



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Mantas Andriulis

**SAVISRIEGIŲ UŽVERŽIMO MOMENTO IR ATSPARUMO IŠTRAUKIMUI
TYRIMAS**

**RESEARCH OF FASTENING TORQUE AND WITHDRAWAL
RESISTANCE OF SELF-TAPPING SCREWS**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX047

Mechaninių sistemų projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Mantas Andriulis

SAVISRIEGIŲ UŽVERŽIMO MOMENTO IR ATSPARUMO IŠTRAUKIMUI
TYRIMAS
RESEARCH OF FASTENING TORQUE AND WITHDRAWAL
RESISTANCE OF SELF-TAPPING SCREWS

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX047

Mechaninių sistemų projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Vadim Mokšin
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Studijų kryptis: Mechanikos inžinerija

TVIRTINU

Studijų programa: Mechanikos inžinerija, valstybinis kodas 6211EX047

Katedros vedėjas

Specializacija: Mechaninių sistemų projektavimas ir gamyba

Ina Tetsmann

2024-05-18

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. MSGfm-22–5101

Vilnius

Studentas (-ė): Mantas Andriulis

Baigiamojo darbo tema: Savisriegių užveržimo momento ir atsparumo ištraukimui tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Uždaviniai tikslui pasiekti: Įvadas, Mokslinės literatūros analizė, Skaitmeninių ir eksperimentinių tyrimų objektas ir metodika, Skaitmeninių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai bei jų palyginimas, Išvados ir rekomendacijos, Literatūros sąrašas

Vadovas profesorius Vadim Mokšin

<table><tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr><tr><td>Mechanikos fakultetas</td></tr><tr><td>Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra</td></tr></table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Mechanikos fakultetas	Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra	<table><tr><td>ISBN</td><td>ISSN</td></tr><tr><td>Egz. sk.</td><td></td></tr><tr><td>Data-.....-.....</td><td></td></tr></table>	ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas											
Mechanikos fakultetas											
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra											
ISBN	ISSN										
Egz. sk.											
Data-.....-.....											
Antrosios pakopos studijų Mechanikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas 4											
Pavadinimas	Savisriegių užveržimo momento ir atsparumo ištraukimui tyrimas										
Autorius	Mantas Andriulis										
Vadovas	Vadim Mokšin										
	Kalba: lietuvių										
Anotacija											
Baigiamajame magistro darbe atliekamas savisriegiam sraigtui įsukti reikalingų skirtingų skylių profilių palyginimas. Mokslinės literatūros apžvalgos skyriuje aptariami analogiški tyrimai ir praktika. Metodologijos dalyje aprašomas bandinių paruošimas, naudojama eksperimentinė įranga ir metodai, išvestinių dydžių ir baigtinių elementų metodo analizės modelis. Palyginimas atliekamas tarp apvalaus ir kvadratinio profilio skylių. Tyrimui atlikti naudojami ISO 7049 savisriegiai sraigčiai ir 3D spausdintos detalės. Palyginimui naudojamas savisriegio sraigto įsukimo momentas, užveržimo momentas, rekomenduojamas užveržimo momentas, tarpinio kūno priveržimo jėga ir atsparumo ištraukimui jėga. Naudojantis baigtinių elementų metodo analize, randama atsparumo ištraukimui jėga ir kūną veikiantys įtempiai. Grafinėje medžiagoje pateikiami skaitmeninio tyrimo rezultatai, nurodantys, kokie įtempiai veikia kūną savisriegio sraigto traukimo metu. Išvadose aptariami gauti eksperimentinių bandymų, išvestinių dydžių ir baigtinių elementų metodo analizės rezultatai, pateikiant procentinius skirtumus tarp analizuojamų skylių profilių mechaninių parametrų. Rekomendacijose aprašomi skylės profilio pasirinkimo ir baigtinių elementų metodikos taikymo praktikoje nurodymai. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, analogiškų tyrimų apžvalga, eksperimentinis tyrimas, teoriniai tyrimai ir skaitmeninis modeliavimas, rezultatai ir jų aptarimas, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 80 p. teksto su priedais, 73 iliustracijos, 9 lentelės, 30 bibliografinių šaltinių.											
Prasminiai žodžiai: savisriegis sraigtas, skylės profilis, jungtis, adityvioji gamyba, lydytojo nusodinimo modeliavimas, užveržimo momentas, atsparumas ištraukimui											

<table border="1"> <tr> <td>Vilnius Gediminas Technical University</td> </tr> <tr> <td>Faculty of Mechanics</td> </tr> <tr> <td>Department of Mechanical and Material Engineering</td> </tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Mechanics	Department of Mechanical and Material Engineering	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....	
Vilnius Gediminas Technical University												
Faculty of Mechanics												
Department of Mechanical and Material Engineering												
ISBN	ISSN											
Copies No.												
Date-.....-.....												
Master Degree Studies Mechanical Engineering study programme Master Graduation Thesis 4												
Title	Research of Fastening Torque and Withdrawal Resistance of Self-tapping Screws											
Author	Mantas Andriulis											
Academic supervisor	Vadim Mokšin											
		Thesis language: Lithuanian										
Annotation In the master's thesis, a comparison is made of different hole profiles required for screwing in a self-tapping screw. A literature review discusses analogous research and practices. Methodology part describes preparation of samples, experimental equipment and methods used, derived mathematical equations and analysis model of finite element method. A comparison is made between round and square profile holes. ISO 7049 self-tapping screws and 3D printed parts are used for the study. Self-tapping screw torque, tightening torque, recommended tightening torque, intermediate body tightening force and pull-out resistance force are used for comparison. Using finite element analysis, the pull-out resistance force and stresses acting on the body are found. Graphic material represents the results of a digital study, indicating what stresses affect the body during the pulling of the self-tapping screw. Conclusions discuss the obtained results from experimental studies, de-rived mathematical equations, and analysis of the finite element method, presenting the percentage differences between mechanical parameters of analyzed hole profiles. Recommendations describe instructions for selection of hole profile and the application of the finite element methodology in practice. The work consists of 7 parts: introduction, overview of analogous studies, experimental study, theoretical studies and digital modeling, results and their discussion, conclusions and recommendations, list of references. Volume of work - 80 p. text with appendices, 73 illustrations, 9 tables, 30 bibliographic sources.												
Keywords: Self-tapping screw, hole profile, joining, additive manufacturing, fused deposition modelling, fastening torque, withdrawal resistance												

TURINYS

ĮVADAS	13
1. ANALOGIŠKŲ TYRIMŲ APŽVALGA.....	15
1.1. Srieginių jungčių mechaninių savybių tyrimai.....	15
1.2. 3D spausdintų medžiagų mechaninių savybių tyrimai.....	34
1.3. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	39
2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	41
2.1. Ruošinių bandymui parengimas	41
2.2. Savisriegių sraigčių įsukimo bandymas ir įranga.....	44
2.3. Ruošiniuose susiformavusio sriegio analizė ir įranga	47
2.4. Savisriegių sraigčių ištraukimo iš ruošinio bandymas ir įranga.....	48
2.5. Ruošinių kiekio nustatymas bandymams atlikti	50
3. TEORINIAI TYRIMAI IR SKAITMENINIS MODELIAVIMAS	51
3.1. Teorinio tyrimo metodika.....	51
3.1.1. Rekomenduojamo savisriegio sraigto priveržimo momento skaičiavimas	51
3.1.2. Priveržiamo kūno prispaudimo jėgos skaičiavimas.....	51
3.2. Baigtinių elementų tyrimo metodika	53
3.2.1. Tiriamųjų kūnų mechaninės savybės.....	53
3.2.2. Tiriamųjų kūnų geometrija	54
3.2.3. Pradinės ir kraštinės skaičiuojamųjų kūnų sąlygos	55
4. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....	57
4.1. Savisriegio sraigto įsukimo į bandinį eksperimento rezultatai.....	57
4.2. Savisriegio sraigto ištraukimo iš bandinio eksperimento rezultatai	59
4.3. Skirtingo skylių profilio eksperimentinių duomenų palyginimas	62
4.4. Ruošinyje suformuoto sriegio analizės rezultatai.....	65
4.5. Baigtinių elementų analizės rezultatai	66
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS.....	70
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	72

A	PRIEDAS. Bandinių spausdinimui naudotų plastikų techninės savybės	75
B	PRIEDAS. Savisriegio sraigto įsukimo bandymų gautieji duomenys	76
C	PRIEDAS. Savisriegio sraigto ištraukimo bandymų gautieji duomenys	78
D	PRIEDAS. Polietileno tereftalato glikolio plastiko (PETG) bandiniuose savisriegio sraigto suformuoti sriegio skerspjūviai	80

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Tyrimė naudotų savisriegių sraigčių tipai (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997)	15
1.2 pav. Sukimo momentas ir apkrovos jėga savisriegio sraigto prasukimo teste lyginant su skylės skersmeniu (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997)	16
1.3 pav. Statinė ištraukimo jėga lyginant su savisriegio sraigto sąveikos ilgiu (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997).....	17
1.4 pav. Eksperimentinio tyrimo rezultatų palyginimas su teorinio modelio kreive (Seneviratne et al., 2001).....	18
1.5 pav. Eksperimentinio tyrimo stendas (Seneviratne et al., 2000).....	19
1.6 pav. Gauti duomenys lyginami su matematiniu modeliu (Seneviratne et al., 2000)	20
1.7 pav. Eksperimentiniai tyrimai su skirtingo skersmens skylėmis (Lara et al., 2012).....	20
1.8 pav. Testavimo stendas: a) bendras matavimo stendo vaizdas, b) eksperimentui naudojami prietaisai ir dalys (Cumbicus et al., 2021).....	21
1.9 pav. Eksperimentiškai gauti rezultatai (Cumbicus et al., 2021).....	22
1.10 pav. Temperatūra susidariusi plastike sukant savisriegį sraigtą (Cumbicus et al., 2021).....	23
1.11 pav. Mažųjų sraigtelių sriegio dizaino iliustracija: (A) atraminis atvirkštinio sriegio profilis, (B) atraminis sriegis, (C) 75° laipsnių profilis, (D) suapvalintas sriegis, (E) trapecinis sriegis (Gracco et al., 2012).....	24
1.12 pav. Eksperimentinio tyrimo schema (Nam et al., 2022).....	25
1.13 pav. (a) analizės 3D modelis, (b) analizės kraštinės sąlygos (Nam et al., 2022)	26
1.14 pav. Pjūvis parodantis keturis savisriegio užveržimo etapus (Nam et al., 2022).....	26
1.15 pav. Skylės skersmuo prieš ir po sriegio suformavimo (Mathurin et al., 2009)	27
1.16 pav. Radialinių deformacijų palyginimas tarp eksperimentinio tyrimo ir baigtinių elementų analizės (Mathurin et al., 2009).....	28
1.17 pav. Skylės skersmens įtaka sraigto užveržimo momentui ir galutiniai sriegio profiliai (Mathurin et al., 2009).....	28
1.18 pav. Baigtinių elementų modelis su pradinėmis sąlygomis (Dinger, 2015)	30
1.19 pav. Eksperimento schema ir ruošinys testavimo stende (Duong et al., 2018).....	31
1.20 pav. Eksperimentinio tyrimo gauti rezultatai lyginami su baigtinių elementų analizės duomenimis (Duong et al., 2018)	31
1.21 pav. Analizėje pritaikytas savisriegio profilio supaprastinimas (Ellwood et al., 2004).....	32
1.22 pav. Temperatūros susidarančios esant skirtingiems įsukimo greičiams (Ellwood et al., 2004)	33
1.23 pav. Eksperimentiniai ir teoriniai duomenys (Ellwood et al., 2004)	34

1.24 pav. Bandinių spausdinimo sluoksnių iliustracija: (a) sluoksnių orientacija x-y plokštumoje (b) sluoksnių orientacija x-z plokštumoje (Kastner et al., 2023).....	35
1.25 pav. Pavyzdiniai bandymų serijos bandiniai su skirtingu bandinių užpildymo tankiu: viršutinis vaizdas (a–c) ir pjūvio vaizdas (d–f) (Kastner et al., 2023)	35
1.26 pav. Skirtingų spausdinimo parametrų palyginimas (Wang et al., 2020)	37
1.27 pav. Plastiko persidengimas spausdinant (Özen et al., 2021)	38
2.1 pav. <i>Prusa Original MK4</i> spausdintuvas su uždara dėže.....	41
2.2 pav. <i>Sunlu FilaDryer S2</i> plastiko džiovintuvas	42
2.3 pav. Spausdinamo ruošinio su kvadratine skylė iliustracija.....	43
2.4 pav. Tiriamųjų skylių profilių iliustracijos: a) Ø2,95 mm skersmens apvalaus profilio skylė, b) □2,65 mm dydžio kvadratinio profilio skylė	43
2.5 pav. Savisriegio sraigto įsukimo į bandinį eksperimento stendo iliustracija	45
2.6 pav. Savisriegio sraigto įsukimo bandymui skirto ruošinio iliustracija	45
2.7 pav. Skaitmeninis dinamometrinis <i>FIRSTINFO H5279U</i> atsuktuvus	46
2.8 pav. Savisriegio sraigto įsukimo į bandinį matavimų blokinė schema	46
2.9 pav. Skaitmeninis mikroskopas naudojamas bandinių analizei atlikti.....	47
2.10 pav. Ruošinių pjūvių iliustracijos.....	48
2.11 pav. Naudota įranga tempimo bandymams atlikti.....	48
2.12 pav. Ruošinio įtvirtinimo tempimo bandymams iliustracija	49
3.1 pav. PETG plastiko skerspjuvio porėtumas	54
3.2 pav. Savisriegio sraigto geometrijos redukavimo iliustracija	54
3.3 pav. Plastike suformuoto sriegio braižymas 3D aplinkoje (pradinis skersmuo – Ø2,80 mm)....	55
3.4 pav. Plastike suformuoto sriegio braižymas 3D aplinkoje (pradinis dydis – □2,55 mm).....	55
3.5 pav. Tiriamųjų kūnų baigtinių elementų tinklelis ir kraštinės sąlygos	56
4.1 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė	57
4.2 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė.....	58
4.3 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė.....	58
4.4 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė	59
4.5 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė	60

4.6 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė.....	60
4.7 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė.....	61
4.8 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė	61
4.9 pav. Ø2,80 mm apvalaus profilio ir 2,55 mm kvadratinio profilio skylių palyginimas.....	63
4.10 pav. Ø2,95 mm apvalaus profilio ir 2,65 mm kvadratinio profilio skylių palyginimas.....	64
4.11 pav. Ø3,10 mm apvalaus profilio ir 2,75 mm kvadratinio profilio skylių palyginimas.....	64
4.12 pav. Kvadratinio profilio 2,55 mm skylės skerspjūvis.....	65
4.13 pav. Apvalaus profilio Ø2,80 mm skylės skerspjūvis.....	65
4.14 pav. Kvadratinio profilio 2,75 mm skylės skerspjūvis.....	66
4.15 pav. Apvalaus profilio Ø3,10 mm skylės skerspjūvis.....	66
4.16 pav. Plastike susidarantys įtempiai savisriegio sraigto traukimo metu (Ø2,80 mm skersmens ir □2,55 mm kvadratinės skylės konfigūracijos).....	67
4.17 pav. Plastike susidarantys įtempiai savisriegio sraigto traukimo metu (Ø2,95 mm skersmens ir □2,65 mm kvadratinės skylės konfigūracijos).....	67
4.18 pav. Plastike susidarantys įtempiai savisriegio sraigto traukimo metu (Ø3,10 mm skersmens ir □2,75 mm kvadratinės skylės konfigūracijos).....	68
B1 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė	76
B2 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė	76
B3 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė.....	77
B4 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė	77
C1 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė.....	78
C2 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė	78
C3 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė.....	79
C4 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė	79

D1 pav. Kvadratinio profilio 2,65 mm skylės skerspjūvis.....	80
D2 pav. Kvadratinio profilio 2,85 mm skylės skerspjūvis.....	80
D3 pav. Apvalaus profilio Ø2,95 mm skylės skerspjūvis.....	80

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Duomenys gauti atliekant savisriegio sraigto prasukimo ir statinio ištraukimo bandymus (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997).....	17
1.2 lentelė. Tyrime gautieji rezultatai iš ištraukimo bandymų (Gracco et al., 2012).....	24
1.3 lentelė. Eksperimentinių rezultatų palyginimas su baigtinių elementų analize (Özen et al., 2021)	38
2.1 lentelė. Ruošinių spausdinimo parametrai	44
3.1 lentelė. Baigtinių elementų analizėje naudojamų medžiagų mechaninės savybės	54
4.1 lentelė. Gautieji savisriegio sraigto įsukimo ir ištraukimo iš ruošinio duomenys	62
4.2 lentelė. Gautieji savisriegio sraigto traukimo iš ruošinio skaitmeniniai duomenys.....	69
A1 lentelė. <i>Prusa Polymers</i> polilakto rūgšties plastiko (PLA) techninės savybės	75
A2 lentelė. <i>Prusa Polymers</i> polietileno tereftalato glikolio plastiko (PETG) techninės savybės.....	75

IVADAS

Plastiko pramonėje, surinkinėjant gaminius, dažnai tenka susidurti su situacijomis, kai prie gaminių turi būti tvirtinami kiti elementai. Dėl savo paprastumo ir pigumo savisriegiai sraigčiai šioje srityje yra labai dažnas pasirinkimas. Taip pat tai yra vienas iš paprasčiausių ir greičiausių būdų surinkti ar išrinkti gaminius. Šis tvirtinimo būdas savisriegiais sraigtais yra jau seniai naudojamas, o pirmieji šių tvirtinimo elementų panaudojimo atvejai aptinkami dar XIX amžiuje.

Mokslinė problema

Šia tema jau yra atlikta daug tyrimų ir pateikta nemažai rekomendacijų. Daugelis tyrimų buvo skirti ištirti savisriegio sraigto įsukimo, pasipriešinimo ištraukimui parametrus, susidarančias apkrovas ir jų kilmę. Taip pat yra pateikta daug rekomendacijų savisriegiams sraigtais tobulinti, polimerinėms medžiagoms parinkti ar būdams, kaip apskaičiuoti veikiančias apkrovas. Nors praktikoje ne dažnai aptinkama, tačiau plastiko gaminiuose galima rasti skylių profilio variacijų, skirtų savisriegiams sraigtais tvirtinti. Tarp tyrimų pasigendama skylių, į kurias savisriegiai sraigčiai yra įsukami, analizių apsiribojant tik apvalių skylių profiliu.

Darbo objektas

Darbo objektas yra savisriegio sraigto skylės profilis, kai tiriama įtaka savisriegio sraigto įsukimui ir pasipriešinimas ištraukimui iš plastikinių detalių. Taip pat šio tvirtinimo būdo mechaninės savybės.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – išanalizuoti savisriegio sraigto, įsukto į plastikines detales su skirtingo profilio skylėmis, mechanines charakteristikas ir parengti baigtinių elementų modelį, skirtą apskaičiuoti maksimalią savisriegio sraigto pasipriešinimo ištraukimui jėgą.

Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti reikia įvykdyti toliau nurodytus uždavinius:

1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą bei tyrimus, susijusius su savisriegių sraigtų bandymais, matematiniais modeliais ir spausdinamų plastikų savybėmis.
2. Atlikti eksperimentinius savisriegio sraigto įsukimo ir pasipriešinimo ištraukimui tyrimus su savisriegiais sraigtais ir atspausdintais bandiniais.
3. Pasitelkiant matematines formules apskaičiuoti rekomenduojamo savisriegio sraigto prisukimo momentą ir ašinę jėgą į priveržiamą kūną.
4. Suformuoti modelį ir atlikti savisriegio sraigto traukimo analizę naudojantis baigtinių elementų metodu.
5. Įvertinti ir palyginti atliktų tyrimų rezultatus.

6. Suformuluoti išvadas ir rekomendacijas pagal surinktus duomenis bei tyrimų rezultatus.

Darbo metodai

Atliekami eksperimentiniai tyrimai su sukimo momento ir tempimo jėgos matavimo įranga, pasinaudojant suprojektuotu savisriegių sraigčių prisukimo tyrimo stendu ir universalia tempimo mašina. Atliekamas teorinis parametrų apskaičiavimas naudojantis matematinėmis formulėmis. Skaitmeniniame tyrime atliekama savisriegių sraigčių atsparumo ištraukimui analizė naudojant *Dassault Systèmes Solidworks 2022* ir *Comsol Multiphysics 5.6* programinius paketus bei nustatomas tapatumas su eksperimentiniais duomenimis.

Temos naujumas

Ankstesni tyrimai nebuvo tiesiogiai susiję su diskutuojama problema. Galima rasti tyrimų apie sraigčių jungčių panaudojimą bei įsukimo momento ar ištraukimo jėgas, tačiau apie kitų, išskyrus apvaliojo, profilių skyles tyrimų trūksta. Tad, sudarant baigtinių elementų modelį ir atliekant išsamesnius eksperimentinius tyrimus, galima išplėsti supratimą apie savisriegio sraigto ir skirtingo skylės profilių elgseną, kurios gali būti naudingos pramonės srityje.

Darbo temos aktualumas

Sumodeliavus ir ištyrus savisriegio sraigto sąveiką su skirtingo profilio skylėmis plastikinėse detalėse, praplečiamas supratimas apie skirtingo profilių skylių mechanines charakteristikas. Pagal eksperimentiškai ištirtus ir apskaičiuotus parametrus pateikiamos rekomendacijos skylės profilio parinkimui ir panaudojimui pramonėje.

Teorinė ir praktinė darbo reikšmė

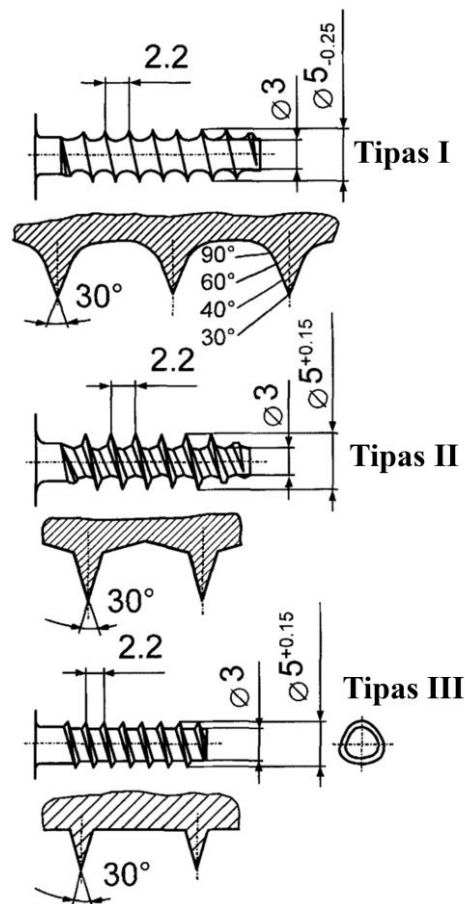
Nustatyti savisriegio sraigto užveržimo momento ir išplėšimo jėgos priklausomybės nuo įsukimo gylio kvadratinio profilio skylėms. Pasiūlyta skaitmeninio modeliavimo metodika gali būti naudojama įsuktų savisriegių sraigčių atsparumo ištraukimui jėgoms rasti.

1. ANALOGIŠKŲ TYRIMŲ APŽVALGA

1.1. Srieginių jungčių mechaninių savybių tyrimai

Dratschmidt & Ehrenstein 1997 metais publikuotame straipsnyje aprašomas eksperimentinis polimerinių ir savisriegių sraigtų (toliau tekste iš angl. *self-tapping* vartojamas trumpinys ST) mechaninės poros tyrimas. Šiame tyrime buvo atlikti statinės ir dinaminės apkrovos bandymai. Dinaminiai tyrimai buvo atliekami norint ištirti šios mechaninės poros patikimumą esant nuovargiui. Nuovargis tiriamas pasinaudojus mikroskopijos ir histerezės matavimo metodais.

Tyrimui atlikti buvo panaudoti trijų skirtingų tipų ST sraigčiai, parodyti 1.1 paveiksle. Visi trys ST sraigtų tipai, kurių nominalus skersmuo yra 5 mm, yra specialiai sukurti naudoti kartu su plastikinėmis detalėmis. Plastiką naudotas tyrime buvo poliamidas su 30 % stiklo pluoštu užpildu.

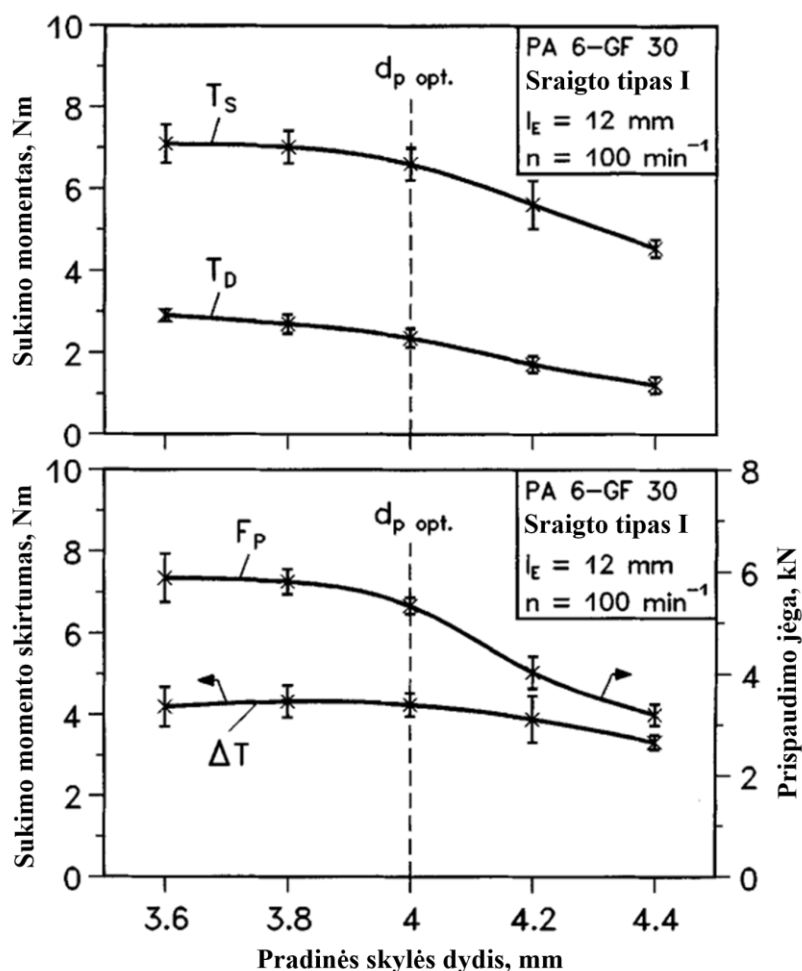


1.1 pav. Tyrime naudotų savisriegių sraigtų tipai (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997)

Tyrime yra nurodomas rekomenduojamas užveržimo momentas sraigtiniam sraigtam plastike, kuris gali būti apskaičiuojamas pagal $T_T = T_{D_{\max}} + k(T_s - T_{D_{\max}})$ formulę. Čia $T_{D_{\max}}$ yra maksimalus sukimo momento dydis, iki kol ST sraigtas pradeda veržti tarpinę plokštelę, o T_s yra dydis kada ST sraigtas galutinai prasisuka skylėje ir sugadina suformuota sriegį. Koeficientas k atsižvelgia,

kaip ST sraigtas yra užveržiamas. Naudojant tikslų dinamometrinį užveržimo prietaisą, koeficientas k gali būti parenkamas 0,5. Naudojant kitus mažo tikslumo užveržimo momento prietaisus, šis koeficientas turėtų būti apie 0,2.

Atliekant statinius bandymus su įvairių skersmenų skylėmis, kurių gylis 12 mm, sraigto įsukimo greitis į bandinį 100 min^{-1} , buvo eksperimentiškai nustatytas optimalus bandomosios skylės skersmuo. Optimalus skylės skersmuo buvo parinktas ten, kur kritinio ir pradinio užveržimo momento skirtumas ΔT ir maksimali apkrovos jėga F_p pradeda mažėti. Tolimesniems bandymams atlikti skylės skersmuo buvo parinktas 4 mm. Duomenys gauti iš statinių bandymų su pirmojo tipo ST sraigto, pateikti 1.2 paveiksle



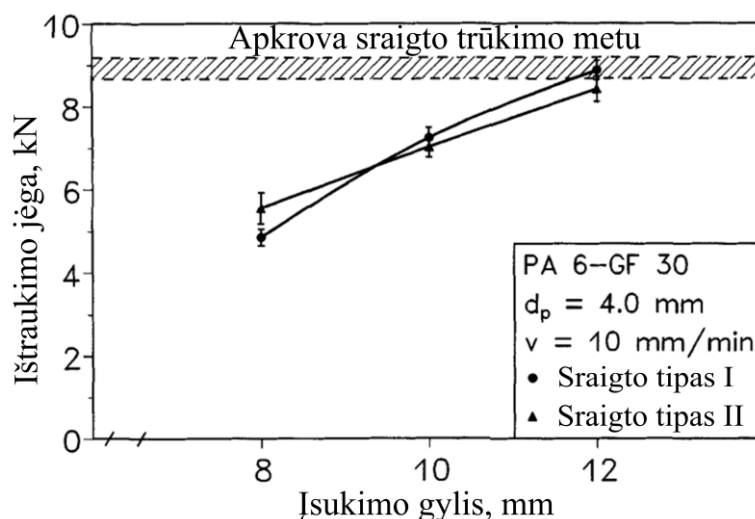
1.2 pav. Sukimo momentas ir apkrovos jėga savisriegio sraigto prasukimo teste lyginant su skylės skersmeniu (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997)

Atlikus ST sraigto statinius ištraukimo bandymus su 8 mm ir 12 mm ilgio skylėmis bei vienos 4 mm skersmens skylėmis, prieita prie išvados, kad tarpusavyje, trijų tipų ST sraigtai turi labai panašius mechanines savisriegio – plastiko sujungimo parametrus. Duomenys gauti tyrime yra pateikti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Duomenys gauti atliekant savisriegio sraigto prasukimo ir statinio ištraukimo bandymus (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997)

	Išplėšimo bandymai su sraigto galvutės trintimi (metalas / metalas)			Išplėšimo bandymai be sraigto galvutės trinties		
	Sraigto tipas			Sraigto tipas		
	I	II	III	I	II	III
I_E , mm	8	8	8	12	12	12
n , rpm	300	300	300	300	300	300
$d_{\rho opt}$, mm	4	4	4	4	4	4
T_D , Nm	1,5	1,6	1,4	2,0	1,8	1,8
T_S , Nm	4,4	4,6	4,5	6,7	6,4	6,5
ΔT , Nm	2,9	3,0	3,1	4,7	4,6	4,7
F_p , kN	3,8	4,1	4,5	5,9	6,1	7,0
F_{stat} , kN	4,9	5,6	4,5	8,9	8,4	9,0

Atlikus ST sraigto ištraukimo bandymus su trijų skirtingų gylių skylėmis, gauta, kad ištraukimo jėga yra tiesiškai priklausantis dydis nuo skylės gylio. Ši tiesinė priklausomybė galima dėl didelio Jungo modulio skirtumo tarp ST sraigto ir plastikinio bandinio, kai didžioji dalis plastinės deformacijos įvyksta plastiko bandinyje. Naudojant nurodytų tipų ST sraigtus, gauta, kad sąveika su didesne nei 12 mm gylio skylė ir atliekant ištraukimo bandymus, ST sraigtas trūko dėl viršytų kritinių įtempių. Duomenys iš tyrimo yra pateikti 1.3 paveiksle.

