



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHATRONIKOS, ROBOTIKOS IR SKAITMENINĖS GAMYBOS KATEDRA

Mindaugas Vėta

3D SPAUSDINAMO TEMPIMO JUTIKLIO KŪRIMAS IR TYRIMAS

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A 3D PRINTABLE TENSION
SENSOR**

Baigiamasis magistro darbas

Mechatroninių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX053

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHATRONIKOS, ROBOTIKOS IR SKAITMENINĖS GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Vytautas Bučinskas
(Vardas, pavardė)

(Data)

Mindaugas Vėta

3D SPAUSDINAMO TEMPIMO JUTIKLIO KŪRIMAS IR TYRIMAS
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A 3D PRINTABLE TENSION
SENSOR

Baigiamasis magistro darbas
Mechatroninių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX053
Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	<u>doc. dr. Andrius Dzedzickis</u>	_____	_____
	(Pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)
Lietuvių kalbos konsultantė	<u>lekt. Angelika Petrėtienė</u>	_____	_____
	(Pedag. vardas, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mindaugas Vėta, 20194154

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Mechatroninės sistemos, MSfm-23

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2025 m. gegužės 15 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „3D spausdinamo tempimo jutiklio kūrimas ir tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: docentas daktaras Andrius Dzedzickis. Mano darbo vadovas docentas daktaras Andrius Dzedzickis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).


(Parašas)

Mindaugas Vėta
(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHATRONIKOS, ROBOTIKOS IR SKAITMENINĖS GAMYBOS KATEDRA

Studijų kryptis: Gamybos inžinerija

Studijų programa: Mechatroninės sistemos , valstybinis kodas 6211EX053

Specializacija: Mechatroninės sistemos

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Vytautas Bučinskas

2025-05-13

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. MSfm-23-7542

Vilnius

Studentas (-ė): Mindaugas Vėta

Baigiamojo darbo tema: 3D spausdinamo tempimo jutiklio kūrimas ir tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Duomenys: Atlikti mokslinės literatūros analizę, apžvelgti varžinius slėgio jutiklius, jų charakteristikų tyrimo metodus. Parengti tyrimų metodiką bei sukurti bandymų stendą. Atlikti eksperimentinius jutiklio tyrimus, išanalizuoti gautus duomenis. Įvertinti jutiklio charakteristikas. Suformuluoti išvadas ir pateikti rekomendacijas tolesniems darbams.

Aiškinamasis raštas:

1. Įvadas
2. Literatūros analizė, panašių jutiklių, jų gamybos metodų ir tyrimų apžvalga.
3. Teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai.
4. Išvados.
5. Literatūros sąrašas

Vadovas docentas Andrius Dzedzickis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas		ISBN	ISSN
Mechanikos fakultetas		Egz. sk.	
Mechatronikos, robotikos ir skaitmeninės gamybos katedra		Data-.....-.....	

Antrosios pakopos studijų Mechatroninių sistemų programos magistro baigiamasis darbas 4	
Pavadinimas	3D spausdinamo tempimo jutiklio kūrimas ir tyrimas
Autorius	Mindaugas Vėta
Vadovas	Andrius Dzedzickis

	Kalba: lietuvių
--	------------------------

Anotacija
Baigiamajame magistro darbe kuriamas bei tiriamas 3D spausdinamas tempimo jutiklis. Atlikta panašių tyrimų bei analoginių įrenginių apžvalga. Aprašyta jutiklio kūrimo eiga, ištirtos medžiagos charakteristikos atliekant jutiklio tempimo tyrimą. Tyrimas atliktas naudojant tempimo stendą, kuris leido tiksliai įvertinti deformacijos poveikį jutiklio atsakui. Apibendrinus gautus rezultatus, suformuotos darbo išvados, pateikiamos rekomendacijos tolimesniems tyrimams bei galimos pritaikymo sritys. Darbą sudaro: įvadas, analoginių įrenginių ir tyrimų apžvalga, 3D spausdinamo tempimo jutiklio metodologija, tyrimo eigos planas, įrangos analizė, jutiklio kūrimo eiga, tempimo tyrimas, rezultatai bei išvados. Darbo apimtis – 66 p. teksto, 46 paveikslai, 3 lentelės, 26 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: Prasminiai žodžiai: 3D spausdinamas tempimo jutiklis, programinė įranga, tempimo stendas, jutiklio tempimo tyrimas, deformacija.

Vilnius Gediminas Technical University		ISBN	ISSN
Faculty of Mechanics		Copies No.	
Department of Mechatronics, Robotics and Digital Manufacturing		Date-.....-.....	

Master Degree Studies Mechatronics Systems study programme Master Graduation Thesis 4	
Title	Development and Research of 3D Printable Tension Sensor
Author	Mindaugas Vėta
Academic supervisor	Andrius Dzedzickis

	Thesis language: Lithuanian
--	------------------------------------

Annotation
The final master's thesis focuses on the development and investigation of a 3D-printed strain sensor. A review of similar studies and analog devices has been conducted. The process of developing the sensor is described, and the material properties have been examined through a tensile test of the sensor. The study was conducted using a tensile testing stand, which allowed for an accurate assessment of the deformations in the sensor response. After summarizing the results obtained, the conclusions of the work are presented, recommendations for further research and possible areas of application are provided. The thesis consists of: an introduction, a review of analogous devices and studies, the methodology of the 3D-printed strain sensor, the research plan, equipment analysis, the sensor fabrication process, tensile testing, results, and conclusions. The volume of the thesis is 66 pages of text, 46 figures, 3 tables, and 26 bibliographic sources.

Keywords: Keywords: 3D-printed strain sensor, software, tensile testing stand, sensor, tensile testing, deformation.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	11
IVADAS	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	13
1.1. Varžiniai slėgio jutikliai	13
1.2. Analoginių jutiklių apžvalga	14
1.2.1. „Tension Sensor MZ1-1000“ elektrinis įtempio jutiklis	14
1.2.2. „Honigmann RFS 100“ įtempio jutiklis	16
1.2.3. „Tension Sensor TSR-20N“ įtempio jutiklis.....	17
1.2.4. „Honeywell Model 31 Low“ įtempio jutiklis.....	18
1.2.5. „OMEGA LCM 703“ įtempio jutiklis.....	19
1.2.6. Įtempio jutiklio patentas	20
1.3. Analogiškų tyrimų apžvalga.....	22
1.2.4 3D spausdinamo jėgos jutiklio tyrimo apžvalga	23
1.2.5 3D spausdinamo tempimo jutiklio tyrimo apžvalga.....	26
1.2.6 3D spausdinamų lanksčių įtempių jutiklių tyrimo apžvalga	30
2. TYRIMO METODAI.....	33
2.1. Metodologija.....	33
2.2. Tyrimo eigos planas	34
2.3. Įrangos analizė.....	35
2.3.1. „Creality K1“ 3D spausdintuvas	36
2.3.2. „Mecmesin MultiTest 2.5-i“ įtempio testavimo įranga.....	37
2.4. Jutiklių testavimo metodika.....	38
2.4.1. Jutiklio kūrimo eiga ir eksperimentinis optimizavimas.....	38
2.4.2. Kombinuoto jutiklio kūrimo eiga.....	42
3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI.....	46
3.1. Pirminiai jutiklio bandinių testavimai	46
3.2. Jutiklio bandinių testavimai keičiant skerspjūvio plotą.....	48

3.3. Jutiklio bandinių testavimai keičiant storį	53
3.4. Jutiklio bandinių testavimai kombinuojant skirtingas medžiagas	59
IŠVADOS	62
LITERATŪROS SĄRAŠAS	64

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. „Tension Sensor MZ1-1000“ elektrinis įtempio jutiklis:	15
1.2 pav. „Honigmann RFS 100“ įtempio jutiklis:	16
1.3 pav. „Tension Sensor TSR-20N“ įtempio jutiklis:	17
1.4 pav. „Honeywell Model 31 Low“ įtempio jutiklis:	18
1.5 pav. OMEGA LCM703 įtempio jutiklis:.....	19
1.6 pav. Apkrovos tiekimas su slėginiu švirkštu:	24
1.7 pav. Jutiklio apkrovos priklausomybės nuo oro slėgio diagrama.....	24
1.8 pav. Eksperimentinis tyrimo vaizdas.....	25
1.9 pav. Jėgos įvertinimo bandymas rankiniu būdu taikant 3D atspausdinto daugiaašio jėgos jutiklio jutimo jėgą:.....	26
1.10 pav. 3D spausdinamas įtempio jutiklis	27
1.11 pav. Plieno plokštelės apkrovos simuliacija CAD aplinkoje.....	28
1.12 pav. Plieno plokštelės apkrovos bandymas realioje aplinkoje.....	28
1.13 pav. Lyginamasis teorinių ir eksperimentinių bandymų grafikas.....	29
1.14 pav. DLP būdu spausdintų jutiklių struktūros pokyčiai esant skirtingoms apkrovoms ir deformacijoms	31
2.1 pav. Principinė tyrimo schema	35
2.2 pav. Jutiklio varžos matavimo po atspausdinimo schema.....	39
2.3 pav. Pirmasis 3D atspausdinto jutiklio bandinys bandymo stende.....	39
2.4 pav. Jutiklio pokytis deformacijos metu	40
2.5 pav. Skirtingų matmenų jutikliai po deformacijos	40
2.6 pav. Jutiklio bandinys, turintis atšakas gnybtams.....	41
2.7 pav. Bandinys stende su prie jo prijungtais multimetro gnybtais:.....	42
2.8 pav. 3D spausdinimo parametrai	43
2.9 pav. 3D spausdinimo procesas:	44
2.10 pav. Atspausdintas kombinuotas bandinys:.....	44
2.11 pav. Jutiklio bandinys tempimo stende:	45
3.1 pav. Apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas	46
3.2 pav. Varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas.....	47
3.3 pav. 23×6×1,5 mm jutiklio bandinys po deformacijos.....	47

3.4 pav. 30×10×1,5 mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas	49
3.5 pav. 30×10×1,5 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas	50
3.6 pav. 30×10×1,5 mm mm jutiklių bandiniai po deformacijos:	50
3.7 pav. 25×12×1,5 mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas	51
3.8 pav. 25×12×1,5 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas	52
3.9 pav. 25×12×1,5 mm jutiklio bandiniai po deformacijos:	52
3.10 pav. 23×6×1 mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas	53
3.11 pav. 23×6×1 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas	54
3.12 pav. 23×6×1 mm jutiklių bandiniai po deformacijos:	54
3.13 pav. 23×6×2 mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas	55
3.14 pav. 23×6×2 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas	56
3.15 pav. 23×6×2 mm jutiklių bandiniai po deformacijos:	56
3.16 pav. 23×6×1,5 mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas	57
3.17 pav. 23×6×1,5 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas	58
3.18 pav. 23×6×1,5 mm jutiklių bandiniai po deformacijos:	58
3.19 pav. Kombinuoto jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas	59
3.20 pav. Kombinuoto jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas	60
3.21 pav. Kombinuotų jutiklių bandiniai po deformacijos:	61

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. 3D spausdintuvo parametrai	38
2.2 lentelė. Tempimo mašinos parametrai.....	38
3.1 lentelė. 3D spausdinamų bandinių charakteristika	48

IVADAS

Pasaulyje sparčiai vystantis technologinei pramonei vis dažniau ieškoma ekonomiškų bei efektyvių detalių gamybos sprendimų. Vienas iš tokių sprendimų – 3D spausdinimas, per pastaruosius dešimtmečius greitai išpopuliarėjęs gamybos srityje dėl savo universalumo ir didelio efektyvumo lyginant su kitomis alternatyvomis. Viena iš sričių kurioje gali būti naudojamas būtent toks detalių spausdinimas yra įtempčių jutiklių gamyba.

Įtempčių jutikliai atlieka svarbų vaidmenį įvairiose robotinėse, mechatroninėse ar elektroninėse sistemose, kurios naudojamos pramonėje. Gaminant šiuos jutiklius yra atsižvelgiama į kainos bei pritaikymo skirtingose srityse kriterijus. 3D spausdinimo metodika jutikliams suteikia formos įvairovę pagal specifinį pritaikymą už prieinamą kainą.

Šiame darbe gilinamasi į 3D spausdinamų įtempčio jutiklių sritį: projektavimą, eksperimentinius charakteristikos bandymus bei galimą pritaikymą įvairiose srityse, lyginant projektuojamą jutiklį su jau egzistuojančiomis alternatyvomis.

Tiriamoji problema. Jutiklių gamyba iš metalo ir silicio yra brangi ir mažiau efektyvi, palyginti su gamyba naudojant elektrai laidų plastiką 3D spausdinimo būdu.

Darbo objektas. 3D būdu gaminamas tempimo jutiklis.

Darbo tikslas. Sukurti 3D būdu spausdinamą jutiklį ir ištirti jo charakteristikas.

Darbo uždaviniai. Kad būtų pasiekti numatyti tikslai, reikia įvykdyti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę, apžvelgti varžinius slėgio jutiklius, jų charakteristikų tyrimo metodus.
2. Parengti tyrimų metodiką bei sukurti bandymų stendą.
3. Atlikti eksperimentinius jutiklio tyrimus, išanalizuoti gautus duomenis.
4. Įvertinti jutiklio charakteristikas.
5. Suformuluoti išvadas ir pateikti rekomendacijas tolesniems darbams.

Temos naujumas ir aktualumas. Tema nėra visiškai nauja, tačiau yra nemažai potencialo jos tobulinimui. 3D spausdinimo ir įtempčio jutiklių technologijos sujungimas gali sukelti revoliuciją pramonės šakose, nes siūlo ekonomiškus, specifiskai pritaikomus bei universalius sprendimus.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Varžiniai slėgio jutikliai

Varžiniai slėgio jutikliai yra vienas iš svarbiausių slėgio matavimo technologijų tipų, plačiai naudojamas tiek pramonėje, tiek medicinoje bei kitose technologiškai pažangiose srityse. Jų veikimo principas yra grindžiamas piezorezistiniu efektu, kai jutiklio deformacija dėl slėgio sukelia elektrinės varžos pokytį, kuris vėliau paverčiamas matavimo signalu. Ši technologija pasižymi paprastumu ir ekonomišku, todėl yra viena populiariausių, kai reikalinga greita ir patikima slėgio analizė. Nors varžiniai slėgio jutikliai pirmą kartą buvo pradėti naudoti praėjusio amžiaus viduryje, pastaruoju metu jų efektyvumas bei taikymo galimybės gerokai išsiplėtė dėl medžiagų mokslo pažangos ir naujų gamybos technologijų.

Vienas pagrindinių varžinių slėgio jutiklių privalumų – jų universalumas ir galimybė taikyti juos įvairiose srityse: nuo pramonės automatizavimo iki medicinos. Pavyzdžiui, medicinoje jie dažnai taikomi neinvaziniams kraujospūdžio matavimams ir dirbtinės širdies valdymo sistemoms, kur reikalingas aukštas jautrumo ir patikimumo lygis. Pramonėje šie jutikliai naudojami slėgio valdymo sistemose, siekiant užtikrinti įrangos saugą ir efektyvumą. Tačiau varžiniai slėgio jutikliai susiduria su tam tikrais iššūkiais, tokiais kaip tikslumo sumažėjimas dėl temperatūros pokyčių ar aplinkos sąlygų poveikio, todėl tai apsunkina jų naudojimą esant ekstremalioms sąlygoms.

Naujausi moksliniai tyrimai rodo, kad naujų medžiagų, tokių kaip nanostruktūriniai puslaidininkiai ar anglies nanovamzdeliai, taikymas leidžia pagerinti šių jutiklių charakteristikas. Pavyzdžiui, lanksčių ir dėvimų jutiklių, integruotų į žmogaus kūną ar aprangą, plėtra atveria naujas galimybes biomedicinoje ir sporto srityje. Tuo tarpu pramonės srityje siekiama mažinti jutiklių dydį ir energijos sąnaudas, išlaikant jų jautrumą bei ilgaamžiškumą. Vienas iš svarbiausių naujausių proveržių yra hibridinių medžiagų kūrimas, kurios leidžia padidinti jutiklių atsparumą temperatūros pokyčiams ir mechaniniam nuovargiui.

Nepaisant reikšmingų technologinių pasiekimų, mokslinėje literatūroje dažnai pabrėžiama, kad varžinių slėgio jutiklių patikimumas ilgalaikėje perspektyvoje vis dar lieka svarbia problema. Dėl jutiklių jautrumo deformacijai gali sumažėti jų matavimo tikslumas, ypač veikiant ekstremalioms sąlygoms. Todėl tyrimai vis labiau orientuojasi į ilgalaikio stabilumo gerinimą bei signalų apdorojimo algoritmų tobulinimą, siekiant užtikrinti didesnę rezultatų tikslumą ir patikimumą.

Apibendrinant galima teigti, kad varžiniai slėgio jutikliai yra neatsiejama šiuolaikinės technologijos dalis, kuriems būdingas paprastumas ir didelis pritaikomumas įvairiose srityse. Vis dėlto jų patikimumas ir tikslumas vis dar kelia iššūkių, kuriuos moksliniai tyrimai ir naujausios medžiagų technologijos siekia spręsti. Ateities tyrimai šioje srityje turėtų būti nukreipti į mažų ir energiją taupančių

jutiklių kūrimą, taip pat jų integraciją su išmaniosiomis technologijomis, siekiant dar platesnio taikymo spektro.

1.2. Analoginių jutiklių apžvalga

Įtempio jutiklių veikimo principas paprastai apima įtempio matuoklio technologijos panaudojimą, kuris priklauso nuo elektrinės varžos pokyčių esant mechaninei įtampai. Daugelio įtempio jutiklių šerdyje yra įtempio matuoklis – įtaisas, pagamintas iš plonos vielos arba folijos, išdėstytos tinklelio pavidalu. Kai įtempio jutiklis yra veikiamas jėga, jis šiek tiek deformuojasi, todėl deformacijos matuoklis patiria įtempimą. Dėl šios deformacijos pasikeičia įtempio matuoklio matmenys, keičiasi jo elektrinė varža.

Įtempio jutikliai pritaikomi įvairiose pramonės šakose dėl savo universalumo ir gebėjimo tiksliai matuoti ir stebėti įtampą ar jėgą. Įtempio jutikliai gali būti naudojami įvairiose pramonės šakose. Medžiagų bandymų ir tyrimų laboratorijose įtempio jutikliai naudojami medžiagų, tokių kaip metalų ar plastikų mechaninėms savybėms matuoti. Jie naudojami tempimo bandymo mašinose, kad bandiniams būtų taikomos kontroliuojamos jėgos ir registruojamas įtempių ir deformacijų elgesys, palengvinantis medžiagos stiprumo, standumo ir lankstumo apibūdinimą. Įtempio jutikliai atlieka labai svarbų vaidmenį mokslinių tyrimų ir plėtos veikloje įvairiose pramonės šakose, įskaitant aviaciją, automobilius, elektroniką ir statybas, kur medžiagos yra kruopščiai išbandomos, siekiant užtikrinti našumą ir patikimumą.

Toliau nagrinėjami įvairūs vielinio lyno įtempio jutikliai, kurie veikia matuodami vielinių lynų arba kabelių įtempimą bei integruodami apkrovos elementą į skriemulį. Apkrovos jutiklis aptinka skriemulio jėgą dėl vielinio lyno įtempio. Šie jutikliai dažnai naudojami kėlimo įrenginiuose (pvz., kranai, liftai), kabelių įtempio sistemose, laivų švartavimo ar lynų sistemose. Taip pat apžvelgiami jėgos matavimams skirti įtempio jutikliai dažnai sutinkami medicinoje, automobilių bei kitose pramonės srityse.

1.2.1. „Tension Sensor MZ1-1000“ elektrinis įtempio jutiklis

3 guolių stacionarus elektroninis jutiklis pavaizduotas (1.1 pav.) yra skirtas matuoti įvairių nedidelių vielų, pluoštų ar laidų, kurių skersmuo neviršija 0,2 mm įtempius. Daugiausia naudojamas tekstilės bei laidų gamybos pramonėse.



1.1 pav. „Tension Sensor MZ1-1000“ elektrinis įtempio jutiklis:
1 – guolis; 2 – metalinis korpusas; 3 – matuojama medžiaga

Hans Schmidt & Co. GmbH (n.d.).

Įrenginio privalumai:

- turi integruotą matavimo stiprintuvą, kurio tikslumas siekia 1,5 % FS;
- galimi tiek analoginis tiek skaitmeninis išėjimo signalai;
- universalus tvirtinimas;
- lengvai sukalibruojamas;
- matuojamas įtempio jėgos diapozonas 0–10 N;
- maksimalus guolio matavimo nuokrypis siekia 0,5 mm;
- standartinė maitinimo šaltinio įtampa – 24 V.

Įrenginio trūkumai:

- gaminamas iš aliuminio;
- ganėtinai sunkus – 0,58 kg;
- nedidelis veikimo temperatūros diapazonas 10–45 °C;
- maksimali aplinkos drėgmė reikalaujama jutiklio veiklai – 85 % RH;
- ganėtinai maža apsauga nuo per didelės apkrovos – 100 %;
- užima daug vietos.

