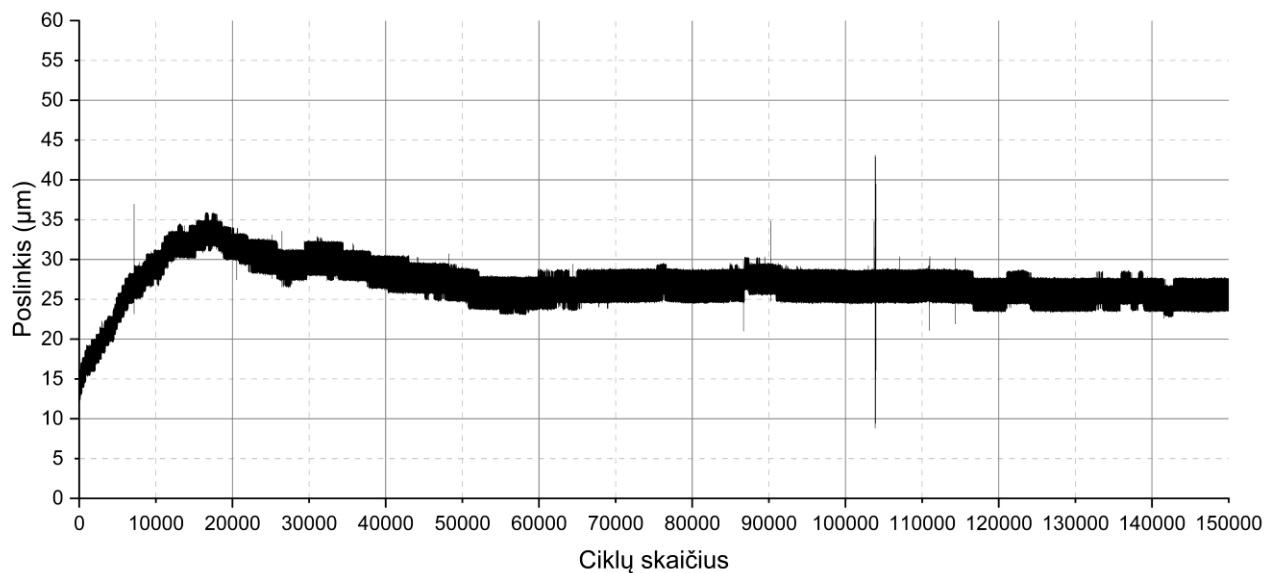
3.6 pav. Velostat®, apkraunamo 280 kPa, pradinis padidintas atsakas

560 kPa bandymų rezultatai

Atlikus bandymus su 560 kPa slėgiu, buvo pastebėta, kad gaunamas signalas yra stabilesnis, nei bandymų su mažesniais slėgiais metu. Bandymų metu signalo kitimas prasideda vidutiniškai ties $67,7 \pm 2,77$ tūkst. ciklų, o signalo kitimas iki bandymo pabaigos yra daug mažesnis nei naudojant mažesnius slėgius. Tai rodo, kad didesnio slėgio naudojimas gali būti naudingas siekiant gauti švaresnius duomenis ir ilgiau veikiančius jutiklius. Jutiklio poslinkis dėl didesnės jėgos taip pat yra didesnis, o pradinio įsidirbimo ciklų skaičius yra šiek tiek mažesnis.

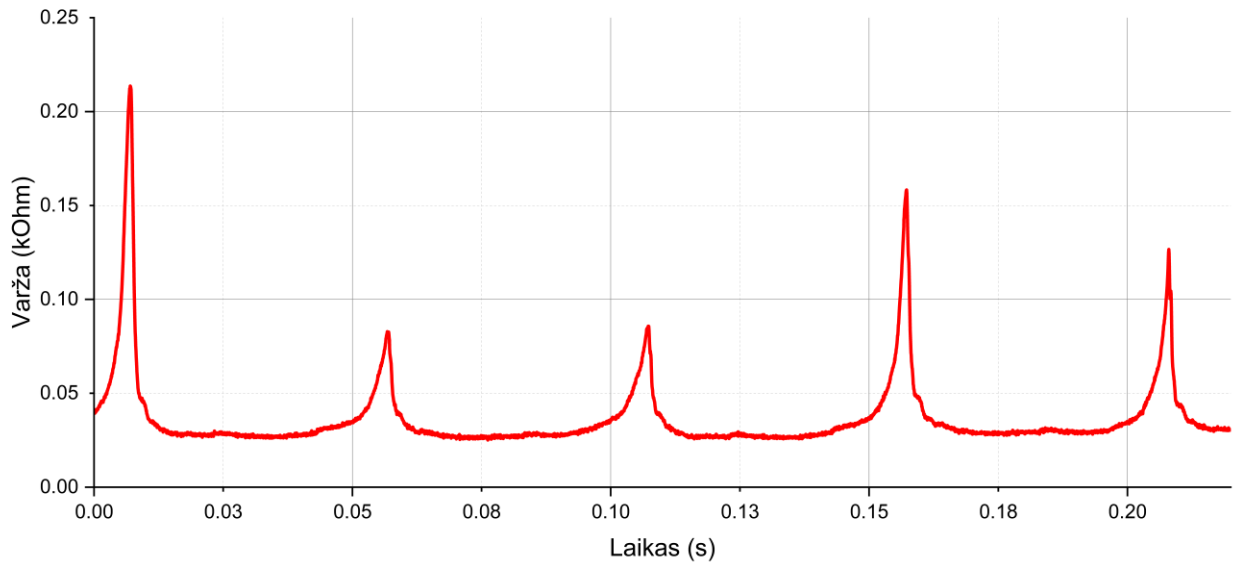


a)



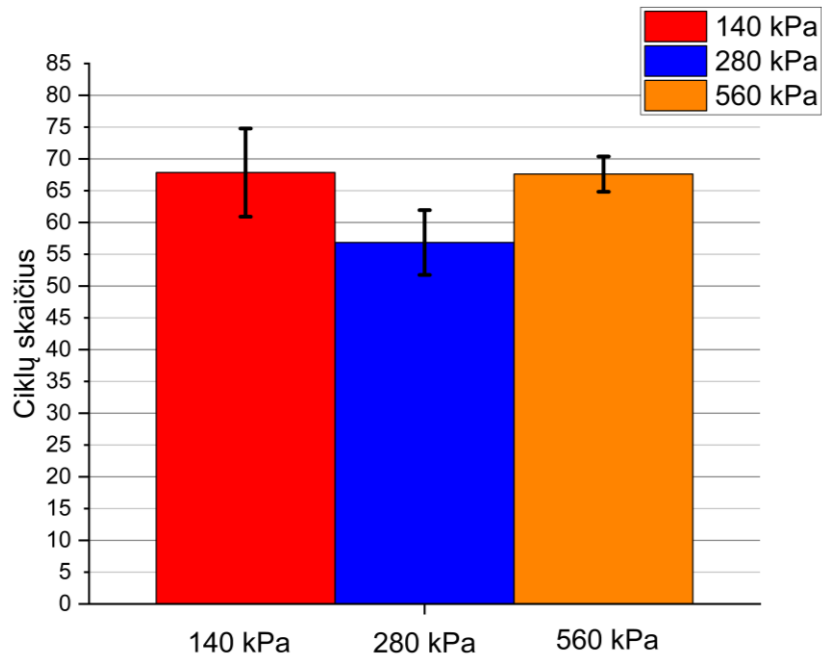
b)

3.7 pav. a) Velostat[®], apkraunamo 560 kPa, atsakas per 150 tūkst. ciklų; b) To paties bandymo poslinkio jutiklio duomenys



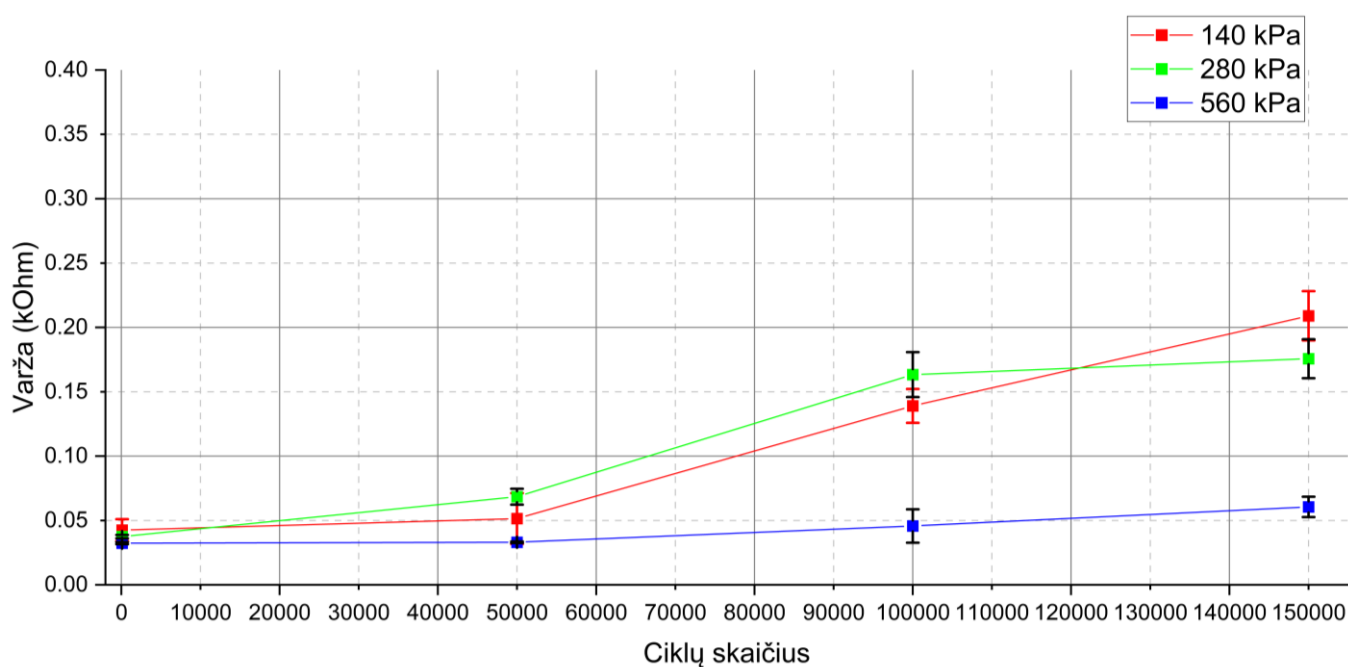
3.8 pav. Velostat®, apkraunamo 560 kPa, pradinis padidintas atsakas