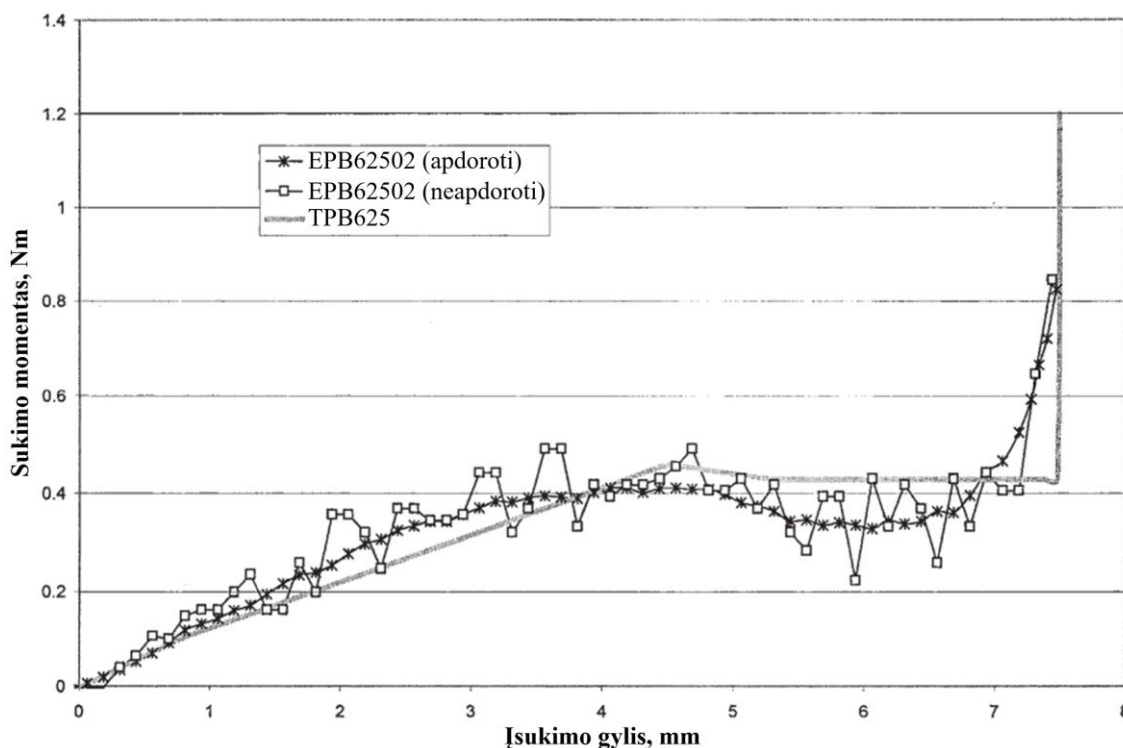


1.3 pav. Statinė ištraukimo jėga lyginant su savisriegio sraigto sąveikos ilgiu (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997)

Seneviratne et al. (2001) ST sraigto tvirtinimo proceso modeliavimo tyrime yra teoriniu būdu apskaičiuota ašinė jėga ir sukimo momentas. Pastarasis reikalingas įsukti ST sraigtą į plastikinę detalę bei patikrinant gautą matematinį modelį eksperimentiniais tyrimo rezultatais. Šio tyrimo tikslas buvo sukurti teorinį ST sraigto priveržimo modelį, kuris leistų geriau kontroliuoti automatizuotus prisukimo procesus.

Pagal supaprastinta ST sraigto profilį yra aprašomos formulės, reikalingos atlikti dvi pagrindines užduotis – įsukti ST sraigtą į ruošinį ir tolimesnis jo užveržimas. ST sraigtą įsukti, aprašomos dvi formulės – reikalingas sukimo momentas išstumti medžiagą ir suformuoti sriegį medžiagoje bei sukimo momentas reikalingas įveikti susidariusia trinties jėgą. ST sraigto užveržimo momentas šiame straipsnyje yra išreiškiamas kaip viena formulė.

Toliau atlikus eksperimentinius bandymus su Akrilnitrilo butadieno stireno (ABS) ir Polikarbonato (PC) plastikiniais bandiniais, gauti rezultatai yra palyginami su sukimo momento kreive gauta pagal teorinį modelį. Gauti tyrimo rezultatai pateikti 1.4 paveiksle.



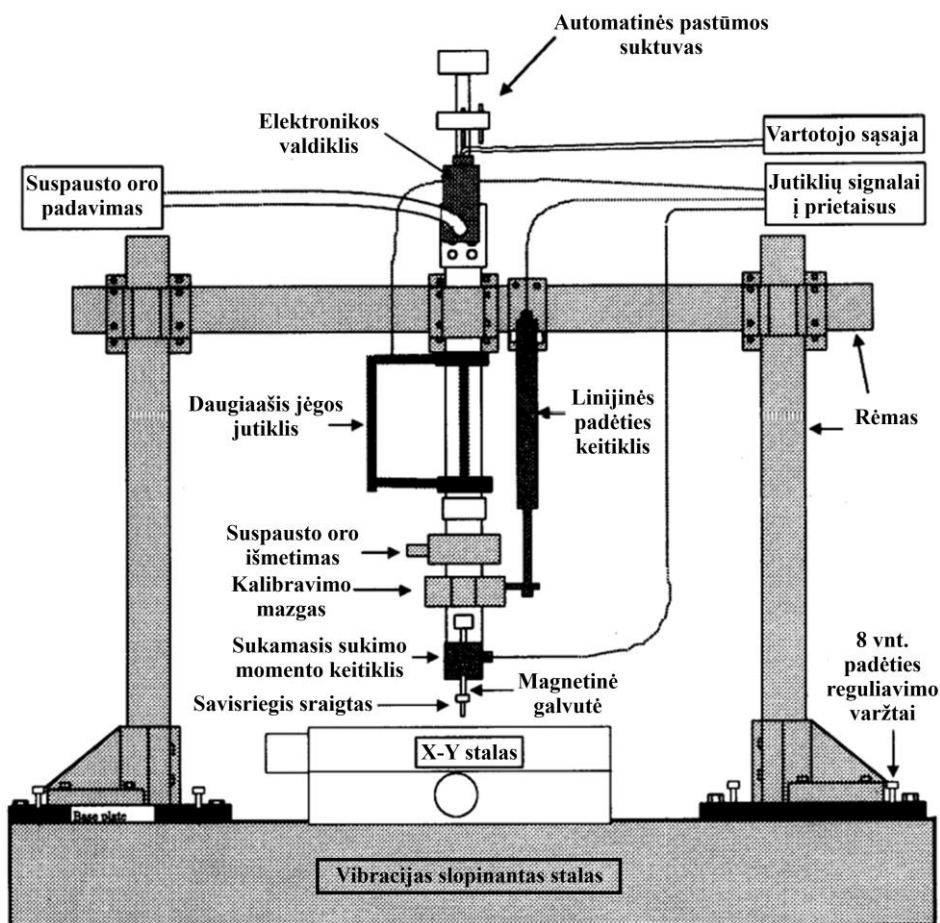
1.4 pav. Eksperimentinio tyrimo rezultatų palyginimas su teorinio modelio kreive (Seneviratne et al., 2001)

Straipsnyje prieita prie išvados, kad aprašytas matematinis modelis yra teisingas ir gali būti naudojamas praktikoje, atsižvelgiant į galimus nuokrypius. Tai yra pirmasis matematinis modelis aprašytas ir yra dažnai cituojamas literatūroje.

Eksperimentinis ST sraigtų sukimo momentų signalų tyrimas analizuoja ST sraigto užveržimo momentą (Seneviratne et al., 2000). Pagrindinis šio tyrimo tikslas buvo patikrinti matematinį penkių etapų ST sraigto užveržimo modelį, kuris buvo gautas prieš tai aptartame tyrime (Seneviratne et al., 2001).

Eksperimentui stendas buvo suprojektuotas taip, kad galėtų supozicionuoti ST sraigtų prisukimo antgalį su bandinio skyde. Taip pat stendas turėjo galimybę pamatuoti realų laiko sukimo momentą iki maksimalios 10 Nm išraiškos, su 0,2 Nm paklaida. Stende sukant ST sraigtą buvo realiu

laiku matuojamas pasukimo kampas ir įsukimo gylis. Eksperimente naudotas stendas yra pavaizduotas 1.5 paveiksle.

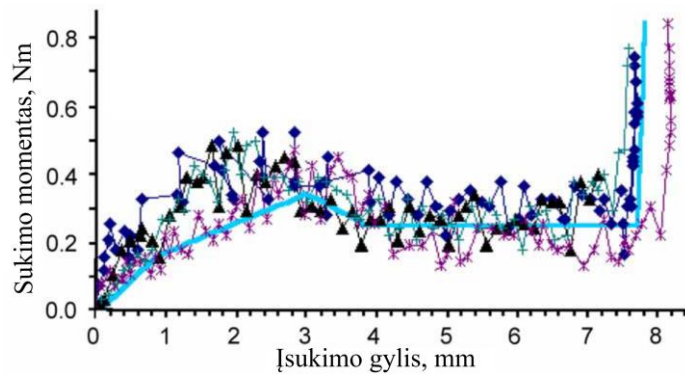


1.5 pav. Eksperimentinio tyrimo stendas (Seneviratne et al., 2000)

Pagrindinės dalys, kurios sudaro stendą yra automatinio padavimo suktuvas, sukamasis sukimo momento keitiklis, linijinės pozicijos keitiklis, dviejų ašių pozicionavimo stalas ir kompiuterinė duomenų rinkimo ir valdymo įranga. Stende naudotas *Desoutter* pneumatinis suktuvas. Šis įrankis galėjo pasiekti didžiausią 7 Nm sukimo momentą, 500 N dinaminį spaudimą į ST sraigtą bei turėjo maksimalų 900 min^{-1} sukimosi greitį. Sukimo momentui pamatuoti buvo naudojamas sukimo momento keitiklis su įtempių matuokliu, galintis matuoti dinamines ir statines sukimo momentus prasidedančius nuo 0 Nm iki 10 Nm su 1 % paklaida.

Eksperimentas buvo atliktas naudojant cinku padengtus ST sraigtus. Bandiniai buvo paruošti iš polipropileno (PP), akrilnitrilo butadieno stireno (ABS), polibutileno (PB), polikarbonato (PC) plastiko ir mažaanglio plieno plokščių. Mažiausiai 4-iais vienodais bandiniais buvo atlikti matavimai rezultatų pakartojamumui.

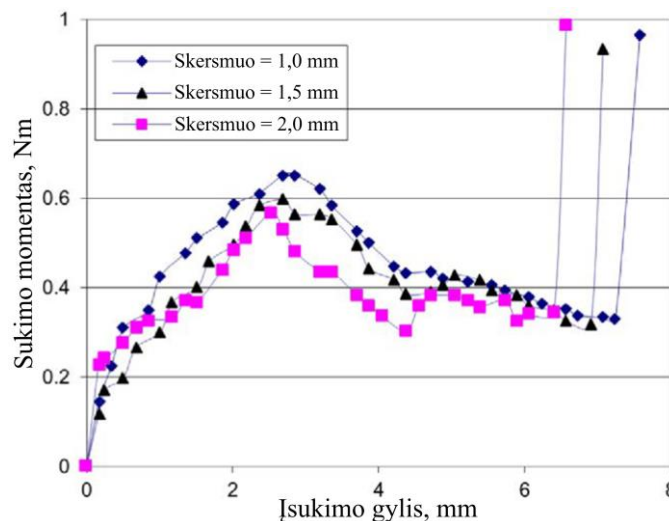
Gautieji rezultatai tarp skirtingų plastikų rodo, kad prieš tai autorių aprašytas matematinis modelis (Seneviratne et al., 2001) yra aprašytas teisingai. Gautieji rezultatai su polikarbonato plastikais, kurie yra lyginami su matematiniu modeliu – pateikiami 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Gauti duomenys lyginami su matematiniu modeliu (Seneviratne et al., 2000)

Taip pat tyrime atlikti bandymai su plieno plokšte, parodė ypač dideles pirmines sukimo momento išraiškas, kol ST sraigto formuoja sriegį skylėje. Kai visame bandinio ilgyje susidaro sriegis, tada sukimo momento išraiška staigiai sumažėja. Tai galima aiškinti dėl pliene esančios mažesnės trinties bei susidariusios sąlyginai mažos temperatūros. Tuo tarpu, plastikiniuose bandiniuose, temperatūra susidariusi sukant ST sraigą, turi didelės įtakos sukimo momentui reikalingo šiam ST sraigto įsukimui.

Vėlesniame straipsnyje, atliktas eksperimentinis tyrimas su skirtingo skersmens skylėmis parodė labai panašius rezultatus į prieš tai minėtą ST sraigto teorinį sukimo momento apskaičiavimo modelį (Lara et al., 2012; Seneviratne et al., 2001) (žr. 1.7 pav.).

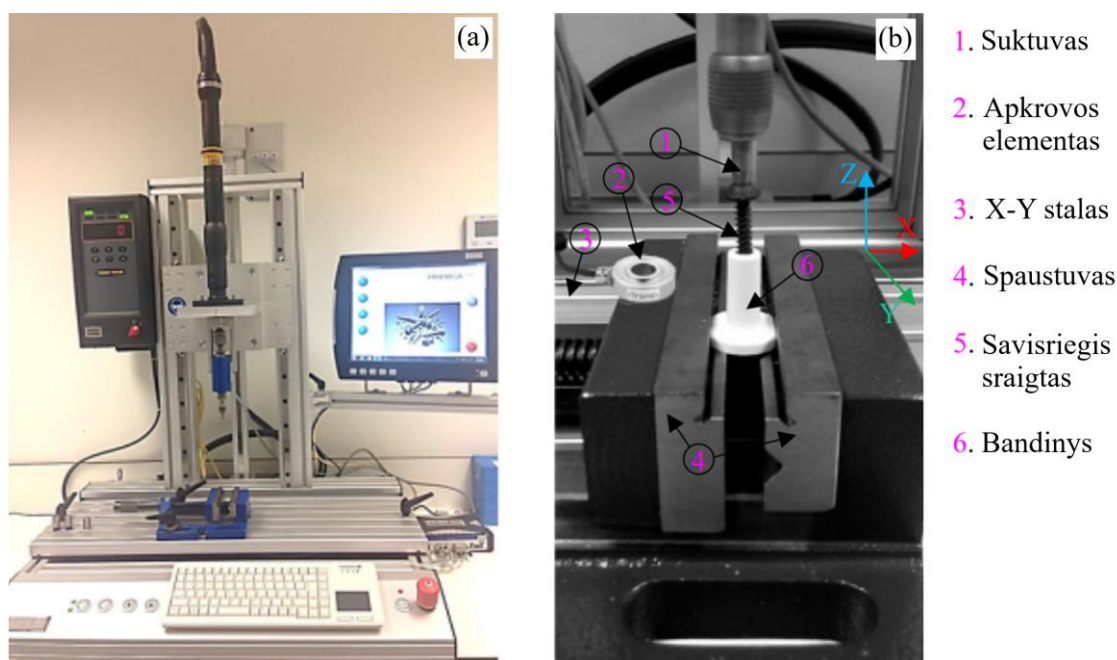


1.7 pav. Eksperimentiniai tyrimai su skirtingo skersmens skylėmis (Lara et al., 2012)

Pagal matomus tolimesnius tyrimus, galima daryti išvadą, kad šis matematinis modelis turi stiprų pagrindimą praktiniais tyrimais bei yra skirtas apskaičiuoti ST sraigto sukimo momentą skirtingais etapais (Seneviratne et al., 2001). Tačiau šiam teoriniam modeliui trūksta temperatūros įtakos sukimo momentui. Taip pat dėl labai staigiai kylančios sukimo momento kreivės matematiniame modelyje, būtų sunku prognozuoti sukimo momento išraiškas jau esant ST sraigto galvos kontaktui su priveržiamuoju kūno paviršiumi.

Cumbicus et al. (2021) publikuotame straipsnyje yra analizuojama ST sraigto geometrijos įtaka sukimo momentui, kai yra formuojamas sriegis. Pagrindinis tyrimo tikslas, rasti sukimo momentą, reikalingą įsukti ST sraigą į plastikinį bandinį. Tyrimui atlikti buvo taikyti du metodai: eksperimentinis ir baigtinių elementų metodo (toliau – BEM) analizės.

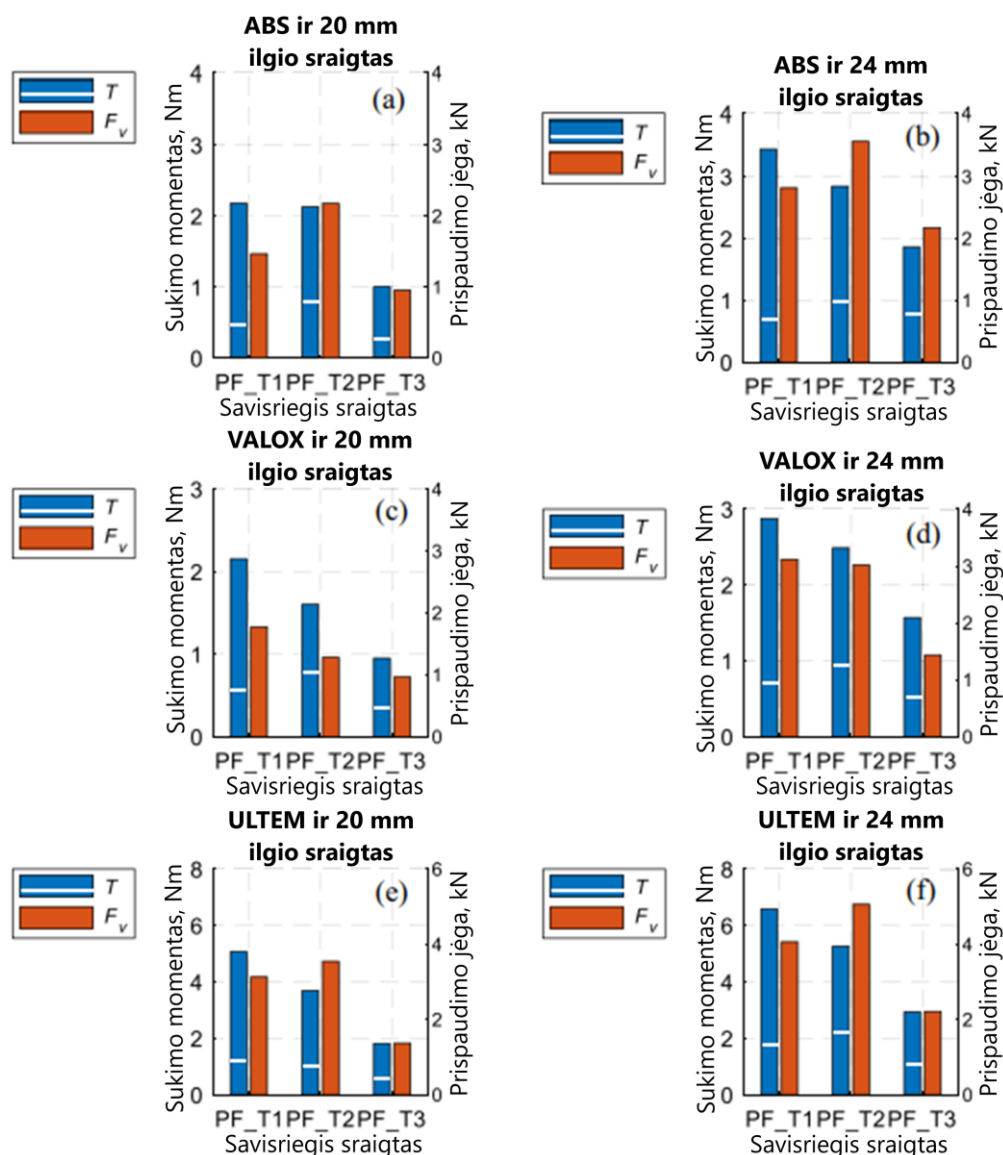
Eksperimentiniame tyrime buvo matuojamas ST sraigto sukimo momentas ir sukuriama prispaudimo jėga. Sukimo momentui pamatuoti buvo panaudotas stendas su sukimosi momento keitikliu, galinčiu pamatuoti statines ir dinamines išraiškas laiko intervale. Prietaisas gali pamatuoti sukimo momentą iki 15 Nm, o matavimo pasiekiamą tikslumo paklaida buvo 1 %. Prispaudimo jėga sukurama priveržiant ST sraigą. Ji buvo matuojama įterpiant apkrovos daviklį tarp ST sraigto ir plastikinio ruošinio. Apkrovos elementas gali pamatuoti prispaudimo jėgą iki 7,5 kN. Stendas naudotas eksperimentui atlikti yra atvaizduotas 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Testavimo stendas: a) bendras matavimo stendo vaizdas, b) eksperimentui naudojami prietaisai ir dalys (Cumbicus et al., 2021)

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti naudojant tris skirtingas ruošinių medžiagas – ABS, polibutileno tereftalatą (PBT) ir polietierimidą (PEI) ir trijų skirtingų profilių ST sraigtus. Gauti sukimo momento duomenys formuojantis sriegiui pavaizduoti mėlynai, o prispaudimo jėga atvaizduojama oranžine spalva, grafikai pateikiami 1.9 paveiksle.

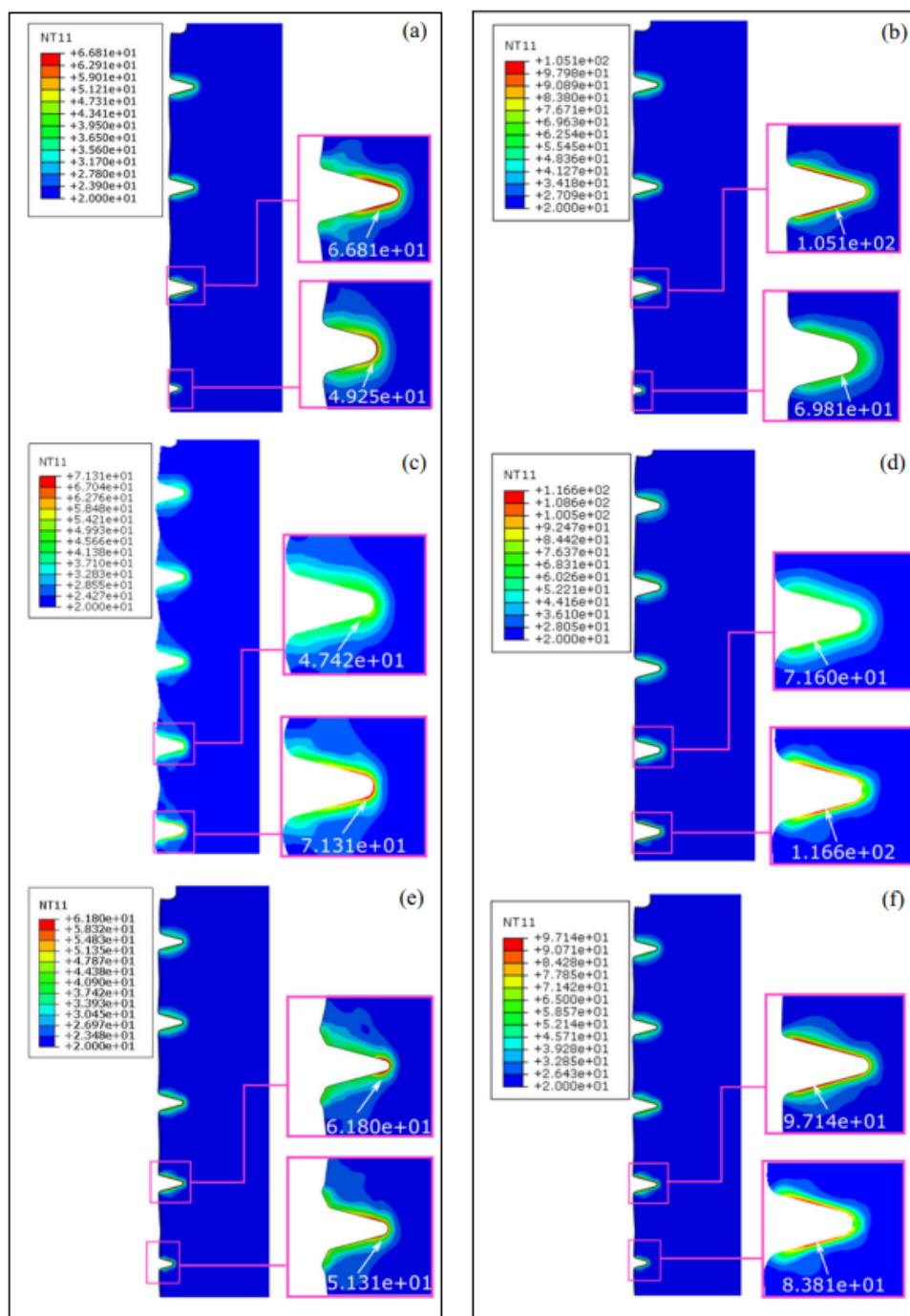
Darant eksperimentinį tyrimą buvo pasirinkti keturi ST sraigtų įsukimo greičiai – 100, 250, 500 ir 1000 min^{-1} . Didžiausia bandinyje ST sraigto sukimo momento reikšmė buvo pasiekta naudojant 250 min^{-1} įsukimo greitį. Naudojant 1000 min^{-1} įsukimo greitį, bandinyje temperatūra pakyla per daug, todėl ST sraigto sukimo momento reikšmė buvo gauta pati mažiausia.



1.9 pav. Eksperimentiškai gauti rezultatai (Cumbicus et al., 2021)

ST sraigto įsukimas buvo sumodeliuotas naudojant *Dassault Systèmes Abaqus* programinį paketą. Pritaikyti dviejų dimensijų (2D) supaprastinimai sumodeliavus tik pusę sraigto, iki jo simetrijos ašies. Atlikta analizė sugeneravo trinties koeficiento reikšmes tarp ST sraigto ir plastiko, temperatūros reikšmes po ST sraigto įsukimo. Gauti rezultatai pagal atliktą BEM analizę, parodė, kad temperatūra susidariusi nuo plastiko deformavimosi yra didžiausia sriegio pašaknyse (žr. 1.10 pav. a, c ir e), o pridėjus ST sraigto trintį į plastiką, aukščiausia temperatūra susidaro ties sriegio šonais (žr. 1.10 pav. b, d ir f).

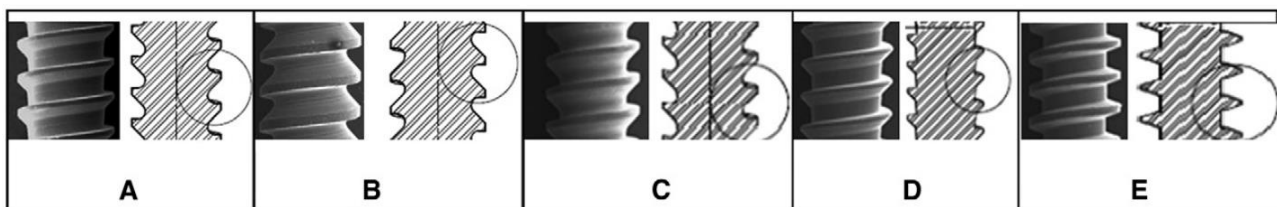
Atlikus įtempių analizę, ST sraigtas su 1,8 mm sraigto žingsniu stipriai deformuoja plastiką įsisukimo metu. ST sraigtas su 2,24 mm sraigto žingsniu parodė geresnius rezultatus, kadangi esant didesniai žingsniui, plastikas nėra taip stipriai deformuojamas ir ST sraigtas yra lengviau įsukamas dėl mažesnės trinties.



1.10 pav. Temperatūra susidariusi plastike sukant savisriegį sraigą (Cumbicus et al., 2021)

Gracco et al. (2012) publikuotame tyrime autoriai analizuoja mažų, odontologijoje naudojamų, sraigtų sriegio įtaką, jų ištraukimo jėgai iš sintetinių kaulų. Tyrimui atlikti naudojamas eksperimentinis metodas.

Tyrimui atlikti buvo pasirinkta septynių skirtingų sraigtelių tipai (žr. 1.11 pav.), iš viso tyrimas atliktas su 35 sraigteliais. Naudoti sraigteliai buvo savisriegiai ir savigręžiai. Šių sraigtelių skersmuo buvo Ø2 mm, o ilgis 12 mm.



1.11 pav. Mažųjų sraigtelių sriegio dizaino iliustracija: (A) atraminis atvirkštinio sriegio profilis, (B) atraminis sriegis, (C) 75° laipsnių profilis, (D) suapvalintas sriegis, (E) trapecinis sriegis (Gracco et al., 2012)

Norint užtikrinti nepageidaujamų paklaidų eliminavimą, sraigteliams įsukti į sintetinį kaulą buvo naudojamas papildomas vamzdelis, pro kurį sraigtas pozicionuojamas statmenai įsukamo paviršiaus, taip pat išvengiant nereikalingo klibėjimo įsukant. Visi sraigteliai buvo prisukami su dinamometrinio suktuvu kalibruotu sukti 15 cNm sukimo momentu.

Ištraukimo bandymui, kiekvienas sintetinio kaulo bandinys buvo įtvirtintas rėme ir priveržtas prie testavimo mašinos. Testavimui buvo naudota *TestResources Instron 4467* įrenginys. Rėmo konstrukcija leido pasiekti aukšto tikslumo ašių sutapimą tarp sraigtelio ir testavimo įrangos. Kritiniai jėgai matuoti pasirinkta ištraukimą atlikti 10 mm per minute greičiu.

Gautieji duomenys iš ištraukimo bandymų pateikiami žemiau pateiktoje 1.2 lentelėje. Iš gautųjų rezultatų matyti, kad ištraukimo jėgų vidutinės reikšmės svyravo nuo $170,0 \pm 10,3$ N iki $192,8 \pm 13,3$ N. Pastebimas tik vienas statistiškai reikšmingas dydis tarp atraminio atvirkštinio sriegio (192,8 N) ir atraminio sriegio (170,0 N). Visi kiti dydžiai neparodė statistiškai reikšmingų skirtumų.

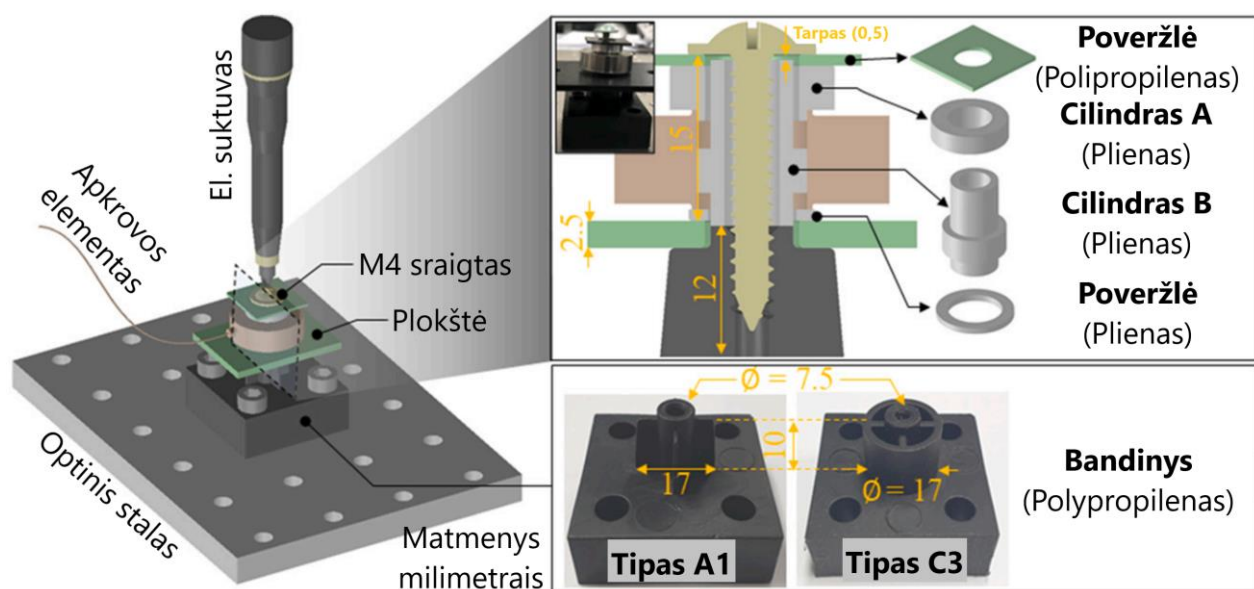
1.2 lentelė. Tyrime gautieji rezultatai iš ištraukimo bandymų (Gracco et al., 2012)

Sraigtelio profilis	Vidutinė jėga, N	Standartinis nuokrypis	Minimali jėga, N	Maksimali jėga, N
Atraminis atvirkštinis sriegis	192,8	13,3	182,2	217,7
Atraminis sriegis	170,0	10,3	159,3	186
75° laipsnių profilis	181,2	11,6	161,5	193,4
Suapvalintas sriegis	188,4	8,7	174,4	199,6
Trapecinis sriegis	184,7	8,8	173,6	197,3

Didelis skirtumas tarp atraminio atvirkštinio sriegio ir atraminio sriegio ištraukimo jėgos aiškiamas dėl sriegio profilio skirtumo. Kadangi atraminis sriegis turi profilį, kuris yra pasviręs link sraigtelio galo, taip sumažindamas pasipriešinimą ištraukimui ašine kryptimi. Šie rezultatai koreliuoja kartu ir su kituose straipsniuose gautaisiais rezultatais, kai naudojami kiti asimetriniai sriegio profiliai su 45° priekiniais bei 90° galiniais kampais (Carano Aldo et al., 2005; Hou et al., 2004; Tencer et al., 1996).