1.2.2. „Honigmann RFS 100“ įtempio jutiklis

Šis vieno guolio įtempio jutiklis, pavaizduotas 1.2 pav., yra skirtas matuoti įvairių nedidelių siūlų, optinių pluoštų ar lipnių juostų įtempius. Daugiausia naudojamas tekstilės bei laidų gamybos pramonėse. Jutiklio gamintojas užtikrina nesikeičiantį tikslumą nuo pirmojo sukalibravimo nepaisant išorinių jėgų poveikio.



1.2 pav. „Honigmann RFS 100“ įtempio jutiklis:
1 – veržlė; 2 – sriegis

Checkline. (n.d.).

Įrenginio privalumai:

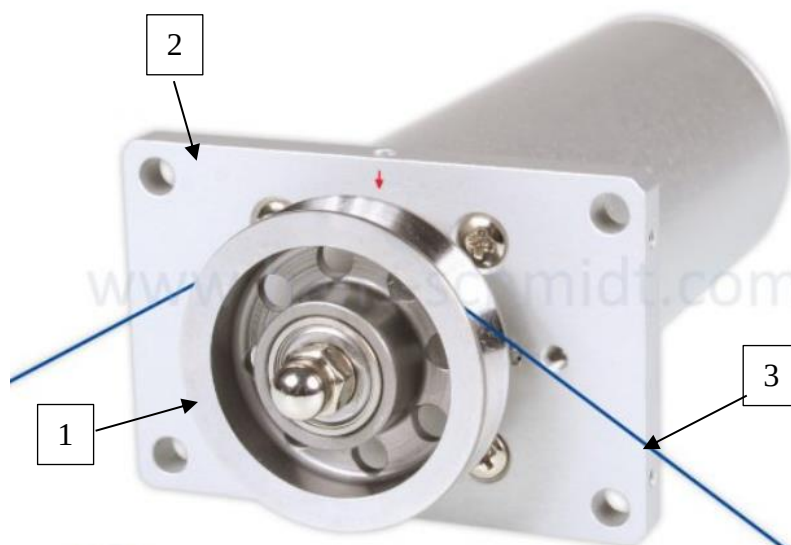
- lengvai sukalibruojamas;
- ašinio posūkio momentai arba tiesioginės ašinės jėgos neturi poveikio matavimams;
- matuojamas įtempio jėgos diapozonas 0–100 N;
- maitinimo šaltinio įtampa – 12 V;
- didelis veikimo temperatūros diapazonas nuo -10 iki 70 °C;
- gera apsauga nuo per didelės apkrovos 400–800 %;
- neužima daug vietos;
- patogus tvirtinimas naudojant veržlę (1.2 pav., Nr. 1) ir sriegį (1.2 pav., Nr. 2).

Įrenginio trūkumai:

- gaminamas iš nerūdijančiojo plieno;
- ganėtinai sunkus – 0,4 kg;
- maksimali aplinkos drėgmė, reikalaujama jutiklio veiklai – 85 % RH;
- analoginis išėjimo signalas.

1.2.3. „Tension Sensor TSR-20N“ įtempio jutiklis

Šis vieno guolio įtempio jutiklis, pavaizduotas 1.3 pav., yra skirtas matuoti tamprųjų medžiagų, pvz., įvairių kabelių, virvių, lynų, kurių skersmuo neviršija 10 mm, įtempius. Daugiausia naudojamas alpinizmo įrangos bei elektros kabelių gamybos pramonėse. Tvirtinamas jau prie turimo nukreipiamojo skriemulio.



1.3 pav. „Tension Sensor TSR-20N“ įtempio jutiklis:

1 – guolis; 2 – metalinis korpusas; 3 – matuojama medžiaga

Hans Schmidt & Co. GmbH (n.d.).

Įrenginio privalumai:

- lengvai sukalibruojamas;
- turi integruotą matavimo stiprintuvą, kurio tikslumas siekia 1 % FS;
- matuojamas įtempio jėgos diapazonas 0–20 N;
- maksimalus guolio matavimo nuokrypis siekia 0,5 mm;
- standartinė maitinimo šaltinio įtampa – 24 V.

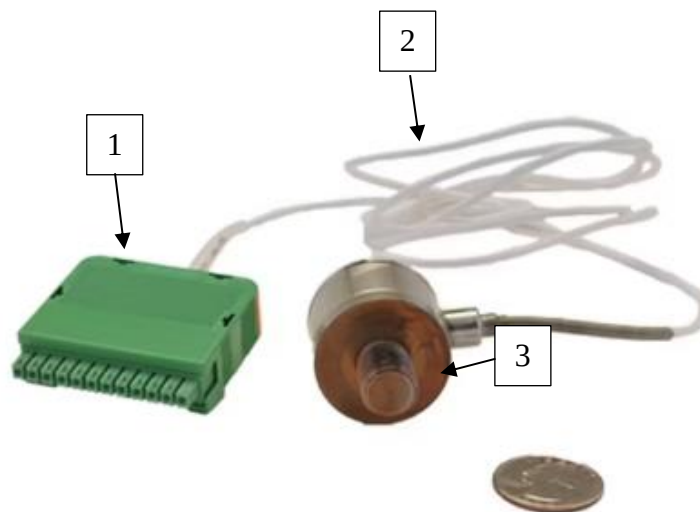
Įrenginio trūkumai:

- gaminamas iš aliuminio;
- ganėtinai sunkus – 0,4 kg;
- nedidelis veikimo temperatūros diapazonas 10–45 °C;
- maksimali aplinkos drėgmė reikalaujama jutiklio veiklai – 85 % RH;

- analoginis išėjimo signalas;
- tvirtinamas prie jau turimo nukreipiamojo skriemulio;
- užima daug vietos;
- ganėtinai maža apsauga nuo per didelės apkrovos – 100 %.

1.2.4. „Honeywell Model 31 Low“ įtempio jutiklis

„Honeywell Model 31“ (1.4 pav.) yra vienas iš populiariausių miniatiūrinių įtempio jutiklių, skirtų aukšto tikslumo jėgos matavimams ribotose erdvėse. Jutiklis idealiai tinka pramoninėms ir mokslinėms reikmėms, kuriose reikia tiksliai matuoti jėgas arba apkrovas. Jis plačiai naudojamas tokiose srityse, kaip medicinos įranga, automobilių pramonė, robotika ir aviacijos technologijos.



1.4 pav. „Honeywell Model 31 Low“ įtempio jutiklis:

1 – jungtis; 2 – kabelis; 3- korpusas

Honeywell International Inc. (n.d.).

Įrenginio privalumai:

- kompaktiškas dydis, galima naudoti ribotose erdvėse, kur kiti jutikliai netelpa;
- pagamintas iš nerūdijančiojo plieno, todėl yra atsparus korozijai ir mechaniniams pažeidimams;
- gali matuoti jėgas nuo 50 N iki 5000 N;
- jutiklis veikia plačiame temperatūrų diapazone nuo -55 °C iki 120 °C;

Įrenginio trūkumai:

- netinka didelės apkrovos pramoninėms aplikacijoms, kur reikalingi jutikliai, galintys matuoti tonų dydžio jėgas;
- dėl mažų matmenų, aukštos kokybės medžiagų ir didelio tikslumo šis jutiklis yra brangus, palyginti su kitais didesniais ir paprastesniais jutikliais;
- nors jis turi IP65 apsaugos klasę, šis lygis gali būti nepakankamas ekstremaliomis aplinkos sąlygomis, pavyzdžiui, nardinant ilgesniam laikui po vandeniu;
- temperatūros pokyčiai gali daryti įtaką matavimo tikslumui, ypač jei aplinka greitai keičiasi.

1.2.5. „OMEGA LCM 703“ įtempio jutiklis

OMEGA LCM703 (1.5 pav.) yra įtempio / suspaudimo jutiklis, skirtas universaliems jėgos matavimams. Dėl savo konstrukcijos šis jutiklis užtikrina itin stabilų veikimą ir yra lengvai montuojamas. Jutiklis plačiai naudojamas automatizacijos pramonėje, testavimo įrangoje, pramoniniuose procesuose ir kitose sistemose, kur reikia stebėti jėgas tiek įtempimo, tiek suspaudimo režimais.



1.5 pav. OMEGA LCM703 įtempio jutiklis:

1 – korpusas; 2 – kabelis

OMEGA Engineering, Inc. (n.d.).

Įrenginio privalumai:

- jutiklis yra universalus, tinka tiek įtempio, tiek suspaudimo jėgoms matuoti;
- platus jėgos matavimo diapazonas gali matuoti nuo 111 N iki 45 000 N;
- pagamintas iš nerūdijančio plieno, todėl yra ilgaamžiškas bei atsparus korozijai;
- itin tiksli S formos konstrukcija užtikrina stabilius matavimus net esant sudėtingoms apkrovoms.

Įrenginio trūkumai:

- kadangi šis jutiklis matuoja tik išilginę jėgą (įtempimo arba suspaudimo kryptimi), netinkamas montavimas gali sukelti netikslius matavimus arba greitesnį jutiklio nusidėvėjimą;
- jutiklis gali veikti tik nuo -18 °C iki 65 °C temperatūrų intervale. Tai reiškia, kad jis netinka naudoti ekstremaliose temperatūrose;
- dėl savo universalumo ir preciziškumo šis jutiklis nėra pigus. Tai gali riboti jo naudojimą situacijose, kur reikalingi mažo biudžeto sprendimai;
- nors jis turi IP65 apsaugos klasę, šis lygis gali būti nepakankamas ekstremaliomis aplinkos sąlygomis, pavyzdžiui, nardinant ilgesniam laikui po vandeniu;
- lyginant su miniatiūriniais jutikliais, tokiais kaip prieš tai apžvelgtas „Honeywell Model 31“, „OMEGA S-Beam“ jutiklis yra didesnis ir gali netikti ribotoms erdvėms.

1.2.6. Įtempio jutiklio patentas

Įtempio jutiklio (angl. *Strain Gauge Type Sensor*) patento paraiška US20100000327, aprašo modernų tempimo jutiklio dizainą, skirtą tiksliai mechaninių deformacijų matavimui. Šis išradimas pasižymi inovatoriška konstrukcija, leidžiančia tiksliai stebėti mechanines apkrovas, slėgį ar deformacijas net sudėtingose aplinkos sąlygose, tokiose kaip temperatūros svyravimai ar vibracijos. Šio tipo jutiklis naudoja varžos tipo jautrųjį elementą, kuris reaguoja į mechaninį tempimą arba suspaudimą, pakeisdamas savo elektrinę varžą. Patento tikslas – padidinti matavimo tikslumą ir stabilumą, įdiegiant temperatūros kompensavimo mechanizmus, taip pat užtikrinti jutiklio patikimumą, apsaugant jį nuo aplinkos poveikio.

Pagrindinė patento naujovė – integruota temperatūros kompensavimo sistema, kuri realiu laiku koreguoja signalą, sumažindama temperatūros poveikį varžos pokyčiams. Tai itin svarbu tempimo jutikliams, nes temperatūros svyravimai gali sukelti nepageidaujamus elektrinės varžos pokyčius, dėl kurių matavimų rezultatai tampa netikslūs. Šis sprendimas leidžia naudoti jutiklį įvairiose srityse, kur reikalingas tikslumas nepaisant aplinkos sąlygų, pavyzdžiui, pramonėje, aviacijoje, automobilių pramonėje ir medicinoje.

Šio patento aprašomas tempimo jutiklis sudarytas iš kelių pagrindinių komponentų: jautriojo elemento, substrato, temperatūros kompensavimo elemento ir apsauginio korpuso. Šie elementai kartu sudaro efektyvią sistemą, užtikrinančią tikslų deformacijos matavimą ir signalų stabilumą.

Jautrusis elementas (varžos elementas) yra pagrindinis jutiklio komponentas. Jis gaminamas iš medžiagų, pasižyminčių dideliu jautrumo koeficientu (angl. *gauge factor*), tokių kaip nikeliu ar chromu

legiruoti lydiniai. Jautrusis elementas yra tvirtai pritvirtintas prie substrato, kuris veikia kaip konstrukcinė bazė. Substratas pagamintas iš medžiagų, pasižyminčių mažu šiluminiu plėtimosi koeficientu, siekiant sumažinti temperatūros įtaką matavimo rezultatams. Kai jutiklis deformuojasi dėl išorinės jėgos, jautrusis elementas patiria tempimą arba suspaudimą, kuris keičia jo elektrinę varžą.

Temperatūros kompensavimo sistema yra šio patento pagrindinė inovacija. Ji apima papildomą varžos elementą arba grandinę, skirtą realiu laiku matuoti temperatūros poveikį varžos pokyčiui. Temperatūros kompensavimo elementas kartu su jautriu elementu sudaro Wheatstone tiltelio grandinę, kuri leidžia atskirti mechaninį tempimą nuo temperatūros sukeltų varžos pokyčių. Koreguotas signalas, gaunamas iš Wheatstone tiltelio, yra proporcingas tik mechaninei deformacijai, todėl rezultatai išlieka tikslūs nepaisant temperatūros svyravimų.

Apsauginis korpusas užtikrina jutiklio patikimumą ilgalaikiame naudojime, apsaugodamas jautriąsias jutiklio dalis nuo drėgmės, dulkių, cheminių medžiagų ir kitų aplinkos veiksnių. Tokiu būdu jutiklis gali veikti sudėtingomis sąlygomis, pavyzdžiui, esant aukštai drėgmei, ekstremaliai temperatūrai ar agresyviai aplinkai.

Aprašomas jutiklis veikia tokiu principu: kai mechaninė jėga t.y., tempimas arba suspaudimas veikia jutiklį, substratas perduoda deformaciją jautriajam elementui. Dėl deformacijos jautrusis elementas keičia savo varžą, o varžos pokytis yra tiesiogiai proporcingas deformacijos dydžiui pagal formulę:

$$\delta R = R * GF * \varepsilon \quad (1)$$

čia:

- R – pradinė jautriojo elemento varža,
- GF – jautrumo koeficientas,
- ε – mechaninė deformacija.

Šis varžos pokytis konvertuojamas į elektrinį įtampos signalą naudojant Wheatstone tiltelio grandinę. Tuo pačiu metu temperatūros kompensavimo sistema koreguoja signalą, pašalindama bet koki temperatūros poveikį. Galutinis signalas yra stabilus ir tiksliai atspindi mechaninės deformacijos dydį.

Šio tempimo jutiklio pagrindinės savybės ir naujovės apima integruotą temperatūros kompensacijos sistemą, kuri užtikrina tikslus matavimus net esant dideliems aplinkos temperatūros svyravimams. Dėl specialiai parinkto jautriojo elemento ir Wheatstone tiltelio grandinės jutiklis pasižymi aukštu tikslumu bei jautrumu, gebėdamas aptikti net ir labai mažus mechaninius pokyčius. Be to, apsauginis korpusas padidina jutiklio ilgaamžiškumą, apsaugodamas jį nuo drėgmės, dulkių, cheminių medžiagų ir mechaninių pažeidimų, todėl jis išlieka patikimas net agresyviose pramoninėse ar lauko

sąlygose. Šios savybės kartu su kompaktišku dizainu užtikrina jutiklio universalumą ir pritaikomumą įvairiose srityse.

Jutiklis gali būti naudojamas automobilių pramonėje, stebint mechanines apkrovas stabdžių, pakabos ir variklio komponentuose, bei aviacijoje, kur svarbu tiksliai matuoti deformacijas orlaivio sparnuose ekstremaliomis sąlygomis. Taip pat jis plačiai taikomas robotikoje, kur reikalingas jėgos ir įtampos stebėjimas robotų rankose ar judančiose dalyse. Statybos srityje jutiklis gali būti naudojamas tiltų, pastatų ir kitų konstrukcijų įtempiams bei apkrovoms matuoti, o medicinos įrangoje jis pritaikomas biomechanikos tyrimuose ar protezų veikimo analizei.

Šis tempimo jutiklis išsiskiria savo tikslumu, ilgaamžiškumu ir universalumu. Dėl temperatūros kompensacijos užtikrinamas stabilus veikimas nepriklausomai nuo aplinkos sąlygų, o apsauginė konstrukcija garantuoja patikimą ilgalaikį naudojimą. Kompaktiškas dizainas ir pritaikomumas daugelyje sričių daro šį jutiklį itin naudingą sprendimu, kai reikalingas tikslus mechaninių deformacijų matavimas sudėtingomis sąlygomis.

Patento paraiškoje aprašytas tempimo jutiklis pasižymi moderniu dizainu, integruota temperatūros kompensacija ir patikimumu, užtikrinančiu tikslus matavimus net sudėtingomis aplinkos sąlygomis. Dėl savo privalumų ir plataus pritaikomumo šis jutiklis yra vertingas sprendimas daugelyje sričių, kur reikalingas tikslus ir stabilus mechaninių deformacijų matavimas.

1.3. Analogiškų tyrimų apžvalga

Šiame poskyryje pateikiama išsami trijų analogiškų eksperimentinių tyrimų, susijusių su 3D spausdinamų jutiklių kūrimu ir charakteristikos apžvalga. Pastaraisiais metais 3D spausdinimo technologijos tapo neatsiejama pažangiųjų jutiklių kūrimo dalimi, leidžiančia gaminti individualizuotas, greitai pritaikomas ir ekonomiškai efektyvias jutiklių sistemas įvairioms inžinerinėms ir biomedicininėms reikmėms. Dėl to vis daugiau dėmesio skiriama 3D spausdinimo panaudojimo galimybėms tiek jėgos, tiek deformacijos matavimo srityse.

Atsižvelgiant į šių technologijų taikomųjų galimybių įvairovę, 1.3.1–1.3.3 skyreliuose analizuojami ir lyginami tris konkretūs tyrimo atvejai, kuriuose buvo sukurti ir eksperimentu būdu pagrįsti skirtingų tipų jutikliai. Kiekvienas atvejis atskleidžia specifinius iššūkius, projektavimo sprendimus ir veikimo principus, būdingus jėgos, tempimo bei lanksčiųjų įtempių jutikliams, gaminamiems naudojant elektrai laidžias termoplastines medžiagas.

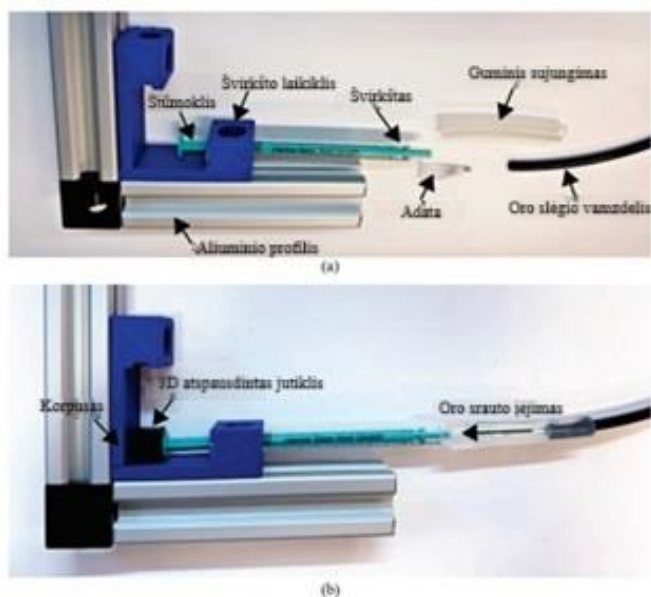
Pirmiausia (1.3.1 skyrelis) aptariamas 3D spausdinamo jėgos jutiklio tyrimas, kuriame nagrinėta mechaninių apkrovų matavimo tikslumo priklausomybė nuo jutiklio geometrijos, spausdinimo parametrų bei medžiagų pasirinkimo. Toliau (1.3.2 skyrelis) pateikiama tempimo jutiklio analizė, orientuota į

deformacijos sekimą ir tempimo charakteristikų fiksavimą dinaminių apkrovų metu. Galiausiai (1.3.3 skyrelis) aprašyta lanksčiųjų įtempių jutiklių apžvalga, kuri išryškina šių jutiklių integravimo į lanksčias struktūras ir paviršius aspektus.

Tokia struktūra leidžia ne tik sistemiškai įvertinti skirtingų jutiklių veikimo principus, bet ir atlikti jų palyginamąją analizę, išryškinant projektavimo sprendimų įtaką matavimo charakteristikoms. Be to, šie tyrimų pavyzdžiai sudaro pagrindą eksperimentinei darbo daliai, kurioje bus kuriamas ir tiriamas naujas, 3D spausdinimu paremtas jutiklis.