Bandymų metu pastebėta, kad vidutiniai jutiklio stabilaus darbo ciklų skaičiai yra priklausomi nuo naudojamo slėgio. Vis dėlto atsižvelgiant į 3.9 paveiksle pateiktus duomenis, galime teigti, kad minėta priklausomybė nėra tiesiška ir atsižvelgiant į bandymų rezultatus, Velostat® medžiagos ilgaamžiškumas galimai būtų pagerintas naudojant ją su didesniais slėgiais.

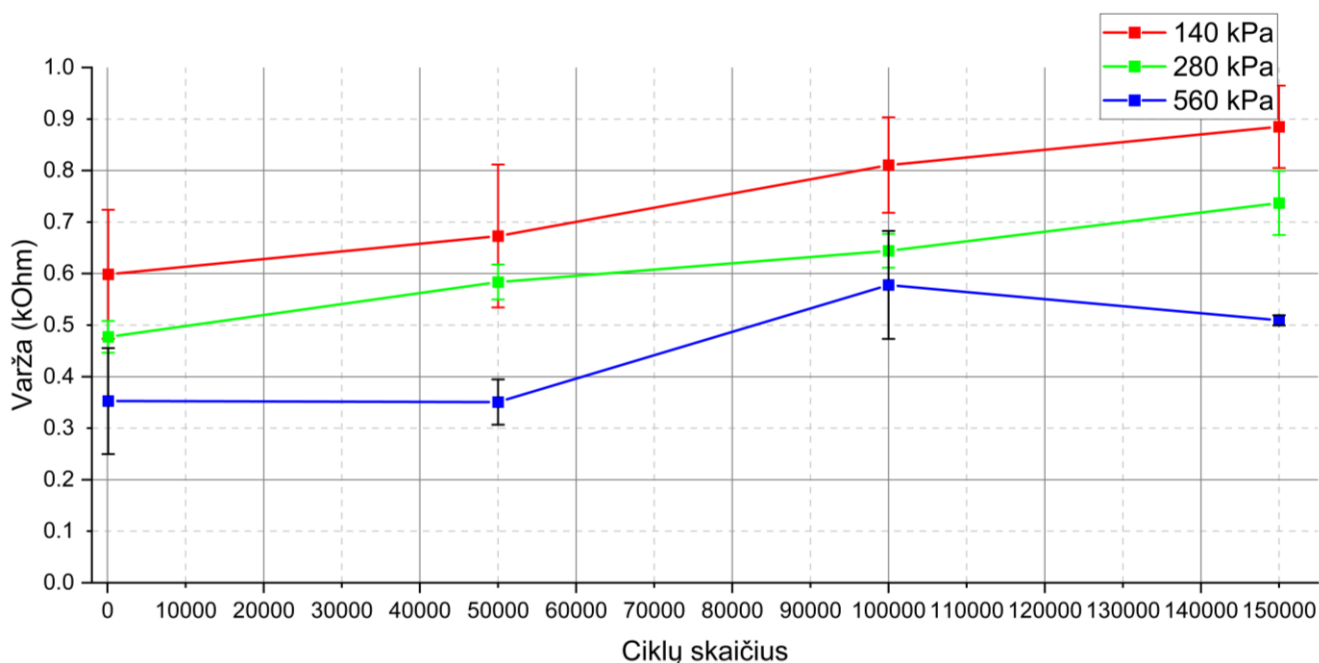


3.9 pav. Velostat® jutiklių signalo prastėjimo pradžios ciklų skaičius

3.10 ir 3.11 paveiksluose pateikiamos vidutinės minimalios ir maksimalios jutiklių varžos vertės bandymų metu. Galime pastebėti, kad jutiklius apkraunant 560 kPa slėgiu, minimalios varžos augimas bandymų metu yra žymiai lėtesnis nei naudojant mažesnes apkrovas. Bandymų paklaidos naudojant 560 kPa slėgį taip pat mažesnės po stabilaus darbo ciklų skaičiaus, kas toliau iliustruoja tai, kad naudojant didesnes apkrovas, Velostat® jutikliai veikia stabiliau, o jų ilgaamžiškumas geresnis. Vertinant maksimalias varžas bandymų metu, matome, kad varžos amplitudės didinant jėgą mažėja, o taip pat mažėja ir jų augimas bandymo metu.



3.10 pav. Velostat® jutiklių signalo vidutinės minimalios varžos vertės suspaudimo metu, pagal ciklų skaičių



3.11 pav. Velostat® jutiklių signalo vidutinės maksimalios varžos vertės bandymo metu, pagal ciklų skaičių

Jutiklio nuovargio kompensavimo galimybės

Atsižvelgiant į bandymų rezultatus, matome, kad Velostat® slėgio jutiklių charakteristikos ir darbo stabilumas labai priklauso nuo naudojamų apkrovų. Siekiant pagerinti jutiklio ilgaamžiškumą, pirmiausia reikia apsibrėžti jutiklio naudojimo paskirtį ir naudojimo sąlygas, kadangi naudojant jutiklius slėgio buvimui nustatyti (pvz.: jungikliai, darbo zonos užimtumo nustatymas) kompensavimas gali turėti visiškai kitokius tikslus, nei naudojant šią medžiagą slėgio dydžiui įvertinti. Naudojant jutiklius slėgio buvimo faktui nustatyti, kompensavimas iš esmės nereikalingas, kadangi tokiems jutikliams veikimo stabilumas nėra labai svarbus, kol nėra minimalaus apkrovos slėgio reikalavimo. Kai toks reikalavimas yra, paprasčiausias būdas kompensuoti jutiklio nuovargį būtų koreguoti valdymo programose nustatytus įtampos slenksčius. Tokiu būdu, kol nėra pažeidžiama jutiklio medžiaga, jutiklis galėtų būti naudojamas labai ilgą laiką.

Naudojant Velostat® jutiklius slėgio dydžiui įvertinti, svarbu žinoti kokių slėgių matavimui bus naudojami jutikliai. Siekiant kompensuoti mažesnių slėgių įtaką nuovargiui galima bandyti kurti ir naudoti algoritmus, kurie priklausomai nuo jutiklio naudojimo laiko koreguotu jutiklio atsaką nurodytais dydžiais. Vis dėlto tokių algoritmų kūrimas ne tik sudėtingas, bet reikalautų didelės apimties bandymų, o sukurto algoritmo tikslumas labai priklausytų nuo naudojimo sąlygų laikymosi.

Atsižvelgiant į Velostat[®] kainą ir bandymų rezultatus, tokie sprendimai neatrodo tikslingi. Naudojant didesnę slėgį matome, kad jutiklio charakteristika yra žymiai stabilesnė, o charakteristikos kitimas ne toks staigus kaip mažesnių slėgių rezultatuose, dėl to naudojant didesnius slėgius, jutiklio nuovargio kompensavimas galimai nebūtų reikalingas. Slėgio matavimams naudojamų Velostat[®] jutiklių nuovargio kompensavimas šiuo metu būtų labai sudėtingas ir ne universalus, o jų pakeitimas finansiškai geresnis variantas. Jei kuriamo slėgio jutiklio jautrus Velostat[®] sluoksnis galėtų būti keičiamas jam susidėvėjus, tai iš esmės pašalintu poreikį nuovargio kompensavimui.

IŠVADOS

Atlikus literatūros apie Velostat[®] analizę, buvo pastebėta, kad būtent šiai medžiagai nebuvo atlikti ilgaamžiškumo tyrimai. Apžvelgus iki šiol atliktus panašius tyrimus, nustatyta, kad tyrimuose naudojamos apkrovos ir bandymų ciklų skaičiai nėra pakankami, kad būtų galima vertinti jų tinkamumą ilgalaikiam naudojimui.

Atsižvelgiant į literatūros analizėje priimtas išvadas, buvo nuspręsta atlikti Velostat[®] medžiagos ilgaamžiškumo bandymus. Bandymams atlikti buvo sukurtas savadarbis tyrimo stendas, varomas ant žingsninio variklio pritvirtintu kumšteliu. Bandymų metu, jutiklio įtampos ir poslinkio duomenys buvo renkami ir saugomi naudojant ADC signalo keitiklį ir programos Labview modulį SignalExpress. Tyrimo metu surinkti duomenys buvo apdorojami programa ORIGIN, taip pat skaičiuojami duomenų statistiniai rodikliai.