Nam et al. (2022) publikuotame straipsnyje yra analizuojama ST sraigtų sąveika su skirtingai sutvirtintomis plastikinėmis detalėmis. Šio tyrimo tikslas – rasti prispaudimo jėgos, užveržimo momento rezultatų sąveiką su skirtingai sutvirtintomis detalėmis. Tyrimas buvo atliktas naudojant 9 skirtingai sutvirtintas plastikines detales. Tyrimo metodikai buvo pasirinkta naudoti BEM analizė, o gautų rezultatų pagrįstumui užtikrinti, atlikti eksperimentiniai tyrimai su dviem pasirinktais bandiniais.

Eksperimentiniame tyrime bandiniai buvo pagaminti liejimo būdu. Tyrime buvo matuojama ST sraigto sukimo momentas ir sukurama prispaudimo jėga. ST sraigtas buvo priveržiamas naudojant komercinės paskirties suktuką *Atlas Copco ETP STB33-12-10B*, fiksuotu 30 min^{-1} greičiu. Sukimo momento matavimai buvo atlikti su suktuku, o prispaudimo jėga buvo pamatuota naudojant apkrovos daviklį *OMEGA LCWD-1k*. Norint išvengti matavimų nukrypimų dėl esančio apkrovos daviklio, buvo įterpta papildomų detalių – cilindrų ir poveržlių, tarp ST sraigto ir bandinio, kaip parodyta 1.12 paveiksle.

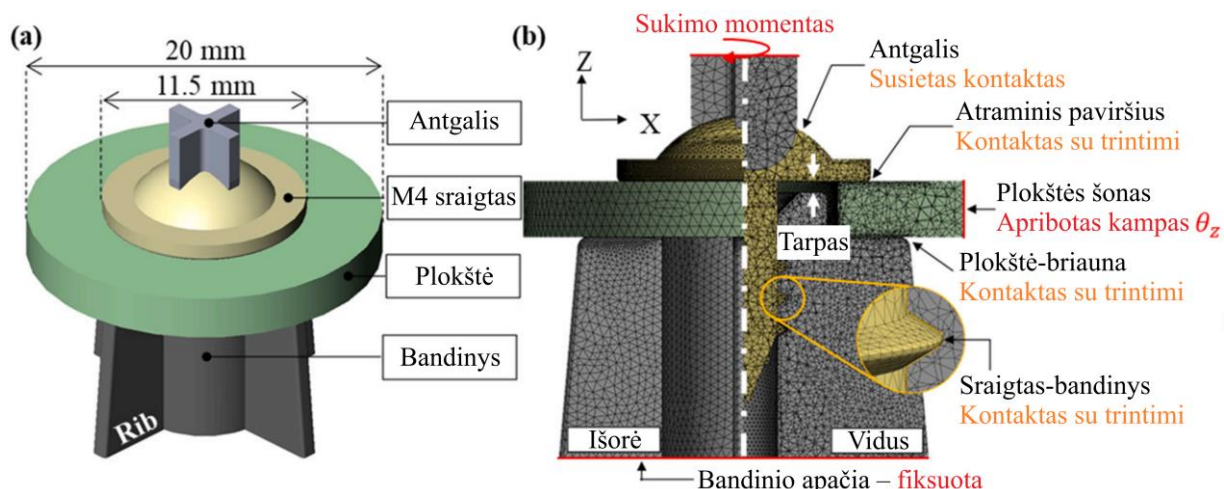


1.12 pav. Eksperimentinio tyrimo schema (Nam et al., 2022)

Statinė ST sraigto užveržimo proceso BEM analizė atlikta naudojant *ANSYS* programinę paketą. Analizei supaprastinti, ST sraigto sukuriamas sriegis buvo suformuotas plastikinėje detalėje. Plastikinė detalė įtvirtinta ties pagrindu. Sukimo momentas buvo perduodamas per suformuotą atsuktuvo antgalį. Taip pat buvo įvertinamos sukuriamos trinties jėgos. Analizės modelis pateikiamas 1.13 paveiksle.

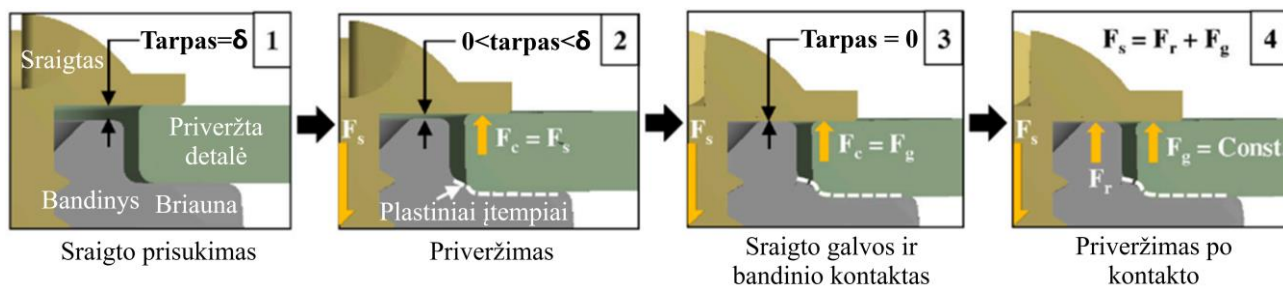
Tyrime buvo išskirti keturi žingsniai, kurie įvyksta priveržiant ST sraigtą esant tokiai konfigūracijai (žr. 1.14 pav.). ST sraigtas sukontaktuoja su prispaudžiamu kūnu, tada vyksta užveržimas, plastikas deformuojasi ir pradeda kontaktuoti su ST sraigtu, tada vyksta tolimesnis užveržimas jau esant kontaktui. Antrame žingsnyje apkrovos jėga yra lygi prispaudimo jėgai. Trečiame žingsnyje

plastikas deformuojasi esant tam tikrai jėgai. Ketvirtame žingsnyje, kai plastikas jau yra sukontaktu-
vęs su sraigto galva, jėga spaudžianti plokštelę nustoja kilti ir papildoma apkrovos jėga tik tolimiau
deformuoja esantį plastiką.



1.13 pav. (a) analizės 3D modelis, (b) analizės kraštinės sąlygos (Nam et al., 2022)

BEM analizėje sukimo momento išraiškos buvo tiesiogiai apskaičiuotos pagal sukimo momentą užduotą į atsuktuvo antgalį, o prispaudimo jėga buvo apskaičiuota pagal kontakto jėgą tarp ST sraigto galvos ir spaudžiamosios plokštelės. BEM analizėje ST sraigto prasukimą bandinyje buvo nuspręsta fiksuoti, kai plastiko deformacijos paviršiuje, ties sriegiu, viršydavo 0,39 reikšmę, kuri yra lygi PP medžiagos Puasono santykiui. Kai sukimo momentas su prispaudimo jėga sukuria 0,39 plastiko deformaciją, fiksuojamos maksimalios sukimo momento ir prispaudimo jėgos.



1.14 pav. Pjūvis parodantis keturis savisriegio užveržimo etapus (Nam et al., 2022)

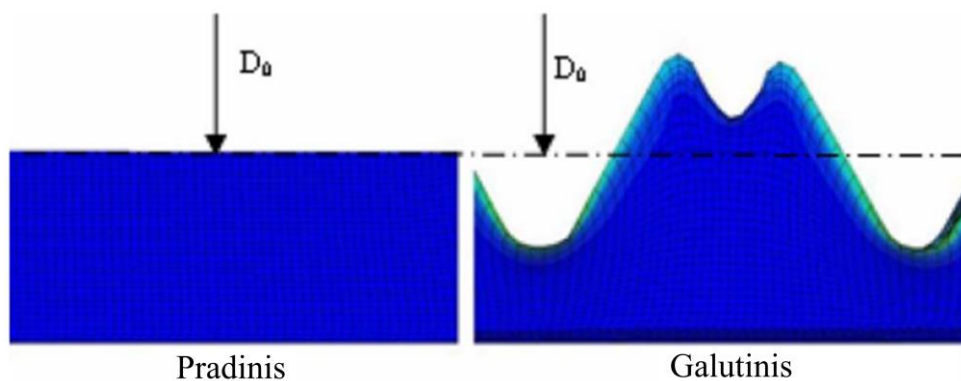
Gauti rezultatai iš eksperimentinių tyrimų buvo palyginti su rezultatais gautais naudojant BEM analizę. Didžiausi nuokrypiai tarp šių skirtingų metodų buvo 11,7 % tarp kritinio sukimo momento ir 8,2 % tarp maksimalių prispaudimo jėgų. Tokie nežymūs nukrypimai parodo, kad BEM šiame straipsnyje yra teisingai pritaikytas ir tinkamas naudojimui.

Mathurin et al. (2009) publikuotame straipsnyje yra modeliuojamas sriegį formuojančio sraigto surinkimo procesas ir analizuojamos susidarančios deformacijos. Šio darbo tikslas buvo sudaryti teisingą BEM analizės metodą tokiam procesui. Gauti rezultatai iš BEM yra lyginami su eksperimentiniu tyrimo gautais rezultatais (Fromentin, 2004). Analizėje tiriamos bandinyje susidarančios

deformacijos sriegio formavimosi metu bei stebimos sukimo momento išraiškos, pagal atitinkamus sraigto įsukimo greičius bei skylės skersmenį bandinyje.

Sriegio formavimosi procesui atvaizduoti buvo pasirinktas *Dassault Systèmes Abaqus Explicit* programinis paketas. Analizėje buvo pritaikyti supaprastinimai, atliekant analizę tik su 1/8 bandinio, tai leido atlikti ašinės simetrijos kraštinė sąlyga programoje. Taip pat analizėje nebuvo vertinamos temperatūros susidarančios dėl sriegio formavimosi proceso. Rezultatams pakoreguoti, buvo išskaičiuotas koeficientas iš eksperimentinio tyrimo, kuris leistų pataisyti sukimo momento rezultatus gautus iš analizės.

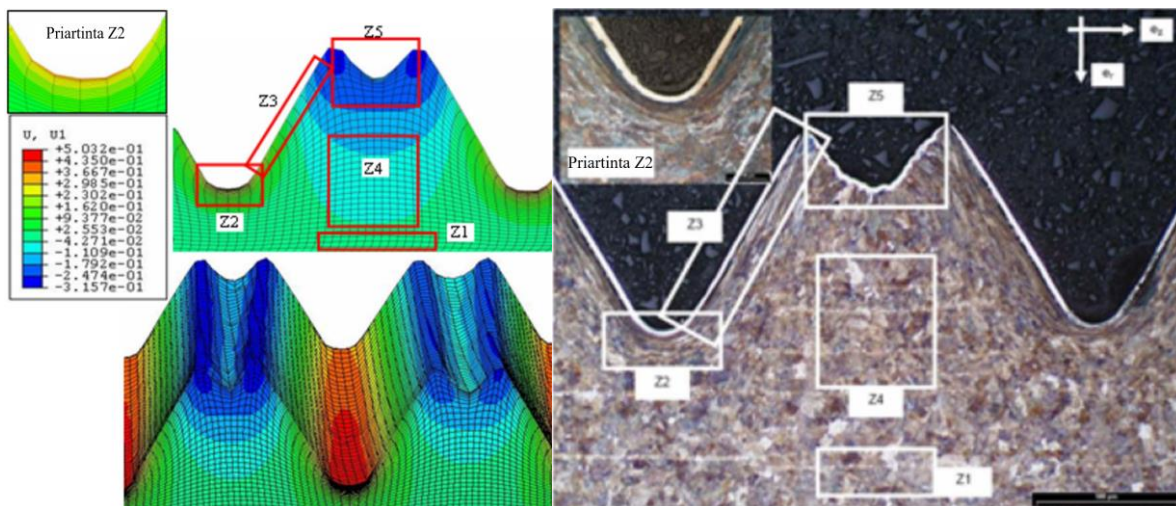
Atlikta BEM analizė parodė labai panašius deformacijų rezultatus į gautus atlikus eksperimentinį tyrimą. Iš rezultatų matoma, kad medžiaga, sriegiui besiformuojant, yra išstumama iš sriegio pašaknų. Šios deformacijos atvirkščiai proporcingos skylės skersmeniui, kurios tolimiau ir yra analizuojamos 1.15 paveiksle.



1.15 pav. Skylės skersmuo prieš ir po sriegio suformavimo (Mathurin et al., 2009)

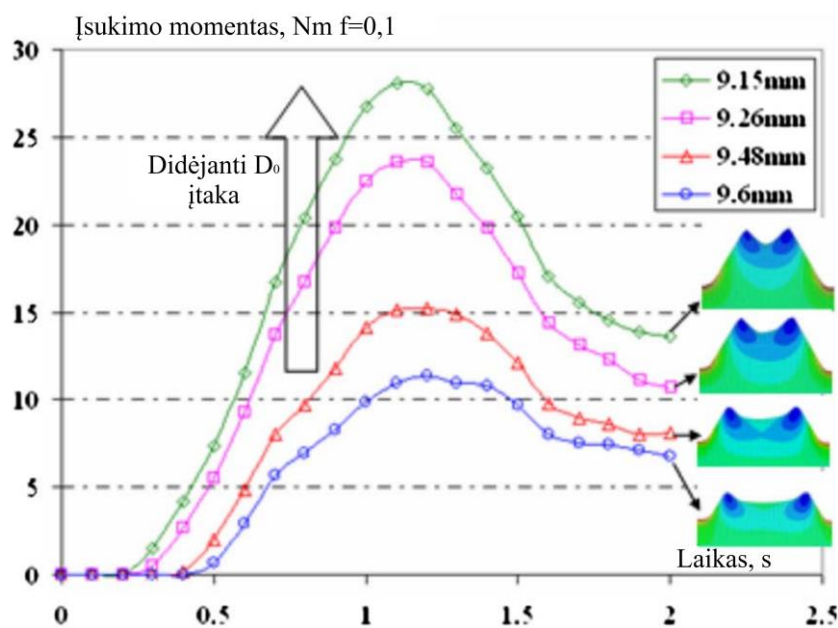
1.16 paveiksle analizuojamos penkios zonos (Z1 – Z5) ir jų deformacijos po sriegio suformavimo. Pirmoje ir ketvirtoje zonoje (Z1, Z4) deformacijos yra artimos nuliui. Antroje zonoje (Z2) deformacijos yra pačios didžiausios. Trečioje zonoje (Z3) matomos deformacijos yra susidariusios nuo sraigto šono. Penktoje zonoje (Z5) yra susidariusios deformacijos, kurios atvaizduoja medžiagos tekėjimą per sraigto šoną iš sriegio pašaknų.

Atlikta analizė su keturiomis skirtingo skersmens skylėmis, rodo labai aiškius skirtumus tarp maksimalių užveržimo momentų reikšmių (žr. 1.17 pav.). Ši analizė atlikta su 9,15 mm, 9,26 mm, 9,48 mm ir 9,6 mm skersmens skylėmis. Tarp 9,15 mm ir 9,6 mm skersmens skylių, užveržimo momento reikšmė skyrėsi daugiau nei 2,5 karto – 11 Nm užveržimo momentas 9,6 mm skylėi ir 28 Nm 9,15 mm skersmens skylėi, kai pritaikytas trinties koeficientas buvo 0,1. Tyrime buvo atliktos papildomos 8 simuliacijos su skirtingais trinties koeficientais. Atliktos analizės parodė, kad apie 90 % energijos reikalingos įsukti sraigta į bandinį, reikalinga įveikti vien susidariusiai trinties jėgai.



1.16 pav. Radialinių deformacijų palyginimas tarp eksperimentinio tyrimo ir baigtinių elementų analizės (Mathurin et al., 2009)

Pagal gautus BEM analizės rezultatus, nepastebėta jokių reikšmingų pokyčių sukimosi momentui pritaikius skirtingus 200, 300, 400, 500 ir 600 min^{-1} sraigto įsukimo greičius. Tokie rezultatai gauti, kadangi bandinys bei sraigtas, naudoti analizėje, parinkti iš plieno medžiagos, kuri nėra jautri deformacijos greičiui. Taip pat aiškinama, kad skirtingi sukimosi greičiai nedaro įtakos rezultatams, dėl visada vienodos energijos, reikalingos įveikti trinties jėgai.



1.17 pav. Skylės skersmens įtaka sraigto užveržimo momentui ir galutiniai sriegio profiliai (Mathurin et al., 2009)

Autoriai vėlesniuose darbuose analizuoja sriegio geometrijos parametrų įtaką, sriegio formavimuisi bandinyje bei pateikia empirinį modelį skirtą apskaičiuoti užveržimo momentui (Stéphan et al., 2011, 2012).

Darbe (Stéphan et al., 2011) pateikiamas neslydimo modelis – detalizuota analizė bandinį veikiančių sriegio formavimo jėgų kryptys, kai daroma prielaida, kad medžiaga yra visiškai plastiška ir trintis nevertinama. Pagal šį modelį galima apskaičiuoti slėgį susidarantį dėl sriegio formavimosi bet kuriame taške.

Taip pat darbe analizuojamos ir modeliuojamos elementarios trinties ir normalinės jėgos veikiančios sriegį formuojantį sraigą, kurios sudaro reikalingą sukimo momentą įsukti sraigą į bandinį. Sukimo momento dedamosios yra išskirstomos į keturias dalis:

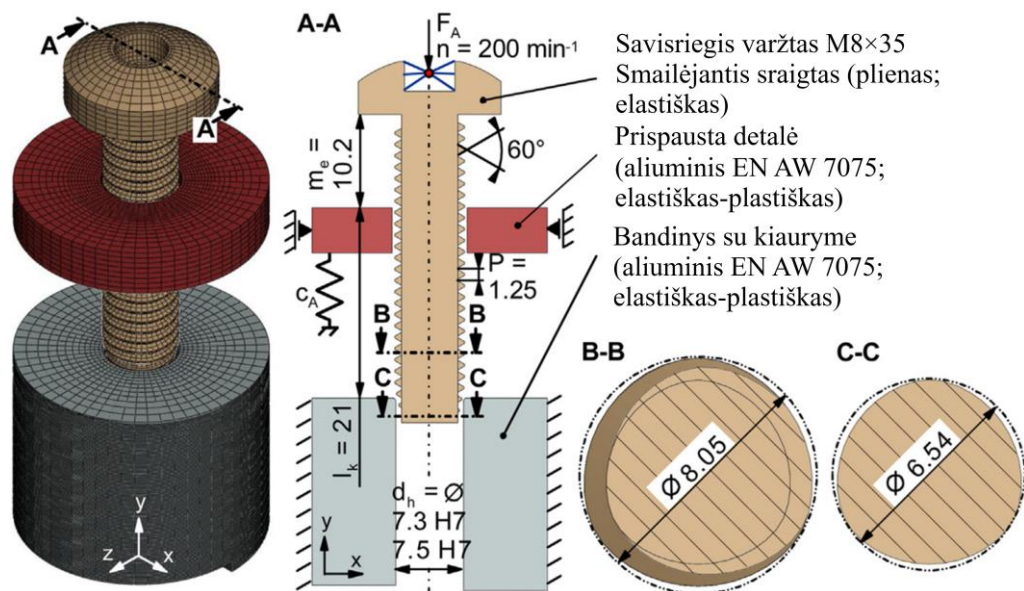
1. Įspaudimo sukimo momentas, atsirandantis dėl slėgio pasiskirstymo suformuotuose sriegio šonuose,
2. Trinties sukimo momentas, atsirandantis dėl trinties suformuotuose sriegio šonuose,
3. Įspaudimo sukimo momentas, atsirandantis dėl slėgio pasiskirstymo suformuoto sriegio viršuje,
4. Trinties sukimo momentas, atsirandantis dėl trinties jėgų suformuoto sriegio viršuje.

Analitiniam modeliui patikrinti buvo atliktas eksperimentinis tyrimas. Gautieji rezultatai koreliuoja su analitiniu modeliu, parodant jo teisingumą. Taip pat pateikiama šio analitinio metodo ribos. Šis modelis neturėtų būti taikomas atvejais, kai nespūdi medžiaga deformuota tarp dviejų sriegio šonų pilnai užpildo ertmę. Tokiu atveju, pagal neslydimo modelį, būtų pernelyg sunku įvertinti kontakto slėgį ir sukimo momentą.

Darbe (Stéphan et al., 2012) detaliau pateikiami to pačio eksperimentinio tyrimo rezultatai. Pateikiamos rekomendacijos pilotinės skylės skersmeniui, naudojant M8 sriegį formuojantį sraigą.

Kitame straipsnyje buvo sudarytas BEM ir dinaminis sriegio formuojančio sraigto modelis (Dinger, 2015). Darbo tikslas buvo sudaryti BEM modelį, norint įvertinti trinties ir pradinės skylės skersmens įtaką sraigto įsukimo momentui. Gautiems rezultatams patikrinti buvo atliktas analogiškas eksperimentinis tyrimas.

BEM analizei atlikti autorius pasirinko naudoti *Dassault Systèmes Abaqus Explicit* programinį paketą. 3D modeliui sudaryti autorius naudojo taip pat *Dassault Systèmes Solidworks* programą, sukurdamas eksperimentinio tyrimo modelio repliką ir po to importuodamas šį modelį į *Dassault Systèmes Abaqus Explicit* programą. Modelis naudotas BEM analizei atlikti yra atvaizduojamas 1.18 paveiksle. Analizės skaičiavimui greičiui paspartinti, autorius pasirinko pakeisti modelio mastelį, taip dirbtinai padidinant proceso greitį.



1.18 pav. Baigtinių elementų modelis su pradinėmis sąlygomis (Dinger, 2015)

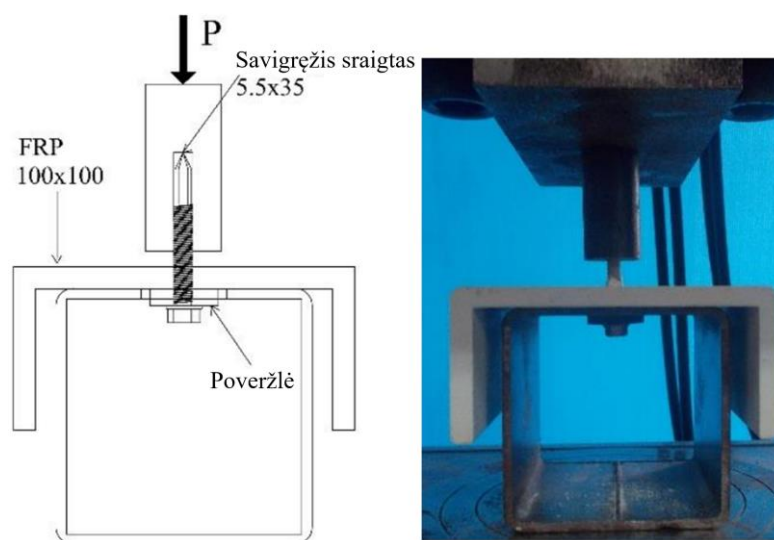
Darbe pasirinkta atlikti analizes su keliais trinties koeficientų dydžiais tarp sraigto ir bandinio – 0,03; 0,04 ir 0,08. O sraigto įsukimo greitis į bandinį yra fiksuoto dydžio – 200 min^{-1} .

Taip pat aprašoma ir formulė, leidžianti suskaičiuoti sukimo momentą reikalingą įsukti sriegį formuojantį sraigą į bandinį.

Atlikus BEM analize, pateikiama keletas vaizdinių grafikų su susidarančiais įtempiais bei temperatūromis sraigto sukimo metu. Iš grafikų matoma, kad įtempiai susidaro daugiausiai dėl deformuojamos medžiagos skylėje, kai medžiaga pasislenka link sraigto pašaknų. O temperatūra susidariusi bandinio medžiagoje koncentruojasi ties sraigto sriegio viršūnėmis, dėl didelės energijos reikalingos deformuoti medžiaga bei trinties. Šiame straipsnyje gautieji eksperimentiniai ir BEM rezultatai yra labai artimi ir parodo, kad kvazistatinės BEM analizės yra tinkamas įrankis analizuoti tokius sujungimus, neatliekant eksperimentinių tyrimų.

Duong et al. (2018) publikuotame straipsnyje yra tiriama savigręžio sraigto ištraukimo jėga iš plastikinio bandinio. Autorius tyrimui atlikti pasirinko eksperimentinį ir BEM analizės metodus.

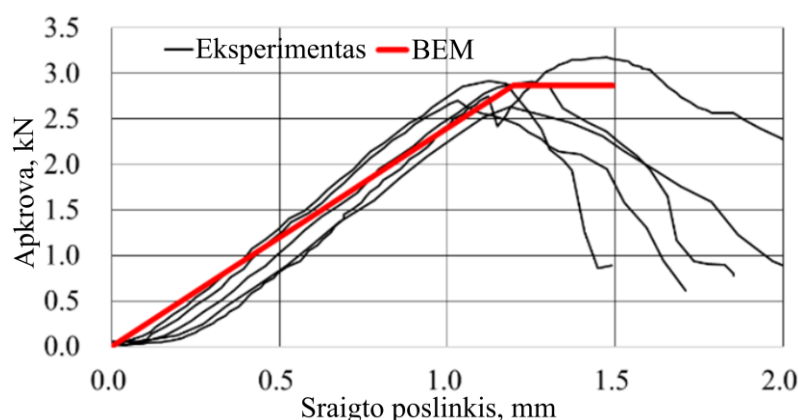
Eksperimentiniui tyrimui atlikti pasirinkta naudoti C tipo profiliai, pagaminti iš stiklo pluošto sustiprinto plastiko. Į šiuos profilius įsukti savigręžiai sraigai su elektriniu suktuvu. Kiekvienas sraigtas buvo priveržiamas iki 15 Nm sukimo momento, taip siekiant nesugadinti bandinių. Tarp kiekvieno sraigto ir bandinio buvo naudojamos poveržlės, kadangi sraigto sriegis nesiekė sraigto galvos. Bandymo schema ir stendas pateikiami 1.19 paveiksle.



1.19 pav. Eksperimento schema ir ruošinys testavimo stende (Duong et al., 2018)

Eksperimente savigręžio sraigto ištraukimui pamatuoti, jėga nebuvo perduodama per sraigto galvą. Kaip schemoje pateikta, jėga stende buvo perduodama nuo sraigto galą, spaudžiant jį į plastinį ruošinį, kuris buvo atremtas į stendo stalą. Tokiu būdu buvo išvengta labiau komplikOTOS testavimo metodikos, kai sraigtas yra traukiamas iš bandinio, perduodant jėga traukimui per sraigto galvą.

Buvo atlikti penki eksperimentiniai bandymai. Tarp keturių eksperimentinių bandymų, gautieji rezultatai turi mažą nuokrypį tarpusavyje, išskyrus vieną bandinį, kurio maksimali jėga ir poslinkiai buvo didesnės už likusiasias. Maksimali pasiekta apkrovos reikšmė buvo 3,18 kN, o mažiausia – 2,64 kN. Atlikta BEM analizė davė labai panašius rezultatus į gautuosius eksperimentiškai. Rezultatai yra palyginami 1.20 paveiksle.

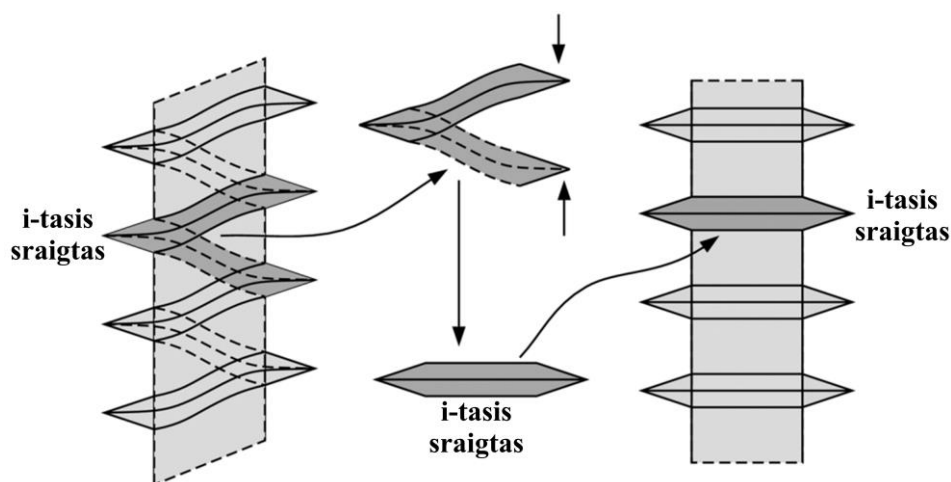


1.20 pav. Eksperimentinio tyrimo gauti rezultatai lyginami su baigtinių elementų analizės duomenimis (Duong et al., 2018)

Minėtame straipsnyje, gautieji eksperimentiniai duomenys sutampa su gautaisiais rezultatais atliekant BEM analizę. Tai parodo, kad pasirinktas analizės metodas yra teisingas. Tačiau straipsnyje trūksta informacijos apie metodiką, kuri buvo taikyta per pačią kompiuterinę programą.

Ellwood et al. (2004) publikuotame straipsnyje yra aprašomas BEM analizės metodas, skirtas išanalizuoti ST sraigtus formuojantis sriegiui plastike. Pagrindinis tikslas buvo sudaryti tinkamą modelį, skirtą analizuoti ST sraigtų susidarusius įtempius bei temperatūras. Analizei sudarytas modelis tikrinamas atliekant eksperimentinius tyrimus.

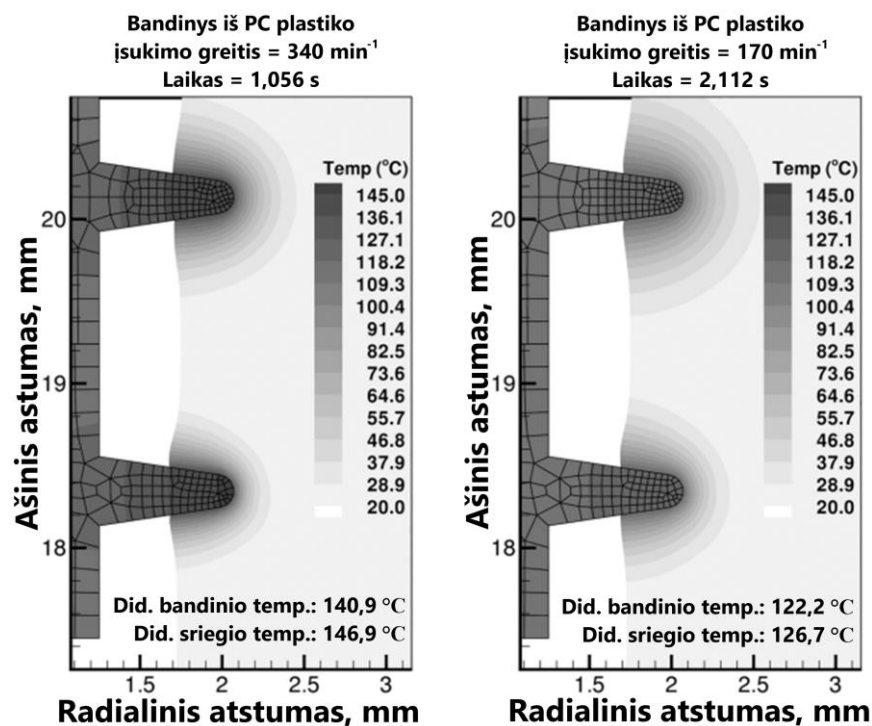
Analizei atlikti, buvo pasirinkta *Deform DEFORM-2D* programa. ST sraigto profilį buvo nuspręsta supaprastinti. Vietoje spirale einančio sraigto, sraigto profilį nuspręsta sumodeliuoti kaip cilindrinį. Kadangi, programa yra paremta kaip dviejų dimensijų skaičiuoklė, dėl to supaprastintas ST sraigto profilis buvo suprojektuotas ant plokštumos. Taip pat profilis yra simetriškas savo ašies atžvilgiu, dėl to buvo pasirinkta analizuoti tik vieną jo pusę. Profilio supaprastinimo modelis yra pateiktas 1.21 paveiksle.



1.21 pav. Analizėje pritaikytas savisriegio profilio supaprastinimas (Ellwood et al., 2004)

Autoriai pasirinko tolimesnius tyrimus atlikti su PC ir PP plastikais. Šiems plastikams buvo atlikti bandymai, norint ištirti jų mechanines savybes. Kitiems dydžiams kaip trinties koeficientas, prie skirtingų apkrovų, buvo pasitelkti išoriniai duomenų šaltiniai. ST sraigtui buvo aprašyta tik savitosios šilumos talpa ir šilumos laidumas, o kiti mechaniniai dydžiai nebuvo aprašomi, kadangi analizėje tariama, kad ST sraigtas nesideformuos.