1.2.4 3D spausdinamo jėgos jutiklio tyrimo apžvalga

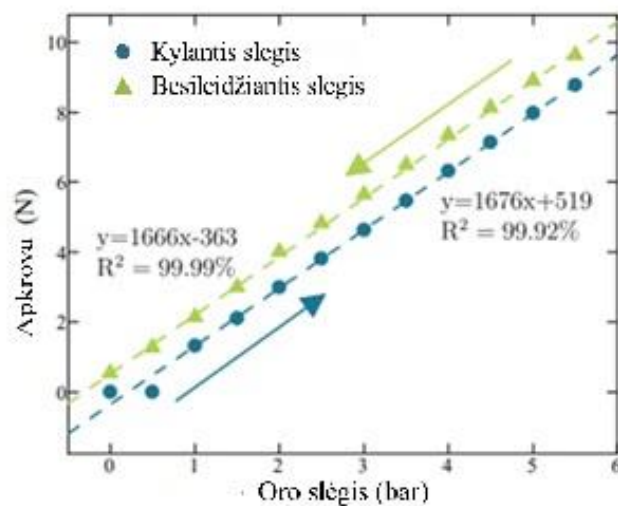
Ji et al. (2021) Stokholme atliko panašios tematikos tyrimą ir sukūrė bei išanalizavo daugiaašį 3D spausdinamą jėgos jutiklį. Atlikdami šį tyrimą autoriai iškėlė problemą: galima nusipirkti tiek standžių, tiek lanksčių jėgos jutiklių, tačiau jie nėra užtektinai universalūs, dėl to kenčia produkto dizaino procesas. Siekdami išspręsti šią problemą, jie sugalvojo sukurti 3D spausdinamą jėgos jutiklį, kuris būtų gaminamas iš EEL pluošto, kuris susideda iš termoplastinio poliuretano (TPU) bei suodžių. Autoriai nustatė, kad medžiaga yra lanksti esant 11 MPa tempimo metu, bei 300 % pailgėjimui ji gali būti pailginta iki 355 proc. Tyrimo metu buvo atliekami įvairūs testai, kaip 1.6 pav. vaizduojamas kintamosios apkrovos taikymas jutikliui bei registruojami varžos pokyčiai. Jutiklis apkraunamas naudojant 1 ml NORM-JECT švirkštus, kur oro slėgis yra taikomas iš švirkštų išleidimo pusės. Į cilindrą pradėjus tiekti slėgį, stūmoklis stumiamas priešinga kryptimi taip apkraudamas jutiklį.



1.6 pav. Apkrovos tiekimas su slėginiu švirkštu:

a) apkrovos maitinimo bloko dalys; b) surinktas apkrovos tiekimo blokas.

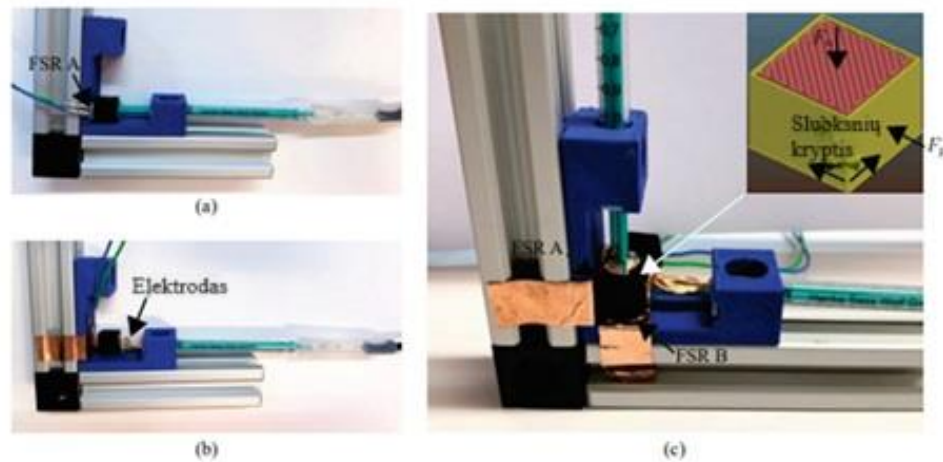
Ji et al. (2021).



1.7 pav. Jutiklio apkrovos priklausomybės nuo oro slėgio diagrama

Ji et al. (2021).

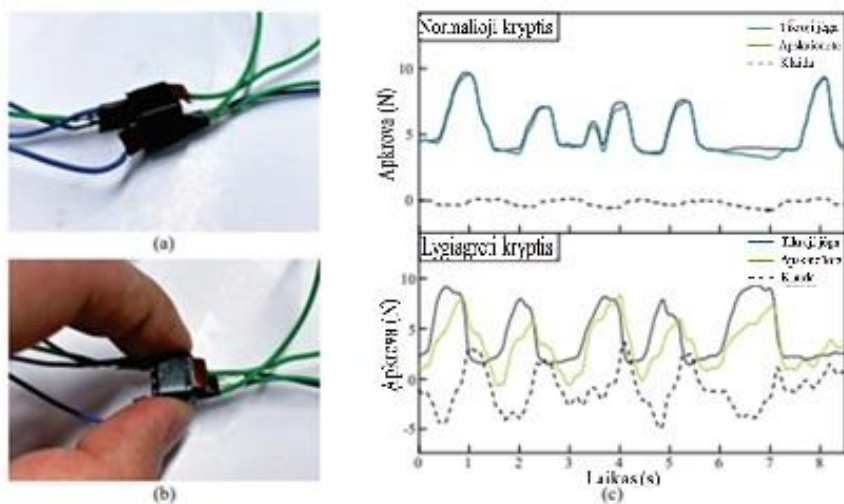
1.7 paveiksle parodytas išėjimo apkrovos per švirkšto stūmoklį kitimas, kuris buvo užfiksuotas naudojant analitinės svarstyklės su didėjančiu ir mažėjančiu įeinančio oro slėgiu. Didinant slėgį, išėjimo slėgis išlieka lygus nuliui, kol oro slėgis pasiekia 1 barą sukeliama trinties tarp stūmoklio ir švirkšto cilindro. Nuo šio taško apkrova didėja tolygiai tiesiškai, lyginant su padidėjusiu slėgiu ir pritaikyta tiesine funkcija.



1.8 pav. Eksperimentinis tyrimo vaizdas
a ir b raidėmis pažymėti lanksčios jėgos jutimo rezistoriai

Ji et al. (2021).

Dėl trinties jėgos iš švirkšto išėjimo apkrova yra nenuspėjama. Norint tiksliai įrašyti 3D atspausdinto jutiklio faktinę apkrovą, naudojamas lankstus jėgos jutimo rezistorius (FSR, RP-C10-ST iš LRGACT co.), kurio skersmuo yra 10 mm. Jutiklio varža pasikeičia, kai jutiklio paviršius yra apkraunamas jėgos. Pakrovimo tiekimo blokas yra vertikalus, o du FSR (lankstus jėgos jutimo rezistorius) yra pritvirtinti vienas ant kito prie svarstyklių plokštės juostomis, todėl abu FSR yra veikiami vienoda jėga, kad būtų patvirtintas dviejų jutiklių lygumas. Kai švirkšte yra slėgis, stūmoklis jėga veiks FSR rezistorius.



1.9 pav. Jėgos įvertinimo bandymas rankiniu būdu taikant 3D atspausdinto daugiaašio jėgos jutiklio jutimo jėgą:

a) surinktas jėgos jutiklis; b) atsitiktinės jutimo jėgos pritaikymas jėgos jutikliui; b) apskaičiuotos jėgos ir tikrosios jėgos palyginimas

Ji et al. (2021).

Autorių teigimu, 3D atspausdintas jėgos jutiklis surenkamas su elektrodais, bei FSR rezistoriais kaip parodyta 1.9 paveiksle. Haptinės jėgos atsitiktinai taikomos normaliai ir lygiagrečiai 3D spausdinimo sluoksnio kryptčiai kaip, o taikomos jėgos apskaičiuojamos naudojant pasipriešinimo jėgos modelius, gautus dvikrypčio bandymo etape.

C raide vaizduojamas apskaičiuotos haptinės jėgos ir tikrosios FSR apkrovos palyginimas. Taip pat grafike yra vaizduojamos ir klaidos. Įvertinimas normalia kryptimi yra tikslus, su mažesnėmis nei 0.2 N paklaidomis, lygiagrečia kryptimi įvertinimas atitinka bendrą faktinės apkrovos tendenciją, bet klaidų dydis lyginamas su faktinėmis apkrovos vertėmis, todėl prieita prie išvados, jog reikalingas tolimesnis modelio tobulinimas lygiagrečia kryptimi.

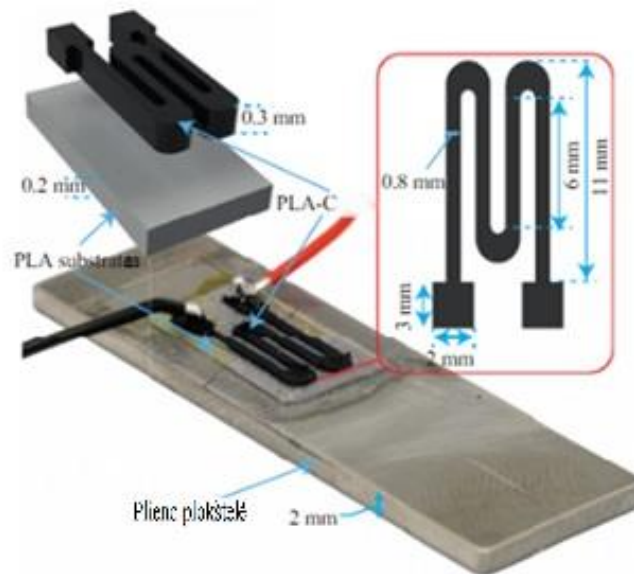
Šiame tyrime pristatomas 3D spausdinto daugiaašio jėgos jutiklio projektavimas, gamyba, bandymai ir patikrinimai. Paaiškinamas jutiklio veikimo principas ir išnagrinėtas 3D spausdinimo procesas. Kuriant įtempio jutiklio korpusą bus galima iš šio darbo pasisemti idėjų bandymams bei apsvarstyti gamybą iš EEL pluošto medžiagos.

1.2.5 3D spausdinamo tempimo jutiklio tyrimo apžvalga

2023 m. Vienoje vykusioje IEEE (ang. Institute of Electrical and Electronics Engineers) konferencijoje Romol Chadda, Omar Ben Dali, Bastian Latsch, Esan Sundaralingam ir Mario Kupnik pristatė inovatyvią temą: 3D spausdinamo įtempio jutiklio gaminamo iš laidaus PLA eksperimentinė

analizė. Tyrime siekiama įvertinti tokio jutiklio veikimą, patvarumą ir jautrumą, pritaikant jį mechaninių deformacijų matavimui. Pagrindinis dėmesys skiriamas 3D spausdinimo technologijos taikymui gaminant ekonomiškus ir personalizuotus tempimo jutiklius.

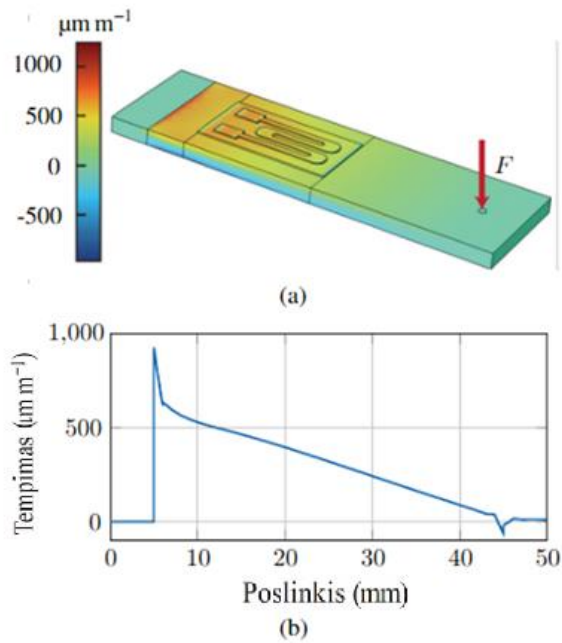
Buvo pristatytas naujas tempimo jutiklis, pagamintas naudojant FDM (Fused Deposition Modeling) 3D spausdinimo technologiją ir laidų PLA filamentą. Jutiklio konstrukcijos ir gamybos procesas buvo optimizuotas taip, kad būtų užtikrintas maksimalus jautrumas ir mechaninis stabilumas. Tyrime buvo atliekami eksperimentiniai bandymai, siekiant įvertinti šiuos veikimo parametrus: jautrumą, liniškumą, histerizę bei pakartojamumą.



1.10 pav. 3D spausdinamas įtempio jutiklis

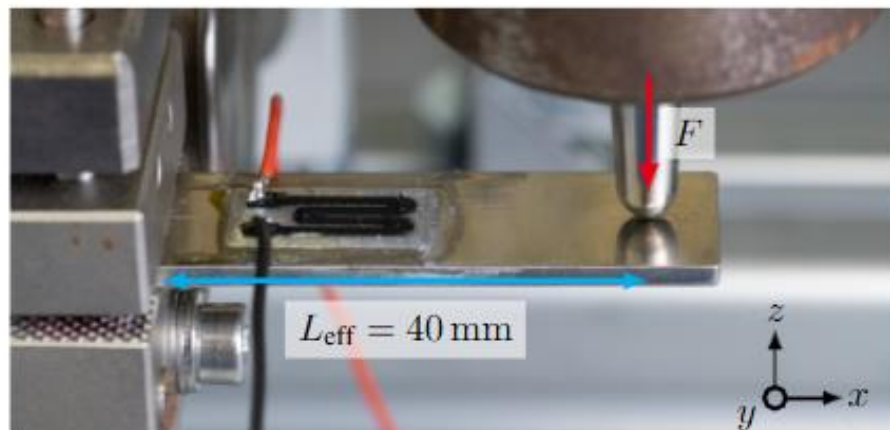
Chadda et al. (2023).

1.10 pav. iliustruoja jutiklio konstrukciją, matoma, kad jutiklis susideda iš PLA atspausdinto substrato, taip pat paveiksle matyti iš PLA-C atspausdintas matavimo tinklelis bei 2 mm storio plieninė plokštelė, kuri veikia kaip deformacijas patiriantis spyruoklinis elementas. Jutiklio veikimas pagrįstas laidumo pokyčiais, atsirandančiais, kai plokštė, prie kurios pritvirtintas jutiklis, patiria deformaciją.



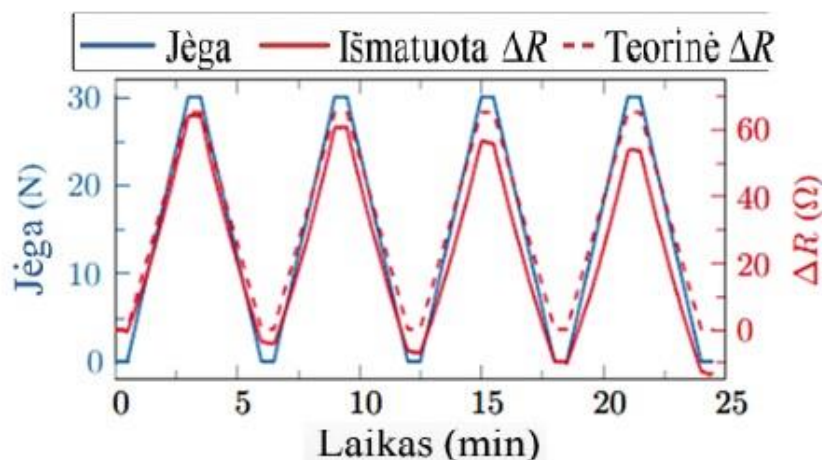
1.11 pav. Plieno plokštelės apkrovos simuliacija CAD aplinkoje Chadda et al. (2023).

1.11 pav., a pažymėtoje dalyje vaizduojamas 3D modelis, kuriame jutiklis pritvirtintas prie plieninės plokštės, o taikoma jėga F sukelia lenkimo deformaciją. Spalvų skalė ($\mu\text{m/m}$) parodo deformacijos pasiskirstymą plokštėje ir matavimo tinklėlyje. B dalyje vaizduojamas grafikas, kuris pateikia deformacijos reikšmes palei plokštės ilgį. Matoma, kad deformacija didžiausia netoli taikomos jėgos vietos ir palaipsniui mažėja artėjant prie tvirtinimo taško. Iš šio paveikslėlio galima geriau suprasti, kaip mechaninės deformacijos yra perduodamos matavimo tinklui, ir kaip tai padeda įvertinti jutiklio jautrumą bei efektyvumą.



1.12 pav. Plieno plokštelės apkrovos bandymas realioje aplinkoje Chadda et al. (2023).

Aukščiau esančiame 1.12 pav., vaizduojama eksperimentinė sistema, kurioje plieninė plokštė su pritvirtintu tempimo jutikliu yra veikiamą lenkimo apkrovos. Jėga F taikoma plokštės laisvojo galo kryptimi, o efektyvus plokštės ilgis ($L_{eff} = 40$ mm) žymi atstumą nuo tvirtinimo taško iki jėgos taikymo vietos. Lenkimo apkrova leidžia sukurti kontroliuojamą deformaciją, kurią jutiklis turi aptikti. Atlikti eksperimentinį bandymą realioje aplinkoje yra svarbu siekiant palyginti jutiklio atsaką su teorinėmis prognozėmis.



1.13 pav. Lyginamasis teorinių ir eksperimentinių bandymų grafikas Chadda et al. (2023).

Aukščiau esantis 1.13 pav., vaizduoja 3D spausdinto tempimo jutiklio atsaką į periodiškai kintančias jėgos F apkrovas per laiką. Iš grafiko matyti, jog išmatuotas varžos pokytis δR tiesiogiai koreliuoja su taikoma jėga F . Grafike matyti, kad jutiklis tiksliai registruoja varžos pokyčius tiek didėjant, tiek mažėjant apkrovai, o jo elgesys yra beveik linijinis. Eksperimentiniai (išstinė linija) ir analitiniai (punktyrinė linija) rezultatai sutampa beveik idealiai, kas rodo, kad teorinis modelis tinkamai prognozuoja jutiklio elgesį esant tokioms apkrovoms. Tiesinis dreifas eksperimentinės varžos pokyčių reikšmėse rodo, kad per laiką atsiranda nedidelė sisteminė paklaida. Iš šio grafiko matyti, jog 3D spausdintas jutiklis tiksliai ir nuosekliai registruoja mechanines apkrovas, o jo atsakas į jėgos pokyčius yra beveik linijinis. Taip pat akcentuojama gera koreliacija tarp analitinių ir eksperimentinių rezultatų, įrodanti teorinio modelio patikimumą. Tačiau nedidelis dreifas varžos pokyčių kreivėje ir skirtumas tarp krovimo/iškrovimo rezultatų gali reikšti, kad jutiklio veikimą ilgainiui gali paveikti medžiagos stabilumas arba eksperimentinės sąlygos.

Moksliniame tyrime buvo įrodyta, kad 3D spausdinti tempimo jutikliai, pagaminti naudojant laidžią PLA medžiagą, yra perspektyvus sprendimas ekonominių ir individualizuotų jutiklių gamybai.

Nors jų jautrumas ir mechaninis stabilumas vis dar yra riboti, tokių jutiklių gamyba gali būti pritaikyta srityse, kur reikalingi nebrangūs, lengvai pagaminami ir pritaikomi sprendimai (pvz. prototipų kūrimas, robotikoje kur reikalingas jėgos ar deformacijos stebėjimas). Darbe išskiriami tokie 3D spausdinamų jutiklių privalumai kaip tvarumas bei ekonomiškumas. Taip pat įvertinami ir trūkumai: ribotas laidžios PLA medžiagos elektros laidumas, linijškumo nukrypimai prie didesnių deformacijų. Siekiant pagerinti jų savybes, autoriai rekomenduoja toliau tirti alternatyvias medžiagas (pvz., grafeno ar anglies nanovamzdelių mišinius) bei optimizuoti 3D spausdinimo parametrus.