Bandymų metu medžiaga buvo apkraunama 140 kPa, 280 kPa ir 560 kPa slėgiais. Bandymai atlikti 20 Hz apkrovos dažniu iki 150 tūkst. apkrovos ciklų. Atlikus po 7 bandymus, naudojant skirtingus slėgius, buvo pastebėta, kad dėl naudojamo slėgio ne tik keičiasi jutiklio stabilaus darbo ciklų skaičius, bet ir signalo prastėjimo viršijus šiuos ciklų skaičius greitis. Naudojant 140 kPa slėgį, jutiklio medžiaga atlaiko iki $67,8 \pm 6,93$ tūkst. apkrovos ciklų, tačiau po jų, laidumo suprastėjimas yra ne tik didesnis nei naudojant didesnius slėgius, bet vyksta šiek tiek greičiau. Naudojant 560 kPa slėgį buvo pastebėta, kad jutiklio ilgaamžiškumas ($67,7 \pm 2,77$ tūkst. ciklų) ne tik geresnis nei naudojant 280 kPa slėgį ($56,8 \pm 5,09$ tūkst. ciklų), bet signalo kitimas po stabilaus darbo ciklų skaičiaus vyksta tolygiau ir lėčiau nei naudojant mažesnius slėgius. Įvertinus jutiklio atsako rezultatus skirtingose bandymo dalyse, buvo nustatyta, kad jutiklį apkraunant 560 kPa slėgiu, ne tik pagerėja jutiklio ilgaamžiškumas, bet vyksta mažesnis jutiklio atsako amplitudės pokytis tarp neapkrauto ir pilnai apkrauto jutiklio. Šis faktas galėtų reikšti, kad naudojant šią medžiagą matuoti mažiems slėgiams, konstrukciniais sprendimais būtų galima žinomu dydžiu padidinti jutimo tašką veikiantį slėgį, dėl ko pagerėtų jutiklio ilgaamžiškumas ir stabilumas.

Pasiūlymai tolimesniems tyrimams

Pagal bandymų metu gautus rezultatus ir literatūros analizėje pateiktus ankstesnių tyrimų pavyzdžius, tolimesni tyrimai galėtų bandyti gilintis į:

- Velostat[®] jutiklių ilgaamžiškumo priklausomybę nuo didesnių arba platesnių intervalų apkrovų.

- kaip bandymuose naudojamų apkrovų dažnis galėtų veikti medžiagos ilgaamžiškumą, kadangi LPK jutikliai naudojami tiek sąlyginai mažų dažnių bioinžinerinėms paskirtims, tiek didesnių dažnių mechaniniams veiksams tirti.
- kaip kinta jutiklio ilgaamžiškumas dėl jo konstrukcijos. Galėtų būti tiriamos literatūros analizėje aptartos jutiklių konstrukcijos ar jutiklių matrica.

LITERATŪRA

- Ambrosetti, G., Balberg, I., & Grimaldi, C. (2010). Percolation-to-hopping crossover in conductor-insulator composites. *Physical Review B*, 82(13), 134201.
- Bucinskas, V., Dzedzickis, A., Rozene, J., Subaciute-Zemaitiene, J., Satkauskas, I., Uvarovas, V., ... & Morkvenaite-Vilkonciene, I. (2021). Wearable feet pressure sensor for human gait and falling diagnosis. *Sensors*, 21(15), 5240.
- Carbonaro, N., Laurino, M., Arcarisi, L., Menicucci, D., Gemignani, A., & Tognetti, A. (2021). Textile-based pressure sensing matrix for in-bed monitoring of subject sleeping posture and breathing activity. *Applied Sciences*, 11(6), 2552.
- Castellino, M., Chiolerio, A., Shahzad, M. I., Jagdale, P. V., & Tagliaferro, A. (2014). Electrical conductivity phenomena in an epoxy resin–carbon-based materials composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 108–114.
- Cheng, J., Sundholm, M., Zhou, B., Hirsch, M., & Lukowicz, P. (2016). Smart-surface: Large scale textile pressure sensors arrays for activity recognition. *Pervasive and Mobile Computing*, 30, 97–112.
- Cowan, G. (1998). *Statistical Data Analysis*. Clarendon Press.
- Dontha, B., Swearingen, K., Swearingen, S., Thrane, S. E., & Kiourti, A. (2022). Wearable Sensors Based on Force-Sensitive Resistors for Touch-Based Collaborative Digital Gaming. *Sensors*, 22(1), 342.
- Dzedzickis, A., Sutiny, E., Bucinskas, V., Samukaite-Bubniene, U., Jakstys, B., Ramanavicius, A., & Morkvenaite-Vilkonciene, I. (2020). Polyethylene-carbon composite (Velostat®) based tactile sensor. *Polymers*, 12(12), 2905.
- Giovanelli, D., & Farella, E. (2016). Force sensing resistor and evaluation of technology for wearable body pressure sensing. *Journal of Sensors*.
- He, Y., Li, W., Yang, G., Liu, H., Lu, J., Zheng, T., & Li, X. (2017). A novel method for fabricating wearable, piezoresistive, and pressure sensors based on modified-graphite/polyurethane composite films. *Materials*, 10(7), 684.
- Hopkins, M., Vaidyanathan, R., & McGregor, A. H. (2020). Examination of the performance characteristics of velostat as an in-socket pressure sensor. *IEEE Sensors Journal*, 20(13), 6992–7000.

- Hu, J., Yu, J., Li, Y., Liao, X., Yan, X., & Li, L. (2020). Nano carbon black-based high performance wearable pressure sensors. *Nanomaterials*, 10(4), 664.
- Ivaškevičiūtė, R. (2018). *Anglies nanosluoksniai difrakcinei terahercų ruožo optikai* (Magistro darbas, Vilniaus universitetas).
- Yee, M. J., Mubarak, N. M., Abdullah, E. C., Khalid, M., Walvekar, R., Karri, R. R., ... & Numan, A. (2019). Carbon nanomaterials based films for strain sensing application – A review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 18, 100312.
- Yousef, H., Boukallel, M., & Althoefer, K. (2011). Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics – A review. *Sensors and Actuators A: physical*, 167(2), 171–187.
- Kalantari, M., Dargahi, J., Kövecses, J., Mardasi, M. G., & Nouri, S. (2011). A new approach for modeling piezoresistive force sensors based on semiconductive polymer composites. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 17(3), 572–581.
- Karimi, M., Solati, N., Amiri, M., Mirshekari, H., Mohamed, E., Taheri, M., ... & Hamblin, M. R. (2015). Carbon nanotubes part I: preparation of a novel and versatile drug-delivery vehicle. *Expert opinion on drug delivery*, 12(7), 1071–1087.
- Kausar, A. (2019). Poly (methyl methacrylate) nanocomposite reinforced with graphene, graphene oxide, and graphite: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 58(8), 821–842.
- Li, Y., Huang, X., Zeng, L., Li, R., Tian, H., Fu, X., ... & Zhong, W. H. (2019). A review of the electrical and mechanical properties of carbon nanofiller-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Science*, 54(2), 1036–1076.
- Liu, M. Y., Hang, C. Z., Zhao, X. F., Zhu, L. Y., Ma, R. G., Wang, J. C., ... & Zhang, D. W. (2021). Advance on flexible pressure sensors based on metal and carbonaceous nanomaterial. *Nano Energy*, 87, 106181.
- Muzyka, R., Drewniak, S., Pustelny, T., Chrubasik, M., & Gryglewicz, G. (2018). Characterization of graphite oxide and reduced graphene oxide obtained from different graphite precursors and oxidized by different methods using Raman spectroscopy. *Materials*, 11(7), 1050.
- Pegan, J. D., Zhang, J., Chu, M., Nguyen, T., Park, S. J., Paul, A., ... & Khine, M. (2016). Skin-mountable stretch sensor for wearable health monitoring. *Nanoscale*, 8(39), 17295–17303.
- Stassi, S., Cauda, V., Canavese, G., & Pirri, C. F. (2014). Flexible tactile sensing based on piezoresistive composites: A review. *Sensors*, 14(3), 5296–5332.
- Suprpto, S. S., Setiawan, A. W., Zakaria, H., Adiprawita, W., & Supartono, B. (2017, November). Low-cost pressure sensor matrix using velostat. In *2017 5th International Conference on*

- Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME)* (pp. 137–140). IEEE.
- Tao, L. Q., Zhang, K. N., Tian, H., Liu, Y., Wang, D. Y., Chen, Y. Q., ... & Ren, T. L. (2017). Graphene-paper pressure sensor for detecting human motions. *ACS nano*, 11(9), 8790–8795.
- Tihak, A., & Bošković, D. (2019, July). Experimental evaluation of challenges in designing a resistive pressure sensors. In *IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies* (pp. 1–6). IEEE.
- Tretjak, M. (2017). *Kompozitinių medžiagų su anglies nano dalelėmis varžos ir žemo dažnio triukšmo charakteristikos* (Magistro darbas, Vilniaus universitetas).
- Wang, X., Yu, J., Cui, Y., & Li, W. (2021). Research progress of flexible wearable pressure sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 330, 112838.
- Xu, F., Li, X., Shi, Y., Li, L., Wang, W., He, L., & Liu, R. (2018). Recent developments for flexible pressure sensors: A review. *Micromachines*, 9(11), 580.
- Zhai, W., Xia, Q., Zhou, K., Yue, X., Ren, M., Zheng, G., ... & Shen, C. (2019). Multifunctional flexible carbon black/polydimethylsiloxane piezoresistive sensor with ultrahigh linear range, excellent durability and oil/water separation capability. *Chemical Engineering Journal*, 372, 373–382.
- Zhang, R., Palumbo, A., Hader, G., Yan, K., Chang, J., Wang, H., & Yang, E. H. (2020). A flexible pressure sensor with sandwiched carpets of vertically aligned carbon nanotubes partially embedded in polydimethylsiloxane substrates. *IEEE Sensors Journal*, 20(20), 12146–12153.
- Zhu, Y., Cai, H., Ding, H., Pan, N., & Wang, X. (2019). Fabrication of low-cost and highly sensitive graphene-based pressure sensors by direct laser scribing polydimethylsiloxane. *ACS applied materials & interfaces*, 11(6), 6195–6200.
- Zhu, Y., Li, J., Cai, H., Wu, Y., Ding, H., Pan, N., & Wang, X. (2018). Highly sensitive and skin-like pressure sensor based on asymmetric double-layered structures of reduced graphite oxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 1262–1267.