ST sraigtas analizėje buvo įsukamas į polikarbonato bandinį, dviem skirtingais – 170 ir 340 min⁻¹ greičiais. Pradinė sąveikaujančių kūnų temperatūra buvo nustatyta 20 °C. Analizėje nuspręsta atlikti bandymus su dviem variacijomis, kai tarp kūnų yra vertinama trintis ir kai trintis nėra vertinama. Esant 340 min⁻¹ įsukimo greičiui ir nevertinant trinties, temperatūra po įsukimo pakilo 15 °C nuo pradinės temperatūros – šis mažas pokytis atsiranda dėl vidinių plastiko deformacijų. Esant tokiam pačiam greičiui, tačiau vertinant trintį, galutinė temperatūra šokteli beveik 9 kartus daugiau – pasiekia galutinę 147 °C temperatūrą. Rezultatai gauti atlikus analizę yra pavaizduoti 1.22 paveiksle.



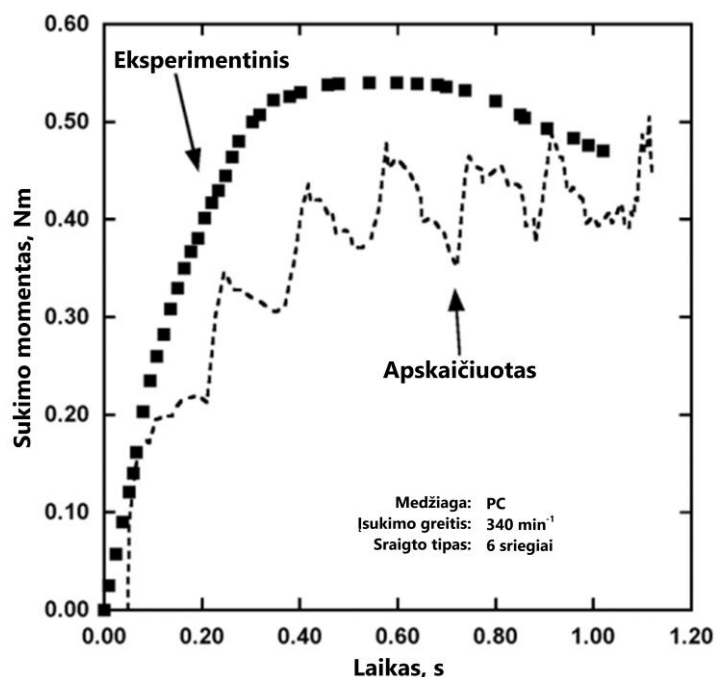
1.22 pav. Temperatūros susidarančios esant skirtingiems įsukimo greičiams (Ellwood et al., 2004)

Atlikti bandymai su dvigubai lėtesniu 170 min⁻¹ greičiu, parodė galutinių temperatūrų sumažėjimus, kurie siekė 20 °C. Kadangi, reikalinga energija įsukti ST sraigą prie mažesnio greičio nesumažinama, dėl to bandinys įgauna tiek pat energijos. Tačiau esant dvigubai mažesniai greičiui, šios energijos dalis spėja išsispinduliuoti į aplinką, dėl to matomas nežymus galutinės temperatūros kritimas.

Atlikta ST sraigto prasukimo analizė parodė, kad temperatūra, šio proceso metu yra pasiekama 147,8 °C. Atlikti infraraudonosios spinduliuotės matavimai prie eksperimentinio bandinio parodė didžiausią 150 °C temperatūros išraišką. Šis matavimas patvirtina gerą BEM analizės ir eksperimentinių duomenų koreliaciją.

BEM analizėje taip pat buvo gautos ir teorinės sukimo momento išraiškos, kurios reikalingos įsukti ST sraigą į bandinį. Šios teorinės reikšmės yra lyginamos kartu su eksperimentiškai gautomis. Apkrovos keitiklis buvo panaudotas gauti sukimo momento reikšmėms realiu laiku. ST sraigtas buvo sukamas fiksuotu 340 min⁻¹ greičiu. Gauti duomenys yra pateikiami 1.23 paveiksle.

Aukštas sukimo momento kilimas pradėjus sukti ST sraigą yra aiškinamas dėl smailėjančio ST sraigto priekio. Kai ST sraigtas yra sukamas gilyn į plastiką, šis yra vėsus, ir taip aušina ST sraigą. O plastikas, kuris jau patyrė deformacijas ir yra aukštesnės temperatūros, aušinamas ST sraigto, kuris yra sukamas toliau. Esant šiems temperatūrų skirtumams, plastikas aušdamas traukiasi ir sudaro vidinius įtempimus, kurie padidina pasipriešinimo jėgas.



1.23 pav. Eksperimentiniai ir teoriniai duomenys (Ellwood et al., 2004)

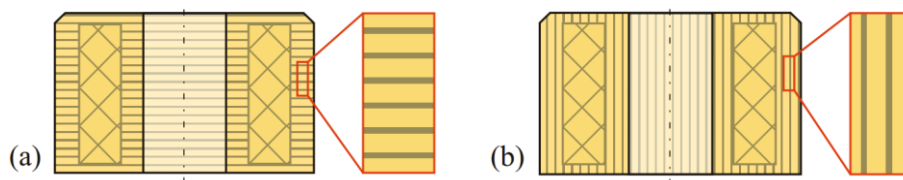
1.2.3D spausdintų medžiagų mechaninių savybių tyrimai

Kastner et al. (2023) publikuotame straipsnyje yra atliekamas metalinių įstatomų sriegių ištraukimas bandymas iš 3D spausdintų detalių, taikant įvairius spausdinimo parametrus. Tyrimas atliktas naudojant eksperimentinį metodą.

Autoriai šiame tyrime naudojo *Ultimaker 3+* 3D spausdintuvą bei spausdino iš aukštos kokybės ir gerų mechaninių savybių *Extruder GreenTEC Pro* plastiko, kuris yra pagamintas naudojant biopolimerą ligniną. Šis spausdintuvas turėjo uždara spausdinimo kamerą, dėl to bandiniai buvo spausdinami uždaroje erdvėje, eliminuojant aplinkos veiksnius.

Šiame straipsnyje nuspręsta keisti keturis bandinių spausdinimo parametrus: detalės užpildymą, sienelės storį, detalės spausdinimo aukštį bei spausdinimo temperatūrą. Detalės užpildymui buvo pasirinktas grotelių tipo užpildymas su trimis skirtingo užpildymo dydžiais – 30, 50 ir 70 % užpildymu. Bandinių sienelių storiai buvo pasirinkti 1,2 mm, 2,4 mm ir 3,2 mm storio, atitinkamai 3, 6 ir 8 sienelėmis. O bandinių vieno sluoksnio spausdinimo aukštis buvo 0,1 mm, 0,2 mm ir 0,3 mm.

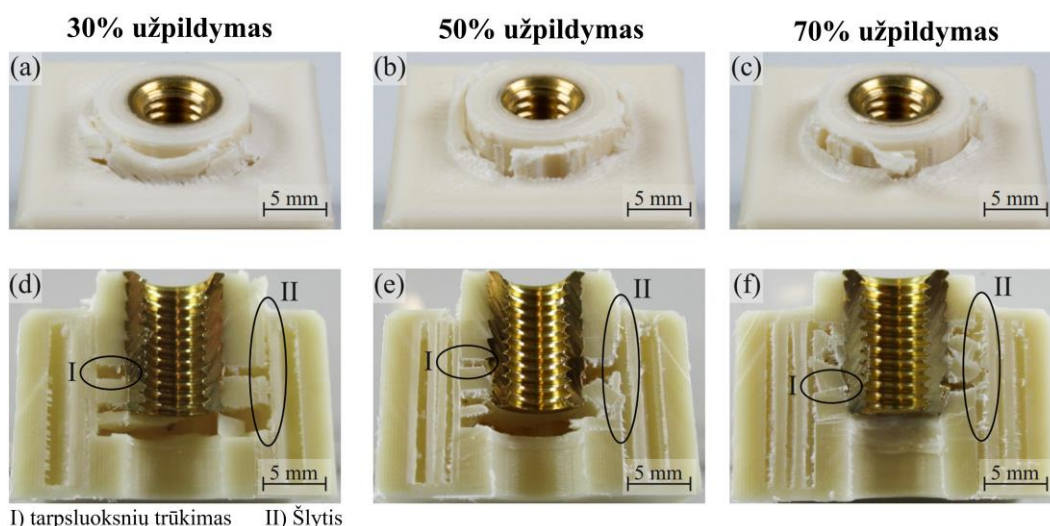
Tyrime buvo parinktas vienas iš dviejų galimų bandinių spausdinimo orientacijų (žr. 1.24 pav.). Bandiniai gali būti spausdinami taip, kad įstatomas sriegio ašis būtų statmena detalės sluoksniams (a) arba paraleli (b). Tačiau bandiniai, kurie buvo spausdinami statmena įstatomo sriegio ašies kryptimi parodė geresnius rezultatus ištraukimo bandyme ir rezultatai buvo tolygesni ir labiau nuspėjami, dėl to tyrime buvo pasirinktas ši spausdinimo kryptis.



1.24 pav. Bandinių spausdinimo sluoksnių iliustracija: (a) sluoksnių orientacija x-y plokštumoje
(b) sluoksnių orientacija x-z plokštumoje (Kastner et al., 2023)

Ištraukimo bandymui atlikti buvo naudojama universali testavimo įranga *ZwickRoell Zwick 1465*. Bandiniams įtvirtinti testavimo mašinoje nebuvo naudojami spaustuvai, tačiau bandiniai buvo atremiami į stacionarią plokštę. Norint išlaikyti pastovią apkrovą bandiniams, buvo naudojamas vienodo greičio įstatomo sriegio ištraukimas – 2 mm/min.

Atlikus bandymus, aiškiai matoma, kad mažesnis spausdintos detalės užpildymo dydis neigiamai veikia maksimalios įstatomo sriegio ištraukimo jėgos vertes. Esant mažesniai užpildymo tankiui, įvyksta daugiau tarp sluoksnių trūkių ir šlyties (1.25 pav.). Esant didesniam detalės užpildymui, pastebimas didesnės paties plastiko plastinės deformacijos.



1.25 pav. Pavyzdiniai bandymų serijos bandiniai su skirtingu bandinių užpildymo tankiu: viršutinis vaizdas (a–c) ir pjūvio vaizdas (d–f) (Kastner et al., 2023)

Bandyme keičiant spausdinamos sienelės storį, įstatomo sriegio poslinkis prie kritinės ištraukimo jėgos buvo praktiškai identiškas. Tačiau darbe pastebima, kad padidinus sienelės storį nuo 1,2 mm iki 2,4 mm, matomas kritinės ištraukimo jėgos padidėjimas nuo 1,0 kN iki 1,5 kN. Tačiau tolimesnis sienelės storio padidėjimas iki 3,2 mm neparodė geresnių rezultatų. Dėl to einama prie išvados, kad įstatomiems sriegiams į bandinį turi būti keliamas minimalus sienelės storio reikalavimas.

Tyrime taip pat buvo nagrinėjama spausdinimo sluoksnio aukščio įtaka ištraukimo jėgos dydžiui. Kai sluoksnio dydis buvo 0,1 mm, ištraukimo jėgos mediana buvo 1,6 kN, sluoksnio dydžiui

esant 0,2 mm, ištraukimo jėgos mediana buvo 1,5 kN, o esant 0,3 mm sluoksniui, mediana krito iki 1,3 kN.

Tyrimo buvo pasirinkta atlikti bandymus su dviem skirtingomis bandinių spausdinimo temperatūromis. Esant 225 °C spausdinimo temperatūrai, maksimali ištraukimo jėgos mediana buvo apie 1,5 kN, tuo tarpu, bandiniai atspausdinti naudojant 210 °C temperatūrą parodė mažesnius rezultatus – mediana nukrito iki 1,2 kN.

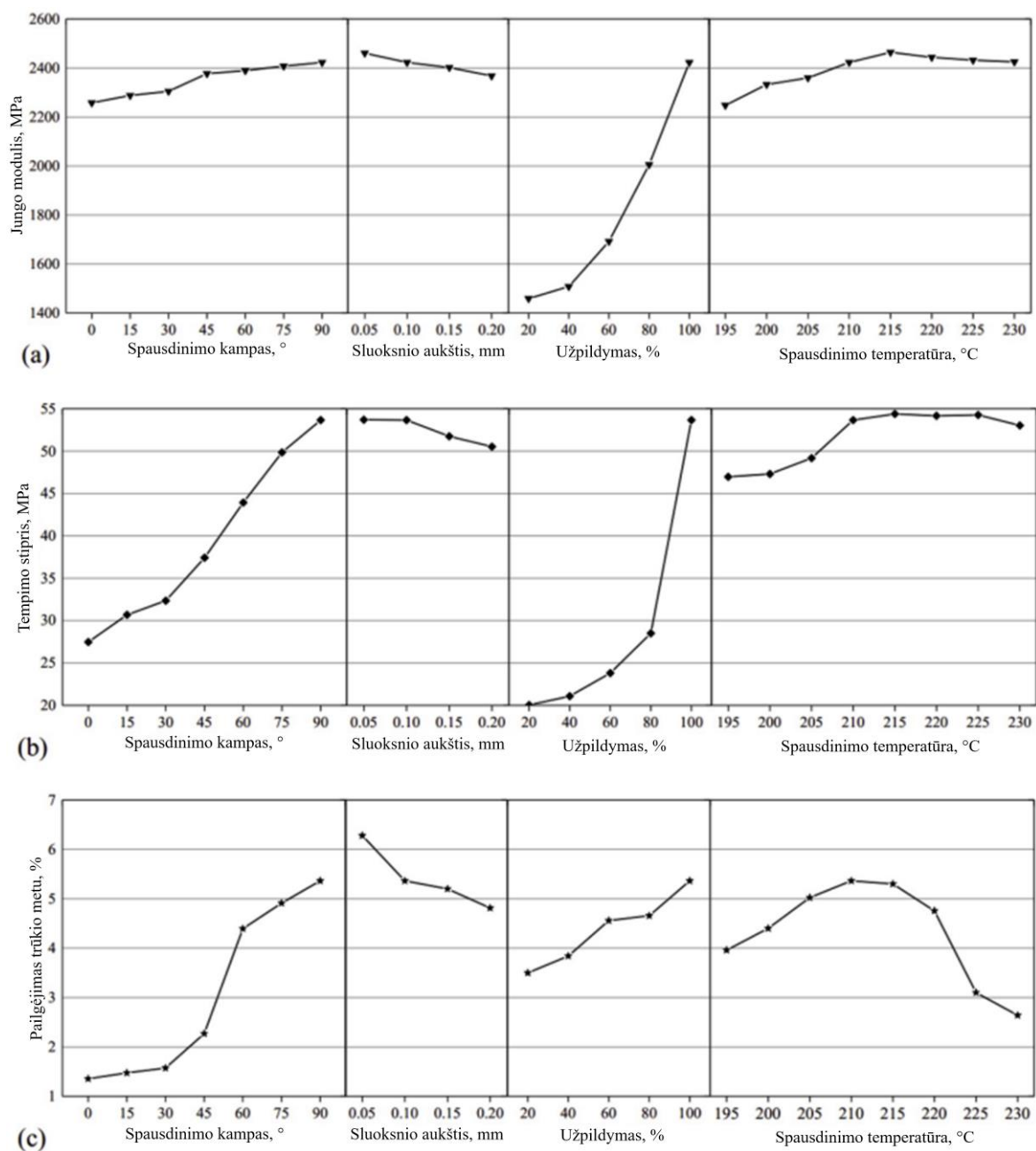
Daugelyje straipsnių yra analizuojamos plastikų savybės su skirtingais spausdinimo parametrais spausdinant lydytojo nusodinimo modeliavimo (FDM) metodu. Dažniausiai sutinkami rinkoje plastikai skirti spausdinimui yra polilakto rūgštis (PLA) ir polietileno tereftalato glikolis (PETG). Šie plastikai pasižymi maža kaina, nesudėtingu spausdinimu bei galutinių matmenų tikslumu po spausdinimo.

Wang et al. (2020) publikuotame straipsnyje yra tiriama spausdinimo kampo ant padėklo, spausdinimo sluoksnio, detalės užpildymo bei spausdinimo antgalio temperatūros įtaka detalių mechaninėms savybėms.

Šiame tyrime buvo naudojamas *Raise3D Pro2 Plus* 3D spausdintuvas. Viso tyrimu metu buvo naudojamas vienas *Polymaker* prekinio ženklo, 1,75 mm skersmens PLA plastikas. Buvo nuspręsta naudoti fiksuotus spausdinimo parametrus kaip spausdinimo greitis, padėklo temperatūra bei užpildymo tipas. Gautieji rezultatai, atlikus eksperimentinius bandymus, rodo, kad detalės, kurios buvo spausdinamos gulsčiai ant padėklo turi geriausią tempimo stiprumą, tamprumo modulio ir pailgėjimo lūžio metu savybes. Didesnis detalės užpildymo procentas bei mažesnis spausdinimo aukštis rodo geriausius rezultatus. Tuo tarpu, spausdinimo temperatūra neturi labai aiškių tendencijų mechaninėms savybėms. Iš grafikų galima matyti, kad 215 °C spausdinimo temperatūra šiame tyrime turėjo geriausią kompromisą tarp visų trijų lyginamųjų mechaninių savybių (žr. 1.26 pav.).

Özen et al. (2021) publikuotame straipsnyje autoriai BEM analizės metodu atlieka bandymus su 3D spausdinto plastiko persidengimo parametrais. Rezultatai toliau yra palyginami su eksperimentiškai gautaisiais. Tyrimo fokusuojamasi į plastiko persidengimą, jį spausdinant. Šis persidengimas išsprendžia problemą spausdinant detales, kai detalės lieka porėtos su oro tarpeliais. Šis porėtumas tiesiogiai mažina galutinių detalių stiprumą. Problemos, su kuriomis yra susiduriama spausdinant yra iliustruojamos 1.27 paveiksle.

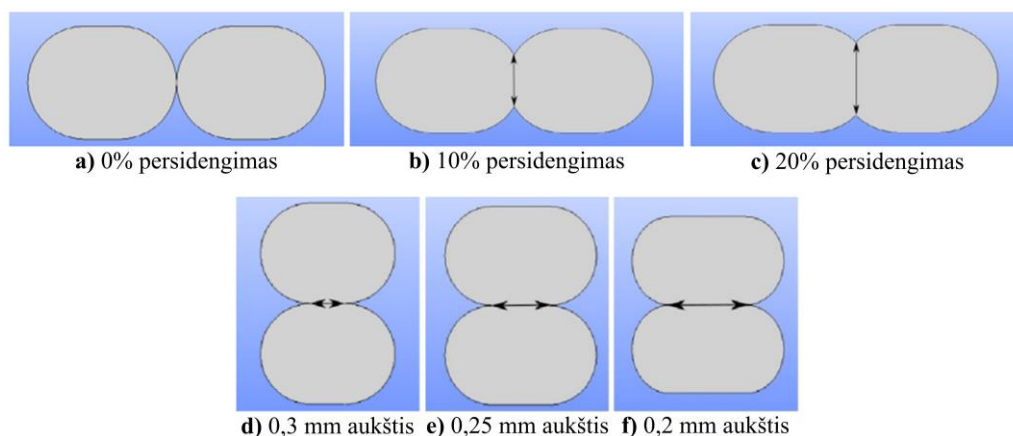
Eksperimentiniui tyrimui atlikti buvo naudojamas *Materials4Print* prekinio ženklo, 2,85 mm skersmens PETG plastikas. Bandiniai buvo spausdinami su *Ultimaker* 3D spausdintuvu. Šio plastiko mechaninės savybės buvo gautos iš plastiko gamintojo.



1.26 pav. Skirtingų spausdinimo parametrų palyginimas (Wang et al., 2020)

Esant skirtingiems spausdinimo sluoksniu aukščiams, skirtingiems persidengimo lygiams, gauti įvairaus porėtumo detalės. Autoriai atliko teorinius porėtumo skaičiavimus iš nubraižytos detalės naudojant kompiuterines programas. Vėliau, detalių porėtumas buvo patikrintas eksperimentiškai. Detalės buvo atspausdintos su skirtingais persidengimo lygiais ir šias perpjovus, su mikroskopo ir kompiuterinės programos pagalba, buvo rastas porėtumo lygis.

Vėliau, bandiniai, kurie buvo atspausdinami pagal ISO 527-2:2012, buvo įstatomi į Zwick 1446 testavimo mašiną, kur bandiniams buvo atliekami tempimo bandymai. Eksperimentiškai gautieji tamprumo modulio rezultatai yra lyginami su gautaisiais iš BEM analizės 1.3 lentelėje.



1.27 pav. Plastiko persidengimas spausdinant (Özen et al., 2021)

Pagal gautuosius rezultatus, matoma, kad porėtumas tiesiogiai mažina detalių stiprumą. Mažiausias porėtumas detalėse buvo gautas, kur sluoksnio aukštis buvo mažiausias ir persidengimo lygis buvo aukščiausias. Tad norint išlaikyti detalių stiprumą ir savybes artinti prie detalių, kurios yra išliejamos, turėtų būti siekiama mažinti detalių porėtumą. Tačiau didesnis persidengimo lygis spausdinant gali sukelti paviršiaus deformacijas ir mažinti galutinių detalių matmenų tikslumą dėl didesnio išstumiamo plastiko kiekio, per spausdintuvo antgalį.

1.3 lentelė. Eksperimentinių rezultatų palyginimas su baigtinių elementų analize (Özen et al., 2021)

Eksperimentiniai rezultatai		Baigtinių elementų analizės rezultatai	
Porėtumas, %	Tamprumo modulis, MPa	Porėtumas, %	Tamprumo modulis, MPa
0,271	2055	2,243	2052
0,502	1996	4,138	2008
0,823	1969	5,027	1992
1,409	1921	6,29	1959
1,541	1915	7,354	1938
2,88	1851	9,761	1883
3,274	1841	10,09	1882
6,349	1790	12,547	1826
9,34	1756	14,975	1769

Hsueh et al. (2021) publikuotame straipsnyje yra analizuojama PLA ir PETG plastikų mechaninės savybės spausdinant juos su skirtingais parametrais (Hsueh et al., 2021). Tyrime analizuojami eksperimentiškai gauti plastikų tempimo, gniuždymo ir lenkimo rezultatai.

Spausdintuvas naudotas tyrime buvo *Infinity 3DP X1E*. Antgalis naudotas spausdinimui buvo 0,4 mm skersmens. Abiejų tipų plastikai buvo naudojami *Min-Yau Information* prekinio ženklo. Plastikai prieš spausdinimą buvo laikomi drėgmės kontroliavimo dėžėje, kad plastikai išliktų sausi.

PLA plastikui gamintojo rekomenduojami spausdinimo parametrai yra 180–210 °C temperatūra antgalyje, o rekomenduojamas spausdinimo greitis 30–50 mm/s. PETG plastikui gamintojo rekomenduojama antgalio temperatūra yra 215–235 °C, o greitis 30–50 mm/s.

Straipsnio autoriai pasirinko analizuoti bandinius esant fiksuotam 20 % detalių užpildymui, kurio raštas buvo kryžminis tiesiaiegis, o spausdinamo sluoksnio aukštis – 0,2 mm. PLA plastikui pasirinkta keisti antgalio temperatūros parametrus 180 ir 220 °C režiuose, o spausdinimo greitį varijuoti tarp 35 ir 45 mm/s. PETG plastikui temperatūra buvo keičiama 225 ir 245 °C režiuose, o spausdinimo greitis buvo tarp 25 ir 35 mm/s. Tyrimo rezultatai rodo, kad šiek tiek didesnis spausdinimo greitis su PLA plastikų duoda aukštesnės kokybės detales, kurios turi didesnį Jungo modulį, aukštesnį atsparumą tempimui, lenkimui bei gniuždymui. Tuo tarpu, spausdinimo temperatūra, ne kaip spausdinimo greitis, neturi vienareikšmiškų rezultatų. Atliekant tris bandymus, Jungo modulis aukščiausias būna prie skirtingų spausdinimo temperatūrų.

Bandymai su PETG plastikų rodo labai vienareikšmiškus rezultatus, kad mažesnis spausdinimo greitis ir aukštesnė temperatūra duoda aukštesnį Jungo modulį, didesnį atsparumą tempimui, gniuždymui ir lenkimui.

1.3. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Atlikus panašios literatūros analizę, matoma, kad ST sraigčiai jau buvo nuo senų laikų mokslininkų dėmesio akiraityje. Iki šiol, matoma, kad buvo sėkmingai sudaryti teoriniai modeliai, paaiškinantys ST sraigtų sąveiką su bandiniais, nurodantys kokios trinties jėgos veikia, kokios dedamosios sudaro reikalingą s ST sraigto įsukimo momentą į apvalią kiaurymę. Modeliai taip pat pateikia formules bei grafikus, pagal kuriuos galima nuspėti būsimas įsukimo momento išraiškas, rekomenduojamą priveržimo momentą, tarpinio kūno priveržimą, kritines ST sraigto ištraukimo jėgas (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997; Seneviratne et al., 2001). Dauguma šių straipsnių yra atlikę eksperimentinius tyrimus, kurie patvirtina šių modelių teisingumą su atitinkama paklaida.

Atlikti eksperimentiniai tyrimai jau pateikė didelį kiekį rekomendacijų. Autoriai plačiai išnagrinėję ST sraigtų sriegio profilio įtaką sujungimo mechaniniams parametrų. Taip pat randama pačių įsukimo parametrų rekomendacijų, kaip įsukimo greitis ar pradinės skylės skersmuo.

Matoma, kad autoriai vis dažniau naudoja BEM analizės metodus, kurių rezultatai yra ypač artimi eksperimentiškai gautiesiems. Ši rezultatų aukšta sutaptis parodo, kad BEM yra puikiai tinkanti priemonė analizuoti tokius ST sraigtų sujungimus. Atliktos analizės pateikia tolimesnes rekomendacijas ST sraigtų įsukimo charakteristikoms (Cumbicus et al., 2021; Ellwood et al., 2004; Mathurin et al., 2009; Nam et al., 2022).

Taip pat populiarėjant 3D spausdinimo technologijai, matoma, kad autoriai plačiai analizuoja spausdinimo parametrų charakteristikas (Hsueh et al., 2021; Wang et al., 2020). Literatūroje rasta spausdinto plastiko mechaninių savybių apibrėžimas pagal medžiagos porėtumą ir panaudojimas BEM analizėse, kaip izotropinės medžiagos (Özen et al., 2021). Taip pat, pastebima, kad tyrimuose

naudotos medžiagos yra artimų mechaninių savybių šiame darbe naudotosioms. Kadangi, 3D spausdintuvai turi galimybes pagaminti sąlyginai aukštos kokybės detales, dėl to populiarėja šių spausdintų gaminių panaudojimas praktikoje ir moksle. Dėl vis panašėjančių charakteristikų kaip pramonėje išlietas plastikas, 3D spausdintos detalės palengvina mokslininkų darbą, atliekant tyrimus, kai reikalingi plastiko ruošiniai.

Tačiau iš analizės matyti, kad visuose darbuose visi ST sraigtų ruošiniai įsukimui buvo vienodi – visi ruošiniai turėjo apvalias skyles. Pasigendama ruošinio ST sraigtui įsukti skylės profilio variacijų – skylės profilio analizės. Taip pat trūkstama informacijos apie ST sraigto ištraukimui iš plastiko apskaičiavimo galimybių naudojantis BEM, kai yra įvertinamas ir nubraižomas suformuotas sriegis plastike.

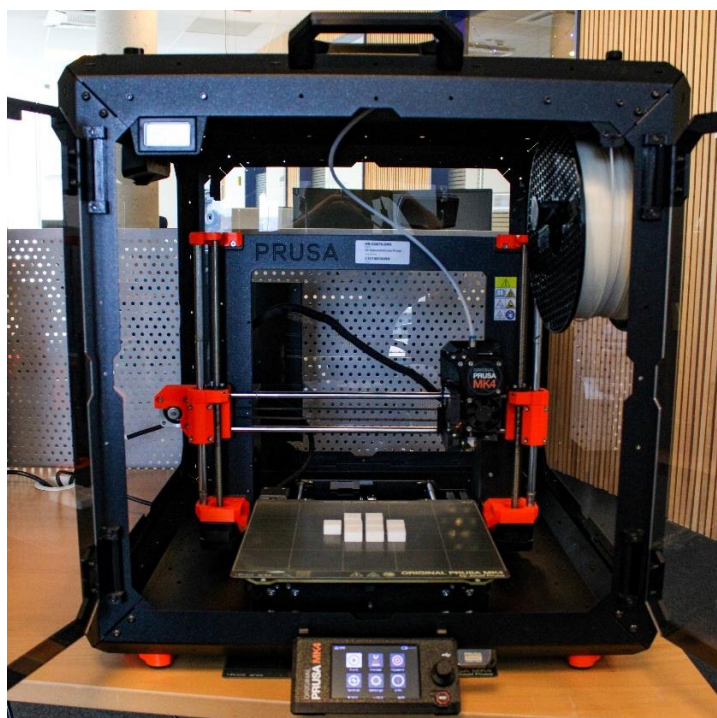
2. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Eksperimentiniame tyrime siekiama nustatyti dvijs priklausomybes: ST sraigto užveržimo momento dydį nuo ST sraigto poslinkio bei ST sraigto pasipriešinimo ištraukimo iš ruošinio jėgos priklausomybę nuo ST sraigto poslinkio. Dėl to šis eksperimentinis tyrimas gali būti padalintas į tris pagrindines dalis – bandinių paruošimą, ST sraigto įsukimo bei jo ištraukimo bandymą.

2.1. Ruošinių bandymui parengimas

Pirmiausia turi būti paruošiami bandiniai į kuriuos reikės įsukti ST sraigtus. Bandiniai bus gaminami dviejų skylių profilių konfigūracijų – apvalaus ir kvadratinio profilio skylės. Taip pat naudojami dviejų skirtingų medžiagų ruošiniai bei varijuojami šių skylių dydžiai.

Bandiniams ruošti bus naudojamas *Prusa Original MK4* 3D spausdintuvas (žr. 2.1 pav.). Šis spausdintuvas yra parinktas dėl didelio populiarumo rinkoje, gerų spausdinimų charakteristikų ir sąlyginai nedidelės kainos. Taip pat šis spausdintuvas turi uždara spausdinimo erdvę, kuri leis eliminuoti išorinius veiksnius siekiant aukštesnės kokybės spausdintų ruošinių.



2.1 pav. *Prusa Original MK4* spausdintuvas su uždara dėže

Ruošiniams paruošti bus naudojami dviejų skirtingų tipų medžiagos – PLA ir PETG plastikai. Šie plastikai buvo pasirinkti dėl gerų matmenų išlaikymo tikslumo po spausdinimo bei nesudėtingo spausdinimo. Taip pat šiems plastikams straipsniuose yra pateikiama nemažai spausdinimo rekomendacijų. Abiejų plastikų gamintojas yra *Prusa Polymers*. Šių plastikų techninės charakteristikos yra

aprašytos priede A, pagal gamintojo nurodytus techninius parametrus (Prusa Polymers, 2022a, 2022b).

Kadangi plastikai turi savybę sugerti drėgmę iš aplinkos, remiantis tyrimų praktika (Hsueh et al., 2021), prieš spausdinimą plastikas yra džiovinamas. Tam naudojamas *Sunlu FilaDryer S2* džiovintuvas (žr. 2.2 pav.). PLA džiovinamas mažiausiai 6 valandas išlaikant šį plastiką 45 °C temperatūroje. PETG plastikas džiovinamas analogiškai mažiausiai 6 valandas, tačiau išlaikant šį plastiką aukštesnėje 60 °C temperatūroje. Džiovinimo temperatūros parinktos, kad nesiektų plastiko stiklo virsmo temperatūros, taip išlaikant spausdinimui reikalingus tikslius plastiko gijos matmenis.