1.2.6 3D spausdinamų lanksčių įtempių jutiklių tyrimo apžvalga

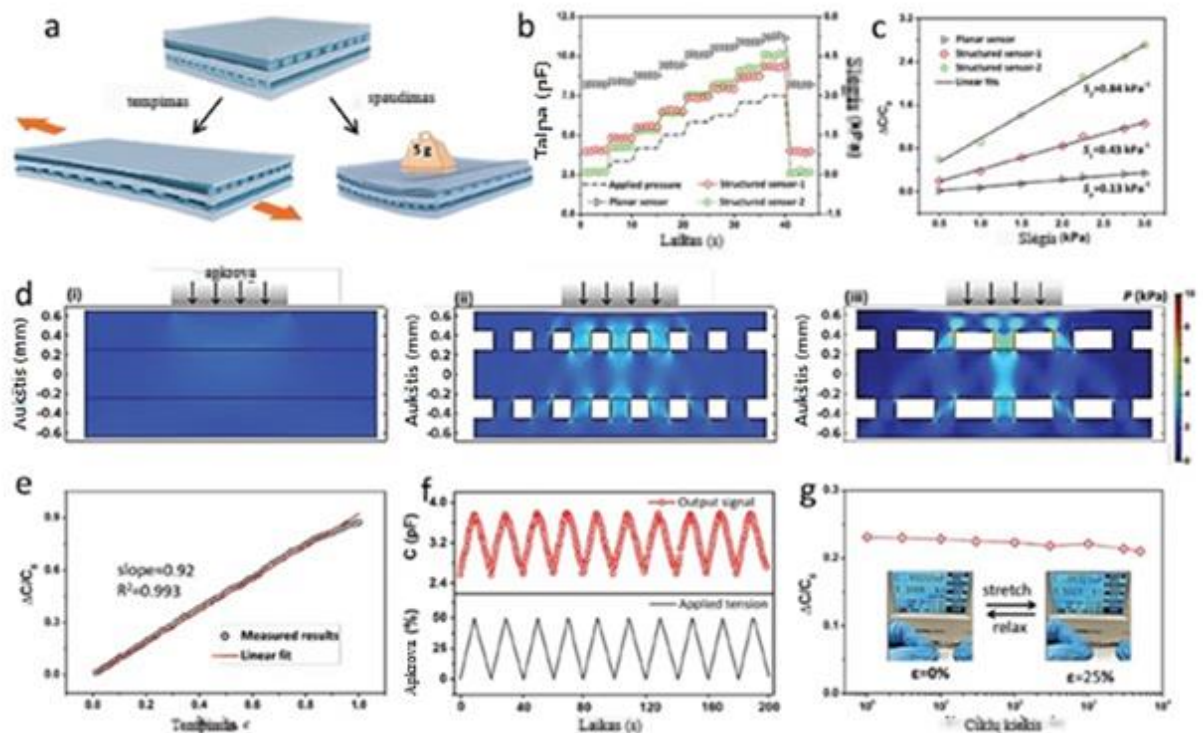
Liu et al. 2021 m. publikuotame tyrime apžvelgė 3D spausdinamų lanksčių įtempių jutiklių kūrimo procesą nuo jų atspausdinimo iki naudojimo įvairiuose prietaisuose. Autoriai apžvelgia šiuolaikines 3D spausdinimo technologijas, skirtas lanksčių deformacijos jutiklių kūrimui, bei pateikia šių jutiklių gamybos, integracijos ir taikymo galimybių analizę. Šie jutikliai, dėl savo galimybės aptikti subtilius deformacijų pokyčius, yra itin reikalingi įvairiose pažangiose srityse: dėvimose technologijose, biomechaniniuose tyrimuose, sveikatos būklės stebėjimo įrenginiuose, išmaniųjų robotų judesių valdymo sistemose ir kt.

Straipsnyje pabrėžiama, kad tradiciniai deformacijos jutikliai, gaminami naudojant įprastas litografijos ar kitų įprastų metodų technologijas yra ganėtai riboti juos bandant pritaikyti lanksčiose sistemose dėl jų standumo, sudėtingos gamybos bei didelių kaštų. 3D spausdinimas, pasitelkdamas pažangias medžiagas ir technikas, suteikia galimybę gaminti aukštos kokybės, individualiai pritaikytus, daugiasluoksnius ir lanksčius jutiklius, leidžiančius išplėsti jų panaudojimo galimybes.

Viena iš svarbiausių šio tyrimo dalių – medžiagų parinkimas lanksčių jutiklių gamybai. Didžiausias dėmesys skiriamas laidžiųjų užpildų, tokių kaip anglies nanodalelės, anglies nanovamzdeliai, grafasas bei sidabro nanodalelės, integracijai į elastingas polimerines matricas. Autoriai teigia, jog tokie užpildai yra būtini tam, kad jutiklis galėtų efektyviai reaguoti į mechanines deformacijas ir perduoti elektrinius signalus, atspindinčius šiuos pokyčius. Tyrimo autoriai pabrėžia, jog laidžiųjų dalelių pasiskirstymas matricoje yra esminis parametras, kuris tiesiogiai lemia jutiklio jautrumą bei elektrinį atsaką.

Tyrime išsamiai analizuojamos medžiagos ir technologijos, leidžiančios 3D spausdinimo būdu gaminti tokio tipo jutiklius. Didžiausias dėmesys skiriamas laidžiųjų užpildų integravimui į lanksčius polimerinius pagrindus. Tyrėjai pabrėžia, kad tokių užpildų pasiskirstymas jutiklio struktūroje tiesiogiai veikia prietaiso jautrumą bei atgalinio ryšio tikslumą. Be to, pateikiama 3D spausdinimo metodų – FDM (angl. *Fused Deposition Modeling*), SLA (angl. *Stereolithography*) ir DLP (angl. *Digital Light*

Processing) – analizė, pabrėžiant kiekvieno metodo privalumus ir trūkumus gaminant lanksčius, itin jautrius komponentus.



1.14 pav. DLP būdu spausdintų jutiklių struktūros pokyčiai esant skirtingoms apkrovoms ir deformacijoms

Yue et al. (2021).

1.14 pav., a pažymėtoje dalyje vaizduojama spausdinto jutiklio veikimo schema. Jutiklis sudarytas iš kelių sluoksnių, kuriuose tempimo ar spaudimo deformacijos sukelia struktūrinius pokyčius, lemiančius talpos kitimą. Iš schema matyti, jog jutiklis reaguoja tiek į tempimą, tiek į spaudimą, kas leidžia jį naudoti įvairiuose taikymuose, pvz., judesių ar jėgos stebėjime.

B dalyje vaizduojamam grafike matyti jutiklių talpos kitimas esant skirtingoms apkrovoms. Lyginami trijų skirtingų tipų jutikliai: plokščias jutiklis ir du struktūriniai jutikliai. Rezultatai rodo, kad struktūriniai jutikliai pasižymi didesniu jautrumu talpos pokyčiams, lyginant su plokščiu jutikliu, o tai reiškia, kad jie efektyviau reaguoja į išorinius mechaninius signalus.

C dalyje buvo atlikta jautrumo analizė, grafike pavaizduotas linijinis talpos pokyčių $\Delta C/C_0$ ir taikomo slėgio tarpusavio ryšys. Jutiklio jautrumas S yra apibrėžiamas kaip šio ryšio nuolydis. Rezultatai rodo, kad struktūriniai jutikliai turi aukštesnį jautrumą nei plokščias jutiklis. Tai įrodo, kad struktūriniai dizaino elementai padeda efektyviau perduoti slėgį į talpos pokyčius.

D dalyje pateikiami teoriniai baigtinių element metodų atliktų įtempių pasiskirstymo modeliai:

- i) Plokščias jutiklis, kuriame deformacijos pasiskirsto tolygiai.
- ii) Struktūrinis jutiklis su ertmėmis, kur deformacijos koncentruojasi ertmių ribose.
- iii) Esant slėgiui P , struktūriniame jutiklyje atsiranda didesnės įtempių koncentracijos zonos, leidžiančios pasiekti didesnę jautrumą ir efektyvesnį signalų generavimą.

E grafike vaizduojamas talpos pokyčių linijinis pokytis. Grafike pavaizduota eksperimentinė linijinė priklausomybė tarp talpos pokyčių $\Delta C/C_0$ ir deformacijos ε . Didelis atitikimas tarp eksperimentinių duomenų ir teorinės linijos (nuolydis 0,92 ir koreliacijos koeficientu $R^2 = 0,993$) rodo, kad jutiklio atsakas yra itin tikslus ir numatomas.

F grafike nagrinėjamas jutiklio atsakas į ciklines deformacijas. Grafike pavaizduotas struktūrinio jutiklio talpos kitimas C per dešimt ciklinių deformacijos ciklų. Rezultatai rodo, kad jutiklis patikimai generuoja pakartotinius signalus, kai taikomos ciklinės deformacijos kas pabrėžia jo stabilumą ir tinkamumą ilgalaikiam naudojimui.

G dalyje pavaizduotas struktūrinio jutiklio stabilumas per 5000 deformacijos ciklų. Talpos pokyčių santykis $\Delta C/C_0$ išlieka beveik nepakitęs, jo nuokrypis yra labai mažas, net esant didelėms deformacijoms $\varepsilon = 25\%$. Tai įrodo jutiklio ilgaamžiškumą ir tinkamumą intensyviai naudojimui realiomis sąlygomis.

Tyrime taip pat aptariami signalų apdorojimo metodai, būtini siekiant užtikrinti tikslų jutiklių atsaką į mechanines deformacijas. Šie signalai yra pagrindas tolimesnei jutiklių integracijai į realias sistemas, pvz., žmogaus judesių stebėjimo įrenginius, dėvimas sveikatos stebėjimo priemones arba robotų judesio valdymo sistemas. Be to pabrėžiama, jog siekiant masinės gamybos bei plačios komercinės taikymo srities, būtina toliau optimizuoti 3D spausdinimo procesus, kad būtų užtikrintas gamybos pakartojamumas ir komponentų ilgaamžiškumas.

Apibendrinant, tyrimas išryškina 3D spausdinimo privalumus gaminant lanksčius deformacijos jutiklius, kartu nurodydamas pagrindinius iššūkius, tokius kaip signalų stabilumas, ilgaamžiškumas ir jautrumo gerinimas. Šio tyrimo rezultatai rodo, kad 3D spausdinimo technologijos turi didelį potencialą ne tik pritaikant deformacijos jutiklius individualiems poreikiams, bet ir plečiant jų naudojimą medicinoje, išmaniosiose sistemose ir robotikoje.

2. TYRIMO METODAI

2.1. Metodologija

3D spausdinamo įtempio jutiklio kūrimo metodika apima sisteminių metodą, integruojantį projektavimo, gamybos ir testavimo procesus, kad būtų sukurtas funkcionalus ir patikimas jutiklis. Šiame skyriuje aprašomi išsamūs žingsniai, susiję su teorinių koncepcijų pavertimu praktišku ir efektyviu įtempio jutikliu naudojant 3D spausdinimo technologiją. Metodika suskirstyta į kelis pagrindinius etapus: projektavimas ir kūrimas, medžiagų parinkimas, 3D spausdinimas, mechaniniai bandymai, duomenų analizė, galutinis optimizavimas ir dokumentacija. Kiekvienas etapas yra labai svarbus siekiant užtikrinti, kad jutiklis atitiktų norimas veikimo specifikacijas ir patikimumo standartus.

Pirmasis metodikos etapas yra projektavimo ir tobulinimo etapas. Tai apima pradinio įtempio jutiklio projekto sukūrimą naudojant CAD (kompiuterinio projektavimo) programinę įrangą, šiam tyrimui atlikti planuojama naudotis SOLIDWORKS programą. Projektavimo procesas apima jutiklio geometrijos, matmenų ir jutiklių elementų integravimo taškų nustatymą. Projektas pagrįstas aukščiau aprašyta literatūros apžvalga bei numatytais taikymo reikalavimais. Pagrindiniai veiksniai, į kuriuos atsižvelgta projektuojant, yra jutiklio universalumas, matavimo diapazonas ir konstrukcijos vientisumas veikiant tempimo jėgoms.

Tinkamų medžiagų pasirinkimas 3D spausdinimui yra labai svarbus įtempio jutiklio veikimui. Įprastos 3D spausdinimo medžiagos yra PLA (polilaktido rūgštis), ABS (akrilonitrilo butadieno stirenas), TPU (termoplastinis poliuretanai) bei PETG (polietileno tereftalato glikolis). Medžiagos pasirinkimas priklauso nuo reikalaujamų mechaninių savybių, tokių kaip atsparumas tempimui, lankstumas ir ilgaamžiškumas. PLA yra žinomas dėl lengvo spausdinimo ir standumo, ABS suteikia didesnę stiprumą ir atsparumą temperatūrai, TPU suteikia lankstumo, PETG apjungia minėtų plastikų stipriąsias savybes bei gaminiams suteikia stiprumą bei universalumą išlaikant nesudėtingą spausdinimo procesą. Dėl minėtų PETG stipriųjų savybių, atliekant bandymus bus naudojamas šis plastiko užpildas.

3D spausdinimo etapas apima jutiklio pagaminimą naudojant pasirinktą medžiagą ir optimizuotus spausdintuvo nustatymus. Pagrindiniai spausdinimo parametrai, tokie kaip sluoksnio aukštis, užpildymo tankis, spausdinimo greitis ir temperatūros nustatymai, koreguojami taip, kad būtų užtikrinta aukšta spaudinių kokybė bei pritaikymas nustatytoms reikmėms. Pakartotinis spausdinimas yra svarbi šio etapo dalis, numatoma, jog bus spausdinama nuo 10 iki 15 jutiklio versijų, kurių kiekviena apims patobulinimus, pagrįstus mechaninių bandymų rezultatais. Šis kartotinis metodas leidžia patobulinti dizainą ir išspręsti atsirandančias problemas, susijusias su spausdinimo kokybe ar struktūros vientisumu.

Norint įvertinti atspausdinto įtempio jutiklio veikimą, yra būtina atlikti mechaninius bandymus. Tai reiškia, kad jutiklis veikiamas kontroliuojamomis tempimo jėgomis naudojant tempimo bandymo mašiną bei yra išmatuojamas jo atsakas. Atliekant testus bus įvertintos pagrindinės našumo metrikos, tokios kaip tikslumas, tiesiškumas, jautrumas ir pakartojamumas. Kalibravimas atliekamas naudojant žinomus svorius, kad būtų sukurta patikima matavimo skalė. Kiekvienai prototipo versijai atliekami keli bandymai, siekiant užtikrinti rezultatų nuoseklumą ir patikimumą. Be to, gali būti atliekami aplinkos bandymai, siekiant įvertinti jutiklio veikimą įvairiomis sąlygomis, pvz., esant skirtingam temperatūros ir drėgmės lygiui.

Duomenų analizė atlieka svarbų vaidmenį vertinant jutiklio veikimą ir numatymą tolesniems dizaino patobulinimams. Našumo metrika, gauta atliekant mechaninius bandymus, analizuojama siekiant įvertinti jutiklio tikslumą, jautrumą ir patikimumą. Statistinė analizė padeda nustatyti tendencijas, nuokrypius ir galimas tobulinimo sritis. Analizė taip pat apima jutiklio veikimo palyginimą su teorinėmis prognozėmis ir jau sukurtų įtempio jutiklių modeliais. Šis etapas užtikrina, kad jutiklis atitiktų norimas specifikacijas, ir suteikia įžvalgų galutiniam optimizavimui.

Remiantis mechaninių bandymų ir duomenų analizės rezultatais, optimizuojami jutiklio dizainas ir medžiagų pasirinkimas. Tai apima tikslų projektavimo parametrų derinimą, konstrukcinių elementų tobulinimą ir galbūt eksperimentavimą su skirtingomis medžiagomis ar medžiagų deriniais, kad būtų pasiektas geriausias našumas. Tada optimizuotas dizainas yra visapusiškai išbandomas, siekiant patvirtinti jo funkcionalumą ir patikimumą.

Paskutinis metodikos etapas apima išsamų viso proceso dokumentavimą ir ataskaitų rengimą. Išsamūs dizaino pakeitimų, bandymų rezultatų ir stebėjimų įrašai saugomi viso kūrimo proceso metu. Darbe sistemingai dokumentuojama metodika, testų rezultatai ir analizė, pateikiant aiškų ir išsamų tyrimo aprašymą. Ši dokumentacija yra reikalinga, tam, kad atsiradus poreikiui jutiklio klaidos diagnostikai, būtų galima kuo greičiau rasti klaidą bei ją pašalinti, taip pat dokumentacija gali būti naudojama kaip šaltinis būsimiems tyrimams ir plėtrai 3D spausdinamų jutiklių srityje.

Ši struktūrizuota metodika užtikrina sistemingą ir nuoseklų požiūrį į 3D spausdinamo įtempimo jutiklio kūrimą, galiausiai sukuriant tvirtą ir patikimą jutiklį, kuris gali būti naudojamas įvairiose srityse.

2.2. Tyrimo eigos planas

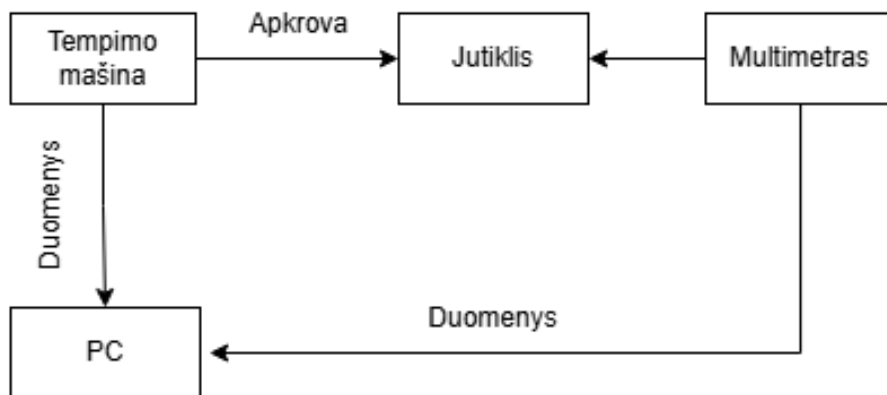
Remiantis informacija pateikta 2.1 skyriuje galima sudaryti konkretų tyrimo eigos planą, kuriuo bus galima remtis atliekant eksperimentinę jutiklio kūrimo ir tyrimo dalį.

Tyrimo planas:

- projektavimas ir kūrimas CAD aplinkoje;

- medžiagų parinkimas;
- 3D spausdinimas;
- mechaniniai bandymai;
- duomenų analizė;
- optimizavimas;
- dokumentacija.

2.1 pav. pateikta principinė eksperimentinio tyrimo schema, pagal kurią bus atliekami bandymai. Schemoje pavaizduota, kad jutiklis yra tempiamas į viršų, jam veikiant mechaninei apkrovai ir vykstant deformacijai. Šio proceso metu multimetrui laidais prijungus jutiklio kontaktus, fiksuojami elektrinės varžos pokyčiai, kurie leidžia vertinti jutiklio jautrumą deformacijai. Kartu su elektriniais duomenimis, per kompiuterinę programinę įrangą sinchroniškai registruojami ir mechaniniai rodikliai – apkrova bei poslinkis, susidarantys tempimo metu. Tokia tyrimo eiga leidžia išsamiai analizuoti jutiklio elgseną tiek mechaniniu, tiek elektriniu požiūriu.



2.1 pav. Principinė tyrimo schema

2.3. Įrangos analizė

Šiame skyriuje analizuojama pagrindinė įranga, naudojama kuriant ir testuojant 3D spausdinamo įtempimo jutiklį: „Creality K1“ 3D spausdintuvą ir „Mecmesin MultiTest 2.5-i“ tempimo bandymo mašiną. Išsamus šių įrankių tyrimas suteiks įžvalgų apie jų galimybes, savybes ir tinkamumą šiam tyrimo projektui.

2.3.1. „Creality K1“ 3D spausdintuvas

„Creality K1“ yra populiarus ir gerai vertinamas 3D spausdintuvas, žinomas dėl savo įperkamumo, patikimumo ir lengvo naudojimo. Žemiau aprašomos spausdintuvo pagrindinės savybės, specifikacija ir priežastys, dėl kurių jis pasirinktas šiam tyrimui.

Pagrindinės funkcijos:

- Kuriamo modelio maksimalus tūris: „Creality K1“ siūlo didelį 220 x 220 x 250 mm tūrį, leidžiantį spausdinti vidutinio ir didelio dydžio komponentus. Tai ypač naudinga kuriant įtempio jutiklio prototipą, kuriam gali prireikti daug vietos norint išgauti tikslų vaizdą.
- Spausdinimo atnaujinimo funkcija: ši funkcija leidžia spausdintuvui tęsti spausdinimą iš paskutinės įrašytos ekstruderio padėties netikėtai nutrūkus maitinimui. Tai užtikrina, kad ilgą laiką užtrunkantys spaudiniai nebus švaistomi dėl neplanuotų maitinimo sutrikimų.
- Karborundo stiklo lova: spausdintuve yra karborundo stiklo lova, kuri pagerina sukibimą spausdinant ir užtikrina lygesnius pirmuosius sluoksnius. Tai taip pat palengvina spaudinių pašalinimą jiems atvėsus.
- Tyli motininė plokštė: „Creality K1“ turi tylią motininę plokštę, kuri sumažina triukšmą veikimo metu, o tai yra naudinga tylesnei darbo aplinkai.
- Patobulinta vartotojo sąsaja: spausdintuve yra patobulinta vartotojo sąsaja su 4,3 colio spalvotu ekranu, todėl lengviau naršyti ir valdyti spausdinimo procesą.

Specifikacijos:

- spausdinimo technologija: lydyto nusodinimo modeliavimas (FDM);
- sluoksnio aukštis: 0,1–0,35 mm;
- purkštuko skersmuo: Standartinis 0,4 mm;
- spausdinimo greitis: iki 600 mm/s;
- pagreitis iki 20 000 mm/s²;
- spausdinimo tikslumas: 100±0,1 mm;
- gijų suderinamumas: PLA, ABS, PETG ir kiti 1,75 mm siūlai.