PRIEDAI

PRIEDAS A

Mechatronica
Mechatronika

VARŽINIO SLĖGIO JUTIKLIO ILGAAMŽIŠKUMO TYRIMAI RESEARCH OF RESISTIVE PRESSURE SENSORS DURABILITY

- 1.
2. Kristijonas KARBAUSKAS, Andrius DZEDZICKIS
- 3.
4. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
5. Gauta 2022 m. balandžio 25 d.; priimta

Santrauka. Šiame straipsnyje pateikiami slėgio jutiklio ilgaamžiškumo tyrimai. Slėgio jutikliui naudojama apkrovai jautri pjezo-varžinė medžiaga Velostat®. Tyrimo metu jutiklio medžiaga buvo apkrauta 3,5 N ir 7 N jėgomis iki 150 tūkst. ciklų, siekiant įvertinti medžiagos ilgalaikio naudojimo galimybes. Atlikus rezultatų analizę buvo pastebėta, kad jutiklio signalo įtampos vertės pradeda augti po vidutiniškai 70 tūkst. ciklų (3,5 N) ir vidutiniškai 58 tūkst. ciklų (7 N). Taip pat pateikiama jutiklio atsako prastėjimo ir parinktų ciklų palyginimas. Šio tyrimo rezultatai turėtų padėti įvertinti Velostat® medžiagos tinkamumą įvairiems ilgalaikio taikymo sprendimams, kuriuose reikalingi pigūs slėgio jutikliai.

Reikšminiai žodžiai: Slėgio jutiklis, Velostat®, ilgaamžiškumas, ciklinė apkrova, pjezo-varžinė medžiaga.

Santrumpos

LPK – Laidūs polimerų kompozitai.

VACNT – (angl. Vertically aligned carbon nanotubes) Vertikaliai sulęginti anglies nanovamzdeliai.

CB – (angl. Carbon Black) Anglies nano dalelės.

Įvadas

Laidžių polimerų kompozitais pagrįsti jėgos/slėgio jutikliai turi daug potencialo pigių ir plačiai prieinamų jutiklių kūrimo sferoje. Tokiems jutikliams reikalingos patikimos medžiagos, kurias naudoti būtų naudinga ne tik dėl jų savybių, bet ir dėl kainos, nes reikalingi jutikliai gali būti didelių matmenų. Dažnai slėgio jutikliai yra naudojami norint išmatuoti ar sekti slėgio pasiskirstymą įvairių formų plotuose, dėl to stambi šių jutiklių gamybą yra sudėtingai suderinama su didžiuliu kiekiu paskirčių ir pritaikymo situacijų. Šiuo metu prieinami slėgio jutikliai nėra didelių matmenų, o dėl jų paprastos geometrinės formos ir nedidelio jutimo ploto, jų taikymas yra ribotas. Laidžių polimerų kompozitais pagrįstų jutiklių matricos, priklausomai nuo naudojamų kompozitų yra sąlyginai pigūs didelio ploto slėgio pasiskirstymo tyrimo variantas, kurį galima pritaikyti daugeliui skirtingų projektų. Ypatingai tokie jutikliai yra naudojami moksliniams tyrimams ar integruojami į mėgėjišką elektroniką. Vienas populiariausių ir prieinamiausių tokių polimerų yra Velostat® (dar žinomas kaip Linqstat). Velostat® yra polietileno ir anglies suodžių kompozitas, pasižymintis savybe keisti savo elektrinę varžą dėl mechaninių deformacijų. Būtent ši savybė ir leidžia kurti jutiklius naudojant šią medžiagą, kuri yra sąlyginai pigi, lyginant su alternatyvomis, kurios dažnai pagrįstos brangesnėmis anglies formomis. Vis dėlto, kadangi ši medžiaga didžiąja dalimi yra naudojama mėgėjų elektronikoje arba nedidelės apimtys tyrimuose, Velostat® medžiagos mechaninės savybės nėra pakankamai išsamiai išnagrinėtos mokslinėje literatūroje.

Šiame darbe siekiama eksperimentiniu tyrimu išnagrinėti Velostat® pagrindo jutiklio ilgaamžiškumą. Darbo metu bus siekiama nustatyti, kokių skaičių apkrovos ciklų gali atlaikyti jutiklis, kol jis nustos tinkamai funkcionuoti. Kadangi tyrimui bus naudojamas kuo paprastesnės konstrukcijos jutiklis, tikimasi, kad gautus rezultatus bus galima pritaikyti vertinant mažiausią tokio tipo slėgio jutiklių ilgaamžiškumą.

Tyrimo objektas – varžinis slėgio jutiklis, pagamintas naudojant spaudimui jautrią medžiagą – polietileno-anglies kompozitą Velostat®.

Tyrimo tikslas – varžinio slėgio jutiklio ilgaamžiškumo tyrimų tikslas yra ištirti polietileno-anglies kompozito Velostat® slėgio jutiklio ilgaamžiškumą.

• Laidžių polimerų kompozitų varžiniai slėgio jutikliai

Laidžių polimerų kompozitų (LPK) varžiniai slėgio jutikliai – tai varžiniai slėgio jutikliai, kurių konstrukcijoje kaip spaudimui jautri medžiaga, naudojami LPK. Šie kompozitai, priklausomai nuo pridėto jėgos sukeltų deformacijų

dydžio, keičia savo varžą. Ši savybė ir medžiagų kaina leidžia kurti įvairių formų ir paskirčių slėgio jutiklius už prieinamą kainą. LPK jutikliai plačiai naudojami spaudimo slėgio matavimui, kadangi gali būti gaminami plonų ir lengvų plėvelių pavidalu. Šios polimerų kompozitų plėvelės yra atsparios cheminiam poveikiui, lengvai deformuojasi bei gerai atlaiko perkrovas. LPK jutikliais galima matuoti tiek statines, tiek dinamines apkrovas (Tihak, ir Bošković, 2019; Dzedzickis et al., 2020). Vis dėlto LPK jutikliai pasižymi netiesiškumu, histereze, o dėl medžiagos nehomogeniškumo, matavimų pakartojamumas nėra geras. Medžiagos nuovargis ir lėtas atsistatymas po deformacijos keičia jutiklių pradines savybes ir gali daryti įtaką jutiklio matavimams. Kadangi šios medžiagos deformuojasi ne tik spaudimo taške, o ir aplink jį ir dažnai yra laidžios visomis kryptimis, matavimų rezultatai gali būti iškreipiami. Dėl išvardintų priežasčių, LPK slėgio jutikliai nėra tinkami tiksliam slėgio matavimui, bet turi daug potencialo būti naudojami slėgio vaizdavimo paskirtyse (Dzedzickis et al., 2020).

Pati paprasčiausia LPK slėgio jutiklio konstrukcija, kuri yra vaizduojama 1 paveiksle, yra sudaryta iš laidaus polimero kompozito sluoksnio, kuris yra įterptas tarp dviejų elektrodų sluoksnių. Suspaudus jutiklį, LPK suspenduotos elektrai laidžios dalelės suartėja viena kitos ir pradeda elektriškai sąveikauti. Tarp laidžių dalelių atsiranda elektrai laidūs tinklai, kompozito varža sumažėja ir pro jutiklį gali tekėti srovė. Toks laidžių kompozitų laidumo pokytis aiškinamas dviem efektais:

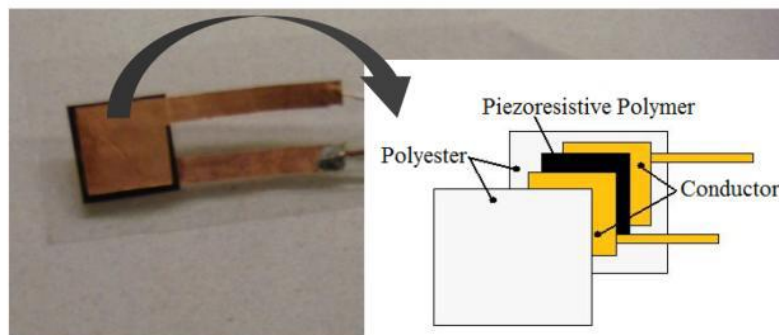
Perkoliacija – tai elektrai laidžių tinklų susidarymas kompozite, kai laidžios dalelės dėl kompozito deformacijos pradeda kontaktuoti ir medžiaga pereina iš izoliatoriaus į laidininką (Ambrosetti, Balberg, & Grimaldi, 2010). Svarbus perkoliacijos rodiklis kompozituose yra perkoliacijos slenkstis – tai mažiausias priemaišų kiekis kompozito struktūroje, kurį perkopus nebėra žymaus pokyčio kompozito elektrinėms savybėms (Dzedzickis et al., 2020)

Tuneliavimas – tai laidžių dalelių elektrinis sąveikavimas, kai laidžios dalelės deformuotame kompozite nekontaktuoja, tačiau tarp jų gali judėti elektronai (Ambrosetti et al., 2010).