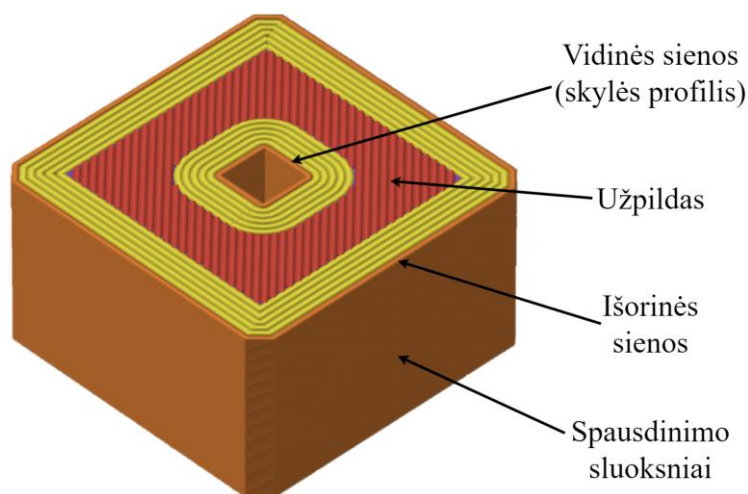


2.2 pav. *Sunlu FilaDryer S2* plastiko džiovintuvas

Atsižvelgus į prieš tai atliktus tyrimus (Hsueh et al., 2021; Özen et al., 2021; Wang et al., 2020), naudojami rekomenduojami spausdinimo parametrai, siekiant išgauti geriausią rezultatą spausdinant ruošinius. Visos detalės spausdinamos 0,05 mm aukščio sluoksniu. Detalė spausdinama taip, kad spausdinimo sluoksniai būtų statmeni ST sraigto įsukimo kryptčiai (Kastner et al., 2023). Detalės pilnai užpildomos plastikų linijiniu būdu, kiekviename sluoksnyje užpildymo kryptį pasukant 90° kampu. Bandinys spausdinamas su šešiomis išorinėmis ir vidinėmis sienelėmis, kurių storis siekia 2,54 mm (žr. 2.3 pav.). Plastiką spausdinamas naudojant Ø0,4 mm skersmens antgalį ir gija spausdinimui yra Ø1,75 ± 0,02 mm skersmens. Taip pat spausdinimo temperatūrai parenkamos plastiko gamintojo rekomenduojamos spausdinimo temperatūros ribos viršutinės reikšmės, kurios yra pateikiamos priede A. Didesnė temperatūra spausdinant užtikrina geresnį plastiko sluoksnių susilydymą tarpusavyje. Detalių spausdinimo greitis parenkamas pagal gamintojo nurodytas rekomenduojamas reikšmes.

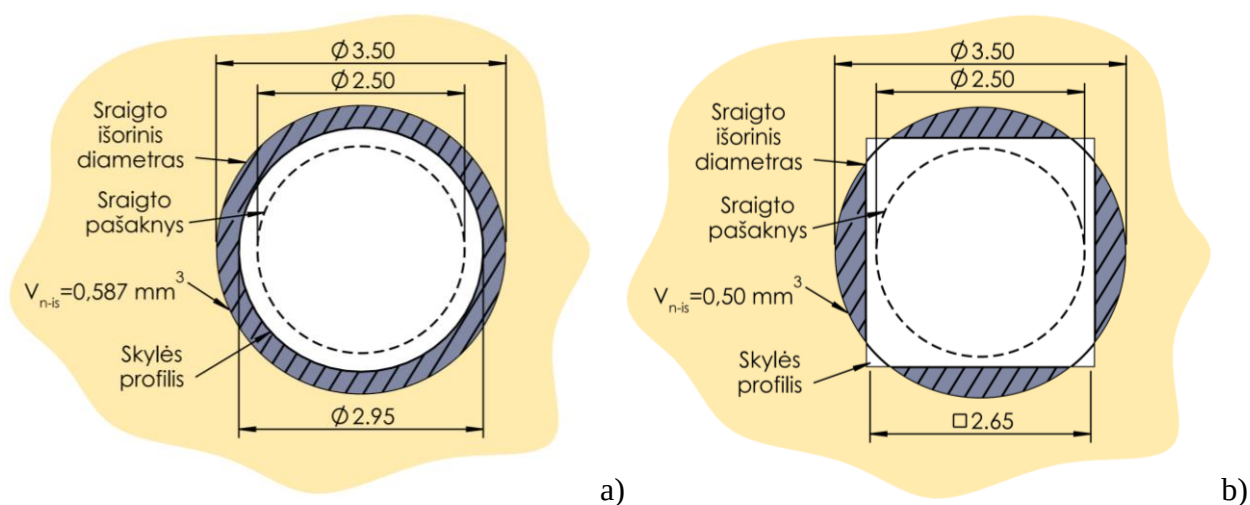
ST sraigtas pasirenkamas pagal LST EN ISO 7049:2011 standartą. Šie ST sraigtai yra pasirenkami tyrimui atlikti dėl jų dažno naudojimo rinkoje ir panašumų su tyrimuose naudotaisiais sraigtais. Viso eksperimento metu naudojami vienodo skersmens ST sraigtai. ST sraigto skersmuo parenkamas Ø3,5 mm, o ST sraigto galva – suapvalinta, su kryžmine įduba suktuvui. ST sraigtas yra pagamintas

iš plieno, pagal LST EN ISO 2702:2023 standartą. Parenkamo ST sraigto žymėjimas pagal standartą yra toks – ISO 7049 – ST 3,5 × L – St – R – H, kai L žymi šio savisriegio ilgį.



2.3 pav. Spausdinamo ruošinio su kvadratine skylė iliustracija

Skylių dydžiai bandiniuose parenkami pagal pasirinktą ST sraigtą. Pagal standartą LST EN ISO 2702:2023 yra nurodomi skylių minimalūs ir maksimalūs skersmenys bandymams atlikti. Rekomenduojamų skylių skersmenys bandymams atlikti su Ø3,5 mm skersmens ST sraigto yra Ø2,92–Ø2,97 mm. Toliau tyrimui pasirenkami trijų skylių dydžiai apvalioms profilio skylėms. Dydžių sklaida yra vienoda į abi puses – į didžiąją bei mažąją, kai vidurinė apvalios profilio skylės reikšmė yra parenkama Ø2,95 mm. Skylės skersmens dydžio žingsnis parenkamas 0,15 mm. Kadangi naudojant kvadratinio profilio skylę kartu su ST sraigto atsiranda kampai, kurių nepasiekia sraigtas, dėl to pati skylė turi būti mažesnė, kad kompensuotų sraigto susikabinimo plotą su bandiniu. 2.4 paveiksle pavaizduoti bandinių skerspjūviai kartu su ST sraigto geometrija.



2.4 pav. Tiriamųjų skylių profilių iliustracijos: a) Ø2,95 mm skersmens apvalaus profilio skylė, b) □2,65 mm dydžio kvadratinio profilio skylė

Pasinaudojus *Dassault Systèmes Solidworks 2022* programos *Mass Properties* funkcija ir apskaičiavus teorinį sraigto išstumiamą tūrį per vieną ST sraigto žingsnio vieneta, gauta, kad ST sraigtas iš 2,65 mm dydžio kvadratinės skylės išstumia panašų plastiko tūrį kaip Ø2,95 mm apvalioje skylėje. Dėl to toliau pasirinkta naudoti keturių dydžių kvadratinės skylės tyrimui. Kvadratinė skylių dydžiai parinkti nuo 2,55 iki 2,85 mm dydžio, kai skylės dydžio žingsnis yra 0,10 mm. Galutiniai ruošinių spausdinimo parametrai yra surašomi į 2.1 lentelę.

2.1 lentelė. Ruošinių spausdinimo parametrai

Parametras	Dydis	Bandymų serija			
		Polilakto rūgšties plastikas (PLA)		Polietileno tereftalato glikolio plastikas (PETG)	
		Apvalaus profilio skylė	Kvadratinio profilio skylė	Apvalaus profilio skylė	Kvadratinio profilio skylė
Spausdinimo antgalio skersmuo	mm	0,40			
Spausdintuvo padėklo temperatūra	°C	60		80	
Spausdinimo temperatūra	°C	220		260	
Spausdinimo greitis	mm/s	20–40		20–40	
Užpildo tipas	–	Tiesia-linijinis			
Užpildo tūris	%	100			
Ruošinio sienelės storis	mm	2,54			
Spausdinimo sluoksnio aukštis	mm	0,05			
Skylės dydis ruošinyje	mm	Ø2,8–Ø3,1	□2,55–□2,85	Ø2,8–Ø3,1	□2,55–□2,85

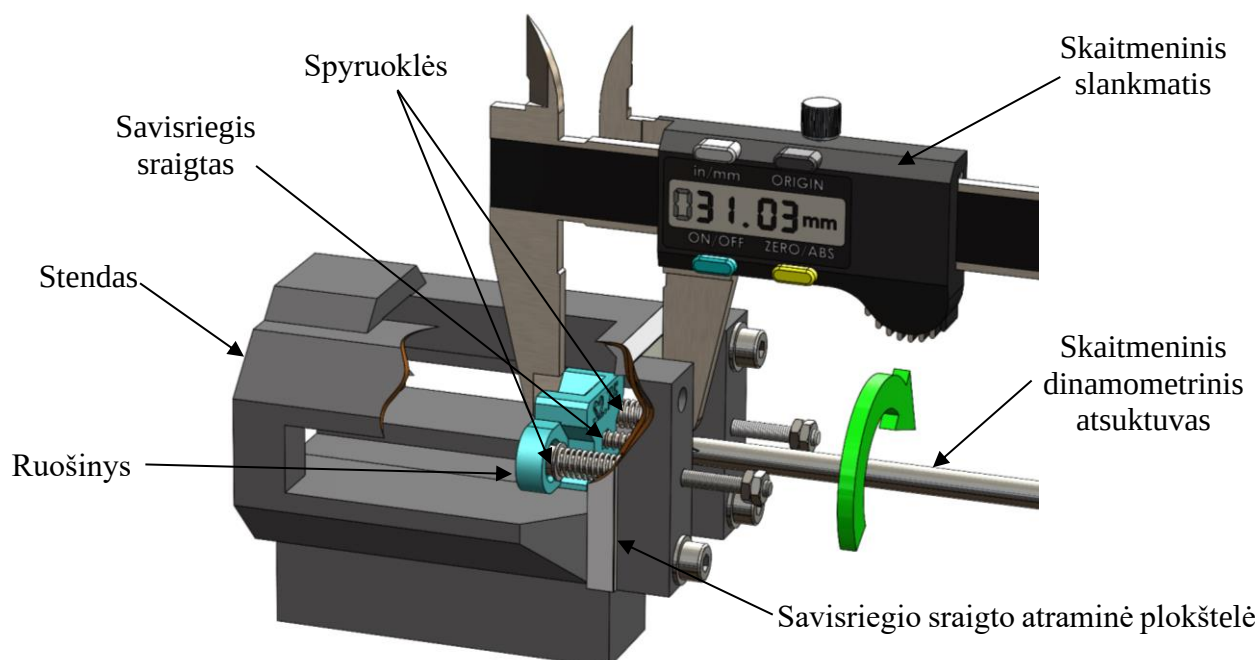
2.2. Savisriegių sraigtų įsukimo bandymas ir įranga

Šiame bandyme siekiama gauti ST sraigto įsukimo momento reikšmės priklausomybę nuo jo įsisukimo gylio. Šis bandymas apima ir maksimalų ST sraigto priveržimo momentą, kada ST sraigtas ruošinyje prasisuka, ir bandinys yra sugadinamas.

Šiam bandymui atlikti naudojamas specialiai suprojektuotas stendas (žr. 2.5 pav.). Stendas suprojektuotas siekiant apriboti bandinio 5-is laisvės laipsnius, leidžiant jam judėti tik ST sraigto ašimi. Taip pat stende naudojamos dvi spyruoklės, kurios stumia bandinį nuo ST sraigto atraminės plokštės. Šios spyruoklės atlieka dvi funkcijas – pirmoji funkcija yra, kad spyruoklės, veikdamos ašine jėga bandinį, imituoja realybėje susidarantią analogišką jėgą, kai atsuktuvą yra spaudžiamas į ST sraigto galvutę ranka. Antroji funkcija yra tai, kad matuojant su skaitmeniniu slankmačiu bandinio poslinkį, šis nejuda ašine kryptimi, leidžiant tiksliau pamatuoti realų poslinkį. Stende naudojamų spyruoklių suminis standumo koeficientas yra 0,6 N/mm. Pradinė pasipriešinimo jėga, kai ST sraigtas pradeda

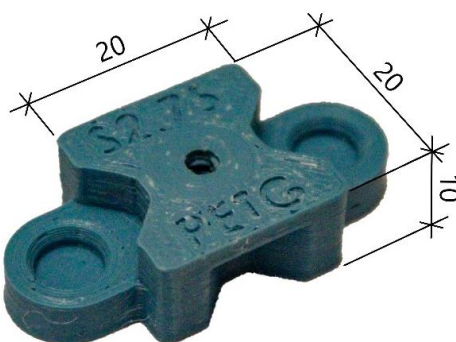
kontaktuoti su bandiniu, yra 3 N, o kraštinė jėga, kai bandinys pasiekia savo eigos pabaigą, yra 8,9 N. Šios spyruoklės naudojamos kartu su visų konfigūracijų ruošiniais.

Šiam stendui yra spausdinamas specialiai suprojektuotas ruošinys, jam turint papildomus atramos taškus kontaktui su spyruoklėmis (žr. 2.6 pav.). Ruošinio testuojamoji dalis yra sudaryta iš kubelio su 20 mm kraštinėmis ir 10 mm aukščiu bei kraštuose esant išpjovoms, pagreitinantioms spausdinimą. Taip pat ruošiniai spausdinimo metu yra žymimi su skylės dydžiu bei naudota medžiaga spausdinimui.



2.5 pav. Savisriegio sraigto įsukimo į bandinį eksperimento stendo iliustracija

Įsukimo bandymui pasirenkamas ST sraigtas, kurio ilgis yra 13 mm. Tad ST sraigto žymėjimas pagal LST EN ISO 7049:2011 standartą yra – ISO 7049 – ST 3,5 × 13 – St – R – H. Kai tiriama ST sraigto ilgis yra 13 mm, o tarpinės atraminės plokštelės storis yra 3,25 mm, tada tiriamojo ST sraigto poslinkio į ruošinį eiga bus iki 9,75 mm. Stende esanti atraminė plokštelė pagaminta iš nerūdijančiojo plieno, užtikrinant stabilesnius matavimo rezultatus bei neleidžiant ST sraigtui plastiškai deformuoti atraminės plokštės.



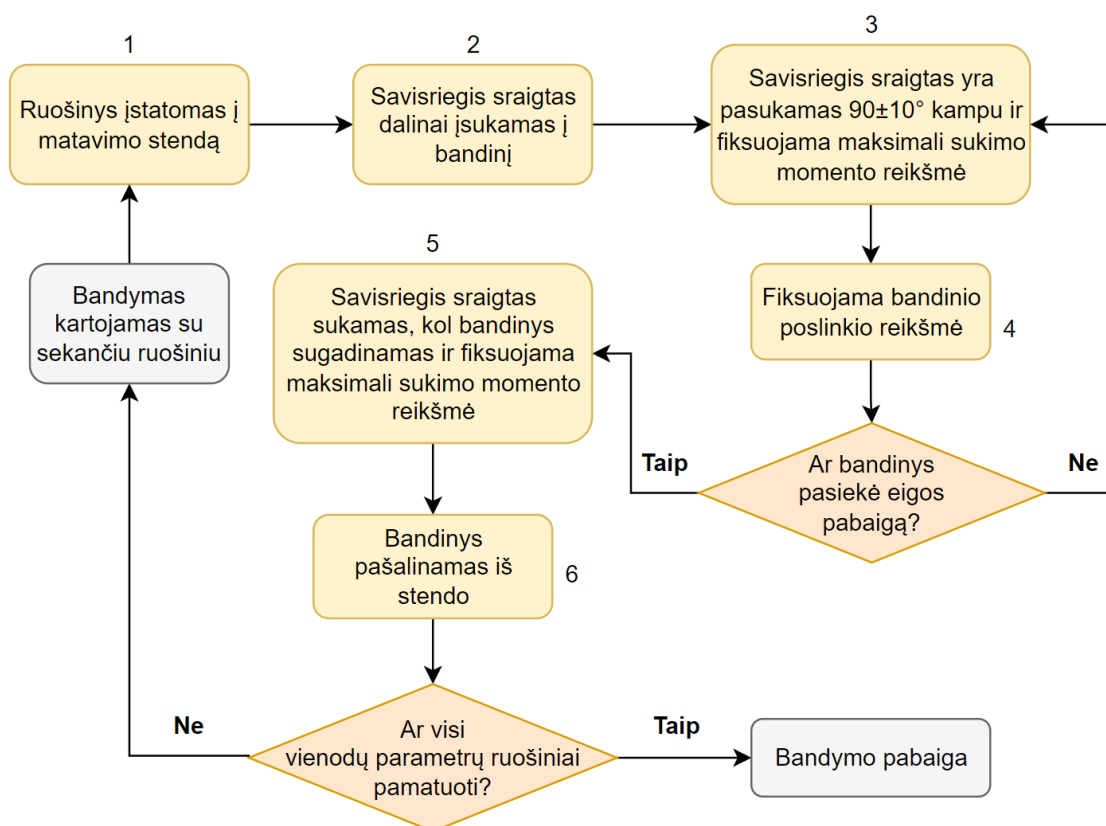
2.6 pav. Savisriegio sraigto įsukimo bandymui skirta ruošinio iliustracija

ST sraigto įsukimo bandymui naudojamos dvi matavimo priemonės. Skaitmeninis slankmatis *Mitutoyo 500-196-30* skirtas pamatuoti ST sraigto poslinkį į ruošinį, pagal 2.5 paveiksle pateiktą schemą. Šio slankmačio matavimo diapazonas yra 150 mm, o jo matavimo tikslumas yra $\pm 0,02$ mm. Įsukimo momento matavimui pasirinkta naudoti skaitmeninį dinamometrinių atsuktuvą *FIRSTINFO H5279U* (žr. 2.7 pav.). Šio atsuktuvo matavimo diapazonas yra nuo 0,05 iki 4,0 Nm, o matavimo tikslumas $\pm 2\%$ nuo matuojamos reikšmės.



2.7 pav. Skaitmeninis dinamometrinis *FIRSTINFO H5279U* atsuktuvas

Matavimai yra atliekami naudojantis 6-ių etapų matavimo seka, o jų blokinė schema yra pateikiama 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Savisriegio sraigto įsukimo į bandinį matavimų blokinė schema

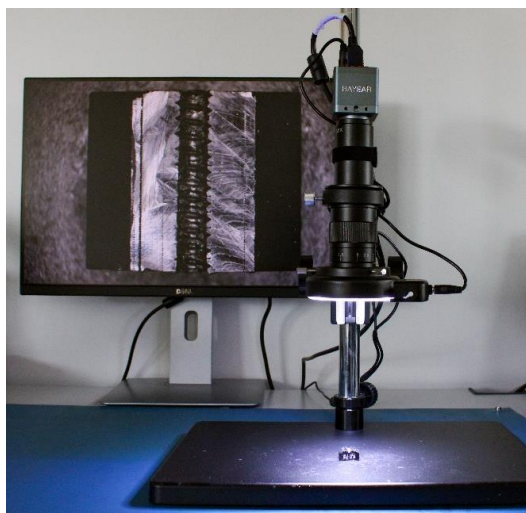
Pirmame etape įstatomas ruošinys per stendo krašte esančią angą, tuomet į bandinį yra įsukamas ST sraigtas tiek, kad šis veikiamas spyruoklių jėgos laikytųsi ir nebūtų išstumiamas. Ši pozicija laikoma kaip pradinis atskaitos taškas. Toliau naudojantis skaitmeniniu dinamometrinio atsuktuvu ST sraigtas yra pasukamas $90 \pm 10^\circ$ laipsnių kampu ir fiksuojama maksimali pasukimui panaudota sukimo momento reikšmė. Atlikus šį veiksmą pamatuojama ruošinio poslinkio reikšmė naudojantis skaitmeniniu slankmačiu. Užfiksavus šiuos dydžius, jie yra įvedami į iš anksto sudaryta duomenų

pildymo lentelę, naudojantis Microsoft Excel programa. Toliau ši matavimų seka yra kartojama iki kol bandinys atsiremia į eksperimentinio stendo atraminę plokštę, tuomet yra užfiksuojama paskutinė poslinkio reikšmė ir toliau matuojama tik kritinė sukimo momento reikšmė, kada bandinyje esantis ST sraigtas prasisuka ir sugadina bandinį. Gavus kritinę reikšmę, ji yra įvedama į minėtą duomenų pildymo lentelę. Tuomet bandinys yra pašalinamas iš stendo, atsukant ST sraigtą. Atlikus šiuos 6-is etapus, bandymas yra kartojamas su kitu ruošiniu, iki kol visi ruošiniai yra išanalizuojami.

2.3. Ruošiniuose susiformavusio sriegio analizė ir įranga

Tiriant nestandartinio profilio skylių sąveiką su ST sraigtu svarbu išanalizuoti kaip ST sraigtas veikia plastiką ir atlikti suformavusių sriegių analizę. Susiformavusių sriegių analizė atliekama abiejų tipų profilių skylėmis. Suformuotų sriegių nuotraukoms padaryti naudojamas skaitmeninis *HAYEAR* mikroskopas (žr. 2.9 pav.).

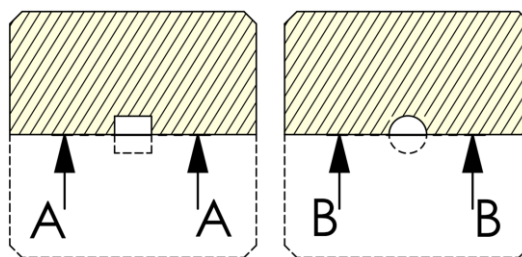
Bandinių analizei atlikti, ruošiniai spausdinami iš PETG plastiko, dėl jo mechaninių savybių leidžiančių lengviau perpjauti ruošinius ir paruošti pjūvius bei plastiko spalvos kontrastingumo. Spausdinimo parametrai naudojami pagal 2.1 lentelėje aprašytas charakteristikas.



2.9 pav. Skaitmeninis mikroskopas naudojamas bandinių analizei atlikti

Tyrimas atliekamas 3-iais etapais. Pirmame etape įsukami ST sraigtai į skirtingo parametrų ir profilių skyles, kai tam naudojamas ruošinys yra pateikiamas 2.3 paveiksle. ST sraigtai įsukami į ruošinius naudojantis akumuliatoriniu suktuvu, esant mažomis apsukomis, taip pat nesukant ST sraigto iki priveržimo, kai ST sraigto galva pradeda kontaktuoti su ruošiniu. Toliau ST sraigtai pašalinami analogišku būdu iš ruošinių.

Kitame etape ruošiniai perpjaunami išilgai ST sraigto sukimo krypties. Visi ruošinių pjūviai atliekami naudojant po du ruošinius kiekvienam skylės parametrui ir skylės profiliui. Daromų pjūvių iliustracijos pateikiamos 2.10 paveiksle.

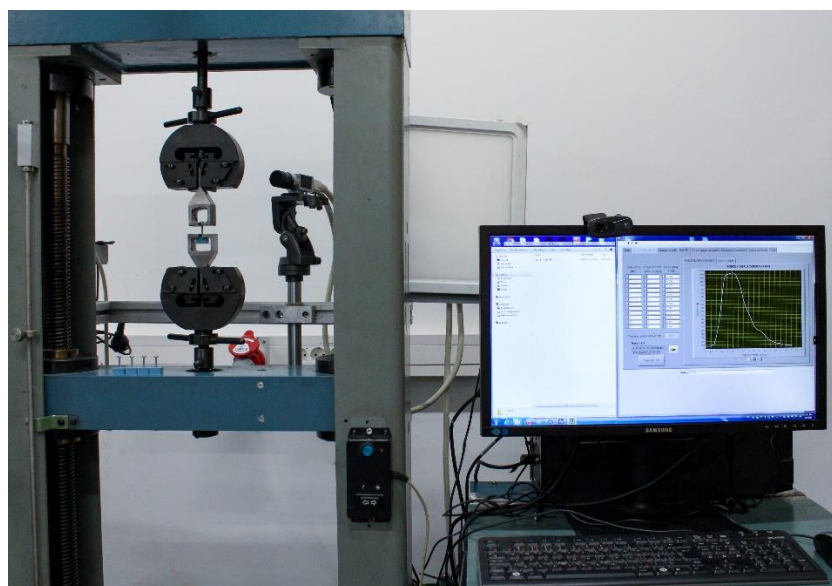


2.10 pav. Ruošinių pjūvių iliustracijos

Trečiajame etape ruošiniai analizuojami naudojantis skaitmeniniu mikroskopu. Iš ruošinių padarytų pjūvių yra parenkama po vieną analizuojamą kūną. Ruošinių atranka analizei yra vizualinė, pasirenkant ruošinį, kurio pjūvis geriau atvaizduoja susidariusį sriegį nuo ST sraigto. Toliau padaromos šių pjūvių nuotraukos.

2.4. Savisriegių sraigtų ištraukimo iš ruošinio bandymas ir įranga

Šiame bandyme siekiama gauti ST sraigtų ištraukimo jėgos priklausomybę nuo ST sraigto poslinkio. Šiam tyrimui atlikti pasirinkta naudoti universalią tempimo mašiną *TOCHPRIBOR 2055 P-5* su įmontuota *Pushton PSD-S1* apkrovos cele. Tempimo mašinos valdymui naudojami *National Instruments NI PXIe-1073* ir *NITB-4330* valdikliai. Duomenys apdorojami su *Labview 2020* programine įranga. Bandymo įrangos, apkrovos ir deformacijų matavimo jutiklių tikslumas buvo $\pm 0,03 \%$. Naudota įranga tempimo bandymams atlikti atvaizduojama 2.11 paveiksle.

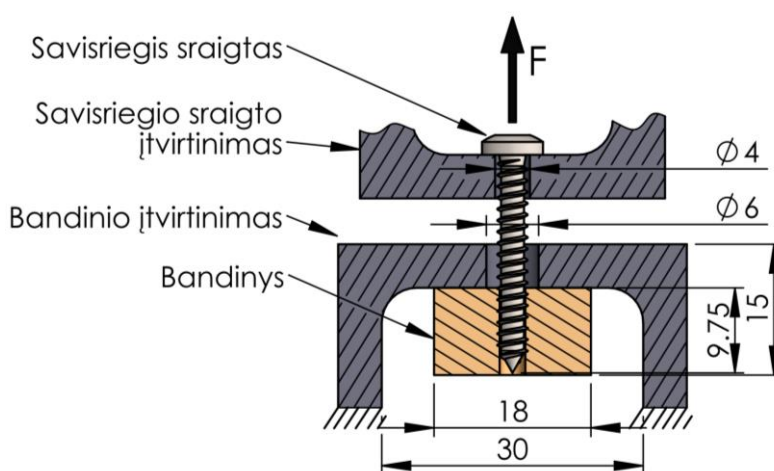


2.11 pav. Naudota įranga tempimo bandymams atlikti

Ši universali tempimo mašina leidžia įtvirtinti į griebtuvus reikalingą tvirtinimo įrangą bandymui atlikti. Ši tvirtinimo įranga yra suprojektuojama atsižvelgiant į testuojamo ruošinio matmenis bei siekiamą patogų bandinių įdėjimą į tempimo mašiną. Bandinio įtvirtinimo būdas tempimo bandymui atlikti yra pateikiamas 2.12 paveiksle.

Šiam tyrimui atlikti spausdinami ruošiniai pateikiami 2.3 paveiksle, kai ruošinys yra su 18 mm išorinėmis kraštinėmis ir 10 mm aukščiu. Tai pat, ruošiniai spausdinami su skylės dydžio bei naudotos medžiagos žyma.

Tempimo bandymai atliekami su analogišku 9,75 mm ST sraigto įsukimo gyliu į ruošinį. Ruošinio įtvirtinimui reikalingas mažiausias 10 mm tarpas tarp bandinio ir ST sraigto galvos, tad ST sraigtas turi būti parenkamas ilgesnis, nei įsukimo bandyme. Užtikrinant sklandų bandinių įstatymą ir parenkant ilgesnį ST sraigtą, tad artimiausias ST sraigto ilgis yra 25 mm, tad ST sraigto tempimo bandymams žymėjimas pagal LST EN ISO 7049:2011 yra – ISO 7049 – ST 3,5 × 25 – St – R – H. Tad, tarp bandinio ir ST sraigto galvos lieka 15,25 mm laisvo aukščio šių ruošinių įstatymui į įtvirtinimą tempimo mašinoje.



2.12 pav. Ruošinio įtvirtinimo tempimo bandymams iliustracija

Prieš atliekant tempimo bandymus paruošiami bandiniai, į juos įsukant ST sraigtus. Į kiekvieną ruošinį įsukami ST sraigtai $9,75 \pm 0,05$ mm įsukimo gyliu. Tam pasitelkiama specialiai paruošta tarpinė kaladėlė, kuri limituotą ST sraigto gilesnį įsisukimą į bandinį. ST sraigtai įsukami į ruošinius akumuliatoriniu suktuvu, naudojant mažas apsukas, prisukant ST sraigtą iki kol šio galva pasieks tarpinės plokštelės paviršių, šių nesuveržiant tarpusavyje su ruošiniu.

Prieš pradedant universalioje tempimo mašinoje nustatomas reikalingas ST sraigto ištraukimo greitis iš bandinio. Greičiui nustatyti remiamasi panašaus pobūdžio standartu LST EN 320:2011 apibūdinančiu medisraigčių ištraukimą iš medinių bandinių. Daroma prielaida, kad ST sraigtai įsukti į plastikinius ruošinius yra analogišku greičiu ištraukinėjami, kaip medisraigčiai įsukti į medinius bandinius. Tuomet ST sraigtų ištraukimo greitis universalioje tempimo mašinoje yra nustatomas 10 ± 1 mm/min.

2.5. Ruošinių kiekio nustatymas bandymams atlikti

Atliekamiems eksperimentiniams tyrimams svarbu nustatyti minimalų ruošinių kiekį, siekiant pasiekti statistiškai reikšmingus rezultatus. Remiantis ASTM D1761-20 apibūdinančiu medsraigčių ištraukimo iš bandinių standartu, nurodoma, kad tvirtinimo detalių bandymų variacijos koeficientas svyruoja nuo 15 % iki 30 %. Tipiški duomenų lūkesčiai, kad duomenų paklaida svyruoja tarp 5 % ir 10 %, o gautų duomenų patikimumas tarp 75 % ir 95 %.

Toliau nurodoma formulė skirta apskaičiuoti minimalų reikalingą ruošinių kiekį bandymams atlikti naudojantis variacijos koeficientu, paklaidos dydžiu ir duomenų patikimumo reikšmėmis:

$$n = \frac{\gamma^2 \cdot (\sigma/\mu)^2}{E^2}, \quad (1)$$

čia

γ – pasikliautinumo koeficientas;

σ/μ – variacijos koeficientas;

E – paklaida.

Skaičiuojamas minimalus kiekis ruošinių reikalingų bandymams atlikti, kai variacijos koeficientas 30 %, duomenų paklaida 10 %, o duomenų patikimumas – 75 %. Tuomet naudojantis 1 formule, yra įstatomos pasirinktos reikšmės. Kadangi duomenų patikimumas yra susijęs su normaliojo pasiskirstymo skirstinio kreivės plotu, tad šis dydis išreiškiamas kaip Z reikšmė, kuri toliau naudojama kaip pasikliautinumo koeficientas. Z reikšmė esant duomenų patikimumui 75 % yra apie 0,67.

Tad reikalingas minimalus ruošinių kiekis bandymams atlikti yra:

$$n = \frac{0,67^2 \cdot 0,3^2}{0,10^2} = 4,041.$$

Minimalus kiekis ruošinių negali būti išreikštas ne kaip natūralusis skaičius, dėl to šis dydis apvalinamas į didžiąją pusę. Tad minimalus kiekis ruošinių bandymams atlikti turėtų būti 5 vienetai. Pagal atliktą literatūros analizę matoma, kad analogiškuose tyrimuose buvo naudojama taip pat tarp 4 ir 5 ruošinių bandymams atlikti.

Šis minimalus ruošinių kiekis taikomas atliekant ST sraigto įsukimui ir ST sraigto ištraukimo iš ruošinio bandymams atlikti. Įsukimo ir ištraukimo bandymams atlikti su skirtingų parametrų ruošiniais iš viso bus reikalingi po 70 ruošinių, iš viso 140 ruošinių.