Dėl „Creality K1“ universalumo valdant įvairius siūlų tipus, įskaitant PLA, ABS ir PETG, jis idealiai tinka eksperimentuojant su įvairiomis medžiagomis, siekiant rasti geriausią įtempio jutiklio variantą. Jo patikimumas ir tikslumas užtikrina, kad aukštos kokybės, tikslūs spaudiniai gali būti nuosekliai gaminami, o tai labai svarbu kartotiniam projektavimo ir testavimo procesui. Palyginti didelė kūrimo apimtis ir didelė spausdinimo skiriamoji geba leidžia sukurti detalų ir sudėtingą jutiklių dizainą, kuris yra būtinas atliekant funkcinis bandymus ir optimizavimą.

2.3.2. „Mecmesin MultiTest 2.5-i“ įtempio testavimo įranga

„Mecmesin MultiTest 2.5-i“ yra universali ir tiksli tempimų bandymo mašina, skirta įvertinti medžiagų ir komponentų mechanines savybes esant tempimo apkrovoms. Šiame poskyryje nagrinėjamos pagrindinės mašinos savybės, specifikacija ir tinkamumas 3D spausdinto įtempimo jutiklio testavimui.

Pagrindinės funkcijos:

- Apkrova: bandymų stendo maksimali apkrova yra 2500 N, todėl jis tinka mažiems ir vidutinio dydžio mėginiams tirti. Šis pajėgumas yra pakankamas numatomoms tempimo jėgoms, su kuriomis susidurs 3D atspausdintas įtempio jutiklis.
- Tikslus apkrovos elementas: Įrengtas didelio tikslumo apkrovos elementas, užtikrina tikslius jėgos matavimus, kurie yra labai svarbūs patikimam duomenų rinkimui ir analizei.
- Kryžminis greitis: bandymų stende yra reguliuojamas kryžminis greitis, leidžiantis kontroliuoti tempimo jėgas. Tai užtikrina nuoseklias bandymo sąlygas ir patikimus rezultatus.
- Duomenų gavimo sistema: integruota duomenų rinkimo sistema registruoja jėgos ir poslinkio duomenis realiuoju laiku, todėl galima išsamiai analizuoti jutiklio veikimą.
- Vartotojo sąsaja: Įrenginys turi patogią sąsają, leidžiančią lengvai nustatyti ir valdyti testavimo parametrus, o tai padidina testavimo proceso efektyvumą.

Specifikacijos:

- apkrovos diapazonas: 0–2500 N;
- matavimo tikslumas: $\pm 0,1\%$ nurodytos apkrovos;
- bandymų režimai: tempimas, gniuždymas, plešimas, lenkimas ir kt;
- poslinkio skiriamoji geba: 0,01 mm;
- sąramos eiga: apie 500 mm;
- greičio diapazonas: reguliuojamas nuo 0,1 mm/min iki 500 mm/min;
- programinė įranga: „Emperor“;
- svoris: ~55 kg.

„Mecmesin MultiTest 2.5-i“ talpa ir tikslumas puikiai tinka įvertinti 3D spausdinto įtempio jutiklio mechanines charakteristikas. Mašinos gebėjimas taikyti kontroliuojamas ir tikslas tempimo jėgas užtikrina tikslų pagrindinių veikimo rodiklių, tokių kaip stiprumas, elastingumas ir deformacijos elgsena, matavimą. Reguliuojami parametrai leidžia atlikti bandymus įvairiomis sąlygomis, imituojant realaus pasaulio scenarijus. Tikslūs jėgos ir poslinkio matavimai yra labai svarbūs kalibruojant jutiklį ir patvirtinant jo tikslumą bei patikimumą.

2.4. Jutiklių testavimo metodika

2.4.1. Jutiklio kūrimo eiga ir eksperimentinis optimizavimas

Eksperimentinis tyrimas pradėtas nuo jutiklio geometrijos modeliavimo naudojant „SolidWorks“ projektavimo programinę įrangą. Bandinys suprojektuotas taip, kad atitiktų bandinių stendo matmenis. Paruoštas modelis iš „SolidWorks“ aplinkos buvo eksportuotas į spausdinimui tinkamą failo formatą (STL), tada naudojant „OrcaSlicer“ programinę įrangą buvo paruoštas ir eksportuotas failas kurį galima kelti tiesiogiai į 3D spausdintuvą (G kodas). Naudojant „Crealty K1“ 3D spausdintuvą buvo atspausdintas pirmasis bandinys, pavaizduotas 2.3 pav., Nr. 2. Spausdinimui naudotas elektrai laidus PLA plastikas turintis anglies ir grafeno priemaišų.

2.1 lentelė. 3D spausdintuvo parametrai

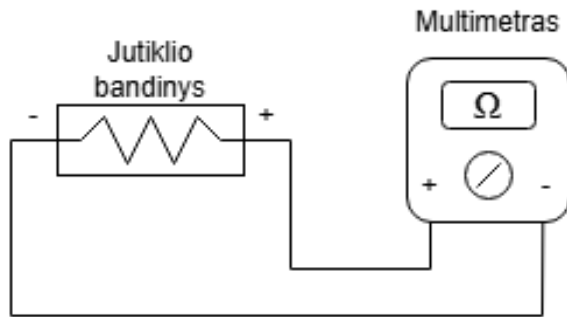
Antgalio temperatūra, °C	Darbinio paviršiaus temperatūra, °C	Vidinė spausdintuvo temperatūra, °C	Sluoksnių aukštis, mm	Užpildas, %	Spausdinimo kryptis
220	55	30	0.08	100	Kryžminė

2.1 lentelėje matyti, kokiems spausdintuvo parametrams esant buvo atlikti bandymai su atspausdintu jutikliu.

2.2 lentelė. Tempimo mašinos parametrai

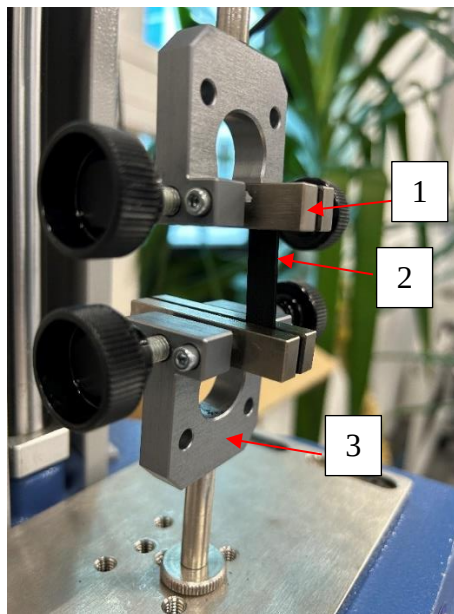
Maksimali apkrova, N	Poslinkio greitis, mm/min	Maksimalus poslinkis, mm	Sustojimo sąlygos	Griebtuvų tipas
1000	1	10	Maksimali jėga/maksimalus poslinkis	Metaliniai su izoliacine medžiaga

2.2 lentelėje pateikti tempimo mašinos parametrai, kuriems esant buvo atlikti bandymai. Naudota apkrovos celė, kurios maksimali apkrova yra 1000 N, buvo parinktas 1 mm/min poslinkio greitis, maksimalus poslinkis apribotas 10 mm, taip pat buvo aprašytos sąlygos, kuriomis tempimas baigtųsi – įrenginiui pasiekus maksimalią nurodytą apkrovos jėgą ar maksimalų nurodytą poslinkį bei buvo parinkti tyrimui tinkami metaliniai griebtuvai iš vidinės pusės sąlyčio su bandiniu vietoje turintis elektrą izoliuojančią medžiagą.



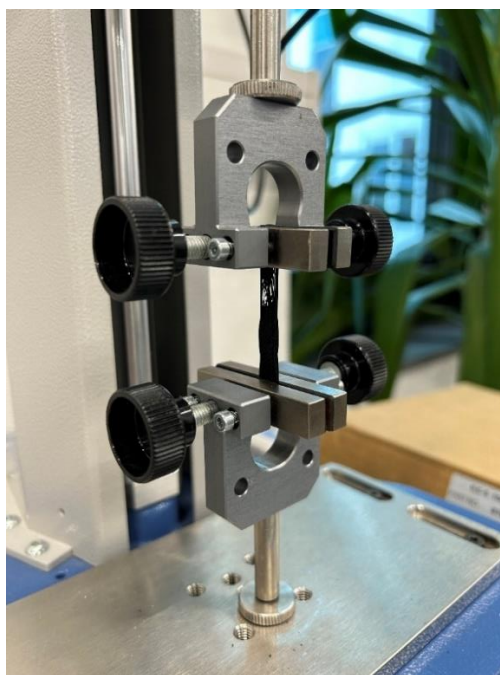
2.2 pav. Jutiklio varžos matavimo po atspausdinimo schema

Tyrimo metu jutiklio elektrinės savybės buvo vertinamos matuojant jo varžą skirtinguose deformacijos etapuose. Prieš pradedant tempimo bandymus, jutiklio galai buvo prijungti prie multimetrom naudojamą „krokodilo“ tipo gnybtus. Pradinė, nedeformuoto jutiklio varža siekė apie 87 kΩ. Šis matavimas atliktas prieš fiksuojant jutiklį tempimo stende, siekiant užfiksuoti pradinę elektrinę būseną.



2.3 pav. Pirmasis 3D atspausdinto jutiklio bandinys bandymo stende
Bandymų stendo dalys: 1 – spaustuvas; 2 – bandinys; 3 – tvirtinimo apkaba

2.3 pav. matyti, jog jutiklio tempimo eksperimentas atliktas mechaniniame bandymų stende, kuriame mėginys buvo tvirtinamas tarp dviejų apkabų. Jutiklio galai tvirtai įspausti tarp stendo spaustuvių – tai yra pradinė padėtis prieš pradedant deformaciją. Tempimo metu jutiklis buvo tolygiai tempiamas vertikalia kryptimi. Jutiklis deformavosi, ilgėjant jo aktyviajai zonai tarp fiksacijos taškų.



2.4 pav. Jutiklio pokytis deformacijos metu

2.4 paveiksle matyti paskutinė tempimo fazė – stipriai deformuotas jutiklis, kuris pailgėjo 20mm, o vidurinėje dalyje galima įžvelgti išsitempusias gijas, kas rodo jutiklio struktūrinius pokyčius.

Šio bandymo metu buvo pastebėta, kad jutiklis pradeda plyšti esant 2 mm poslinkiui. Nuspręsta, jog reikia modifikuoti bandinį tam, kad būtų galima tiesiogiai prie jo prijungti multimetrom gnybtus bei stebėti varžos pokytį realiu metu.

Atsižvelgiant į prieš tai minėtus rezultatus buvo spausdinami ir testuojami keletas skirtingų matmenų jutiklių (2.5 pav.), iki kol buvo rastas tinkamas variantas atlikti tolesnius tyrimus.



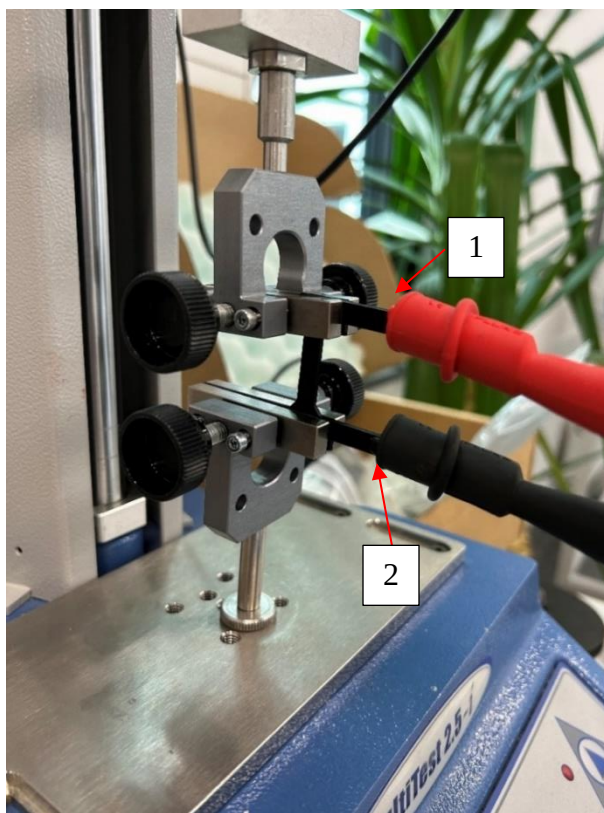
2.5 pav. Skirtingų matmenų jutikliai po deformacijos

Atlikus pakartotinius testavimus, buvo apsistota prie jutiklio (2.6 pav.), kurio testuojamas paviršiaus plotas yra $23 \times 6 \times 1,5$ mm. Šis bandinys turi pakankamai ilgas ir plačias atšakas, kad patogiai ir stabiliai būtų galima prijungti multimetrom gnybtus visos deformacijos metu.



2.6 pav. Jutiklio bandinys, turintis atšakas gnybtams

2.7 pav. vaizduojamas jutiklio bandinys su prie jo prijungtais multimetrom gnybtais, pažymėtais 1 ir 2 numeriais, tam, kad realiuoju laiku būtų galima stebėti varžos pokytį vykstant deformacijos procesui.



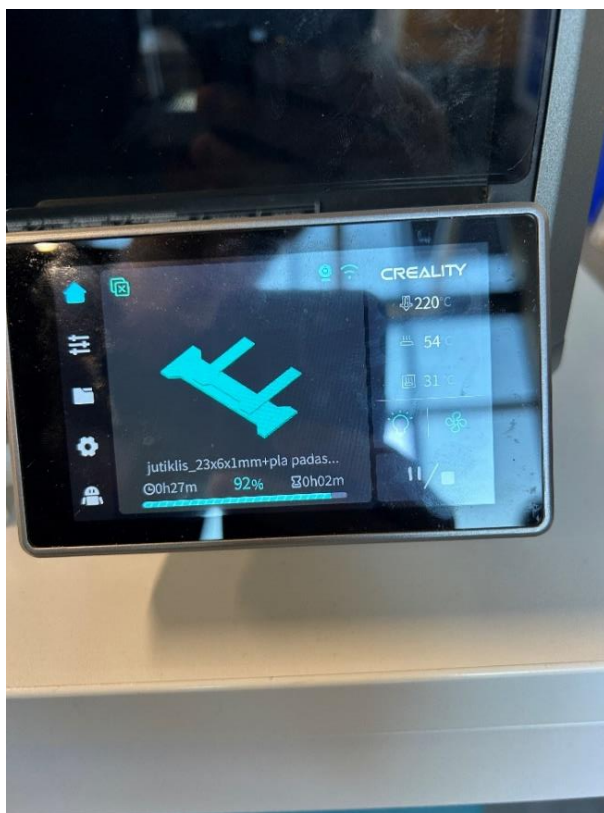
2.7 pav. Bandinys stende su prie jo prijungtais multimetro gnybtais:
1 – teigiamas multimetro gnybtas; 2 – neigiamas multimetro gnybtas

2.4.2. Kombinuoto jutiklio kūrimo eiga

Toliau buvo suprojektuotas kombinuoto tipo jutiklio bandinys, kurio 2 mm storio laikomasis padas atspausdintas iš įprasto PLA plastiko, o 1 mm storio centrinė dalis – iš elektrai laidaus PLA. Tam pasitelktas 2.3 poskyryje aprašytas „Crealty K1“ 3D spausdintuvas, leidžiantis sluoksniais formuoti skirtingų medžiagų komponentus. Baigus gamybą, jutiklis buvo sumontuotas tempimo bandymo staklėse, kuriose fiksuojamas tiek mechaninis atsakas (plyšimo taškas), tiek elektrinės savybės deformacijos metu.

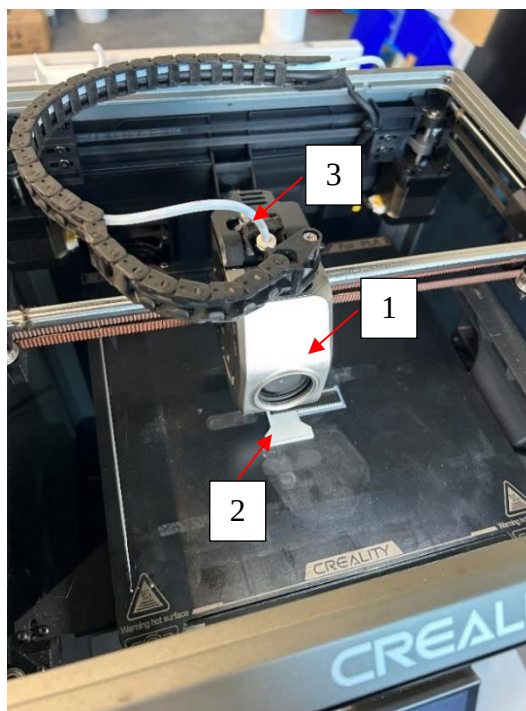
2.8 pav. pavaizduotas spausdintuvo ekranas, kuriame parodomi parametrai, kuriems esant buvo spausdinamas bandinys:

- ekstruderio temperatūra – 220 °C;
- darbinio paviršiaus temperatūra – 55 °C;
- vidinė spausdintuvo temperatūra – 30 °C.



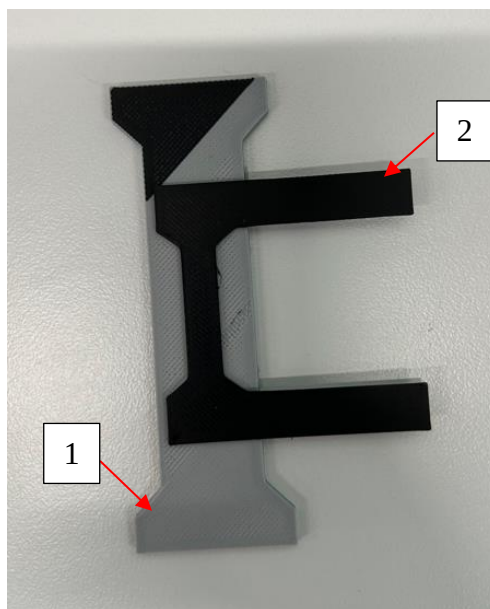
2.8 pav. 3D spausdinimo parametrai

2.9 pav. pavaizduota kombinuoto jutiklio bandinio spausdinimo eiga. Plastiko tiekimo gija, pažymėta Nr. 3, tiekama į ekstruderį (Nr. 1), iš kurio, vadovaujantis suformuotu G kodu, formuojamas spausdinamas bandinys (Nr. 2). Iš pradžių buvo atspausdinta bandinio bazė, naudojant pilkos spalvos įprastą PLA plastiką. Pasiekus reikiamą aukštį, spausdinimo procesas buvo sustabdytas, o tūbelėje esanti gija pakeista į elektrai laidų PLA plastiką. Tuomet spausdinimas pratęstas, tokiu būdu viršutinė – jautrioji jutiklio dalis – buvo pagaminta iš reikiamos, elektrai laidžios medžiagos.



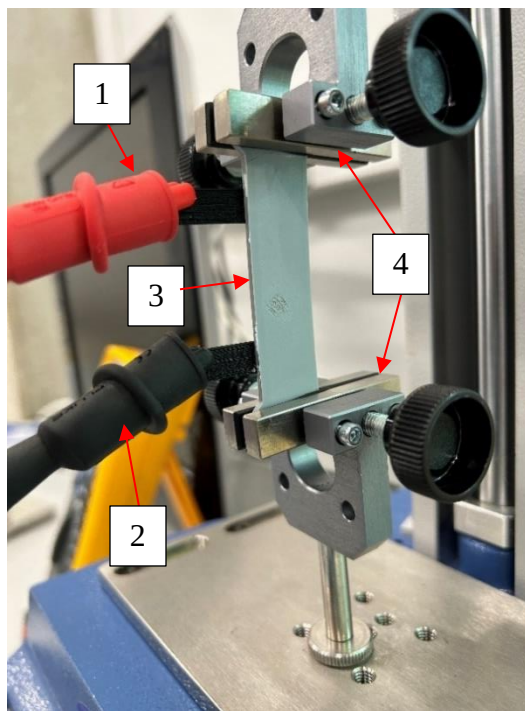
2.9 pav. 3D spausdinimo procesas:
1 – ekstruderio galvutė; 2 – bandinys; 3 – plastiko tiekimo gija

2.10 pav. pavaizduotas atspausdintas jutiklio bandinys, sudarytas iš dviejų skirtingų medžiagų. 1 Nr. žymima bazinė dalis, atspausdinta iš įprasto PLA plastiko, užtikrinanti konstrukcinį stabilumą ir patogų tvirtinimą. 2 Nr. pažymėta jautrioji jutiklio dalis, pagaminta iš elektrai laidaus PLA plastiko – prie jos prijungus multimetrą, bus matuojami varžos pokyčiai deformacijos metu.