Dažniausiai vienas iš minėtų efektų bus dominuojantis. Tai lemia laidžių dalelių tankis, forma, dydis, elektrinis laidumas ir kitos savybės. Perkoliacija labiau pasireiškia kai kompozito laidžių dalelių dydis yra mikronų eilės, tuo tarpu mažėjant dalelių dydžiui iki nano- eilės, labiau pasireiškia tuneliavimo efektas. Bandymai modeliuoti kompozitų laidumo ir priemaišų tankio priklausomybes rodo, kad geriausiai eksperimentinius duomenis atitinka kombinuotas tuneliavimo-perkoliacijos modelis. Tai reiškia, kad nei vienas efektas negali pilnai apibūdinti kompozito laidumo ir keičiantis kompozito dalelių tankiui, laidumo mechanizmai taip pat tampa sudėtingesni (Castellino, Chiolerio, Shahzad, Jagdale & Tagliaferro, 2014; Ambrosetti et al., 2010). Žinant koks laidumo mechanizmas dominuoja kompozite ir tai įvertinus, galima kurti tokias jutiklių konstrukcijas, kurios geriau išnaudotų laidumo mechanizmą (Giovannelli & Farella, 2016).

Tyrimė naudojama medžiaga Velostat® yra kompozitas sudarytas iš polietileno ir anglies suodžių. **Didelio paviršiaus ploto anglies suodžiai** (angl. CB; carbon black), yra grynos anglies nanodalelės, gaunamos pirolizės arba nepilno angliavandenilių sudegimo metu. Terminas „suodžiai“ gali būti šiek tiek klaidinantis, kadangi CB turi didesnę kiekį elementinės anglies ir aiškiau apibrėžtas savybes. CB pasižymi dideliu elektriniu laidumu, LPK, kuriuose yra CB turi žemą perkoliacijos slenkstį. CB yra naudojamas gumos, polimerų, baterijų, superlaidininkų ir jutiklių gamyboje, taip pat naudojamas kaip pigmentas (Yee et al., 2019; Tretjak, 2017). Lyginant su kitomis anglies nanodalelėmis CB yra žymiai pigesnis ir plačiai prieinamas, o laidūs kompozitai gaminami naudojant CB jau seniai naudojami kaip antistatinės pakavimo medžiagos.

Šiuo metu nėra atlikta daug tyrimų, kuriuose būtų įvertintas LPK, o ypač Velostat® ilgaamžiškumas. Dauguma tyrimų, kuriuose atliekami LPK ciklinių apkrovų bandymai, apsiriboja nedideliais apkrovos ciklų skaičiais ir yra apkraunami sąlyginai nedidelėmis jėgomis.



1 pav. Paprasčiausias LPK varžinio slėgio jutiklis ir jo struktūra (Kalantari et al., 2011)

Fig 1. Simplest design of a resistive pressure sensor (Kalantari et al., 2011)

Tokie tyrimai gali būti naudingi siekiant įvertinti naudojamos medžiagos atsako atkartojamumą, tačiau yra per trumpi, kad įvertintu kiek ilgai jutiklis bus tinkamas naudoti. Panašių tyrimų palyginimas pateikiamas 1 lentelėje.

1 lentelė. Panašių tyrimų palyginimas

Table 1. Comparison of similar work

Naudota laidži medžiaga	Medžiagos forma	Naudotas slėgis	Tyrimo metu naudotas ciklų skaičius, tūkst.	Šaltinis
Velostat®	Plėvelė	140, 280 kPa	150	Šis darbas
VACNT	Nusodinta ant silikono	200 kPa	10	(Zhang et al., 2020)
Modifikuoto grafito ir poliuretano kompozitas	Plėvelė	Iki 10 kPa	Iki 2	(He et al., 2017)
Grafasas	Plėvelė	28 Pa	4	(Zhu et al., 2019)
Grafasas	Nusodintas ant popieriaus	Iki 10 kPa	0,3	(Tao et al., 2017)
Anglies suodžiai	Nusodinti ant silikono	2,5 kPa	1,5	(Hu et al., 2020)

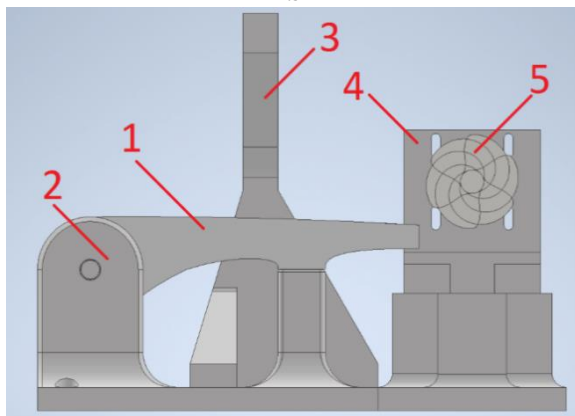
• Eksperimentiniai tyrimai

1.1. Tyrimo stendas

Tyrimo stendo mechaninės dalies konstrukcija pateikiama 2.1 paveiksle. Pagrindinis reikalavimas kuriamam stendui buvo bent 10 Hz suspaudimų dažnis. Toks dažnis buvo parinktas atsižvelgiant į informacijos apie Velostat® ilgaamžiškumą trūkumą ir į tai, kad anksčiau atlikti panašūs tyrimai apsiribojo nedideliais ciklų skaičiais. Siekiant atlikti bandymus, kuriuose būtų atlikta kuo daugiau suspaudimo ciklų, bet tuo pačiu bandymai neužtruktų per ilgai, sukurtas stendas buvo išbandytas ir naudojamas su 20 Hz suspaudimų dažniu. Stendą sudaro svirtas (2.1 pav. 1), korpusas (2.1 pav. 2), poslinkio jutiklio stovas (2.1 pav. 3), žingsninio variklio stovas (2.1 pav. 4) ir kumštelis (2.1 pav. 5). Surinktame stende taip pat yra poslinkio jutiklis LAT61K30/8IUPN, tiriamo jutiklio elektrodai ir metalinė plokštelė, per kurią perduodama jėga nuo kumštelio į svirtą.

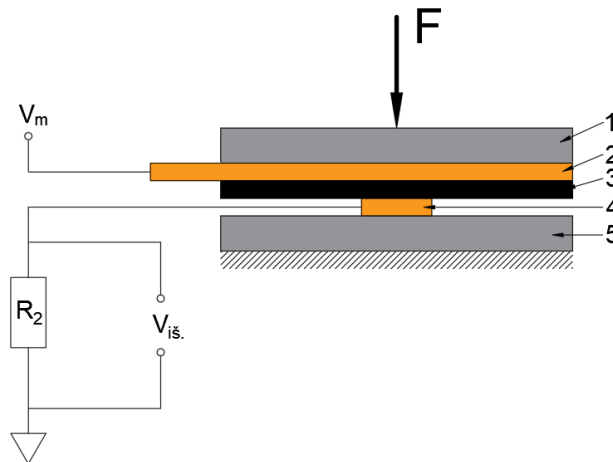
Besisukdamas kumštelis spaudžia metalinę plokštelę, kuri yra pritvirtinta prie sverto. Svertas dėl savo formos perduoda jėgą į Velostat® bandinį, kuris yra padėtas tarp dviejų elektrodų, kurie yra statmenai vienas kito atžvilgiu priklijuoti ant sverto ir stendo korpuso. Kadangi elektrodų ir stendo medžiagos yra tvirtesnės nei Velostat®, šis deformuojasi ir keičia savo varžą, kurią galima netiesiogiai išmatuoti naudojant įtampos dalinimo grandinę, kuri pateikiama 2.2 paveiksle kartu su jutiklio vizualizacija. Prie jutiklio nuosekliai prijungus žinomą varžą ir prie abiejų prijungus žinomą įtampą, galime išmatuoti kintančią grandinės išėjimo įtampą ir pagal ją apskaičiuoti kintančią jutiklio varžą. Jutiklio varžą apskaičiuojama pagal formulę 1.

$$R_j = R_2 \cdot \left(\frac{V_m}{V_{is}} - 1 \right) \quad (1)$$



2.1 pav. Bandymų stendo mechaninė dalis; 1) Svertas; 2) Korpusas; 3) Poslinkio jutiklio stovas; 4) Žingsninio variklio stovas; 5) Kumštelis

Fig 2.1. Design of the test stand; 1) Lever; 2) Body; 3) Mount for the displacement sensor; 4) Stepper motor mount; 5) Rotating cam



2.3 pav. Įtampų dalinimo grandinė ir darbo zonos skerspjūvis; 1) Stendo svertas; 2) Viršutinis elektrodas; 3) Velostat® bandinys; 4) Apatinis elektrodas; 5) Stendo korpusas

Fig 2.4. Voltage divider circuit and crossection of testing area; 1) Lever; 2) Upper electrode; 3) Velostat® specimen; 4) Bottom electrode; 5) Test rig body

Maitinimo (5 V) ir išėjimo įtampa, bei poslinkio jutiklio signalas, buvo renkami naudojant duomenų rinkimo įrenginį NI USB-4432 ir programos Labview modulį SignalExpress.