3. TEORINIAI TYRIMAI IR SKAITMENINIS MODELIAVIMAS

3.1. Teorinio tyrimo metodika

3.1.1. Rekomenduojamo savisriegio sraigto priveržimo momento skaičiavimas

Pagal eksperimentiškai gautąsias ST sraigto įsukimo ir maksimalaus sukimo momento išraiškas suskaičiuojamas rekomenduojamas priveržimo sukimo momentas, pasitelkiant analogiško tyrimo išvesta formulę (Dratschmidt & Ehrenstein, 1997). Rekomenduojamas ST sraigto priveržimo momentas apskaičiuojamas taip:

$$T_T = T_{D_{\max}} + k(T_s - T_{D_{\max}}), \quad (2)$$

čia

$T_{D_{\max}}$ – reikalingas sukimo momentas įsukti savisriegį sraigtą, Nm;

k – priveržimo koeficientas;

T_s – maksimalus sukimo momentas, kai savisriegis sraigtas sugadina bandinį, Nm.

ST sraigto priveržimo momentui apskaičiuoti naudojamas priveržimo koeficientas k , kuris parenkamas atitinkamai nuo prisukimui naudojamo įrankio. Kai prisukimui naudojami mažo tikslumo įrankiai $k = 0,20$, o kai prisukama su reguliuojamo sukimo momento įrankiu $k = 0,50$.

3.1.2. Priveržiamo kūno prispaudimo jėgos skaičiavimas

ST sraigtą priveržiant, ST sraigto galva sukuria ašinę apkrovą į tarpinį priveržiamą kūną. Šiai apkrovai apskaičiuoti išvedama formulė ir ja naudojantis apskaičiuojamos, eksperimentiniu tyrimu gautų sukimo momentų rezultatų, teorines užveržimo metu susidarancias apkrovas.

Norint rasti ST sraigto užveržimo momentu susidariusią ašinę apkrovos jėgą į tarpinį priveržiamą kūną, galima pasinaudoti formule, kuri apskaičiuoja sukimo momentą, reikalingą pakelti masę naudojantis varžto sraigto. Ši formulė išvesta ir specialiai skirta apskaičiuoti sukimo momentui varžtų sąveikoje su veržlėmis (Norton, 2011). Taigi, šiuo atveju masė tampa ašine apkrova į priveržiamą tarpinį kūną ir išreiškiama F_i jėga. Formulė apskaičiuoti sukimo momentui reikalingam pakelti masę yra išreiškiama taip:

$$T_i = F_i \frac{d_p}{2} \frac{\mu + \tan \lambda \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \tan \lambda} + F_i \frac{d_c}{2} \mu_c, \quad (3)$$

čia

T_i – savisriegio sraigto užveržimo momentas, Nm;

F_i – savisriegio sraigto galvos jėga į priveržiamą kūną, N;

d_p – savisriegio sraigto sriegio žingsnio skersmuo, mm;

d_c – savisriegio sraigto galvos skersmuo, mm;

μ – trinties koeficientas tarp savisriegio sraigto ir ruošinio;

μ_c – trinties koeficientas tarp savisriegio sraigto galvos ir priveržiamo kūno;

α – sraigto profilio kampas, °;

λ – sraigto žingsnio kampas, °.

Toliau iš formulės yra išvedama jėga F_i , vietoje T_i yra įstatoma rekomenduojamas priveržimo momentas T_T ir likę nariai yra perkeltami į dešinę lygybės pusę. Taigi, ašinė apkrovos jėga į tarpinį prispaudžiamą kūną yra išreiškiama taip:

$$F_i = \frac{2T_T (\cos \alpha - \mu \tan \lambda)}{\mu d_p + d_p \tan \lambda \cos \alpha + d_c \mu_c \cos \alpha - \mu d_c \mu_c \tan \lambda}. \quad (4)$$

Kadangi atliekami skaičiavimai yra palyginamojo pobūdžio, dėl to nežinomieji dydžiai kaip trintis yra parenkami bendrinio pobūdžio. Šiuo atveju trinties koeficientai yra parenkami kaip kinetiniai dydžiai, dėl priveržimo momentu vykstančio slydimo.

Taigi, kinetinis trinties koeficientas tarp ST sraigto galvos ir plieninės plokštelės yra $\mu_c = 0,42$. Trinties koeficientas tarp plieno ir PLA plastiko yra $\mu_{pla} = 0,43$, o trinties koeficientas tarp plieno ir PETG plastiko yra $\mu_{petg} = 0,39$.

ST sraigto sriegio žingsnio skersmuo yra $d_p = 2,655$ mm, ST sraigto galvos skersmuo $d_c = 6,5$ mm, sraigto profilio kampas $\alpha = 30^\circ$, o sraigto žingsnio kampas yra $\lambda = 8,09^\circ$.

Tuomet įstačius šiuos žinomus dydžius į 4 formulę ir ją supaprastinus, gauname dvi paprastas lygtis skirtas apskaičiuoti ST sraigto ašinei apkrovai į tarpinį kūną. Tuomet apkrova naudojant PLA ir PETG plastiką yra apskaičiuojamos atitinkamai taip:

$$F_{i,pla} \approx 439 \cdot T_T, \quad (5)$$

$$F_{i,petg} \approx 453 \cdot T_T, \quad (6)$$

čia

$F_{i,pla}$ – savisriegio sraigto galvos jėga į priveržiamą kūną, naudojant PLA plastiką, N;

$F_{i,petg}$ – savisriegio sraigto galvos jėga į priveržiamą kūną, naudojant PETG plastiką, N.

3.2. Baigtinių elementų tyrimo metodika

ST sraigą ištraukiant iš bandinio įvyksta labai didelės deformacijos. Suskaičiuoti šias apkrovas įprasta naudoti šlyties formulę. Nors tai neblogas indikatorius, kokių maksimalių atlaikomų apkrovų būtų galima tikėtis. Tačiau tiksliau suskaičiuoti šiuo atveju labiau tinka BEM analizė.

Statinės BEM analizės leidžia išspręsti netiesinius geometrinius uždavinius, kaip ST sraigų ištraukimas. Tam pasirinkta naudoti *Comsol Multiphysics 5.6* programinį paketą dėl plačių skaičiavimo ir rezultatų atvaizdavimo galimybių.

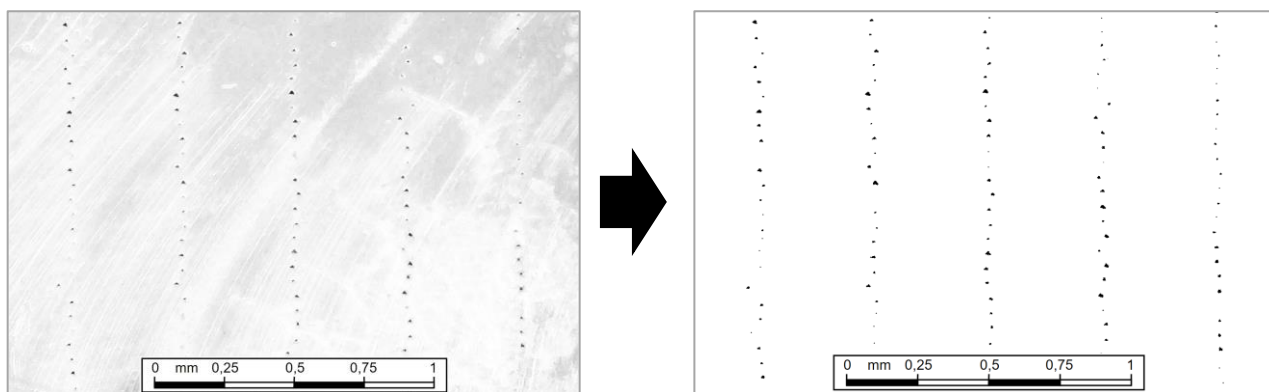
ST sraigto įsukimo į ruošinį analizės BEM metu susidaro ypač didelės deformacijos. Atliekant tokias analizes reikalaujama labai didelių kompiuterio skaičiavimo pajėgumų. Dėl to šiam teoriniam tyrimui pasirinkta atlikti tik ST sraigto ištraukimo iš ruošinio bandymą.

3.2.1. Tiriamųjų kūnų mechaninės savybės

Sprendžiant problemas naudojantis BEM analize būtina nurodyti naudojamų medžiagų mechanines savybes. ST sraigto medžiagos aprašomos ISO 4954:2022 standarte ir tolimesniam tyrimui parenkama naudoti grūdintas plienas – C10E2C. Šio plieno mechaninės charakteristikos pateikiamos 3.1 lentelėje.

Atsižvelgiant į eksperimentiškai gautuosius tempimo bandymo rezultatus šiame tyrime atliekamos analizės naudojantis vienu pasirinktu plastikumu. Plastiką pasirenkamas, kurio tempimo bandymu metu kvadratinio ir apvalaus profilio skylės atitikmuo turėjo artimiausias pasipriešinimo ištraukimui jėgas. Tad, tyrimas atliekamas naudojantis PETG plastikumu.

Remiantis tyrimu, kuriame nustatytos spausdinto PETG plastiko mechaninės savybės, charakterizuojant jas pagal atspausdintos detalės porėtumą, galima nustatyti eksperimente naudotų ruošinių tamprumo modulį (Özen et al., 2021). 3.1 paveiksle pateikiama spausdinto PETG plastiko ruošinio, pagal 2.1 lentelėje nurodytus parametrus, skerspjūvis. Šio skerspjūvio nuotrauka redukuojama į dvejetainę spalvų skalę, kai balta spalva žymi užpildą, o juoda spalva žymi užpildo porėtumą. Pagal gautąjį 0,28 % porėtumą, toliau naudojantis linijine duomenų interpoliacija parenkamas tamprumo modulis iš tyrimo (Özen et al., 2021) esančios eksperimentinių duomenų lentelės. Spausdinto PETG plastiko Puasono koeficientas nurodomas minėtame tyrime ir yra 0,35. Taip pat tyrime nurodoma, kad BEM analizė gali būti atliekama laikant spausdintą plastiką kaip izotropinę medžiagą, esant iki 6,5 % paklaidai gautiesiems rezultatams. Plastiko tempimo stipris parenkamas iš gamintojo nurodytos techninės duomenų lentelės. PETG plastiko mechaninės charakteristikos pateikiamos 3.1 lentelėje.



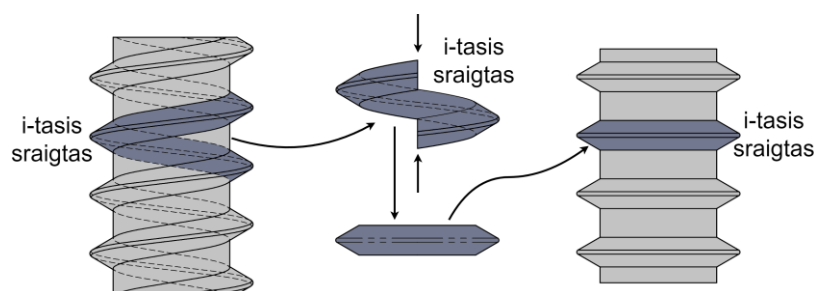
3.1 pav. PETG plastiko skerspjūvio porėtumas

3.1 lentelė. Baigtinių elementų analizėje naudojamų medžiagų mechaninės savybės

Medžiaga	Tankis, g/cm ³	Puasono koeficientas	Tamprumo modulis, GPa	Tempimo stipris, MPa
Plienas C10E2C	7,9	0,29	190	450
Plastikas PETG	1,27	0,35	2,053	50

3.2.2. Tiriamųjų kūnų geometrija

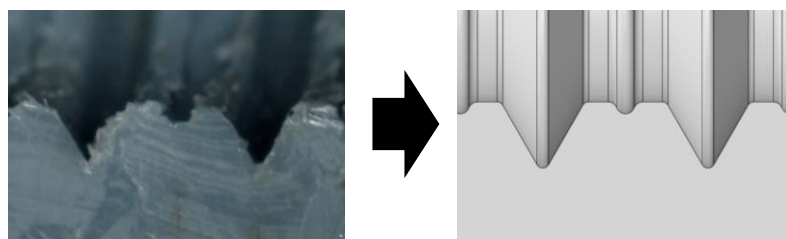
BEM analizėje siekiama atkartoti pasipriešinimo ištraukimui eksperimentinį tyrimą. Analizėje naudojamas analogiško dydžio ST sraigtas, kaip eksperimentiniame tyrime, tai yra ISO 7049 – ST 3,5 × 25 – St – R – H. Remiantis tyrimų praktika (Ellwood et al., 2004) siekiama supaprastinti suformuoto sriegio braižymą bei sumažinti reikalingų kompiuterių resursų atliekant analizę, dėl to ST sraigto geometrija yra redukuojama iš spiralės į cilindriškai apsuktą sraigtą (žr. 3.2 pav.). Toliau likusioji ST sraigto geometrija braižoma pagal realius pamatuotus matmenis.



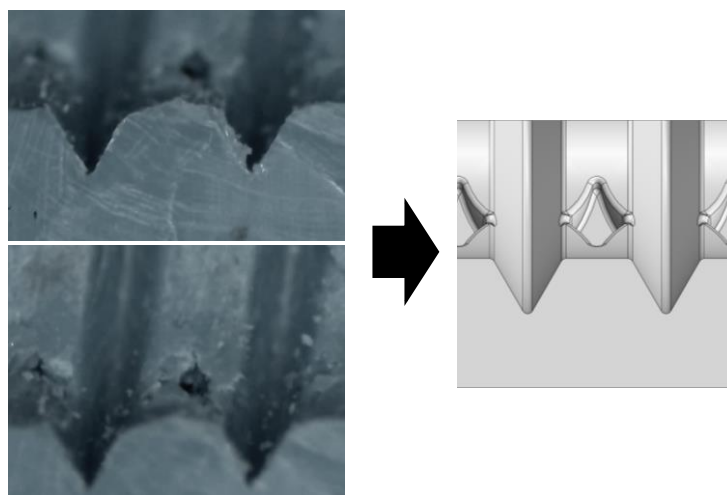
3.2 pav. Savisriegio sraigto geometrijos redukavimo iliustracija

Kadangi ST sraigto įsukimo į ruošinį analizė nėra atliekama, tad suformuotas sriegis nubraižomas naudojant *Dassault Systèmes Solidworks 2022* 3D modeliavimo programinį paketą. Suformuoto sriegio braižymui randamas vieno ST sraigto interferencijos tūris, naudojantis programos *Mass Properties* funkcija, su pradinio dydžio kiauryme. Toliau šis išstumiamas tūris paskirstomas nubraižant suformuotą sriegį. Šie sriegiai nubraižomi pagal eksperimentiškai gautuosius bandinių skerspjūvius. Plonasienės arba atskilusios plastiko dalys nėra įtraukiamos į geometriją, kadangi tai nepripasideda prie bendros apkrovos atlaikymo ir tai tik apsunkintų BEM analizę.

Pateikiami eksperimentiškai gautųjų bandinių skerspjūvių nuotraukos (žr. 3.3 ir 3.4 pav.) ir dešinėje atvaizduojamas suformuotas sraigto sriegis plastike 3D aplinkoje.



3.3 pav. Plastike suformuoto sriegio braižymas 3D aplinkoje (pradinis skersmuo – Ø2,80 mm)



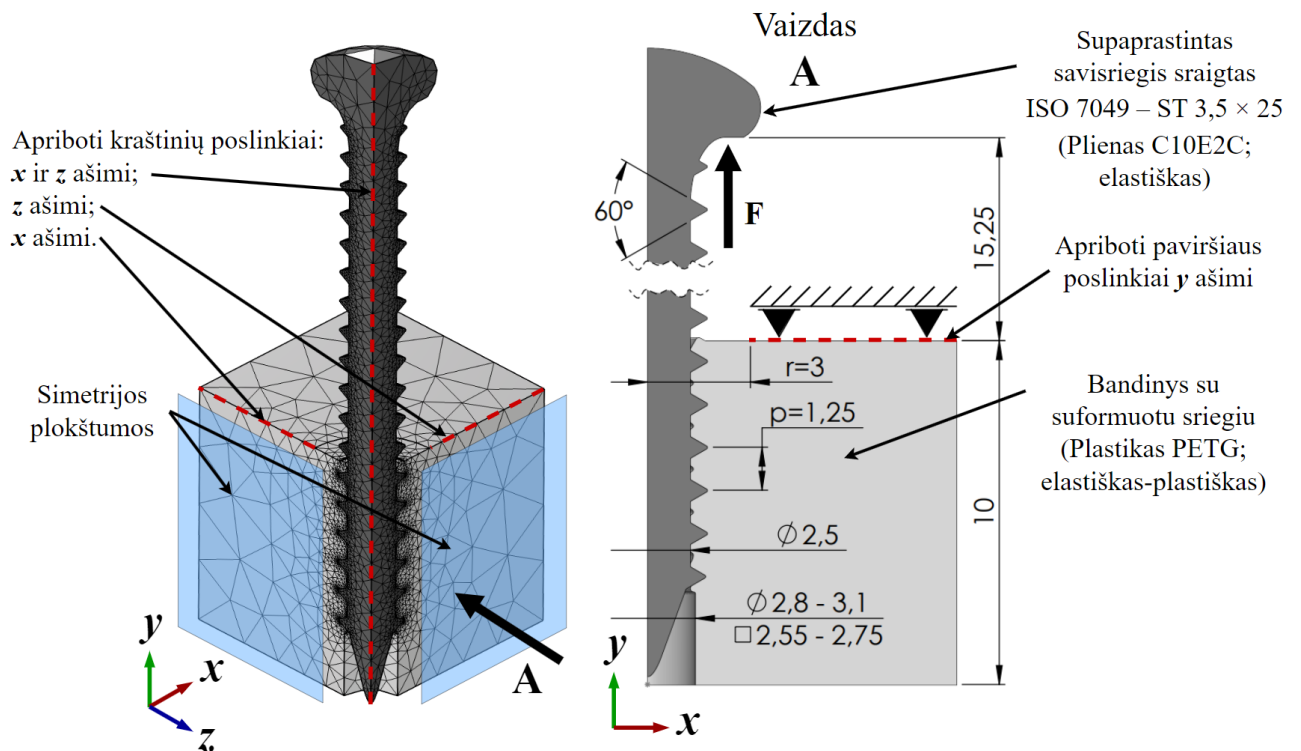
3.4 pav. Plastike suformuoto sriegio braižymas 3D aplinkoje (pradinis dydis – □2,55 mm)

Visa analizuojama ST sraigto ir bandinio sistema yra simetriška. Tai panaudojama sumažinant reikalingų kompiuterio skaičiuojamuosius resursus bei leidžia naudoti smulkesnį elementų tinklą. Taigi, analizė atliekama tik su ketvirčiu modelio.

3.2.3. Pradinės ir kraštinės skaičiuojamųjų kūnų sąlygos

Nubraižyti 3D modeliai yra išsaugomi parametriniu, neutraliu STEP dalinimosi formatu ir importuojami į *Comsol Multiphysics 5.6* programą. Nurodomos geometrijos simetrijos plokštumos ant dviejų bandinio ir ST sraigto paviršių. Sistemos laisvės laipsniai apribojami naudojantis 0 mm poslinkiu ir nurodomi ant bandinio paviršiaus y ašimi, taip pat ant ST sraigto ašies x, z ašimis bei ant dviejų bandinio kraštinių x ir z ašimis. Kontaktas tarp plastiko sriegio ir ST sraigto nurodomas naudojantis standumo faktoriaus funkcija, kai jo koeficientas – 1. BEM tinklas sudaromas stambus ties vietomis, kur įtempiai numatomi maži, o kontaktiniame plote tinklas yra smulkinamas iki kol nubraižyta geometrija atvaizduojama be didelių iškraipymų. ST sraigto veikianti jėga pridedama iš apatinio galvos paviršiaus y ašimi ir palaipsniui didinama kas 20 N iki kol pasiekama 80 % numatoma maksimali apkrova ir toliau žingsnis mažinamas iki 5 N. Skaičiavimai atliekami kaip su netiesine geometrija, kai kiekviena iteracija įvertina pasikeitusią geometriją nuo poslinkių. Prie naudojamų medžiagų nurodomas plastiškumo modelis, leidžiantis kūnams deformuotis plastiškai, kai šių von

Mises įtempiai pasiekia tempimo stiprį. Kraštinių sąlygų ir BEM tinklelio iliustracija pateikiama 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Tiriamųjų kūnų baigtinių elementų tinklelis ir kraštinės sąlygos

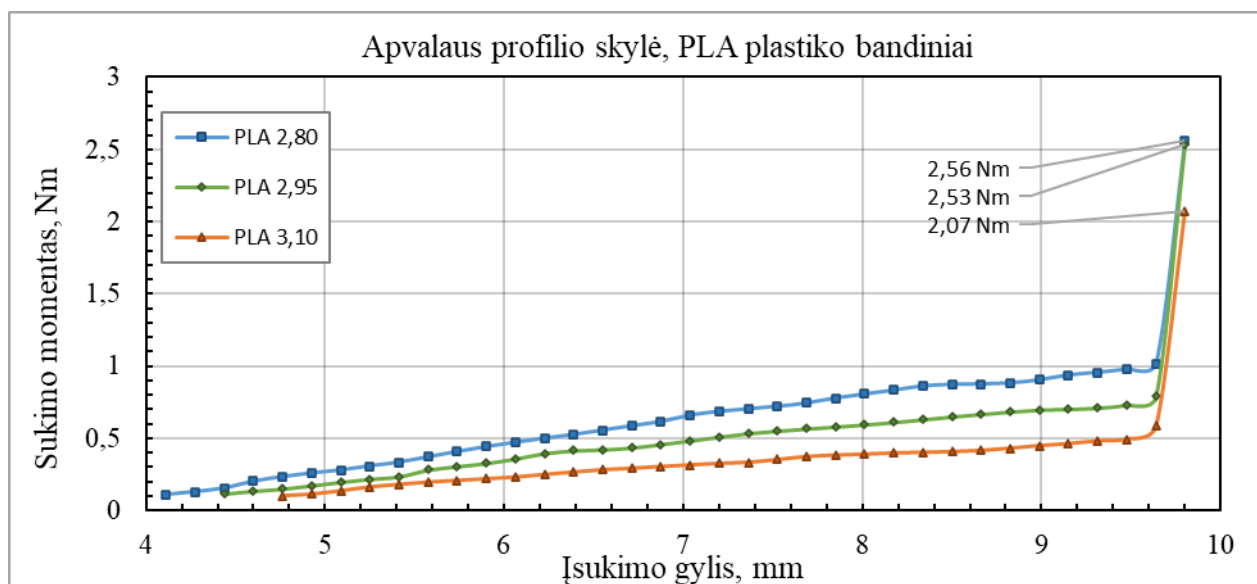
Analizės atliekamos plačiame veikiančių jėgų intervale. Analizė stabdoma, kai bandinyje susidarę įtempiai pasiekia maksimalius medžiagos von Mises įtempius bei šie įtempiai jungia bandinyje suformuotus sriegius su nurodyta atrama.

4. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

4.1. Savisriegio sraigto įsukimo į bandinį eksperimento rezultatai

Atlikti ST sraigto įsukimo į ruošinius bandymai naudojantis 2.1 lentelėje aprašytais ruošinių specifikacijomis. Gautieji eksperimento duomenys suvesti naudojantis *Microsoft Excel* programa. Kiekvienos bandymų serijos duomenys yra pateikiami kaip penkių bandinių vidutinės reikšmės. B priede pateikiami savisriegio sraigto įsukimo bandymų į 2,55 mm kvadratinio ir Ø2,80 mm apvalaus profilio kiaurymes neapdoroti duomenys.

Grafikuose (žr. 4.1 ir 4.2 pav.) atvaizduojami eksperimente gautųjų ST sraigto sukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, esant apvalioms skylėms ruošiniuose ir naudojant bandinius iš PLA bei PETG plastiko.

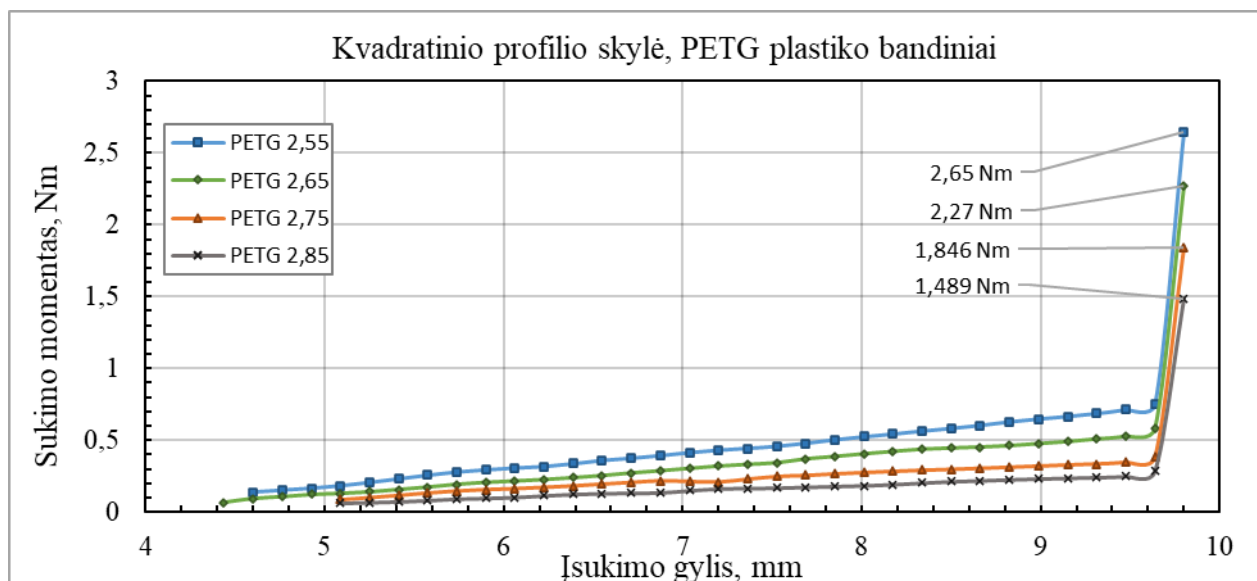


4.1 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė

Iš esančių 4.1 ir 4.2 grafikų matoma, kad siaurėjant skylės dydžiui, reikalingas įsukimo momentas, prieš priveržimą, tendencingai didėja. ST sraigto įsukimo metu sukimo momentas į ruošinį didėja tiesiškai, didėjant įsukimo gyliui. Rasta, kad PETG plastiko ruošiniuose reikalingas įsukimo momentas yra žymiai mažesnis nei PLA plastiko ruošiniuose. PETG plastiko bandiniuose įsukti ST sraigtui reikalingas 54 %, 73 % ir 62 % mažesnis sukimo momentas atitinkamai esant Ø2,80, Ø2,95 ir Ø3,10 mm skylėms.

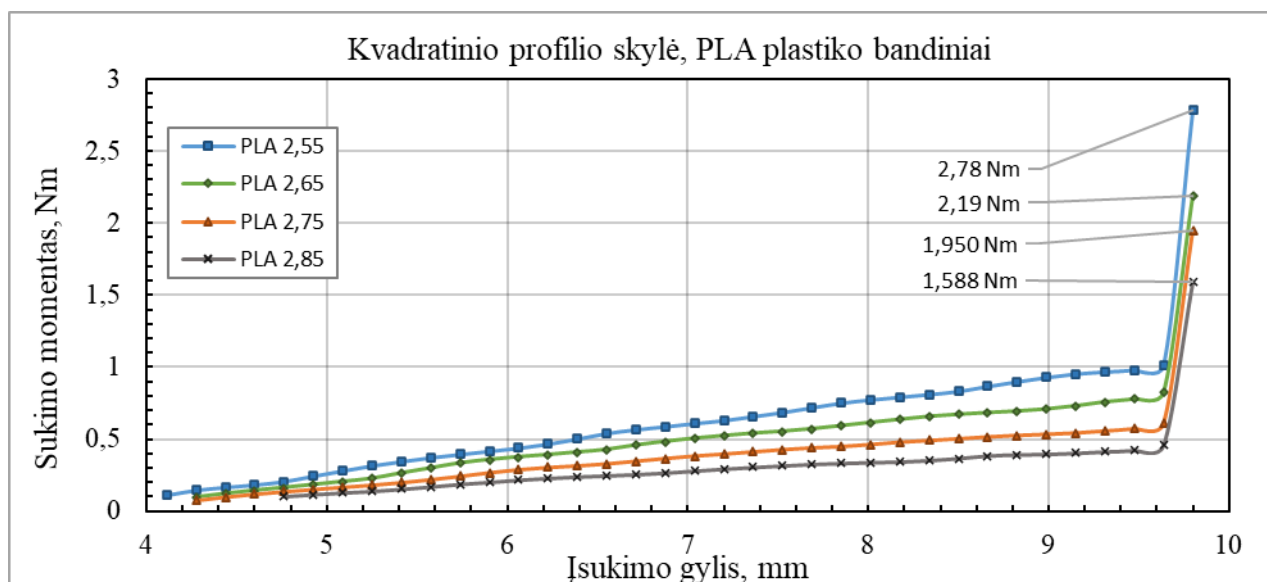
Pastebima, kad apvalaus profilio skylės bandiniuose esant Ø2,95 mm skylės dydžiui ir jam toliau siaurėjant, ST sraigto maksimalus priveržimo sukimo momentas nedidėja ir išlieka panašus. Naudojant PLA plastiko ruošinius skirtumas buvo 1,03 %, o naudojant PETG plastiko ruošinius, skirtumas buvo dar mažesnis – 0,153 %. Taip pat pastebima, kad PETG plastiko bandiniuose maksimalus

ST sraigto priveržimo sukimo momentas, kai bandinyje esantis sriegis yra sugadinamas, yra panašus į PLA plastiko bandinius. PLA plastiko bandinių maksimalus priveržimo sukimo momentas, esant Ø2,80 ir Ø2,95 mm skylėms, buvo apie 8 % didesnis nei bandiniuose iš PETG plastiko.



4.2 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė

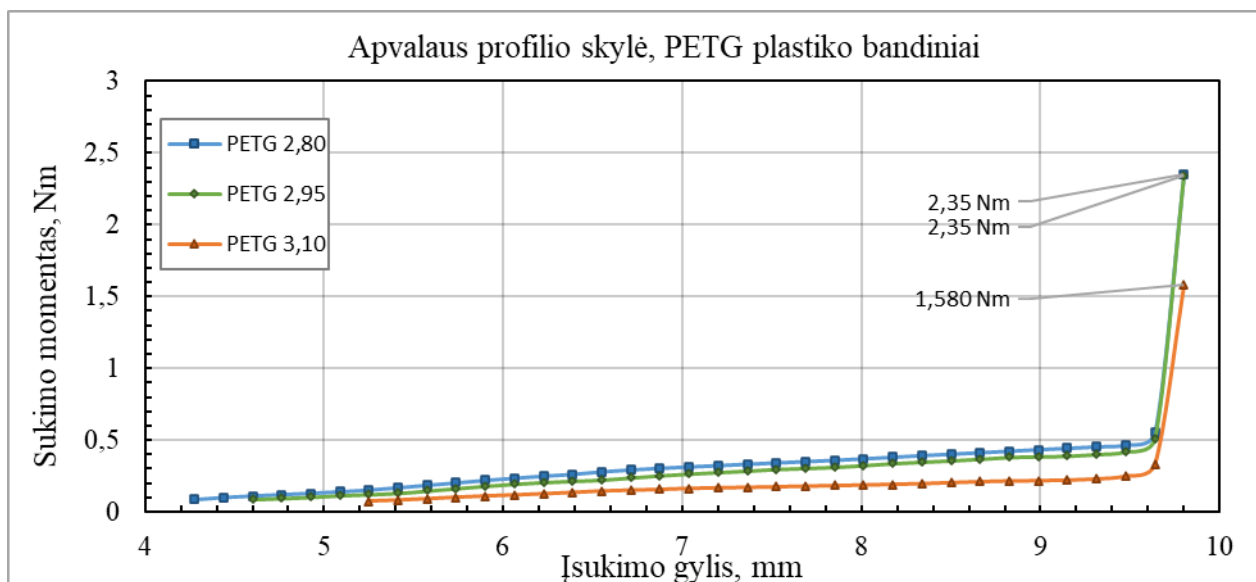
Toliau atvaizduojami gautieji ST sraigto sukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio duomenys (žr. 4.3 ir 4.4 pav.), kai ruošiniuose buvo naudojamos kvadratinės skylės ir PLA bei PETG plastikai.



4.3 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė

Grafikuose 4.3 ir 4.4 matoma, kad siaurėjant skylei tendencingai didėja sukimo momentas reikalingas įsukti ST sraigą, taip pat kaip ir maksimalus priveržimo sukimo momentas. ST sraigą įsukti

į PETG plastiko bandinius reikėjo 35–60 % mažiau sukimo momento nei sukant į PLA plastiko bandinius. Pastebima, kad PETG plastiko bandiniuose maksimalus priveržimo sukimo momentas buvo apie $5,5 \pm 0,8$ % mažesnis nei PLA plastiko bandiniuose esant 2,55, 2,75 ir 2,85 mm kvadratinėms skylėms. Tačiau esant 2,65 mm kvadratiniai skylei, PETG plastiko bandinyje maksimalus priveržimo sukimo momentas buvo apie 4 % didesnis negu PLA plastiko bandinyje.