2.10 pav. Atspausdintas kombinuotas bandinys:
1 – bazė iš PLA plastiko; 2 – matuojama dalis iš elektrai laidaus PLA plastiko

2.11 pav. matoma, jog jutiklio tempimo eksperimentas buvo atliktas mechaniniame bandymų stende, vadovaujantis tokiu pačiu principu kaip ir bandymas, aprašytas 3.1 poskyryje. Skirtumas tas, kad šio bandymo metu jutiklio bazinė dalis (Nr. 3), pagaminta iš įprasto PLA plastiko, buvo įtvirtinta bandymų stendo spaustuvuose (Nr. 4). Prie jautriosios jutiklio dalies, pagamintos iš elektra laidaus PLA, buvo prijungti multimetrom gnybtai: teigiamas – Nr. 1, neigiamas – Nr. 2, siekiant fiksuoti varžos pokyčius tempimo metu.

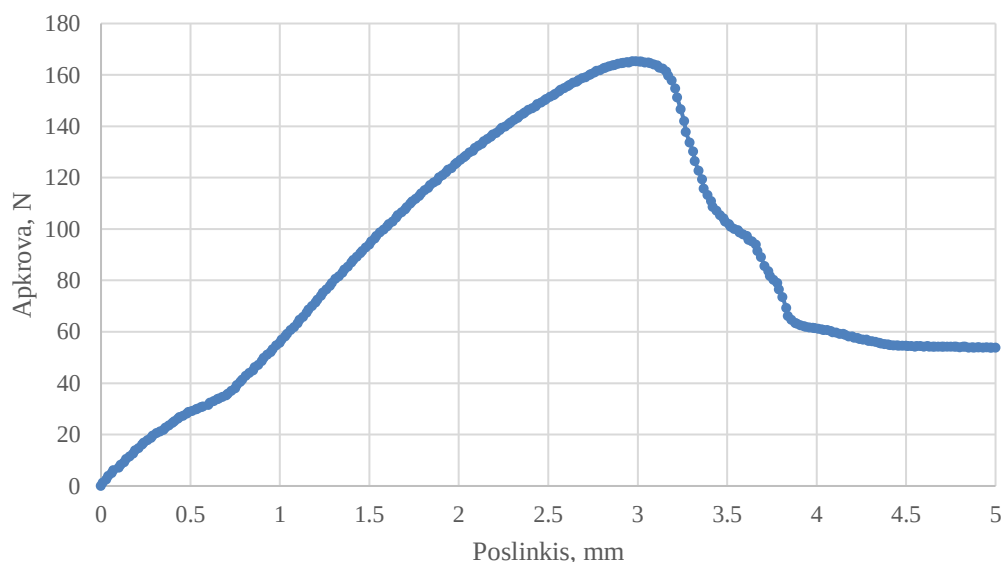


2.11 pav. Jutiklio bandinys tempimo stende:
1 – teigiamas multimetrom gnybtas; 2 – neigiamas multimetrom gnybtas; 3 – bandinio bazė; 4 – spaustuvai

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

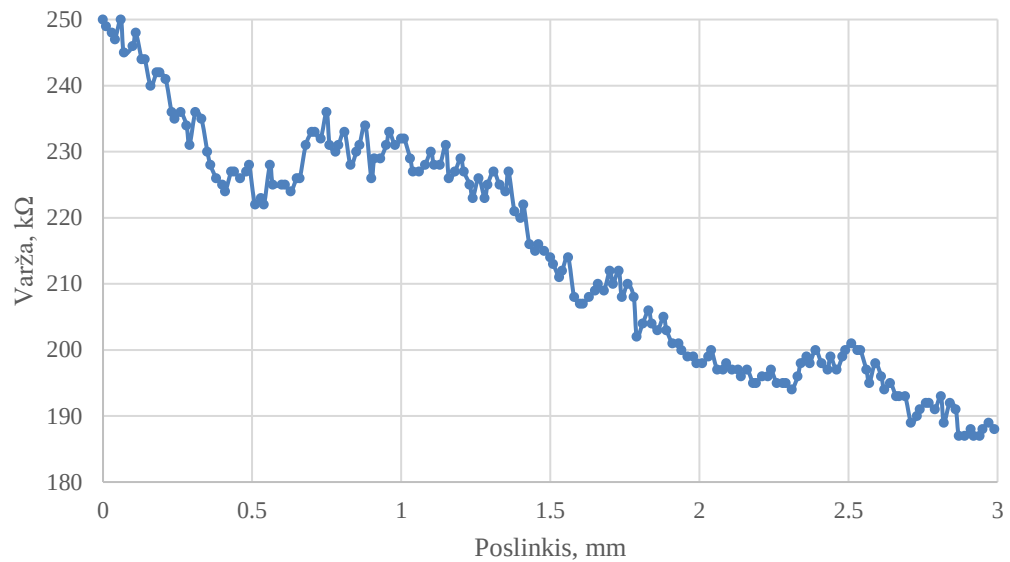
3.1. Pirminiai jutiklio bandinių testavimai

Šioje darbo dalyje aprašomas eksperimentinis tyrimas, kurio tikslas – įvertinti 3D spausdinamo jutiklio, pagaminto iš elektrai laidžios PLA medžiagos, atsaką į mechaninę deformaciją. Tyrimas atliktas siekiant išanalizuoti, kaip kinta tokio tipo medžiagos elektrinė varža ją tempiant, taip preliminariai įvertinant jos tinkamumą kaip mechaniniam jutikliui. Šis eksperimentas yra reikšmingas siekiant toliau vystyti ekonomiškus, lengvai integruojamus jutiklius, pritaikomus įvairiose srityse, tokiose kaip išmanios konstrukcijos ar nebrangūs biomechaniniai jutikliai.



3.1 pav. Apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.1 pav. pavaizduotas 2.4.1 skyrelyje aprašyto bandymo apkrovos pokyčio priklausomybės nuo poslinkio grafikas, gautas tempimo bandymo metu. Iš grafiko matyti, kad iki 3 mm poslinkio apkrova palaipsniui didėjo, pasiekdama aukščiausią apkrovos tašką – 165,3 N. Tai rodo, jog jutiklis šiame etape nuo tempimo pradžios iki kol pasiekė aukščiausią apkrovos tašką patyrė elastingą deformaciją. Vėliau apkrova pradėjo mažėti, o tai reiškia medžiagos struktūrinį silpnėjimą ir galimą plastinę deformaciją bei plyšimo proceso pradžią. Šis kritimas rodo apie mechaninės vientisumo ribos peržengimą, t. y. jutiklio bandinys išlieka elastingas iki kol pasiekia aukščiausią apkrovos tašką ties 3 mm ir pradeda plyšti.



3.2 pav. Varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.2 pav. pateiktas varžos pokyčio priklausomybės nuo poslinkio grafikas. Priešingai nei įprasta metaliniams jutikliams, šiuo atveju varža mažėjo didėjant tempimo poslinkiui – nuo 250 kΩ iki 187 kΩ. Šis atvirkštinis varžos pokytis gali būti susijęs su elektrai laidžios PLA medžiagos savybėmis, kuriose tempimo metu gali keistis laidžiųjų anglies dalelių pasiskirstymas. Mažėjanti varža gali rodyti kontaktinių taškų suartėjimą arba naujų elektros kelių susiformavimą deformacijos metu.

Šių grafikų analizė rodo, kad jutiklis reaguoja į mechaninę deformaciją ne tik per apkrovą, bet ir per varžos pokytį, kas patvirtina jo potencialų panaudojimą kaip tamprumo jutiklį.



3.3 pav. 23×6×1,5 mm jutiklio bandinys po deformacijos

3.3 paveiksle pavaizduotas modifikuotos formos jutiklio bandinys po atlikto tempimo bandymo. Matoma aiški struktūrinė deformacija – viršutinėje kairėje srityje įvyko medžiagos plyšimas, išryškėjo ištemptos vidinės spausdinimo gijos. Plyšimo vieta sutampa su siauresne jutiklio dalimi, kurioje deformacijos metu koncentravosi didžiausia mechaninė įtampa.

Šis pažeidimas rodo, kad jutiklis buvo veikiamas iki ribinio apkrovimo taško – 165,3 N, viršijančio jo elastingumo ribą, dėl ko įvyko plastinė deformacija ir galiausiai – struktūros plyšimas. Nepaisant to, iki plyšimo momento esant 3 mm poslinkiui buvo galima stebėti aiškia elektrinės varžos priklausomybę nuo mechaninio poslinkio, o tai patvirtina jutiklio veikimo principą.

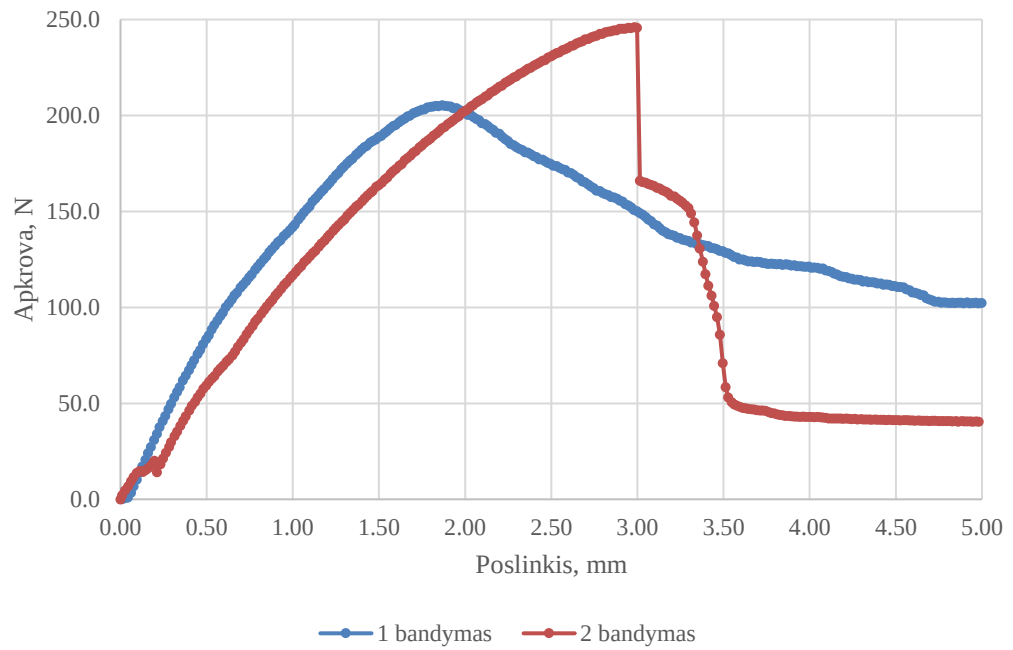
Išanalizavus gautus rezultatus ir pastebėjus, jog yra koreliacija tarp jutiklio deformacijos ir varžos pokyčio, buvo nuspręsta toliau tirti šią koreliaciją keičiant jutiklio parametrus. 3 lentelėje pateikti jutiklių, su kuriais toliau buvo atliekami bandymai, geometriniai matmenys, medžiagiškumo sandara bei nurodytas bandymų skaičius.

3.1 lentelė. 3D spausdinamų bandinių charakteristika

Eil. Nr.	Skerspjūvio plotas, mm	Storis, mm	Medžiaga	Bandymų skaičius
1	30×10	1,5	Elektrai laidus PLA	2
2	25×12	1,5	Elektrai laidus PLA	2
3	23×6	1,5	Elektrai laidus PLA	3
4	23×6	1	Elektrai laidus PLA	3
5	23×6	2	Elektrai laidus PLA	3
6	23×6	1 + 2	Elektrai laidus PLA + PLA bazė	3

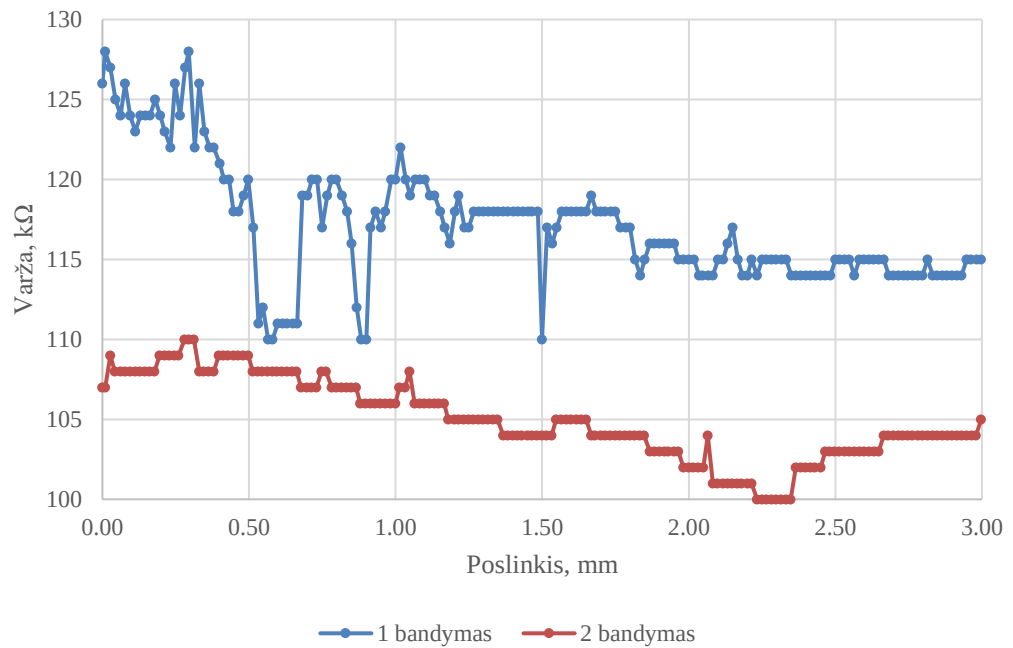
3.2. Jutiklio bandinių testavimai keičiant skerspjūvio plotą

Siekiant geriau įvertinti elektrai laidžios PLA plastiko tinkamumą jutiklių gamybai, buvo atlikta eksperimentinė analizė keičiant bandinio geometriją – šiuo atveju analizuoti 30×10×1,5 mm matmenų jutiklių bandiniai. 3.4 pav. pateiktas jutiklių apkrovos priklausomybės nuo poslinkio grafikas. Iš grafiko matyti, jog atliekant pirmąjį bandymą apkrova palaipsniui didėjo iki 1,87 mm poslinkio pasiekdama aukščiausią apkrovos tašką ties – 205,3 N. Atitinkamai antrojo bandymo metu maksimali apkrova – 260 N pasiekta esant 2,98 mm poslinkiui. Galima matyti, jog abiejuose bandymuose jutikliai patyrė elastingą deformaciją iki kol pasiekė aukščiausią apkrovos tašką ir pradėjo plyšimo procesą. Pirmojo bandymo metu jutiklis plyšo laipsniškai, antrojo bandymo metu matomas staigus apkrovos kritimas, būdingas trapiam plyšimui.



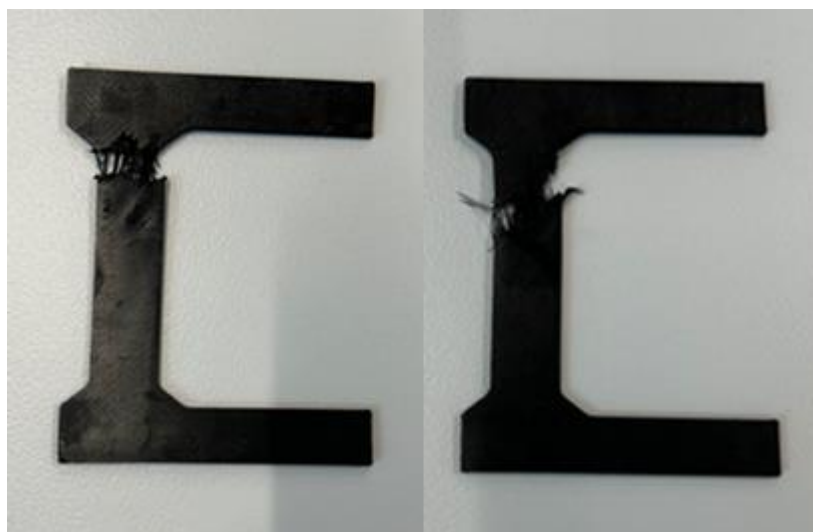
3.4 pav. 30×10×1,5 mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.5 pav. pateiktas 30×10×1,5 mm matmenų jutiklių bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas. Pirmojo bandymo metu varža svyravo nuo 107 kΩ iki 103 kΩ, tuo tarpu antrojo – nuo 126 kΩ iki 115 kΩ. Abu bandiniai pasižymėjo reikšmingais varžos svyravimais deformacijos metu, o tai rodo nestabilią elektrinę elgseną. Nors abiejų bandymų metu varža bendraja tendencija mažėjo didėjant poslinkiui, varžos kitimas buvo netolygus su aiškiai matomais šuoliais ir nelygumais.



3.5 pav. 30×10×1,5 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas

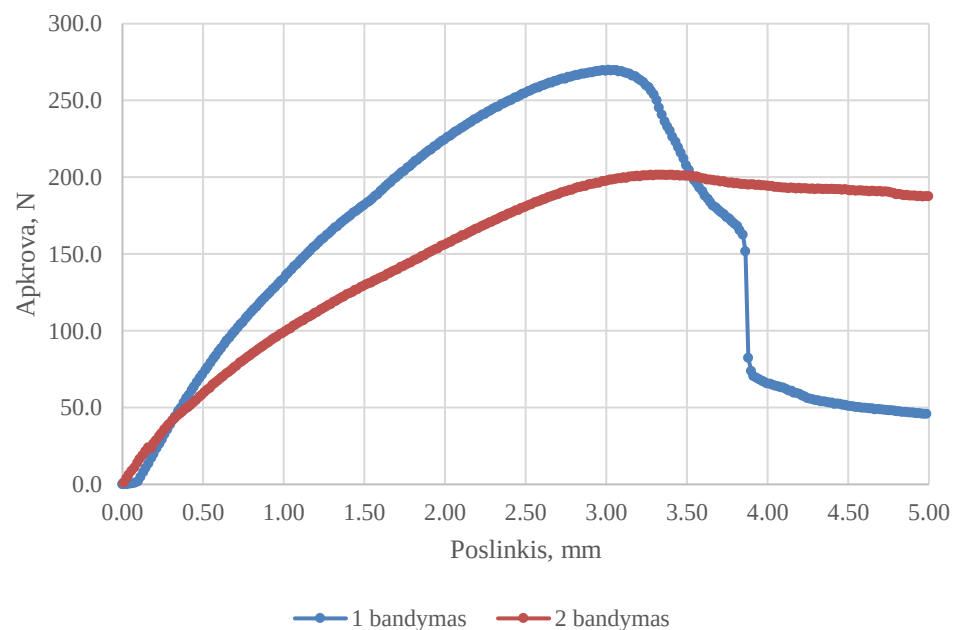
3.6 pav. matomi jutiklių bandiniai po tempimo bandymų aiškiai rodo deformacijos ir plyšimo zonas. Jutiklių plyšimas įvyko skirtingose vietose, pirmasis bandinys (3.6 pav., a) plyšo skerspjūvio viršuje horizontaliai bei pasižymėjo palaipsnišku plyšimu, būdingu tampriai-plastiškai medžiagai, tuo tarpu antrasis (3.6 pav., b) lūžo staigiai, istrižai bei kiek arčiau skerspjūvio centro, o tai rodo trapijo plyšimo pobūdį. Vizualiai matoma medžiagos trūkimo struktūra patvirtina ankstesnius mechaninės elgsenos skirtumus tarp dviejų bandinių.



3.6 pav. 30×10×1,5 mm mm jutiklių bandiniai po deformacijos:
a) jutiklis po pirmojo bandymo; b) jutiklis po antrojo bandymo

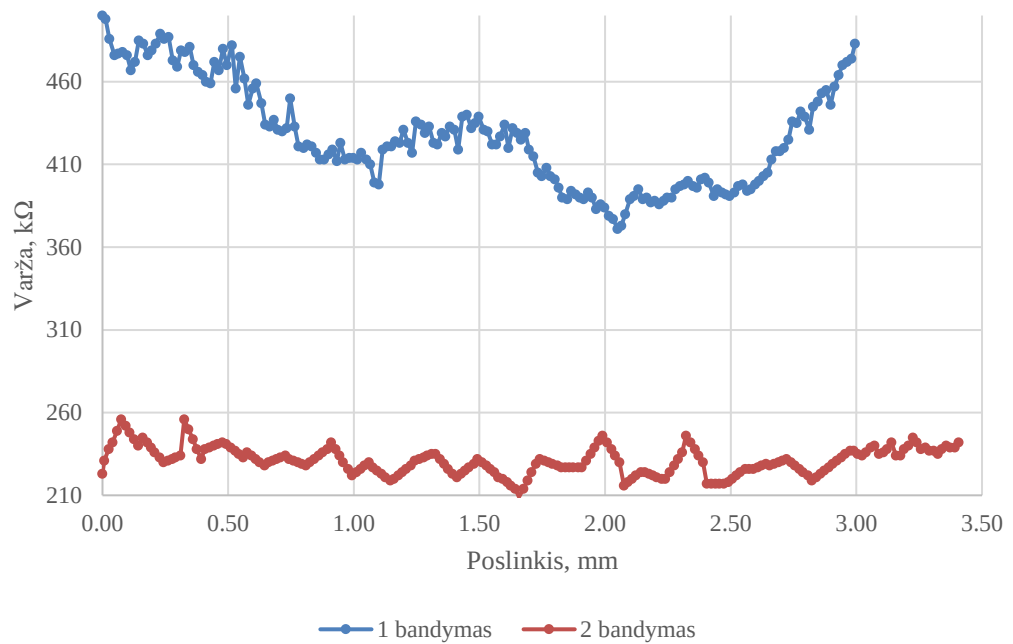
Elektrinės varžos charakteristikos (3.11 pav.) taip pat neparodė teigiamų pokyčių, susijusių su šios geometrijos pasirinkimu – varža deformacijos metu kito netolygiai, buvo fiksuojami dažni šuoliai bei svyravimai. Elektriniu požiūriu, nei vienas bandinys nepasižymėjo stabilia ir tolygiai kintančia varža deformacijos metu, o tai mažina jutiklio patikimumą ir jautrumą. Atsižvelgiant į elektrinius rezultatus, galima teigti, kad $30 \times 10 \times 1.5$ mm geometrijos jutiklių bandiniai nėra tinkami tiksliai ir stabiliam jutiklių veikimui užtikrinti. Siekiant optimizuoti jutiklio charakteristikas, toliau eksperimentuojama su $25 \times 12 \times 1.5$ mm skerspjūvio jutiklio bandiniais.