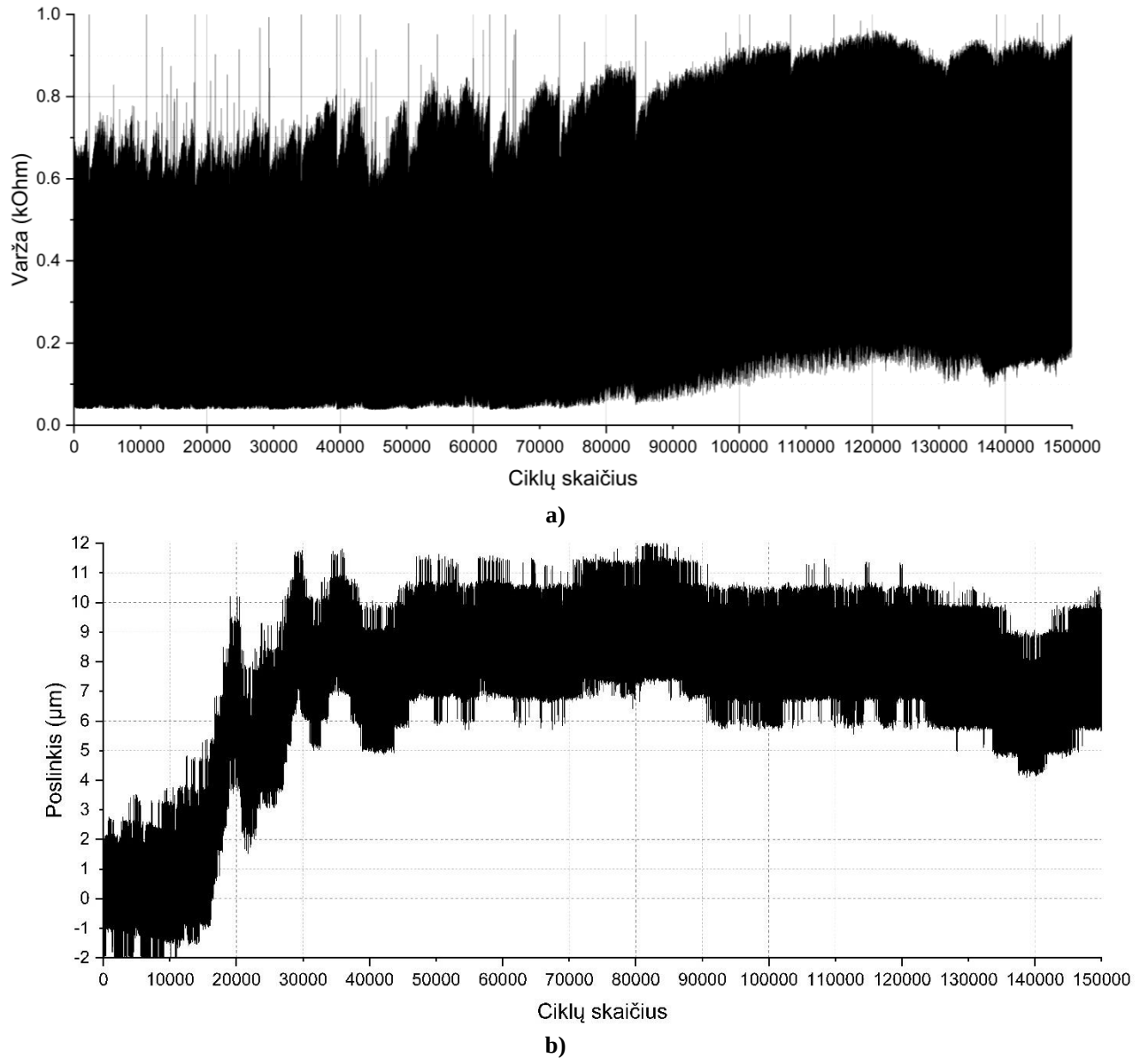
6. Tyrimo metodika

Tyrimo metu buvo atlikti bandymai, kurių metu jutiklis buvo apkraunamas 3,5 N ir 7 N jėga. Statmeni vienas kito atžvilgiu elektrodai, tarpusavyje padengė 25 mm² plotą, dėl to Velostat® buvo apkraunamas naudojant 140 kPa arba 280 kPa slėgį. Su abejomis jėgomis buvo atlikta po 7 bandymus, o kiekvienam bandymui naudotas naujas Velostat® bandinys. Kiekvieno bandymo metu Velostat® buvo apkrautas 150 tūkst. kartų. Atlikus bandymus, surinkti duomenys buvo apdorojami programa ORIGIN.

• Rezultatai

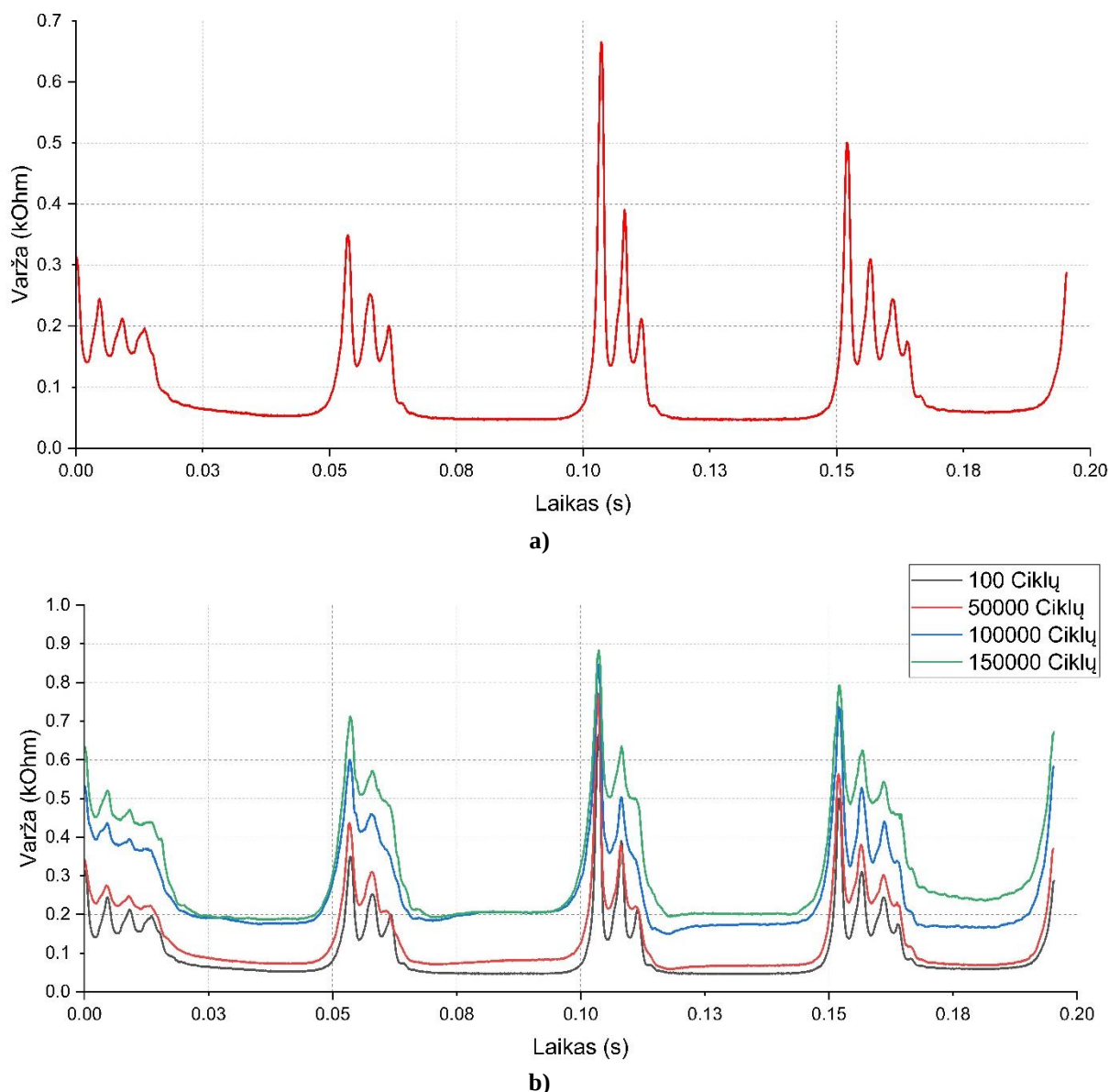
1.1. 3,5 N bandymų rezultatai

3,5 N jėga, 20 Hz dažniu apkrautas jutiklis veikė stabiliai vidutiniškai 67,8 tūkstančių apkrovos ciklų. Po šio ciklų skaičiaus, jutiklio minimali varža žemiausiame suspaudimo taške pradeda kilti, kas matoma 3.1a paveiksle. Bandymų pradžioje minimali varža vidutiniškai siekia apie 40 Ω, o pabaigoje apie 200 Ω. Toks laidumo sumažėjimas gali vykti dėl Velostat® mechaninių savybių, kaip viskoelastiškumas ir valksnumas bei laidžių dalelių persistūmimas. Spaudžiant tik 25 mm² plotą, laikui bėgant laidžios dalelės gali būti perstumiamos aplink spaudžiamą medžiagos vietą ir dėl to sumažėja laidumas spaudžiamoje medžiagos zonoje.