4.4 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė

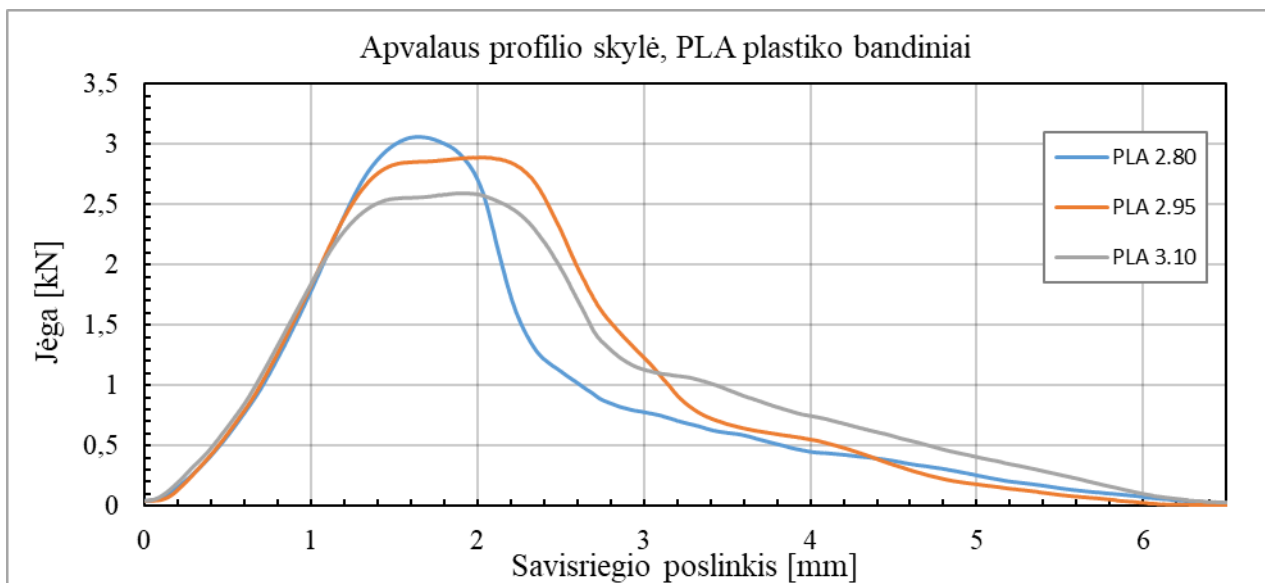
4.2. Savisriegio sraigto ištraukimo iš bandinio eksperimento rezultatai

Atlikti ST sraigto ištraukimo iš ruošinių bandymai naudojantis 2.1 lentelėje aprašytais ruošinių specifikacijomis. Atlikto ištraukimo bandymo duomenys sugeneruoti ir išvedami naudojantis *Microsoft Excel* programa. Kiekvienos bandymų serijos duomenys yra pateikiami kaip penkių bandinių vidutinės reikšmės. C priede pateikiami savisriegio sraigto ištraukimo bandymų iš 2,55 mm kvadratinio ir Ø2,80 mm apvalaus profilio kiaurymių neapdoroti duomenys.

Grafikuose (žr. 4.5 ir 4.6 pav.) atvaizduojami eksperimente gautųjų ST sraigto ištraukimo iš ruošinio jėgos priklausomybės nuo ST sraigto poslinkio, esant apvalioms skylėms ruošiniuose ir naudojant bandinius iš PLA bei PETG plastiko.

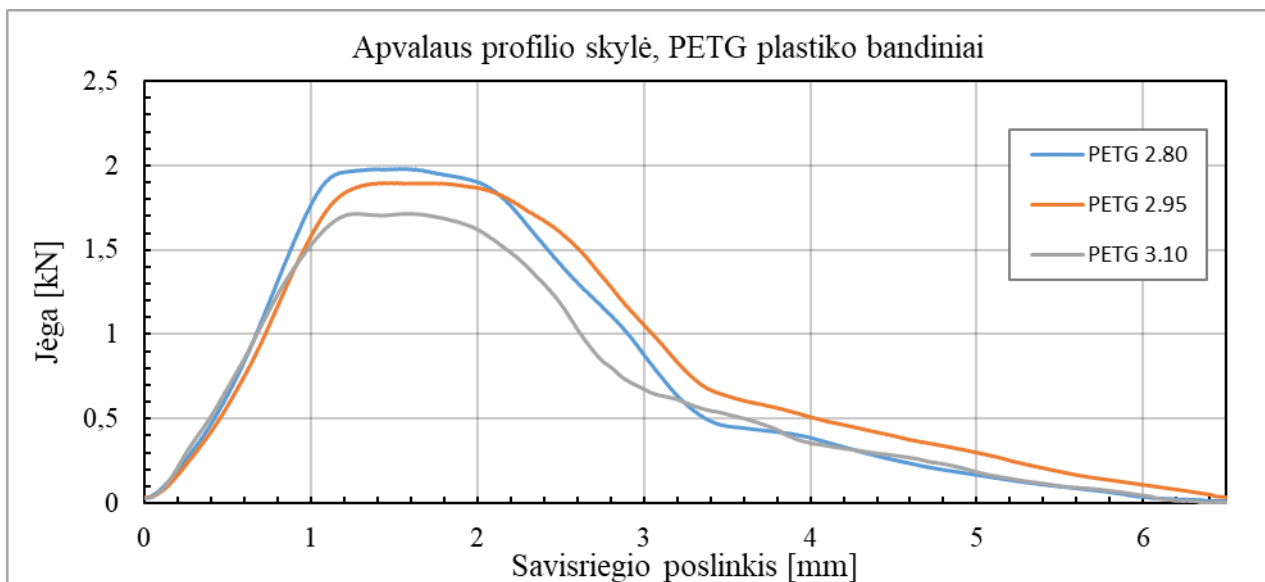
Iš grafikų 4.5 ir 4.6 matoma, kad ST sraigto ištraukimo jėga iš ruošinio staigiai pradeda kilti, didėjant ST sraigto poslinkiui. Ištraukimo jėgos kreivės viršūnė pasiekama iš lėto ir atitinka atvirkštinės parabolės formą. Tačiau kreivės viršūnės užsitiesimas parodo plastiko deformacinį tysimą, kuris yra ryškesnis su PETG plastiko ruošiniais, kai šis turi ilgesnį pailgėjimą prieš kritiškai nutrūkstant. Taip pat šis viršūnės užsitiesimas nurodo didesnę duomenų sklaidą. Tai reiškia, kad ruošinys gali būti

sugadinamas gana plačiame diapazone. Toliau ištraukimo jėga pradeda staigiai kristi ir po to seka tiesinis jėgos mažėjimas iki kol ST sraigtas yra ištraukimas galutinai iš ruošinio.



4.5 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė

Pastebima, kad ištraukimo jėga tendencingai didėja siaurėjant bandinių skylei. Maksimali ištraukimo jėga esant Ø2,80 mm skylei rasta 3,06 ir 1,983 kN atitinkamai PLA ir PETG plastiko ruošiniuose. Lyginant visus trijų skylių dydžius, PLA plastiko bandiniai yra atsparesni už PETG plastiko bandinius $52 \pm 2 \%$.

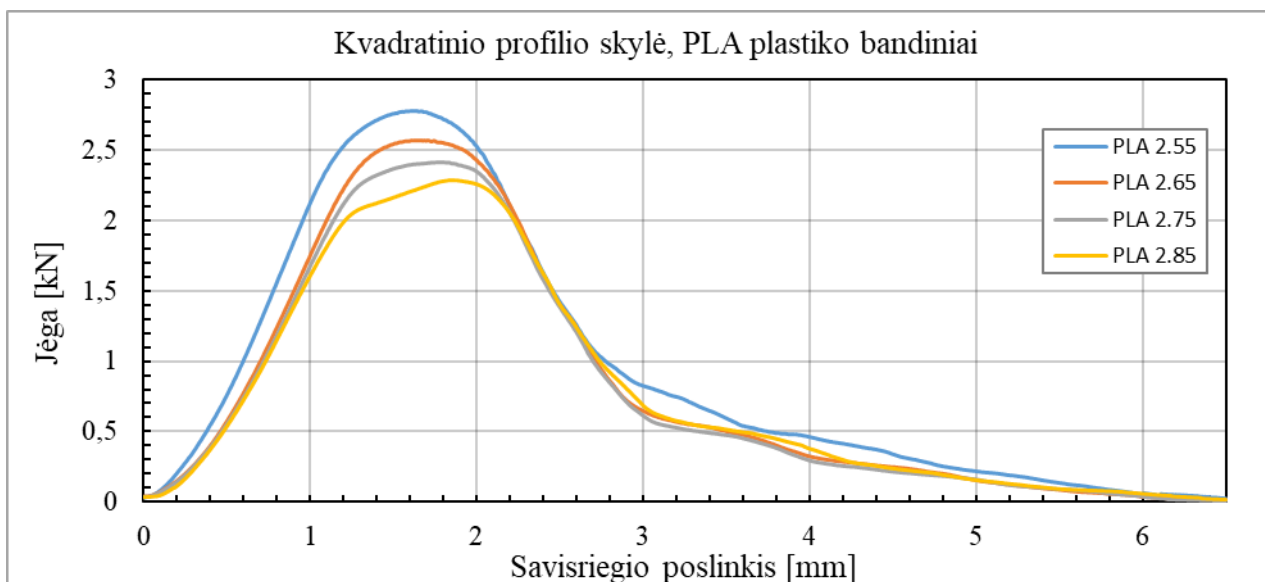


4.6 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su apvalaus profilio skylė

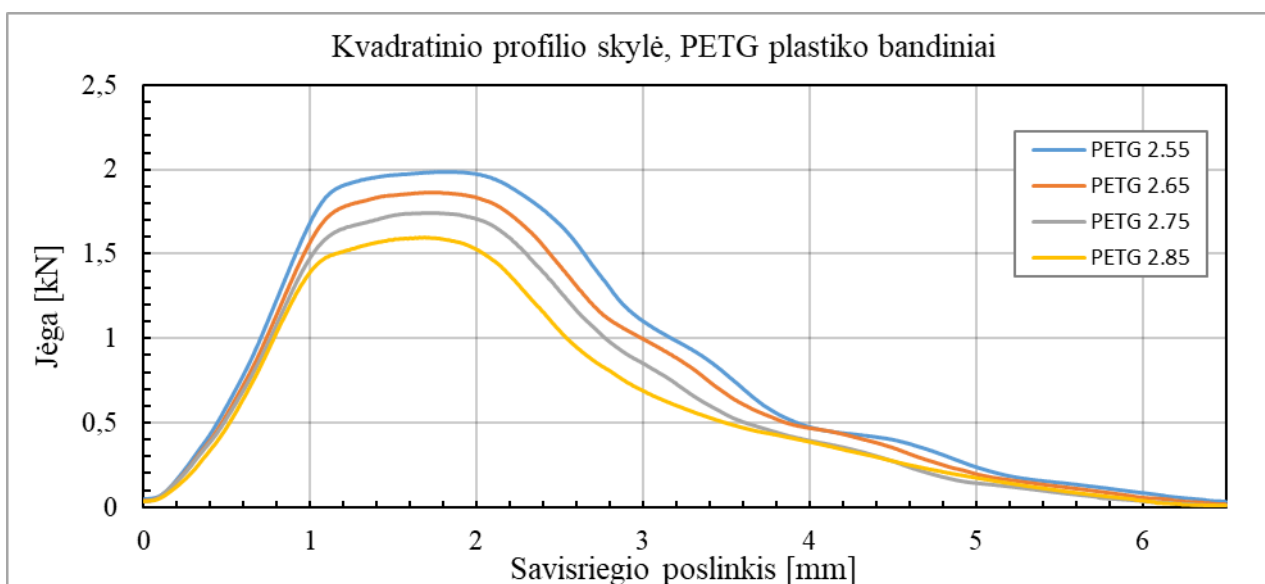
ST sraigto maksimali ištraukimo jėga iš PLA plastiko ruošinių rasta esant ST sraigto poslinkiui $1,65 \pm 0,06$ mm, kai buvo naudojama Ø2,80 mm skylė ir $1,96 \pm 0,12$ mm likusioms konfigūracijoms.

O maksimali ištraukimo jėga iš PETG plastiko ruošinių rasta esant ST sraigto poslinkiui $1,47 \pm 0,23$ mm.

Grafikuose (žr. 4.7 ir 4.8 pav.) atvaizduojami eksperimente gautųjų ST sraigto ištraukimo iš ruošinio jėgos priklausomybės nuo ST sraigto poslinkio, esant kvadratinėms skylėms ruošiniuose ir naudojant bandinius iš PLA bei PETG plastiko.



4.7 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė



4.8 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su kvadratinio profilio skylė

Analizuojant ištraukimo jėgas iš kvadratinio profilio skylių, rasta, kad maksimali ištraukimo jėga esant $\varnothing 2,80$ mm skylėi yra 2,78 ir 1,988 kN atitinkamai PLA ir PETG plastiko ruošiniuose.

Lyginant visus keturių skylių dydžius, PLA plastiko bandiniai yra atsparesni už PETG plastiko bandinius $40 \pm 2,5 \%$.

ST sraigto maksimali ištraukimo jėga iš PLA plastiko ruošinių rasta esant ST sraigto poslinkiui $1,74 \pm 0,19$ mm. O maksimali ištraukimo jėga iš PETG plastiko ruošinių rasta esant ST sraigto poslinkiui $1,74 \pm 0,14$ mm.

4.3. Skirtingo skylių profilio eksperimentinių duomenų palyginimas

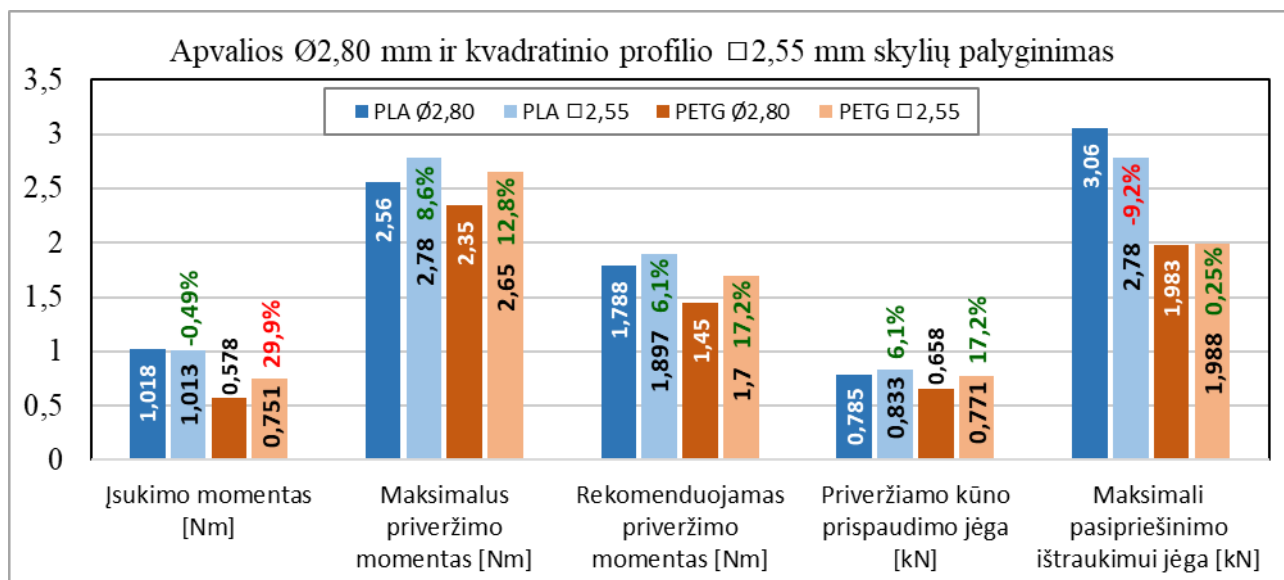
Kiekvienai bandymų serijos gautiesiems duomenims yra apskaičiuojamas rekomenduojamas ST sraigto priveržimo momentas T_T naudojantis 2 formule. Toliau yra randama ST sraigto priveržimo metu susidaranti ašinė jėga į priveržiamą kūną, naudojantis 5, 6 formulėmis ir esant rekomenduojamam sukimo momentui T_T . Toliau apskaičiuotos reikšmės ir gautieji eksperimentiniai duomenys yra surašomi į 4.1 lentelę.

4.1 lentelė. Gautieji savisriegio sraigto įsukimo ir ištraukimo iš ruošinio duomenys

Skylių profilis		Polilakto rūgšties plastikas (PLA)					Polietileno tereftalato glikolio plastikas (PETG)				
		Įsukimo momentas T_{Dmax} , Nm	Maksimalus priveržimo momentas T_s , Nm	Rekomenduojamas priveržimo momentas T_T , Nm	Priveržiamo kūno prispaudimo jėga F_i , kN	Maksimali pasipriešinimo ištraukimui jėga, kN	Įsukimo momentas T_{Dmax} , Nm	Maksimalus priveržimo momentas T_s , Nm	Rekomenduojamas priveržimo momentas T_T , Nm	Priveržiamo kūno prispaudimo jėga F_i , kN	Maksimali pasipriešinimo ištraukimui jėga, kN
Apvalus	Ø2,8	1,018	2,56	1,788	0,785	3,06	0,578	2,35	1,450	0,658	1,983
	Ø2,95	0,790	2,53	1,661	0,729	2,90	0,513	2,35	1,429	0,648	1,898
	Ø3,1	0,585	2,07	1,329	0,583	2,59	0,335	1,580	0,957	0,434	1,716
Kvadratinis	□2,55	1,013	2,78	1,897	0,833	2,78	0,751	2,65	1,700	0,771	1,988
	□2,65	0,822	2,19	1,506	0,661	2,57	0,583	2,27	1,427	0,647	1,861
	□2,75	0,611	1,950	1,280	0,562	2,41	0,384	1,846	1,115	0,506	1,740
	□2,85	0,458	1,588	1,023	0,449	2,29	0,286	1,489	0,888	0,402	1,599

Gautiesiems duomenims palyginti nuspręsta kvadratinio ir apvalaus profilių skylės palyginti pagal artimiausias tarpusavyje esančias įsukimo momento, maksimalaus priveržimo momento bei pasipriešinimo ištraukimui reikšmes. Iš gautųjų duomenų (žr. 4.1 lentelę) matoma, kad artimiausiai kvadratinio profilio 2,55, 2,65 ir 2,75 mm skylių mechaninės savybės sutampa atitinkamai su Ø2,80, Ø2,95 ir Ø3,10 mm apvalaus profilio skylėmis. Pagal kitų duomenų suderinamumą, kvadratinio profilio 2,85 mm skylėi atitiktumu būtų apie Ø3,25 mm apvalaus profilio skylė. Kadangi esant Ø3,25 mm skylėi, o ST išoriniui skersmeniui Ø3,5 mm, sriegio susikabinimas su plastikumu tampa ribiškai mažas, dėl to 2,85 mm kvadratinio profilio skylė nėra toliau analizuojama.

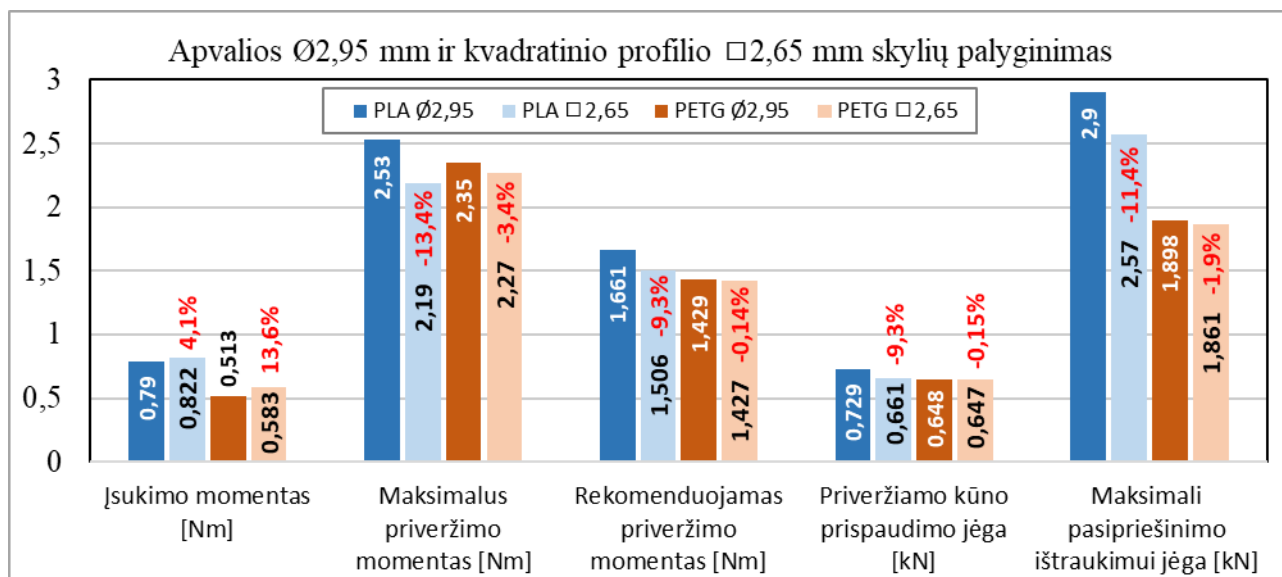
Toliau yra pateikiamas trijų skirtingo dydžių skylių palyginimas tarpusavyje (žr. 4.9, 4.10 ir 4.11 pav.) naudojantis 4.1 lentelėje supildytais duomenimis. Stulpelinėse diagramose yra pateikiamos kvadratinės ir apvalios skylės atitikmenys bei šių skylių mechaninės savybės priklausomai nuo analizuotos ruošinio medžiagos. Diagramoje prie kiekvienos kvadratinio profilio skylės mechaninių savybių yra pateikiamas procentinis skirtumas, lyginant su apvalios skylės atitikmeniu. Procentinis skirtumas yra pateikiamas žalia spalva, kai gautieji parametrai viršija apvalios skylės parametrus, išskyrus įsukimo momento parametą, kai šiam esant mažesnio dydžio, šis laikomas geresniu.



4.9 pav. Ø2,80 mm apvalaus profilio ir 2,55 mm kvadratinio profilio skylių palyginimas

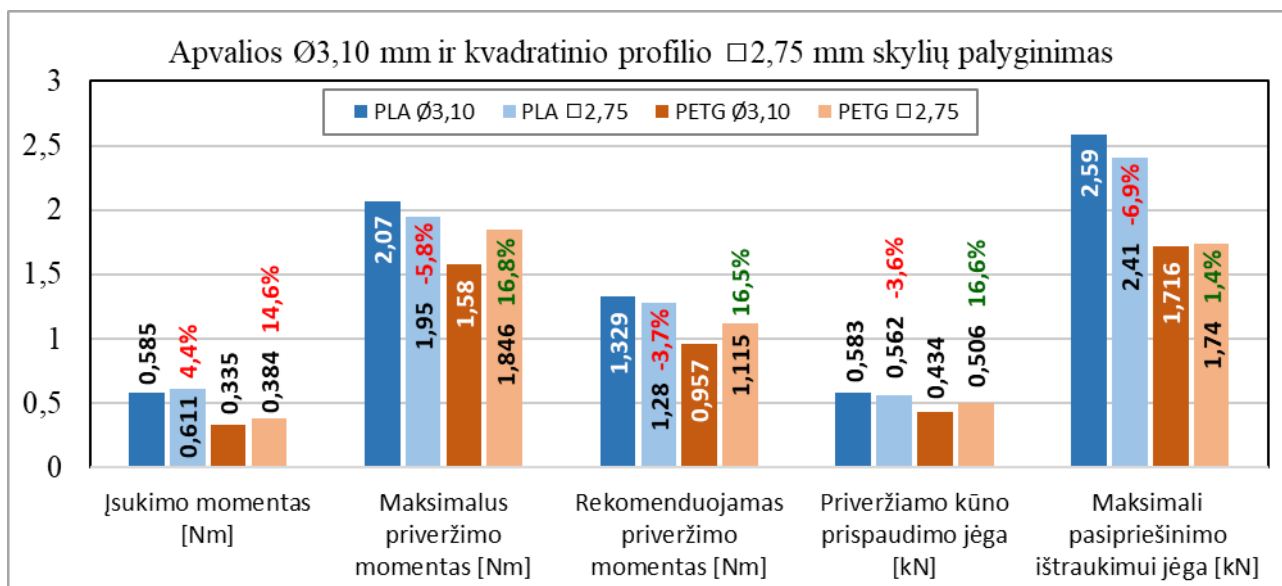
Iš 4.9 paveikslo matoma, kad bandiniuose iš PLA plastiko ST sraigto įsukimo momentas į kvadratinio profilio skylę yra artimas apvalaus profilio skylei ir šis dydis buvo 0,49 % mažesnis, o likusieji parametrai iš ST sraigto įsukimo bandymo gauti didesni ir skirtumas viršijo 6,1 %. Tačiau šios konfigūracijos kvadratinė skylė buvo mažiau atspari ST sraigto ištraukimui per 9,2 %. Bandiniuose iš PETG plastiko, kvadratinio profilio skylė viršijo visus analizuojamus parametrus, lyginant su apvalios skylės atitikmeniu. ST sraigto ištraukimo jėga šioje konfigūracijoje skyrėsi vos per 5 N, sudarantis 0,25 % skirtumą. Didžiausias skirtumas pastebimas, ST sraigto įsukimo momente, kai į kvadratinio profilio skylę ST sraigtui įsukti reikalingas 29,9 % didesnis sukimo momentas.

Analizuojant Ø2,95 mm apvalios skylės atitikmenį – kvadratinio profilio 2,65 mm skylę, matoma, kad nepriklausomai nuo naudotos bandinių medžiagos, apvali skylė turi geresnius mechaninius parametrus (žr. 4.10 pav.). Naudojant PLA plastiko bandinius, ST sraigto įsukimui buvo reikalingas 4,1 % didesnis sukimo momentas, o PETG plastiko bandiniuose skirtumas buvo didesnis – 13,6 %. PETG plastiko bandiniuose likę mechaniniai parametrai buvo artimi apvalios skylės atitikmeniui ir didžiausias skirtumas pastebimas maksimalaus priveržimo momente – 3,4 %. PLA plastiko bandiniuose likusieji mechaniniai parametrai buvo 9,3–13,4 % prastesni nei apvalios skylės atitikmenyje.



4.10 pav. Ø2,95 mm apvalaus profilio ir 2,65 mm kvadratinio profilio skylių palyginimas

Lyginant Ø3,10 mm apvalios skylės atitikmenį – kvadratinio profilio 2,75 mm skylę (žr. 4.11 pav.), pastebima, kad PLA plastiko bandiniuose kvadratinio profilio skylė turėjo iki 6,9 % prasčiau mechaninius parametrus. Didžiausias skirtumas matomas maksimalaus pasipriešinimo ištraukimo jėgai – 6,9 % mažesnis bei maksimalaus priveržimo momente – 5,8 % mažesnis.

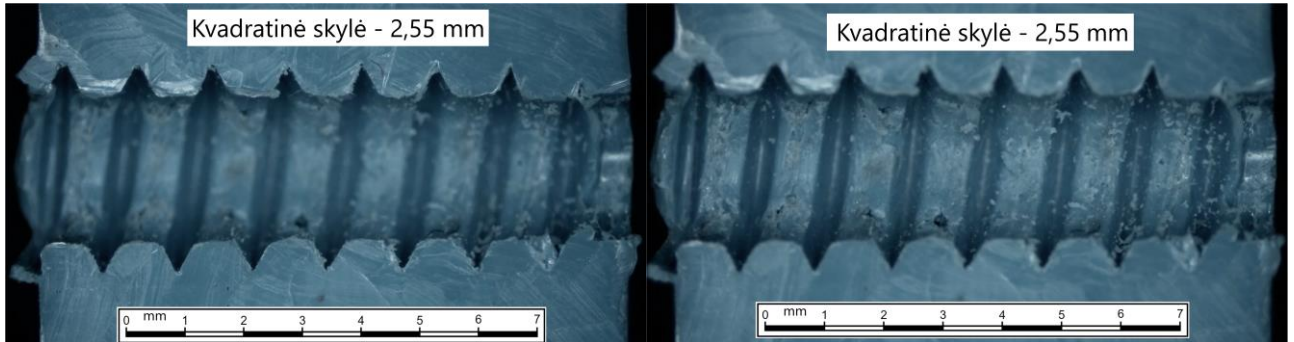


4.11 pav. Ø3,10 mm apvalaus profilio ir 2,75 mm kvadratinio profilio skylių palyginimas

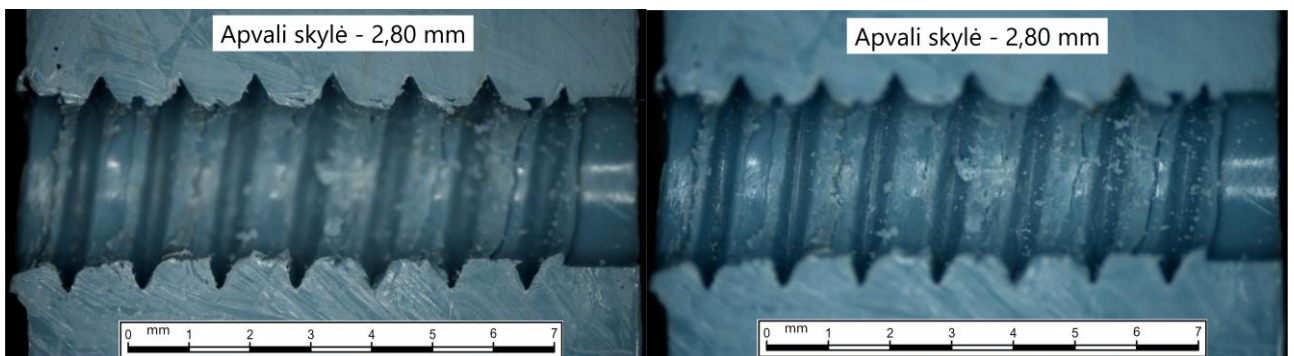
PETG plastiko bandinių kvadratinėse skylėse pastebimas padidėjęs maksimalaus ST sraigto prisukimo momentas – 16,8 %. Panašus skirtumas randamas ir rekomenduojamame priveržimo momente – 16,5 % bei priveržiamo kūno jėgoje – 16,6 %. PETG plastiko bandinio kvadratinė skylė atlaiko panašias ST sraigto ištraukimo jėgas kaip ir apvalaus profilio skylė, rasta 1,4 % didesnė apkrovimo jėga kvadratinėje skylėje. Tačiau matoma, kad ST sraigto įsukimui į kvadratinio profilio skylę reikalingas 14,6 % didesnis sukimo momentas.

4.4. Ruošinyje suformuoto sriegio analizės rezultatai

Naudojantis *HAYEAR* mikroskopu padarytos ST sraigto ruošinyje susiformavusio sriegio skerspjūvių nuotraukos. Vienos konfigūracijos skylėi pateikiami du vaizdai – pirmoje nuotraukoje pateikiamas sufokusuotas vaizdas į pjūvį, o antrasis vaizdas sufokusuojamas į sriegio pašaknis. Toliau pateikiami kvadratinio profilio 2,55 ir 2,75 mm dydžio skylių skerspjūviai 4.12 ir 4.14 paveiksluose bei apvalaus profilio Ø2,80, Ø3,10 mm dydžio skylių skerspjūviai 4.13 ir 4.15 paveiksluose. Likusių konfigūracijų skerspjūvių nuotraukos yra pateikiamos D priede.