3.7 pav. apkrovos nuo poslinkio grafikas rodo, kad pirmasis bandinys pasiekė didesnę maksimalią apkrovą – 269,9 N ties 3,01 mm poslinkiu, o antrasis – 201,6 N ties 3,31 mm poslinkiu. Abiejų bandymų metu pastebėtas elastingas deformacijos etapas, tačiau pirmojo bandinio kreivėje po piko užfiksuotas staigus apkrovos kritimas, antrojo bandinio apkrova krito palaipsniui.



3.7 pav. $25 \times 12 \times 1.5$ mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.8 pav., varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas rodo, kad abu bandiniai pasižymėjo nestabilia varžos kaita deformacijos metu. Pirmojo bandymo metu varža svyravo nuo pradinių 500 k Ω iki 477 k Ω piko metu, o antrojo – nuo 223 k Ω iki 237 k Ω . Varža mažėjo, tačiau šis mažėjimas buvo nelygus – vyko dažni šuoliai ir bangavimai, kas rodo netolygiai pasiskirsčiusį laidžiųjų dalelių tinklą ir žemą matavimo tikslumą. Tokia elektrinė elgsena neatitinka stabiliam jutikliui keliamų reikalavimų.



3.8 pav. 25×12×1,5 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.9 pav., matyti, kad abu bandiniai (3.9 pav., a,b) plyšo panašiose skerspjūvio vietose. Vienas bandinys trūko visiškai, o kitas – deformavosi stipriai išsilenkdamas, tai rodo nelygų įtempių pasiskirstymą. Plyšimo pobūdis patvirtina mechaninės analizės išvadas – jutiklis neatsparus įtempio koncentracijai ir linkęs deformuotis nestabiliai.



3.9 pav. 25×12×1,5 mm jutiklio bandiniai po deformacijos:
a) jutiklis po pirmojo bandymo; b) jutiklis po antrojo bandymo

Apibendrinant galima teigti, jog 25×12×1,5 mm geometrijos jutiklio bandiniai nėra tinkami naudoti kaip patikimi deformacijų jutikliai. Nepakankamas elektrinis stabilumas, aukšta varža ir mechaninio

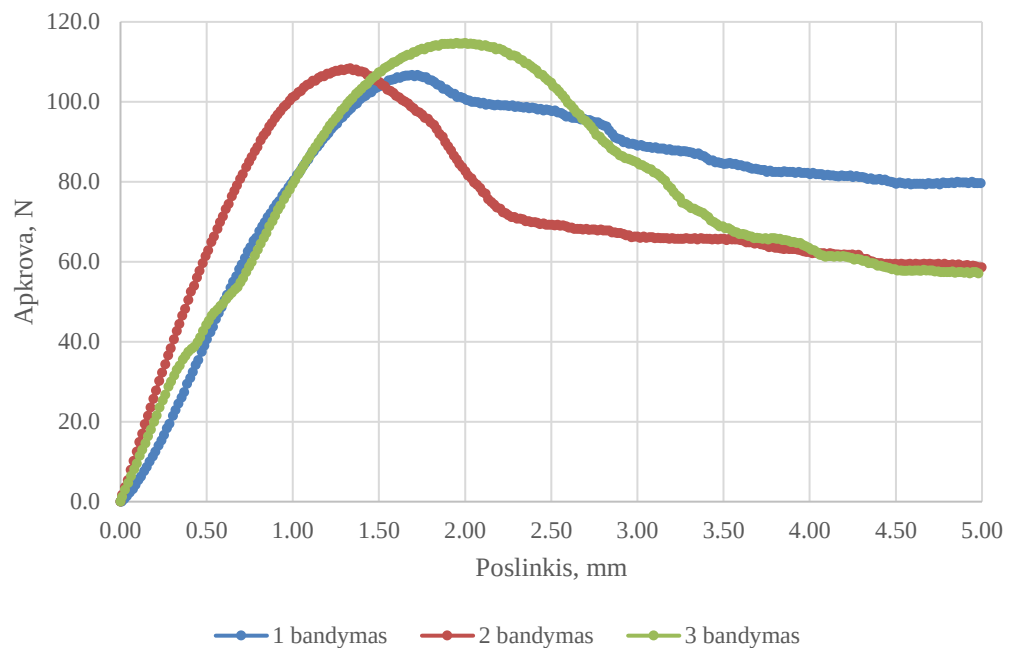
vientisumo trūkumas rodo, kad toliau reikia testuoti alternatyvias geometrines formas, siekiant pagerinti varžos pokyčių jautrumą bei stabilumą deformacijos metu.

3.3. Jutiklio bandinių testavimai keičiant storį

Remiantis 3.2 poskyryje gautais rezultatais buvo nuspręsta atlikti tolesnius bandymus bei ieškoti koreliacijų keičiant jutiklio storį. Buvo atlikti trys tempimo bandymai su $23 \times 6 \times 1$ mm matmenų jutikliu. Ši geometrija tyrime naudota kaip sumažinto storio versija, siekiant įvertinti storio įtaką tiek mechaniniam atsakui, tiek elektrinėms savybėms.

3.10 pav. apkrovos nuo poslinkio grafikas rodo, jog:

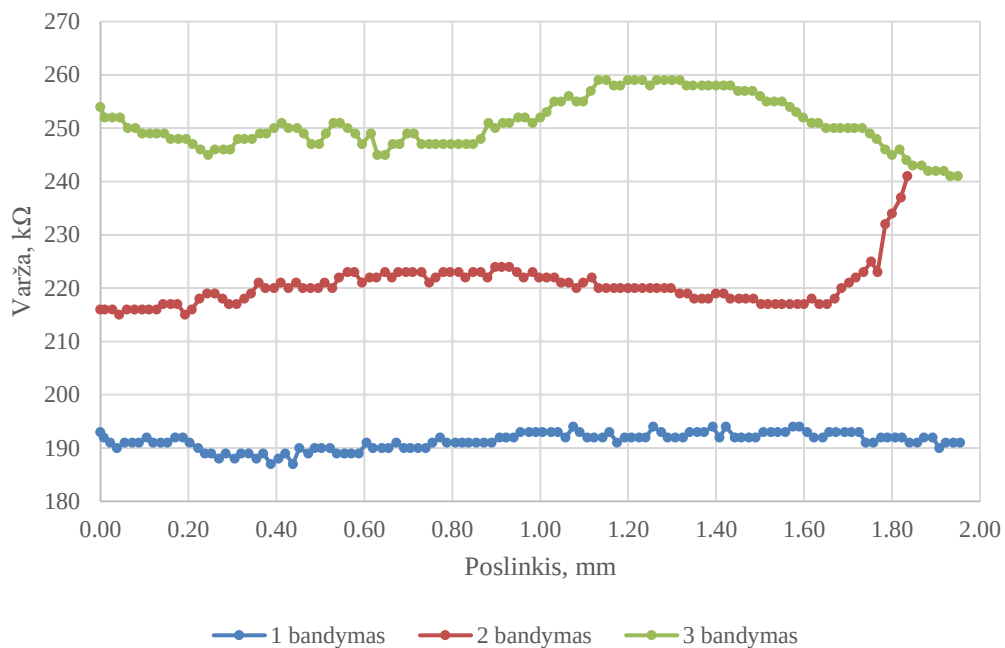
- 1 bandymo metu maksimali apkrova siekė 106,7 N ties 1,69 mm poslinkiu;
- 2 bandymo metu maksimali apkrova siekė 108,3 N ties 1,34 mm poslinkiu;
- 3 bandymo metu maksimali apkrova siekė 114,7 N ties 1,95 mm poslinkiu.



3.10 pav. $23 \times 6 \times 1$ mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.11 pav. vaizduojamame varžos pokyčio nuo poslinkio grafike galima išvelgti šias tendencijas:

- 1 bandymo metu varža išliko gana stabili bei nepaisant svyravimų nuo pradinio matavimo - 193 k Ω iki matavimo prie aukščiausio taško išliko tokia pati - 193 k Ω ;
- 2 bandymo metu varža kito nuo 216 k Ω iki 223 k Ω aukščiausiam poslinkio taške;
- 3 bandymo metu varža svyravo nuo 254 k Ω iki 241 k Ω aukščiausiam poslinkio taške.



3.11 pav. 23×6×1 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.12 pav. matoma, kad visi bandiniai plyšo skirtingose vietose, pirmasis bandinys (3.12 pav., a) – skerspjūvio viršuje ties konstrukcijos pastiprinimu su kita dalimi, antrasis (3.12 pav., b) ties skerspjūvio centru, trečiasis (3.12 pav., c) – tarp skerspjūvio centro ir viršaus.



3.12 pav. 23×6×1 mm jutiklių bandiniai po deformacijos:

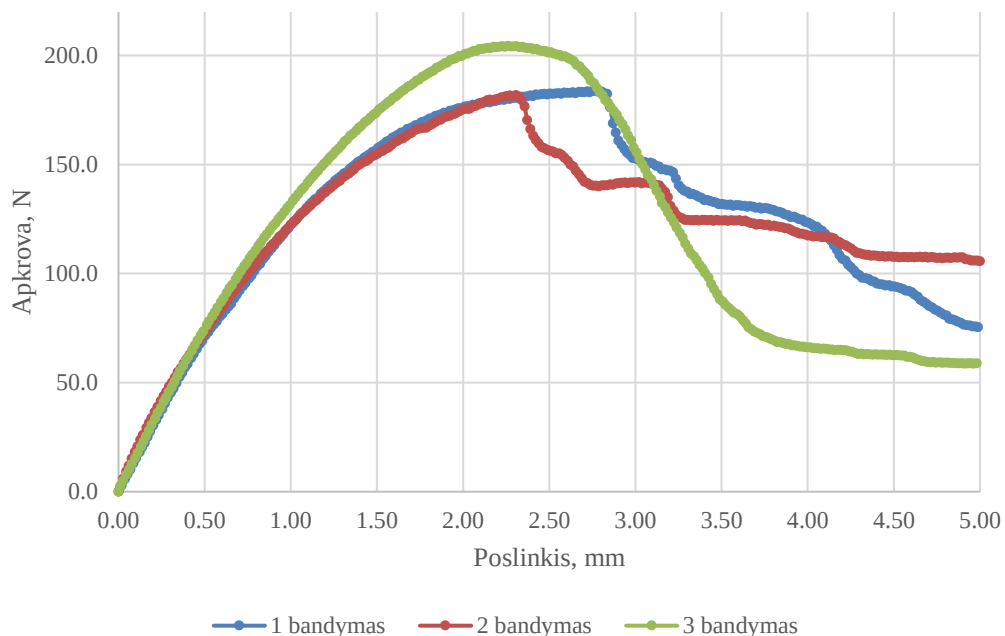
a) jutiklis po pirmo bandymo; b) jutiklis po antro bandymo; c) jutiklis po trečio bandymo.

Atsižvelgiant į šių bandinių rezultatus galima teigti, jog jie nėra tinkami naudojami dėl nestabilių varžos pokyčių bei nevienodos mechaninės deformacijos poveikio bandiniams.

Toliau buvo atlikti trys tempimo bandymai su $23 \times 6 \times 2$ mm matmenų jutikliu. Ši geometrija tyrime naudota kaip padidinto storio versija, siekiant įvertinti storio įtaką tiek mechaniniam atsakui, tiek elektrinėms savybėms.

3.13 pav. apkrovos nuo poslinkio grafikas rodo, jog:

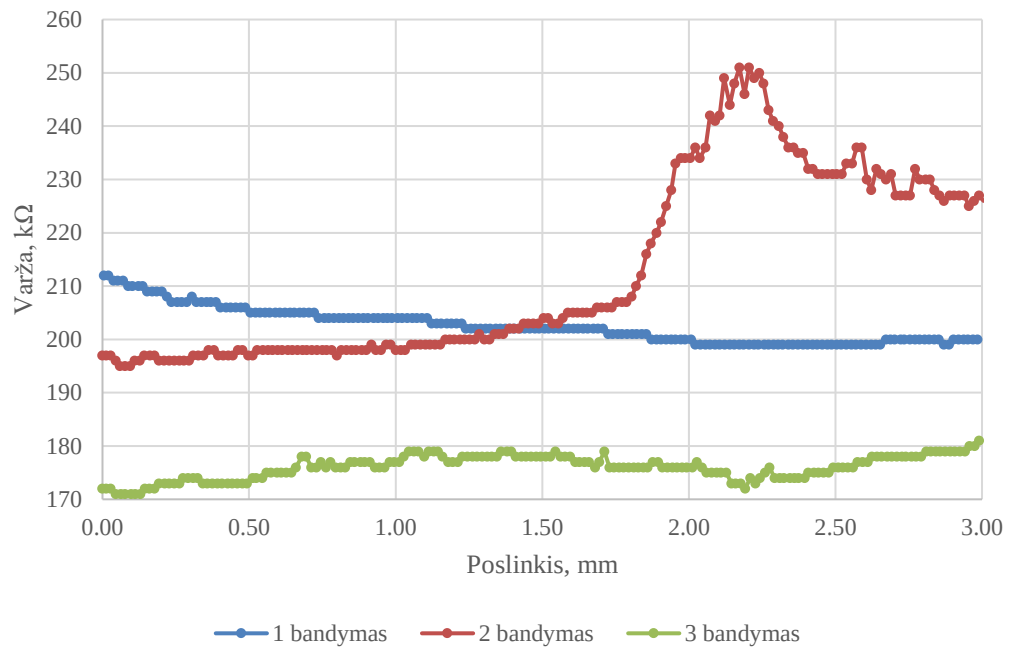
- 1 bandymo metu maksimali apkrova siekė 183,8 N ties 2,76 mm poslinkiu;
- 2 bandymo metu maksimali apkrova siekė 181,8 N ties 2,31 mm poslinkiu;
- 3 bandymo metu maksimali apkrova siekė 204,4 N ties 2,26 mm poslinkiu.



3.13 pav. $23 \times 6 \times 2$ mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.14 pav. vaizduojamame varžos pokyčio nuo poslinkio grafike vyrauja šios tendencijos:

- 1 bandymo metu varža mažėjo tolygiai, nuo pradinio matavimo – 213 k Ω iki matavimo prie aukščiausio taško išliko tokia pati – 200 k Ω ;
- 2 bandymo metu varža nepaisant keleto nežymių šuoliu tolygiai kilo į viršų, nuo 197 k Ω iki 240 k Ω aukščiausiam poslinkio taške;
- 3 bandymo metu varža bangavo nuo 172 k Ω iki 175 k Ω aukščiausiam poslinkio taške.



3.14 pav. 23×6×2 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.15 pav. matoma, kad pirmi du bandiniai (3.15 pav., a, b) plyšo panašiose vietose – skerspjuvio viršuje ties sutvirtinimu su viršutine dalimi, o trečiasis (3.15 pav., c) – skerspjuvio viršuje plyšo įstrižai.



3.15 pav. 23×6×2 mm jutiklių bandiniai po deformacijos:
a) jutiklis po pirmojo bandymo; b) jutiklis po antrojo bandymo; c) jutiklis po trečiojo bandymo

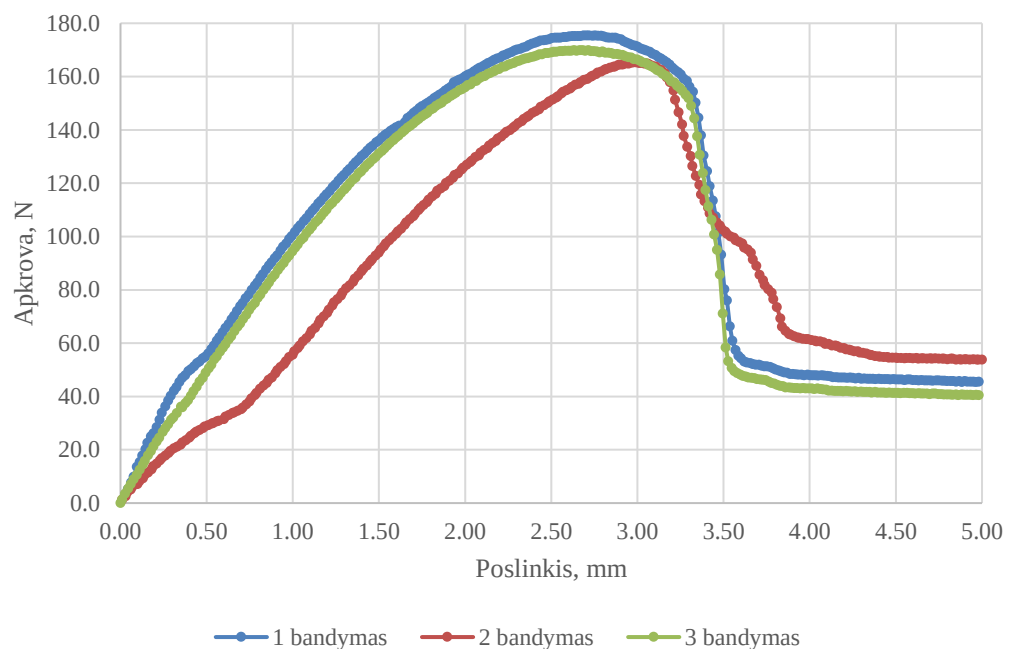
Apibendrinant galima daryti išvadą, kad 23×6×2 mm matmenų jutiklio bandiniai nepasitvirtino kaip tinkami deformacijos matavimo sprendimai. Bandinių elektrinis atsakas pasižymėjo nepakankamu stabilumu, didele varža bei nevienodu mechaniniu pokyčiu. Šie trūkumai rodo būtinybę toliau tirti

kitokias geometrines konfigūracijas, kurios galėtų užtikrinti didesnę jautrumą varžos pokyčiams bei patikimesnį veikimą esant deformacijai.

Atlikus bandymus su pastorintos ir paplonintos geometrijos jutiklių bandiniais, buvo grįžta prie pradinių matmenų – $23 \times 6 \times 1,5$ mm mm bei atlikta keletas pakartotinių bandymų rezultatus lyginant su pirminiais rezultatais, aprašytais 3.1 poskyryje.

3.16 pav. apkrovos nuo poslinkio grafikas rodo, jog:

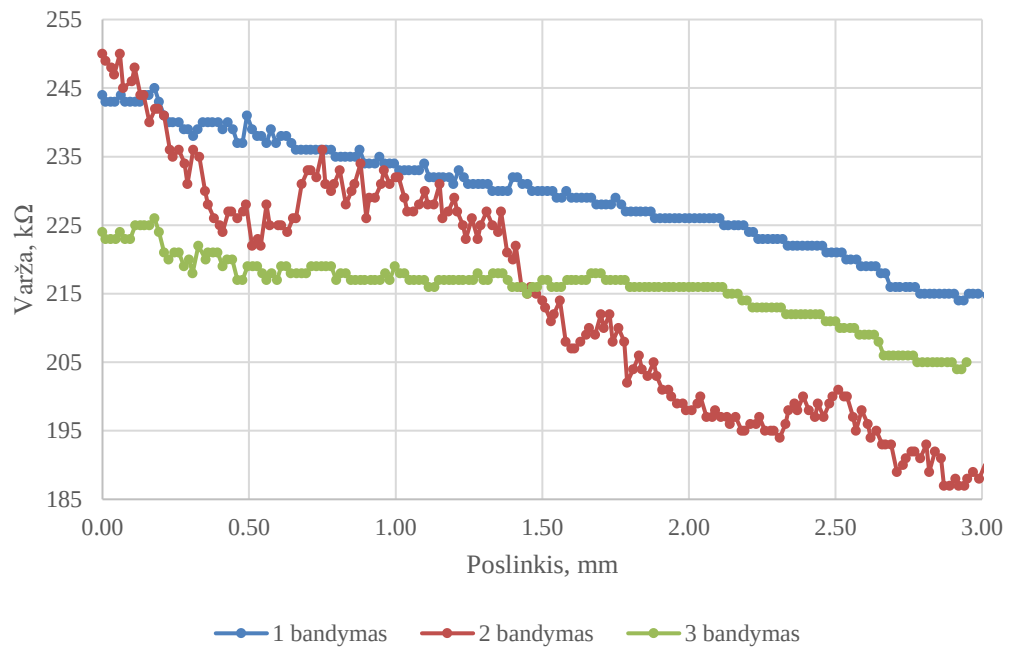
- 1 bandymo metu maksimali apkrova siekė 175,4 N ties 2,69 mm poslinkiu;
- 2 bandymo metu maksimali apkrova siekė 165,3 N ties 2,99 mm poslinkiu;
- 3 bandymo metu maksimali apkrova siekė 169,8 N ties 2,63 mm poslinkiu.