3.1 pav. a) Velostat® apkraunamo 3,5 N jėga 20 Hz dažniu atsakas per 150 tūkst. ciklų; b) To paties bandymo poslinkio jutiklio duomenys

Fig 3.1. a) Response of Velostat® loaded with a force of 3,5 N at 20 Hz frequency over 150 thousand cycles; b) Displacement data of the same experiment



3.2 paveikslas. a) Velostat® apkraunamo 3,5 N jėga 20 Hz dažniu 100-ojo ciklo padidintas vaizdas; b) Palyginimas po skirtingų ciklų skaičiaus

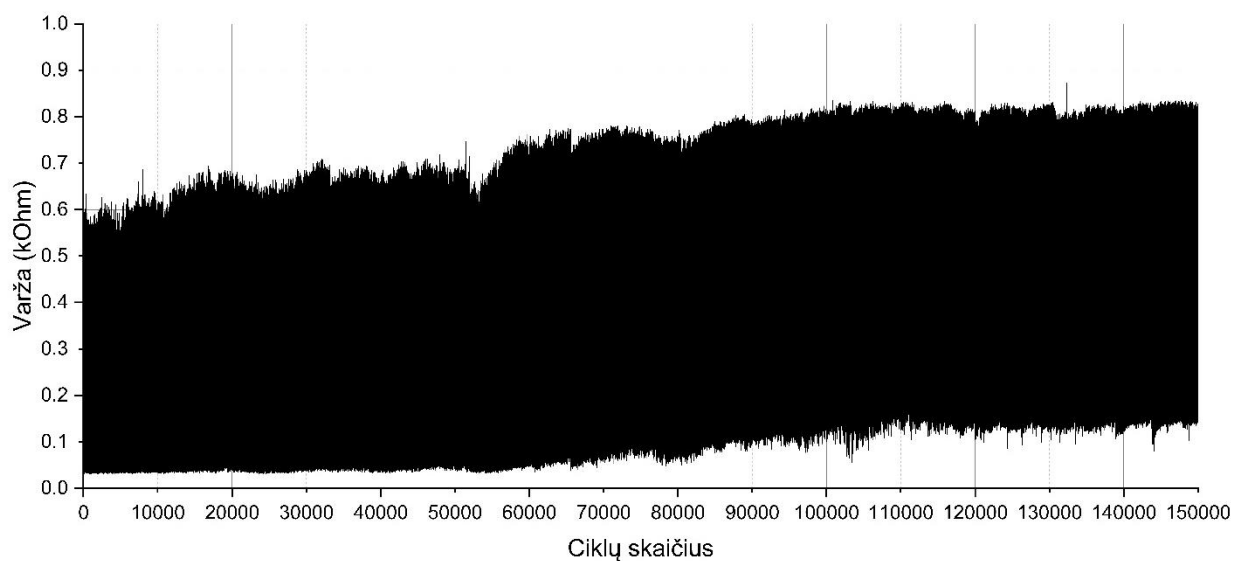
Figure 3.2. a) Enlarged response of the 100th cycle of Velostat® loaded with a force of 3,5 N at 20 Hz frequency; b) Comparison of responses after various numbers of cycles

Kelių pradinio apkrovimo ciklų atsako padidintas vaizdas pateikiamas 3.2a paveiksle. Jame matome, kaip buvo apkraunamas jutiklis. Jutiklio atsakas apkrovos metu yra gana tolygus, o tarpai tarp apkrovų (kumštelio kilimas ir leidimasis) atvaizduoti pilnai. Lyginant su tolimesnių ciklų vaizdais, kurie pateikiami 3.2b paveiksle, matome, kad apkrovos profilis atvaizduojamas tiksliau. Nusileidimai lygesni, o pakilimai turi visas viršūnes, medžiagos atsakas yra jautresnis. Taip pat matome aiškų skirtumą tarp varžos amplitudžių. Pradinių ir paskutinių ciklų varža skiriasi apie 5 kartus.

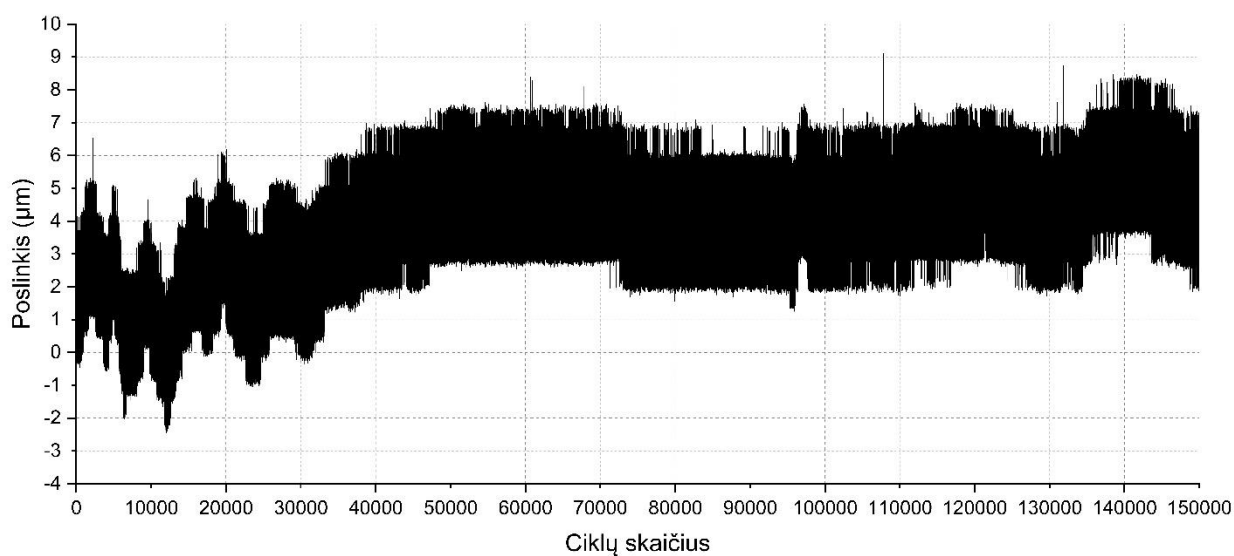
7. 7 N bandymu rezultatai

Bandymų su 7 N jėga metu, Velostat® demonstravo panašų elgesį, kaip ir ankstesnių tyrimų metu, 3.3a paveikslas. Vienintelis skirtumas viso signalo grafike, yra sumažėjęs ciklų skaičius iki signalo pokyčio pradžios. Šiuo atveju, signalo vertės augimas prasidėdavo vidutiniškai ties 56,8 tūkst. ciklų. Jutiklio pradinio ciklo vaizde, kuris pateikiamas 3.4a paveiksle, galima pastebėti daugiau signalo netolygumų suspaudimo metu. Tai reiškia, kad naudojant didesnę jėgą galime gauti šiek tiek tikslesnį spaudžiančio kūno paviršiaus atvaizdavimą, o taip pat mažesnę triukšmo įtaką jutiklio signalui. Tai galėtų būti naudinga siekiant gauti detalesnį ir stabilesnį slėgio atvaizdavimą slėgio matricose papildomai

padidinant jutiklį veikiantį slėgį. Žemiausia pasiekiamą varžą padidinus jėgą skiriasi nedaug, tačiau atsižvelgiant į grafiko viršūnes, galime pastebėti, kad dėl didesnės apkrovos, medžiaga nebespėja atsistatyti iki kito ciklo pradžios. Lyginant su tolimesnių ciklų vaizdais, matome, kad varža bandymo pabaigoje padidėja apie 4 kartus. Tokį mažesnį signalo padidėjimą būtų galima aiškinti tuo, kad aplink darbo zoną išsispaudus medžiaga negali pasipriešinti didesnei jėgai taip pat, kaip 3,5 N bandymų metu ir todėl varžos padidėjimas nėra toks staigus. Tą patį galime pastebėti ir lyginant abiejų bandymų varžos kitimo duomenis.



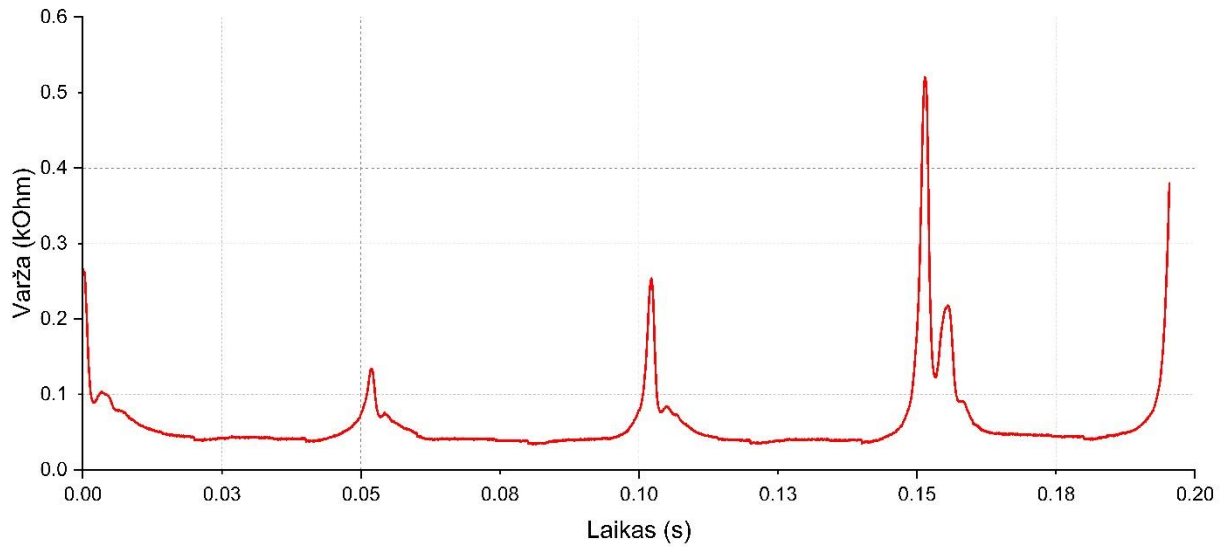
a)



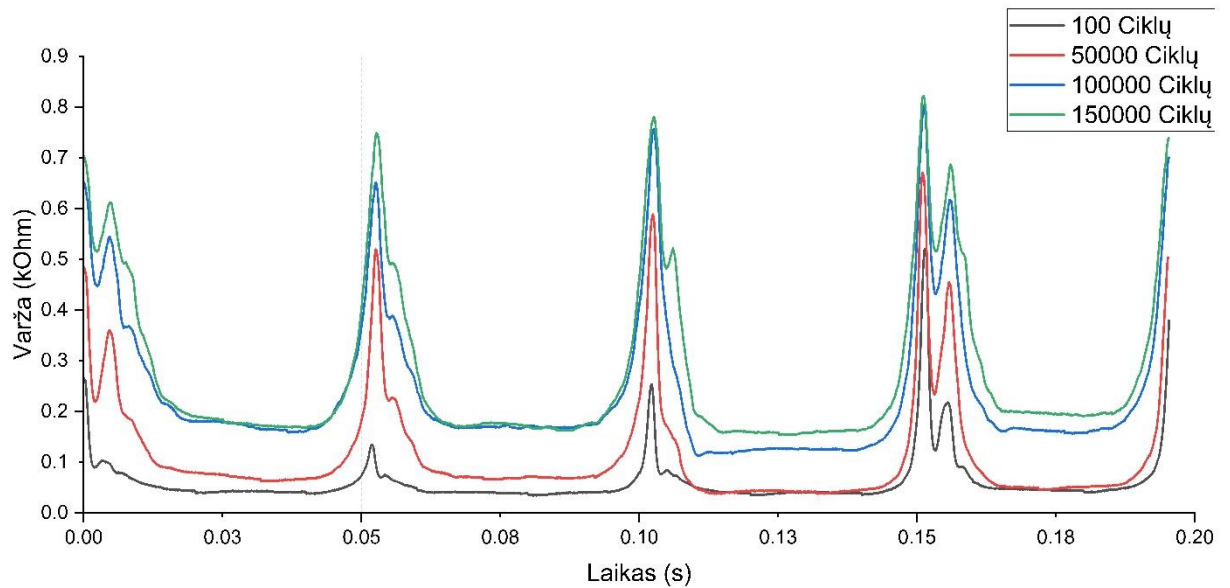
b)

3.3 paveikslas. a) Velostat® apkraunamo 7 N jėga 20 Hz dažniu atsakas per 150 tūkst. ciklų; b) To paties bandymo poslinkio jutiklio duomenys

Figure 3.3. a) Response of Velostat® loaded with a force of 7 N at 20 Hz frequency over 150 thousand cycles; b) Displacement data of the same experiment



a)

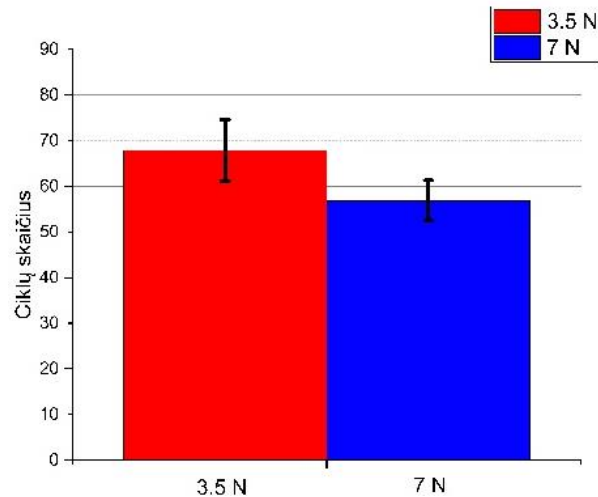


b)

3.4 paveikslas. a) Velostat® apkraunamo 7 N jėga 20 Hz dažniu, 100-ojo ciklo padidintas vaizdas; b) Palyginimas po skirtingų ciklų skaičiaus

Figure 3.4. a) Enlarged response of the 100th cycle of Velostat® loaded with a force of 7 N at 20 Hz frequency; b) Comparison of responses after various numbers of cycles

Abiejų jėgų bandymų Velostat® jutiklio signalo prastėjimo pradžios ciklų vidutinės vertės pateikiamos 3.5 paveiksle.



3.5 paveikslas. Velostat® jutiklų signalo prastėjimo pradžios ciklai atskiruose bandymuose

Figure 3.5. Cycle numbers where the signal degradation of Velostat® sensor started in the experiments

Išvados

Įvertinus prieinamoje literatūroje esantį trūkumą apie Velostat® medžiagos ilgaamžiškumą, buvo nuspręsta atlikti šios medžiagos ilgaamžiškumo bandymus, siekiant įvertinti medžiagos tinkamumą ilgalaikio naudojimo sprendimams. Bandymuose naudotos 3,5 N ir 7 N jėgos, o bandymai atlikti 20 Hz apkrovos dažniu iki 150 tūkst. apkrovos ciklų. Atlikus po 7 bandymus su kiekviena jėga, buvo pastebėta, kad dėl apkraunamos jėgos, ne tik keičiasi jutiklio stabilaus darbo ciklų skaičius, bet ir signalo prastėjimo viršijus šiuos ciklų skaičius greitis. Naudojant mažesnę jėgą, jutiklio medžiaga atlaiko daugiau apkrovos ciklų, tačiau po jų, laidumo suprastėjimas yra ne tik didesnis, bet ir vyksta šiek tiek greičiau. Įvertinus padidintus apkrovos ciklų rezultatus skirtingose bandymo dalyse, buvo nustatyta, kad 3,5 N jėgos bandymuose medžiagos varžos atsakas šiek tiek prasčiau atvaizduoja apkraunamo objekto netolygumus, o laikui bėgant atvaizdavimas išsiskiria šiek tiek daugiau. Šis faktas galėtų reikšti, kad naudojant šią medžiagą slėgio vaizdavimo matricoms kurti, konstrukciniais sprendimais būtų galima žinomu dydžiu padidinti kiekvieną jutimo tašką veikiantį slėgį, dėl to galimai pagerėtų ir spaudžiančio kūno paviršiaus atvaizdavimas.

Literatūra

- Tihak, A., & Bošković, D. (2019, July). Experimental evaluation of challenges in designing a resistive pressure sensors. In IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2019.8861803>
- Dziedzickis, A., Sutiny, E., Bucinskas, V., Samukaite-Bubniene, U., Jakstys, B., Ramanavicius, A., & Morkvenaite-Vilkonciene, I. (2020). Polyethylene-Carbon Composite (Velostat®) Based Tactile Sensor. *Polymers*, 12(12), 2905. <https://doi.org/10.3390/polym12122905>
- Zhang, R., Palumbo, A., Hader, G., Yan, K., Chang, J., Wang, H., & Yang, E. H. (2020). A flexible pressure sensor with sandwiched carpets of vertically aligned carbon nanotubes partially embedded in polydimethylsiloxane substrates. *IEEE Sensors Journal*, 20(20), 12146-12153. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2999261>
- He, Y., Li, W., Yang, G., Liu, H., Lu, J., Zheng, T., & Li, X. (2017). A novel method for fabricating wearable, piezoresistive, and pressure sensors based on modified-graphite/polyurethane composite films. *Materials*, 10(7), 684. <https://doi.org/10.3390/ma10070684>
- Zhu, Y., Cai, H., Ding, H., Pan, N., & Wang, X. (2019). Fabrication of low-cost and highly sensitive graphene-based pressure sensors by direct laser scribing polydimethylsiloxane. *ACS applied materials & interfaces*, 11(6), 6195-6200. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b17085>
- Tao, L. Q., Zhang, K. N., Tian, H., Liu, Y., Wang, D. Y., Chen, Y. Q., ... & Ren, T. L. (2017). Graphene-paper pressure sensor for detecting human motions. *ACS nano*, 11(9), 8790-8795. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b02826>
- Hu, J., Yu, J., Li, Y., Liao, X., Yan, X., & Li, L. (2020). Nano carbon black-based high performance wearable pressure sensors. *Nanomaterials*, 10(4), 664. <https://doi.org/10.3390/nano10040664>
- Ambrosetti, G., Balberg, I., & Grimaldi, C. (2010). Percolation-to-hopping crossover in conductor-insulator composites. *Physical Review B*, 82(13), 134201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.134201>
- Castellino, M., Chiolerio, A., Shahzad, M. I., Jagdale, P. V., & Tagliaferro, A. (2014). Electrical conductivity phenomena in an epoxy resin-carbon-based materials composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.012>
- Giovanelli, D., & Farella, E. (2016). Force sensing resistor and evaluation of technology for wearable body pressure sensing. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9391850>

- Yee, M. J., Mubarak, N. M., Abdullah, E. C., Khalid, M., Walvekar, R., Karri, R. R., ... & Numan, A. (2019). Carbon nanomaterials based films for strain sensing application—A review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 18, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100312>
- Tretjak, M. (2017). Kompozitinių medžiagų su anglies nano dalelėmis varžos ir žemo dažnio triukšmo charakteristikos (Masters thesis, Vilniaus universitetas). <https://epublications.vu.lt/object/elaba:23194056/>