3.16 pav. $23 \times 6 \times 1,5$ mm jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.17 pav. vaizduojamame varžos pokyčio nuo poslinkio grafike vyrauja šios tendencijos:

- 1 bandymo metu varža mažėjo tolygiai be didesnių svyravimų, nuo pradinio matavimo - 244 k Ω iki matavimo prie aukščiausio taško – 216 k Ω ;
- 2 bandymo metu varža mažėjo tolygiai su keletą svyravimų, nuo 250 k Ω iki 188 k Ω aukščiausiam poslinkio taške;
- 3 bandymo metu varža mažėjo tolygiai su nežymiais svyravimais nuo 224 k Ω iki 209 k Ω aukščiausiam poslinkio taške.



3.17 pav. 23×6×1,5 mm jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.18 pav. matoma, kad visi trys bandiniai (3.12 pav., a,b, c) plyšo įstrižai beveik toje pačioje vietoje - skerspjūvio ploto viršuje. Tai rodo, jog viršutinėje jungties srityje kaupėsi didžiausios įtampos, kurios paskatino įstrižą lūžį taip pat matomą ir anksčiau nagrinėtos geometrijos jutiklių bandiniuose.



3.18 pav. 23×6×1,5 mm jutiklių bandiniai po deformacijos:

a) jutiklis po pirmojo bandymo; b) jutiklis po antrojo bandymo; c) jutiklis po trečiojo bandymo

Atsižvelgiant į elektrinius rezultatus, galima teigti, kad 23×6×1,5 mm geometrijos jutiklių bandiniai yra tinkamiausi iš tirtų bandinių tiksliai ir stabiliai jutiklių veikimui užtikrinti. Siekiant dar

labiau optimizuoti jutiklio charakteristikas, toliau eksperimentuojama su kombinuoto tipo jutiklio bandiniais sudarytasi iš įprasto PLA bei elektrai laidaus PLA plastikų kombinacijos.

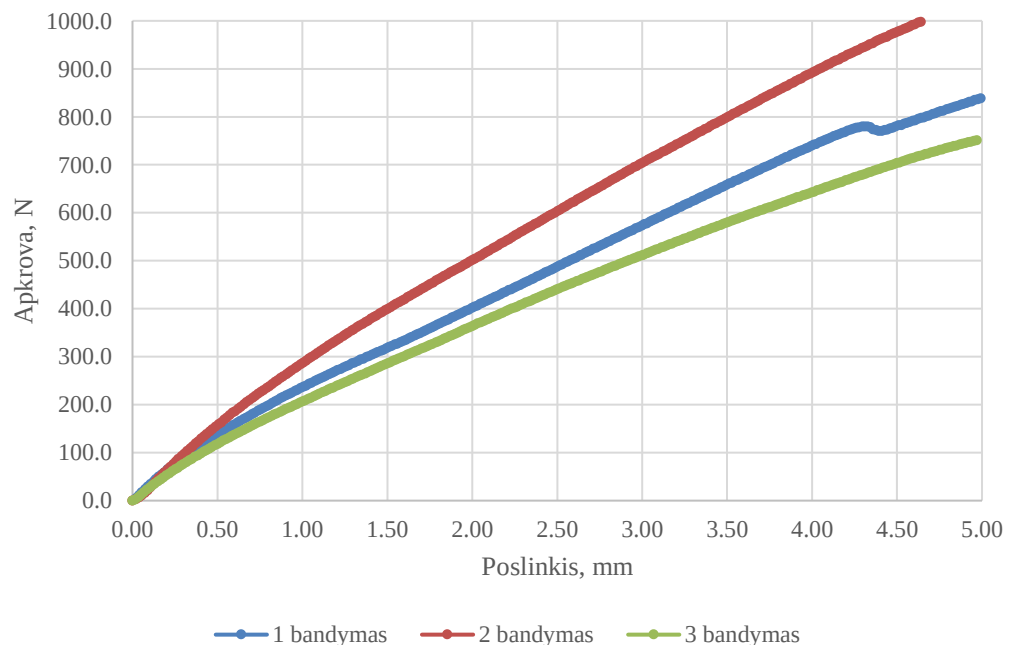
3.4. Jutiklio bandinių testavimai kombinuojant skirtingas medžiagas

Atlikus kombinuoto jutiklio bandinio gamybą ir eksperimentinį tyrimą mechaninio tempimo stende, aprašytą 2.4.2 skyrelyje, buvo užfiksuoti tiek mechaniniai, tiek elektriniai duomenys, leidžiantys įvertinti jutiklio atsaką deformacijos metu. Kaip ir anksčiau atliktuose ir aprašytuose bandymuose, fiksuoti varžos pokyčiai tiesiogiai priklausė nuo jutiklio deformacijos, o tai leidžia vertinti jautrumą ir elektrinės reakcijos stabilumą.

Iš 3.19 pav. vaizduojamo kombinuoto jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafiko matoma:

- 1 bandymo metu maksimali apkrova siekė 838,1 N ties 4,99 mm poslinkiu;
- 2 bandymo metu maksimali apkrova siekė 998,1 N ties 4,64 mm poslinkiu;
- 3 bandymo metu maksimali apkrova siekė 751,3 N ties 4,97 mm poslinkiu.

Tolesni apkrovos pokyčiai po bandinio lūžio grafike nėra matomi, kadangi lūžio momentu tempimo staklės automatiškai sustabdė duomenų fiksavimą. Dėl šios priežasties bandinio elgsena po trūkimo nebuvo užregistruota.

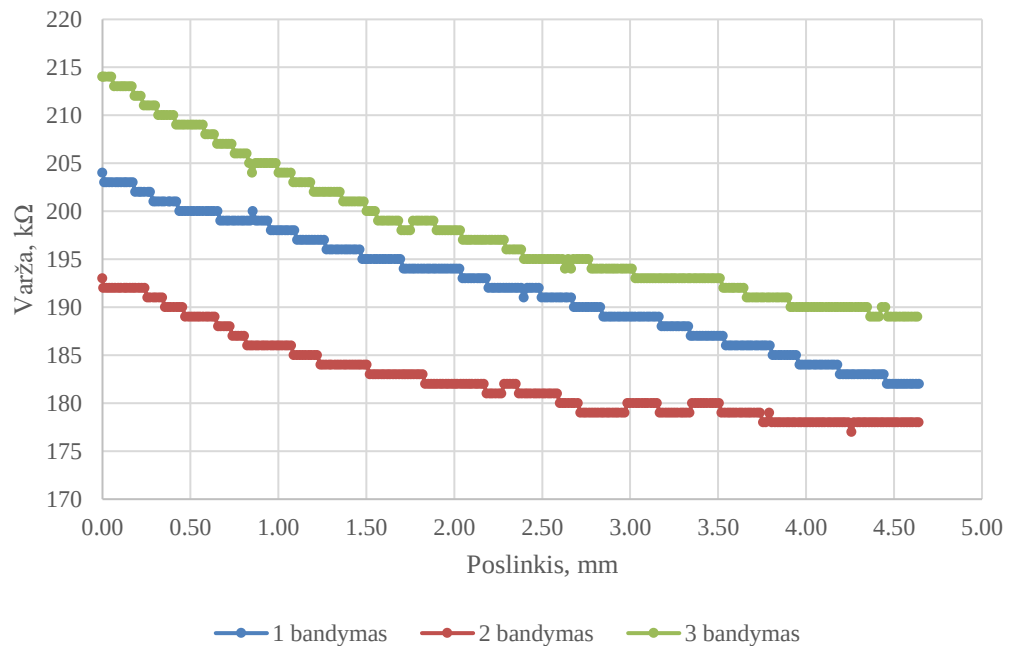


3.19 pav. Kombinuoto jutiklio bandinių apkrovos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.20 pav., vaizduojamame varžos pokyčio nuo poslinkio grafike vyrauja šios tendencijos:

- 1 bandymo metu varža mažėjo tolygiai be didesnių svyravimų, nuo pradinio matavimo - 204 k Ω iki matavimo prie aukščiausio taško – 180 k Ω ;
- 2 bandymo metu varža taip pat mažėjo tolygiai be didesnių svyravimų, nuo 193 k Ω iki 178 k Ω aukščiausiam poslinkio taške;
- 3 bandymo metu varža mažėjo tolygiai be didesnių bangavimų nuo 214 k Ω iki 188 k Ω aukščiausiam poslinkio taške.

Iš pateikto grafiko matyti pastovi ir tolygi varžos priklausomybė nuo poslinkio, o tai leidžia teigiamai vertinti elektrai laidaus PLA ir įprasto PLA kombinacijos potencialą. Tokia elgsena rodo šio tipo jutiklio tinkamumą tolimesniems tyrimams ir galimą pritaikymą pramonėje.



3.20 pav. Kombinuoto jutiklio bandinių varžos pokyčio nuo poslinkio grafikas

3.21 pav., matoma, kad pirmojo (3.21 pav., a) ir trečiojo (3.21 pav., c) bandymo metu bandiniai plyšo beveik toje pačioje vietoje – bazinės dalies skerspjūvio ploto viršuje. Antrojo bandymo metu (3.21 pav., b) bandinys neplyšo, nes buvo pasiekta beveik maksimali apkrova, todėl įsijungus mašinos apsaugos mechanizmui bandymas buvo sustabdytas ties – 998.1 N apkrova.



3.21 pav. Kombinuotų jutiklių bandiniai po deformacijos:

a) jutiklis po pirmojo bandymo; b) jutiklis po antrojo bandymo; c) jutiklis po trečiojo bandymo

Apibendrinant visus atliktus eksperimentinius tyrimus su skirtingos geometrijos bandiniais, galima teigti, jog vien skerspjuvio ploto keitimas nepagerino varžos ir poslinkio tarpusavio koreliacijos – aiškesnių dėsningumų tarp šių parametrų nebuvo nustatyta. Bandinių storio mažinimas lėmė kiek stabilesnius ir mažiau svyruojančius rezultatus, tačiau jų tikslumas bei patikimumas išliko nepakankami. Tolesni pakartotiniai bandymai su $23 \times 6 \times 1,5$ mm matmenų bandiniais atskleidė palyginti nuoseklius ir stabilius varžos pokyčius, kuriems būdingi tik nedideli svyravimai. Taip pat visuose bandiniuose pastebima aiški dispersija tarp bandinių, tai gali rodyti mikrotrūkius, mažus įtrūkius ar nevienodą kontaktą jautrioje dalyje. Kiekvieno bandinio jautrioji dalis galėjo būti atspausdinta šiek tiek skirtingai: gali skirtis sluoksnių tarpai, sluoksnių sujungimo kokybė arba netgi mažos oro kišenės. Tai tiesiogiai veikia laidžios medžiagos varžą. Geriausi rezultatai buvo gauti tiriant kombinuoto tipo jutiklį, kurio jautrioji dalis pagaminta iš elektrai laidaus PLA, o bazė – iš įprasto PLA plastiko. Šis bandinys parodė aiškiausią ir tolygiausią varžos priklausomybę nuo poslinkio, todėl gali būti laikomas perspektyviausiu tolesniems tyrimams bei praktiniam taikymui.

IŠVADOS

1. Atlikus analoginių tempimo jutiklių analizę nustatyta, kad rinkoje egzistuoja įvairių sprendimų, pritaikytų skirtingoms reikmėms, tačiau dauguma jų gaminami iš metalo vielos arba folijos. 3D spausdinimo technologija sukurti tempimo jutikliai, pagaminti iš plastiko, šiuo metu komerciškai neprieinami. Literatūros analizė parodė, kad nėra atlikti bandymai, kuriuose jutiklis būtų tempiamas vertikaliąja ašimi. Taip pat buvo apžvelgtas ir išnagrinėtas įtempio jutiklio patentas, teikiantis papildomos informacijos apie tokio tipo jutiklių veikimo principus.
2. Remiantis analogiškų jutiklių analize ir atliktais ankstesniais tyrimais, buvo parengta darbo metodologija ir sudarytas eksperimentinės eigos planas. Įvertinus techninius poreikius, jutiklio gamybai pasirinktas „Crealty K1“ 3D spausdintuvas, o mechaniniam testavimui – „Mecmesin MultiTest 2.5-i“ įtempio testavimo sistema. Taip pat atlikta reikalingos įrangos analizė, užtikrinanti tyrimų tikslumą bei pakartojamumą.
3. Tyrimai pradėti sukūrus jutiklio modelį „SolidWorks“ programinėje aplinkoje. Sukurtas modelis buvo atspausdintas iš elektrai laidaus PLA plastiko, o prie jo prijungus multimetą nustatyta pradinė varža – apie 87 kΩ. Pirmojo bandymo metu jutiklis pradėjo plyšti esant 2 mm poslinkiui. Remiantis gautais rezultatais, buvo spausdinami ir testuojami skirtingų formų bei matmenų jutikliai, kol buvo nustatyta tinkamiausia geometrija – 23×6×1,5 mm. Vėlesni tyrimai atskleidė, kad varžos kitimui didesnę įtaką daro bandinio storis, o ne skerspjūvio plotas. Taip pat buvo tirtas jutiklis, atspausdintas su izoliaciniu pagrindu iš nelaidaus PLA plastiko. Iš viso atlikta ir analizuota 16 bandinių testavimo rezultatų. Eksperimentai parodė, kad jutiklis deformuojasi prie tam tikros apkrovos per tam tiką poslinkį, bei jo elektrinės savybės keičiasi per varžos pokytį, kas patvirtina jo potencialą būti naudojamu kaip tamprumo jutikliu.
4. Eksperimento rezultatai parodė, jog tiek 23×6×1,5 mm skerspjūvio ploto, tiek didesnių gabaritų kombinuoti jutikliai demonstruoja jautrumą tempimui – varža mažėja didėjant poslinkiui. Tačiau mažesnio skerspjūvio jutikliai yra labiau linkę į netolygų varžos pokytį, o tai rodo, kad jų jautrioji dalis yra labiau paveikiama mikrostruktūrinių defektų ir kontaktų nestabilumo. Prie jutiklių bandinių pastebimas išsibarstymas rodo, jog 3D spausdinimo procesas ir kontaktų tvirtinimas turi įtakos rezultatų atkuriamumui. Siekiant sumažinti šią dispersiją, būtina optimizuoti spausdinimo parametrus, laidžios medžiagos paskirstymą bei užtikrinti stabilų kontaktų pritvirtinimą prie jautriosios dalies.
5. Tolimesniems tyrimams siūloma optimizuoti 3D spausdinimo procesą, bei įrangą ypatingą dėmesį skiriant spausdinimo parametrams, tokiems kaip sluoksnio aukštis, užpildo tankis ir

spausdinimo greitis, bei laidžiųjų dalelių pasiskirstymui jautriojoje dalyje. Taip pat rekomenduojama tobulinti kontaktų tvirtinimo sprendimus, siekiant sumažinti kontaktinės varžos įtaką matavimams – pavyzdžiui, integruojant kontaktinius paviršius tiesiogiai spausdinimo metu arba užtikrinant tvirtesnį kontaktų prispaudimą. Ateities tyrimuose naudinga atlikti ilgesnius ciklinius tempimo bandymus, įvertinant jutiklių ilgalaikį patikimumą, galimus nuovargio reiškinius bei histerezės efektus. Rekomenduojama ištirti aplinkos veiksnių, tokių kaip temperatūra ir drėgmė, poveikį jutiklio elgsenai, siekiant įvertinti jo tinkamumą darbui įvairiomis sąlygomis. Visi šie tobulinimai padėtų pagerinti jutiklių kokybę, jų stabilumą ir pritaikomumą praktiniuose sprendimuose.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Akcan, Ö. G., Değirmenci, E., Kılıç, V., & Yıldız, M. (2025). Development of a disposable silicone–graphite composite strain sensor for soft robotics applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 391, 116527. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116527>
- Chadda, R., Dali, O. B., Latsch, B., Sundaralingam, E., & Kupnik, M. (2023). 3D-Printed Strain Gauges Based on Conductive Filament for Experimental Stress Analysis. *2023 IEEE SENSORS*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSORS56945.2023.10325276>
- Checkline. (n.d.). *RFS100. Compact On-Line Tension Sensor*. <https://www.checkline.com/product/RFS100>
- Chittibabu, S. K., & Chintagumpala, K. (2023). Evolution of 2D materials conducive to the wearable physical sensors for structural health assessment. *Microelectronic Engineering*, 276, 112013. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2023.112013>
- DwyerOmega. (n.d.). *Strain gauges. Introduction to Strain Gauges*. <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/strain-gages>
- Evans, D., & Neal, B. (2010). *Strain measurement devices and methods* (U.S. Patent Application No. 20100000327 A1). United States Patent and Trademark Office. <https://www.freepatentsonline.com/y2010/0000327.html>
- Fil Control. (n.d.). *Tension sensor*. <https://filcontrol.com/tension-sensor/>
- Flintec. (n.d.). *Load cell explained: What it is and how the sensor works*. <https://www.flintec.com/learn/weight-sensor/load-cell>
- FUTEK Advanced Sensor Technology. (n.d.). *Load cells*. <https://www.futek.com/store/load-cells>
- Ghaderiaram, A., Wang, J., & Hu, Y. (2025). Piezoelectric sensor characterization for structural strain measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 391, 116659. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116659>
- Hans Schmidt & Co. GmbH. (n.d.). *Tension sensor MZ1, stationary electronic device*. <https://www.hans-schmidt.com/en/produkt-details/tension-sensor-mz1/>

- Honeywell. (n.d.). *Model 31 miniature stainless steel load cells*. <https://automation.honeywell.com/us/en/products/sensing-solutions/test-and-measurement/load-cells/model-31-series>
- Yue, M., Wang, Y., Guo, H., Zhang, C., & Liu, T. (2022). 3D reactive printing of polyaniline hybrid hydrogel microlattices with large stretchability and high fatigue resistance for wearable pressure sensors. *Composites Science and Technology*, 220, 109263. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109263>
- Ji, Q., Fu, S., Feng, L., Andrikopoulos, G., Wang, X. V., & Wang, L. (2022). Development of a 3D Printed Multi-Axial Force Sensor. A. H. C. Ng, A. Syberfeldt, D. Högberg, & M. Holm (Sud.), *Advances in Transdisciplinary Engineering*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE220178>
- Montalbano, J., & Aitken, J. (2017). *Strain gauge sensors and related methods* (U.S. Patent No. 9,797,819). United States Patent and Trademark Office. <https://www.freepatentsonline.com/9797819.html>
- Nachazel, T. (2020, rugpjūčio 13d.). *What is a strain gauge and how does it work?* Michigan Scientific Corporation. <https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/>
- National Instruments. (n.d.). *Measuring strain with strain gages*. <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-strain-with-strain-gages.html>
- Omega Engineering. (n.d.). *Load cells: Everything you need to know*. <https://www.omega.com/en-us/resources/load-cells>
- Omega Engineering. (n.d.). *In-line load cell*. <https://www.omega.co.uk/pptst/LCM703.html>
- Pakhare, A. S., Kalia, K., Nadimpalli, S. P. V., & Ameli, A. (2024). Interface fracture characterization of 3D-printed rigid/flexible dissimilar polymers. *Progress in Additive Manufacturing*, 9(6), 2235–2247. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00575-3>
- Song, W., Chen, Y., Mu, Z., Wang, Y., Zhang, Z., Wang, Z., Liu, L., Zhang, B., Li, Y., Li, B., Zhang, D., Zhang, J., Niu, S., Han, Z., & Ren, L. (2022). A feather-inspired interleaf for enhanced interlaminar fracture toughness of carbon fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 236, 109827. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109827>
- Šutinyas, E. (2017). *Baigiamųjų darbų nurodymai*. Technika.

- Tahir, B. A., Sakikoto, J. A., Fadhali, M., & Ahmed, R. A. (2007). *A study of FBG sensor and electrical strain gauge for strain measurements*. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 15(3), p. 333–340.
https://www.researchgate.net/publication/232436164_A_study_of_FBG_sensor_and_electrical_strain_gauge_for_strain_measurements
- Vekteris, V., Jurevičius, M., & Kilikevičius, A. (2009). *Matavimų teorija ir praktika*. Technika.
- Wikipedia. (2024, kovo 25d.). *Load cell*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Load_cell&oldid=1215456494