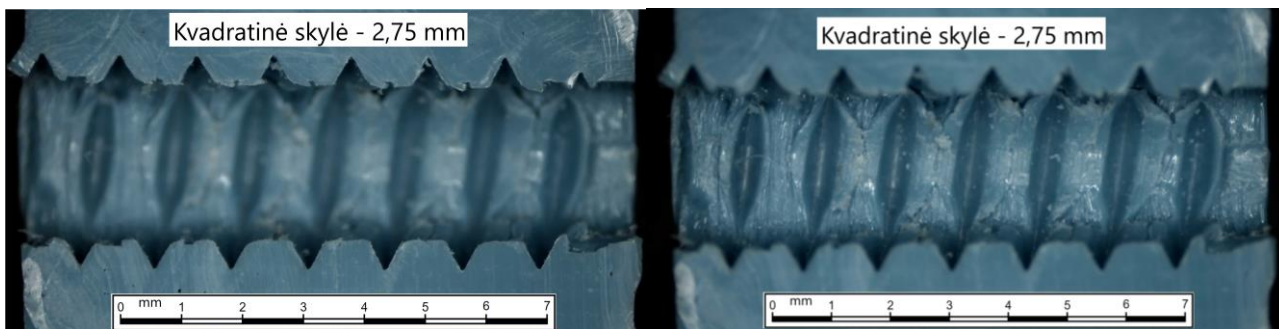
4.12 pav. Kvadratinio profilio 2,55 mm skylės skerspjūvis



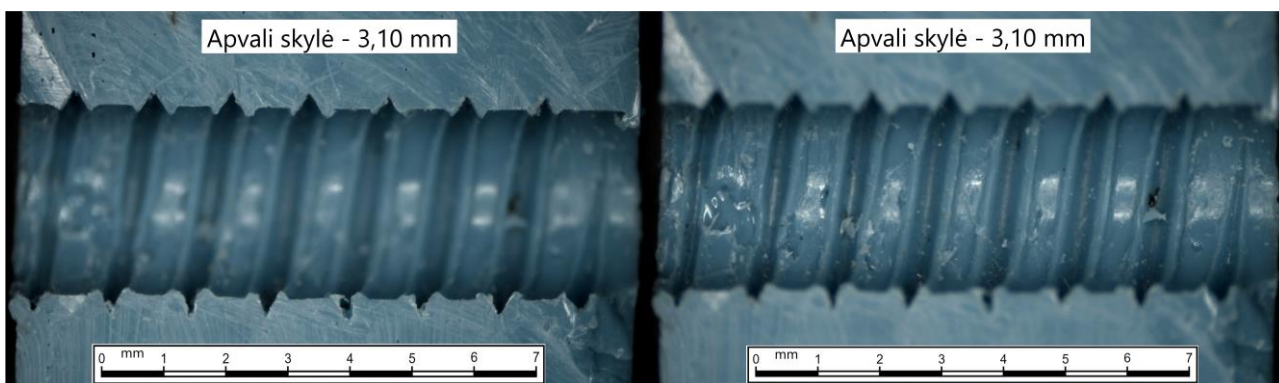
4.13 pav. Apvalaus profilio Ø2,80 mm skylės skerspjūvis

Siauriausių skylių konfigūracijose pastebima, kad ST sraigto suformuotas sriegis beveik pilnai užpildo buvusią tuščią erdvę tarp ST sraigto ir plastiko. Atkreipiant dėmesį į 2,55 mm dydžio kvadratinio profilio skylės pašaknis 4.12 paveiksle, pastebimas plastiko plastinis tekėjimas į kvadrato kampus. Taip pat pastebima, kad kvadrato kampuose susidaro tuščios erdvės kišenės. Apvalaus profilio Ø2,80 mm dydžio bandinyje (žr. 4.13 pav.) matomas statmenas plastiko tekėjimas nuo ST sraigto sriegio paviršiaus, taigi formuojamas plastikas sunkiausiai teka link ST sraigto pašaknų.

Iš skerspjūvio nuotraukų (4.12 bei 4.13 pav.) matomi vietomis smulkūs plastiko atskilimai ir trupiniai nuo didelių plastiko deformacijų. Šie atskilimai ar plastiko trupiniai daugiausiai yra pasiskirstę vietose, kur plastikas turėjo nutekėti didžiausią atstumą – ties ST sraigto pašaknimis apvalaus profilio skylėse, o kvadratinio profilio skylėse ties kvadrato kampais. Toliau didėjant skylių dydžiams, plastiko atskilimai susiformuoja rečiau (žr. 4.14 ir 4.15 pav.).



4.14 pav. Kvadratinio profilio 2,75 mm skylės skerspjūvis



4.15 pav. Apvalaus profilio Ø3,10 mm skylės skerspjūvis

Atlikta ST sraigto suformuoto sriegio skerspjūvio analizė parodė sutampančius rezultatus su pirmajame skyriuje aptartu, analogišku Mathurin et al. (2009) publikuotu tyrimu.

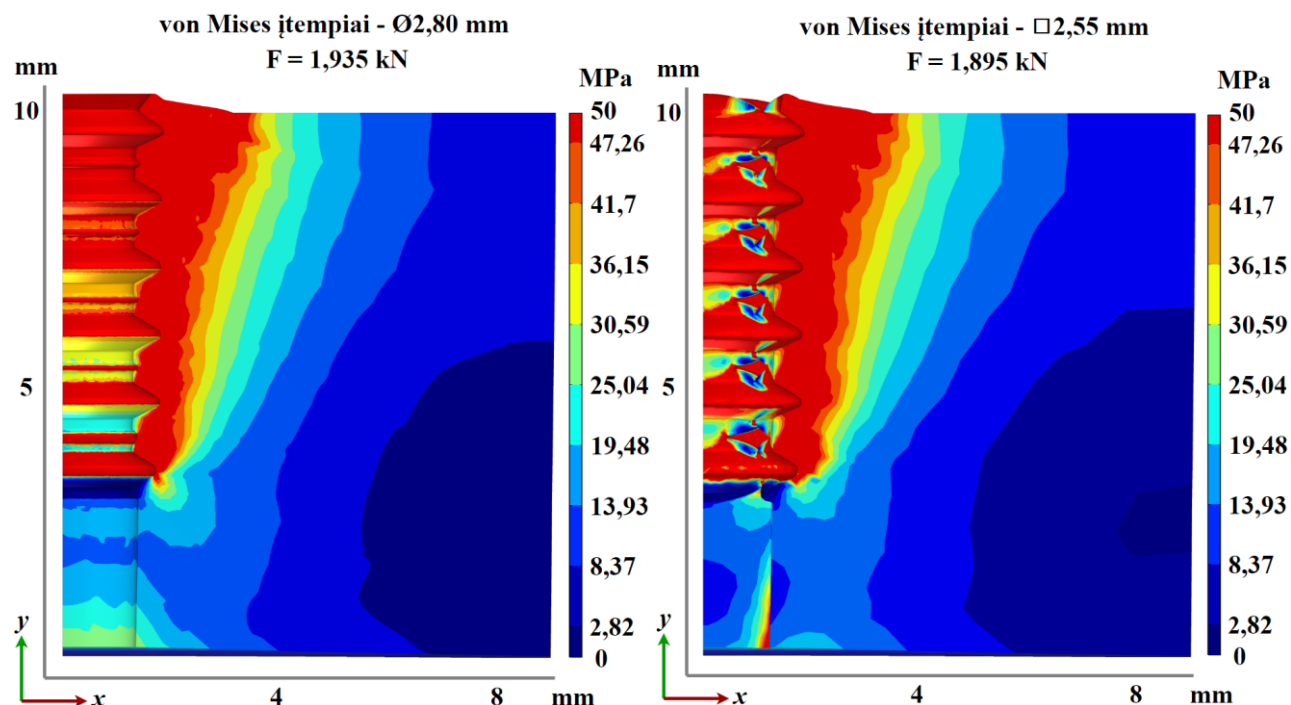
4.5. Baigtinių elementų analizės rezultatai

Nubraižius 3D aplinkoje analizuojamus kūnus, atlikta BEM analizė Ø2,80, Ø2,95 mm ir Ø3,10 skersmens bei □2,55–2,75 mm kvadratinio profilio skylėms, kai naudojama bandinių medžiaga buvo PETG. Analizės buvo atliekamos naudojantis *Intel i9-11900* procesoriumi su 8-iais branduoliais, 5,2 GHz procesoriaus maksimaliu dažniu bei 2933 MHz greičio, 32 GB laikinąja atmintimi (RAM). Analizės vidutinis skaičiavimo laikas buvo tarp 11 ir 20 valandų. Analizės trukmė kito priklausomai nuo pasirinkto BEM tinklelio ir analizuojamų jėgos atskaitos taškų kiekio.

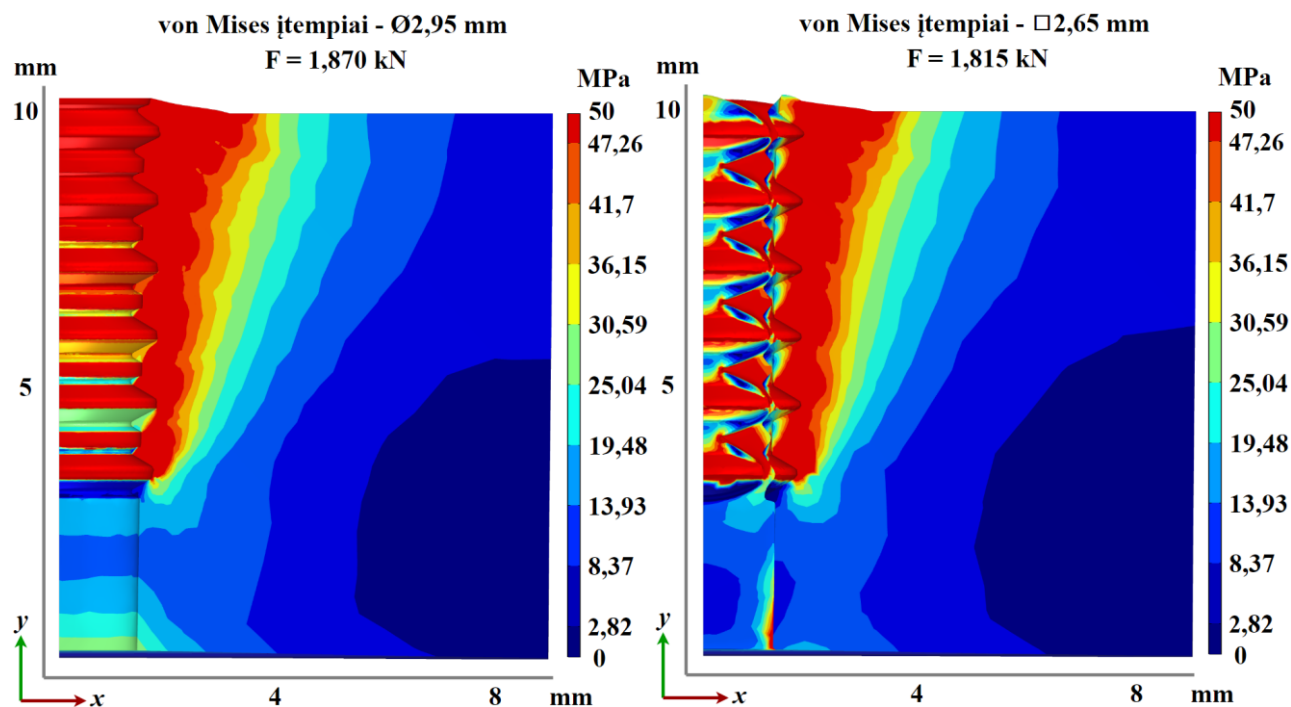
Susidarę įtempiai traukiant ST sraigtą iš Ø2,80 mm skersmens ir ekvivalentiškos □2,55 mm kvadratinės kiaurymės atvaizduojami 4.16 paveiksle. Iš atliktos analizės matyti, kad Ø2,80 mm skersmens kiaurymėje, traukiant ST sraigtą gaunama maksimali 1,935 kN jėga, o kvadratinio profilio konfigūracijoje – 1,895 kN. Šios suskaičiuotos jėgos yra mažesnės už eksperimentiškai gautuosius duomenis atitinkamai 2,48 % ir 4,91 %.

Analizuojamose Ø2,95 mm apvalios ir □2,65 mm kvadratinės profilio skylėse, pastebimi mažiausi nuokrypiai nuo eksperimentinių rezultatų. Gauta maksimali traukimo jėga apvalaus profilio skylėje 1,870 kN, o kvadratinio profilio kiaurymėje – 1,815 kN. Tai atitinkamai skylių profiliams rastas nuokrypis buvo 1,5 % ir 2,53 %, kai analizėje gautos mažesnės ST sraigto traukimo jėgos. Šių

konfigūracijų įtempiai atvaizduojami 4.17 paveiksle. Plačiausios konfigūracijos kiauřymėse Ø3,10 mm apvalios ir □2,75 mm kvadratinės profilio skylėse – gautos traukimo jėgos sutampa ir buvo 1,665 kN. Nuokrypis nuo eksperimentinių rezultatų atitinkamai buvo 3,06 % ir 4,5 %. Plačiausių kiauřymių konfigūracijų įtempiai atvaizduojami 4.18 paveiksle.

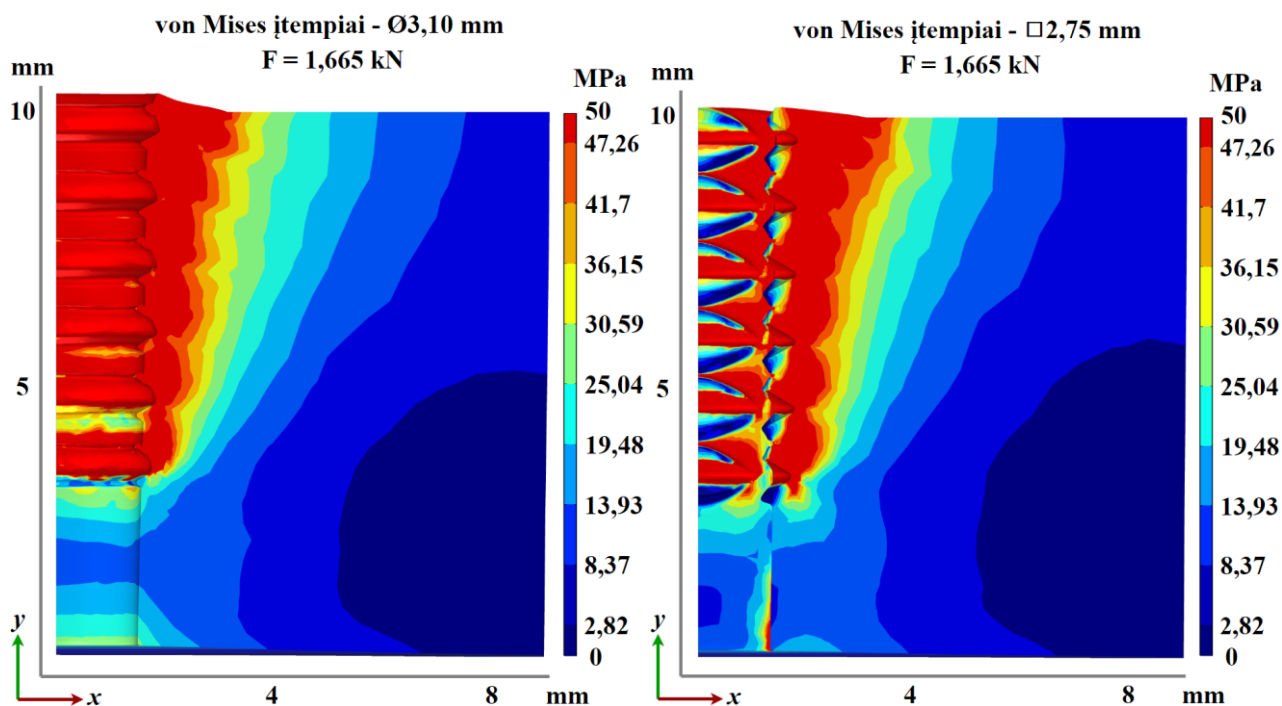


4.16 pav. Plastike susidarantys įtempiai savisriegio sraigto traukimo metu (Ø2,80 mm skersmens ir □2,55 mm kvadratinės skylės konfigūracijos)



4.17 pav. Plastike susidarantys įtempiai savisriegio sraigto traukimo metu (Ø2,95 mm skersmens ir □2,65 mm kvadratinės skylės konfigūracijos)

Iš įtempių grafikų pastebima bendra tendencija ST sraigto traukime. Veikianti tempimo jėga ST ašies vektoriumi persiduoda į bandinį pakeitusi jėgos veikimo kryptį. Tai sprendžiama iš grafikuose matomų susiderinančių įtempių koncentracijų ties sriegio paviršiumi. Toliau plastikinę detalę veikia ST sraigto sriegio profiliui statmena jėga. Ši toliau veikdama sudaro gniuždymo, lenkimo, tempimo ir šlyties įtempius medžiagoje.



4.18 pav. Plastike susidarantys įtempiai savisriegio sraigto traukimo metu (Ø3,10 mm skersmens ir □2,75 mm kvadratinės skylės konfigūracijos)

Kaip galima pastebėti iš 2.4 paveikslo, nevertinant būsimos sriegio formos, pirminis šlyties plotas tarp ST sraigto ir plastikinio bandinio bus visada didesnis esant apvalios formos kiauryme, nei naudojant kvadratinio profilio skyles. Naudojantis įprasta šlyties formule $\tau = \frac{F}{A}$, būtų galima teigti, kad kvadratinio profilio kiaurymėje maksimali ST sraigto ištraukimo jėga būtų mažesnė 3,9 % esant siauriausiai konfigūracijai bei būtų mažesnė apie 15 % esant □2,75 mm kiauryme. Tačiau kaip matoma iš eksperimentinių ir skaitmeninių rezultatų, ši šlyties formulė neatitinka realiai susidarantių įtempių medžiagoje ir yra tik dalis visų susidarantių įtempių visumos.

Toliau 4.2 lentelėje surašomos skaitmeninio tyrimo gautosios reikšmės, kartu su eksperimentiškai gautosiomis jėgomis ir nurodomas šių tyrimų rezultatų procentinis skirtumas. Taip pat nurodomas analizėje naudoto tinklėlio elementų kiekis tūkstančiais prie kiekvienos konfigūracijos.

4.2 lentelė. Gautieji savisriegio sraigto traukimo iš ruošinio skaitmeniniai duomenys

Skylės profilis	Skylės profilio dydis, mm	Eksperimentinio tyrimo maksimali pasipriešinimo ištraukimui jėga, kN	Baigtinių elementų analizės pasipriešinimo ištraukimui jėga, kN	Analizėje naudoto tinkelio elementų kiekis, tūkst.	Santykinis skirtumas tarp eksperimentinio ir skaitmeninio tyrimo rezultatų
Apvalus	Ø2,8	1,983	1,935	120,5	2,48 %
	Ø2,95	1,898	1,870	108,3	1,50 %
	Ø3,1	1,716	1,665	96,2	3,06 %
Kvadratinis	□2,55	1,988	1,895	150,3	4,91 %
	□2,65	1,861	1,815	132,0	2,53 %
	□2,75	1,740	1,665	113,6	4,50 %

Kaip matoma iš duomenų suvestinės 4.2 lentelėje, BEM nubraižant 3D aplinkoje suformuotą sriegį yra geras būdas patikrinti plastike susiformavusius įtempius bei suskaičiuoti maksimalias atlaikomas apkrovas tempiant ST sraigtą. BEM tikslumas svyravo tarp 1,50 % ir 4,91 %, lyginant su eksperimentiškai gautaisiais duomenimis.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Išvados

Pasitelkiant mokslinius tyrimus ir literatūrą, šiame darbe tiriamas savisriegio sraigto skylės profilis plastikuose. Tiriama įtaka savisriegio sraigto įsukimui ir pasipriešinimo ištraukimui iš plastikinių detalių ir šio tvirtinimo būdo tarpusavio mechaninės savybės. Analizuoti parametrai atspindi pagrindinius keliamus reikalavimus šiam sutvirtinimo būdai. Sudarytas skaičiuojamasis modelis, įvertinant plastike susiformavusį sriegį ir atlikta savisriegio sraigto traukimo iš skirtingo profilio kiaurymių baigtinių elementų analizė.

Išanalizuoti gauti eksperimentiniai, teoriniai ir skaitmeniniai tyrimo rezultatai parodė:

1. Esant siauriausio profilio kvadratinėms kiaurymėms, lyginant su ekvivalentiška Ø2,80 mm skylė, gaunami iki 12,8 % didesni maksimalaus priveržimo momentai ir iki 17,2 % didesnės priveržimo kūno prispaudimo jėgos. Įsukimo momentas gautas iki 29,9 % didesnis, pasipriešinimo ištraukimui jėga gauta iki 9,2 % mažesnė.
2. Analizuojamoje 2,65 mm kvadratinėje kiaurymėje gauti visi penki parametrai, nurodantys Ø2,95 mm skylės pranašumą abiem plastiko medžiagoms. Gauti iki 13,6 % mažesni priveržimo parametrai, iki 11,4 % mažesnis pasipriešinimas ištraukimui bei iki 13,6 % didesnis įsukimo momentas, lyginant su apvalaus profilio atitikmeniu.
3. Plačiausiose analizuojamose kiaurymėse plastiškesnė PETG medžiaga turėjo iki 16,8 % didesnius priveržimo parametrus, 1,4 % didesnę pasipriešinimą ištraukimui ir 14,6 % didesnę įsukimo momentą naudojant kvadratinio profilio kiaurymę. To paties kiaurymių dydžio PLA plastiko bandiniuose su kvadratinio profilio skylė randamos nuo 3,6 iki 6,9 % prastesnės mechaninės šio sutvirtinimo būdo savybės.
4. Taikant baigtinių elementų metodą, rastos savisriegio sraigto pasipriešinimo ištraukimui maksimalios jėgos 4,91 % tikslumu.
5. Buvo pastebėta, kad pradinis teorinis savisriegio sraigto ištraukimo šlyties plotas neturi tiesinės priklausomybės nuo jo ištraukimo maksimalios jėgos iš skirtingo profilio kiaurymių.
6. Baigtinių elementų analizės metu įsukto savisriegio sraigto ištraukimo jėgą iš plastikinių detalių apibrėžia gniuždymo, tempimo, lenkimo ir šlyties įtempiai.

Rekomendacijos

1. Projektuojant plastikinius gaminius su savisriegio sraigto tvirtinimo būdu, siūloma naudoti siauriausią 2,55 mm kvadratinio profilio kiaurymę su Ø3,5 mm savisriegiu sraigtu, kai siekiama gauti

aukštesnes šios jungties atlaikomas apkrovas. Gaminį projektuojant pagal standarte nurodomą rekomenduojamą Ø2,95 mm skylės dydį, siūloma naudoti apvalaus profilio kiaurymę.

2. Dėl skirtingų plastiko medžiagų savybių inžinieriams rekomenduojama atlikti dominančių parametrų bandymus su savisriegiais sraigtais ir pasirinkta medžiaga, prieš pradedant gaminti gaminius masinėje gamyboje.
3. Siekiant apskaičiuoti savisriegio sraigto, įsukto į plastikinę detalę, maksimalias atlaikomas ištraukimo jėgas, rekomenduojama taikyti baigtinių elementų metodą, nubraižant suformuotą sriegį plastikinėje detalėje.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

ASTM D1761-20. *Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood and Wood-Based Materials*. West Conshohocken, 2020. 10 p. <https://doi.org/10.1520/D1761-20>

Carano, A., Lonardo, P., Velo, S., & Incorvati, C. (2005). Mechanical properties of three different commercially available miniscrews for skeletal anchorage. *Progress in orthodontics*, 6(1), 82–97.

Cumbicus, W. E., Estrems, M., Arizmendi, M., & Jiménez, A. (2021). Joining polymer parts with self-tapping screws: an improvement of the screw thread geometry. *International Journal of Material Forming*, 14, 777–798. <https://doi.org/10.1007/s12289-020-01593-6/Published>.

Dinger, G. (2015). Dynamic modeling and simulation of the screwing behavior of thread forming screws. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.012>.

Dratschmidt, F., & Ehrenstein, G. W. (1997). Threaded joints in glass fiber reinforced polyamide. *Polymer Engineering & Science*, 37(4), 744–755. <https://doi.org/10.1002/pen.11718>.

Duong, N. N., Nhut, P. V., Satake, C., & Matsumoto, Y. (2018, June). Study on Mechanical Behavior of Self-tapping Screws Connection Using Washers in Single-Lapped Glass Fiber Reinforced Plastic Plates by Experiment and Finite Element Analysis. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 371, No. 1, pp. 012027). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/371/1/012027>.

Ellwood, K. R., Fesko, D., & Bauer, D. R. (2004). An axisymmetric model for thread forming in polycarbonate and polypropylene screw and boss fasteners. *Polymer Engineering & Science*, 44(8), 1498–1508. <https://doi.org/10.1002/pen.20146>.

LST EN 320:2011. *Smulkinių ir plaušų plokštės. Atsparumo ašiniam medsraigčių ištraukimui nustatymas*. Vilnius, 2011. 9 p.

Fromentin, G. (2004). Etude mécanique et technologique du taraudage par déformation: application aux aciers prétraités (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).

Gracco, A., Giagnorio, C., Parenti, S. I., Bonetti, G. A., & Siciliani, G. (2012). Effects of thread shape on the pullout strength of miniscrews. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 142(2), 186–190. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2012.03.023>.

Hou, S. M., Hsu, C. C., Wang, J. L., Chao, C. K., & Lin, J. (2004). Mechanical tests and finite element models for bone holding power of tibial locking screws. *Clinical Biomechanics*, 19(7), 738–745. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2004.04.012>.

Hsueh, M. H., Lai, C. J., Wang, S. H., Zeng, Y. S., Hsieh, C. H., Pan, C. Y., & Huang, W. C. (2021). Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling. *Polymers*, 13(11), 1758. <https://doi.org/10.3390/polym13111758>.

ISO 4954:2022. *Steels for cold heading and cold extruding*. Vilnius, 2022. 67 p.

Jasiūnienė, V., Vaitkus, A., & Grigonis, V. (2020). *Magistrantūros studijų baigiamojo darbo rengimo metodiniai nurodymai*. Technika.

Kastner, T., Troschitz, J., Vogel, C., Behnisch, T., Gude, M., & Modler, N. (2023). Investigation of the Pull-Out Behaviour of Metal Threaded Inserts in Thermoplastic Fused-Layer Modelling (FLM) Components. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 42. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010042>.

Lara, B., Seneviratne, L. D., & Althoefer, K. (2012). Automated Screw Insertion Monitoring Using Neural Networks: A Computational Intelligence Approach to Assembly in Manufacturing. In *Computational Intelligence And Its Applications: Evolutionary Computation, Fuzzy Logic, Neural Network and Support Vector Machine Techniques* (pp. 183–209). Imperial College Press. https://doi.org/10.1142/9781848166929_0008.

LST EN ISO 2702:2023. *Tvirtinimo detalės. Terminiškai apdoroti savisriegiai sraigtai. Mechaninės ir fizikinės savybės*. Vilnius, 2023. 13 p.

LST EN ISO 7049:2011. *Savisriegiai sraigtai su pusapvale cilindrine galvute, turinčia kryžminį griovelį*. Vilnius, 2011. 7 p.

Mathurin, F., Guillot, J., Stéphan, P., & Daidié, A. (2009). 3D finite element modeling of an assembly process with thread forming screw. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131(4). <https://doi.org/10.1115/1.3160377>.

Nam, J., Kim, D., & Oh, J. H. (2022). Investigation of the fastening behavior of self-tapping plastic joints with various supporting ribs. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 425–433. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.001>.

Norton, R. L. (2011). *Machine design: an integrated approach*. 4th edition. Prentice Hall.

Özen, A., Abali, B. E., Völlmecke, C., Gerstel, J., & Auhl, D. (2021). Exploring the role of manufacturing parameters on microstructure and mechanical properties in fused deposition modeling

(FDM) using PETG. *Applied Composite Materials*, 28(6), 1799–1828. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09940-9>.

Prusa Polymers. (2022a). Prusament PETG technical datasheet. Prieiga per internetą: https://storage.googleapis.com/prusa3d-content-prod-14e8-wordpress-prusament-prod/2023/10/9f8d2165-tds_prusament-petg_n_en.pdf. Prieigos data: 2024-01-21.

Prusa Polymers. (2022b). Prusament PLA technical datasheet. Prieiga per internetą: https://prusament.com/wp-content/uploads/2022/10/PLA_Prusament_TDS_2021_10_EN.pdf. Prieigos data: 2024-01-21.

Seneviratne, L. D., Ngemoh, F. A., Earles, S. W. E., & Althoefer, K. A. (2001). Theoretical modelling of the self-tapping screw fastening process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 215(2), 135–154. <https://doi.org/10.1243/0954406011520562>.

Seneviratne, L. D., Ngemoh, F. A., & Earles, S. W. E. (2000). An experimental investigation of torque signature signals for self-tapping screws. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 214(2), 399–410.

Stéphan, P., Mathurin, F., & Guillot, J. (2011). Analytical study of maximal tapping torque during forming screw process. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.013>.

Stéphan, P., Mathurin, F., & Guillot, J. (2012). Experimental study of forming and tightening processes with thread forming screws. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(4), 766–775. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.029>.

Tencer, A. F., Asnis, S. E., Harrington, R. M., & Chapman, J. R. (1996). Biomechanics of cannulated and noncannulated screws. In *Cannulated screw fixation: principles and operative techniques* (pp. 15–40). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2326-9_2.

Wang, S., Ma, Y., Deng, Z., Zhang, S., & Cai, J. (2020). Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials. *Polymer testing*, 86, 106483. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106483>.

A PRIEDAS. Bandinių spausdinimui naudotų plastikų techninės savybės

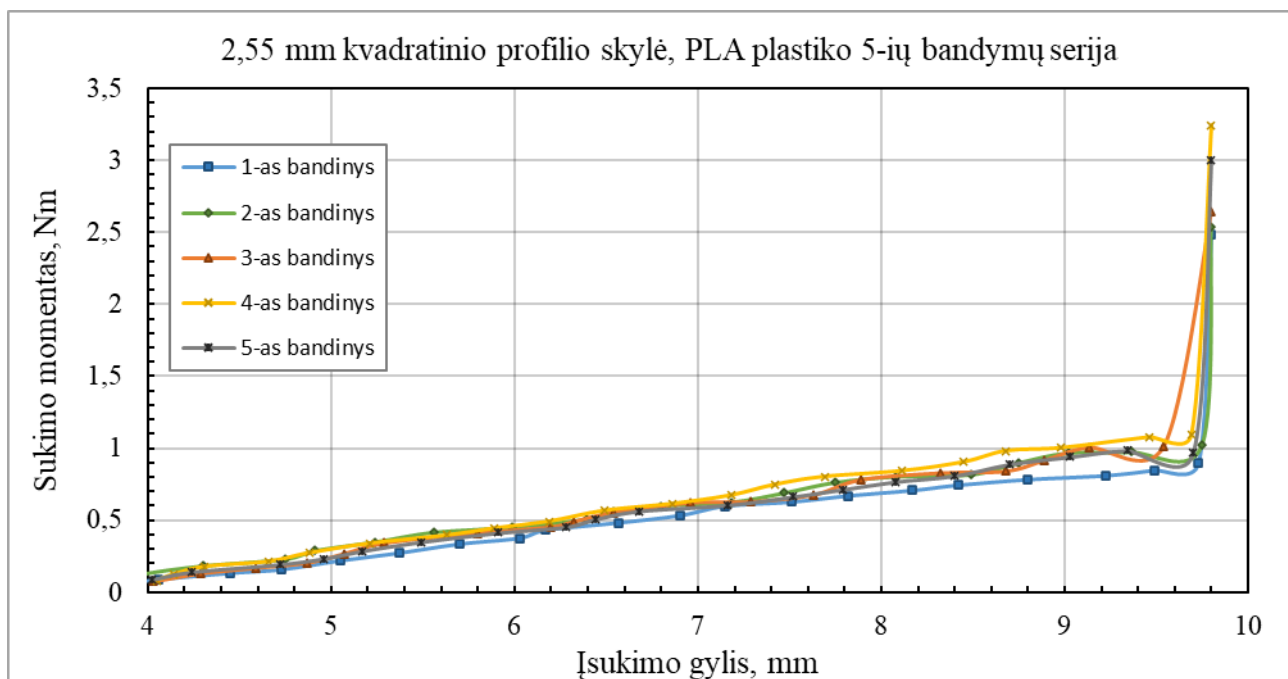
A1 lentelė. *Prusa Polymers* polilakto rūgšties plastiko (PLA) techninės savybės

Rekomenduojami plastiko spausdinimo parametrai		Parametrų reikšmės	
Spausdinimo temperatūra, °C		210 ± 10	
Spausdinimo pado temperatūra, °C		40 – 60	
Spausdinimo greitis, mm/s		iki 200	
Aušinimo ventiliatoriaus greitis, %		100	
Mechaniniai plastiko parametrai	Savybės		Testo metodas
	Horizontalia kryptimi	Vertikalia kryptimi	
Tankis, g/cm ³	1,24		ISO 1133
Tempimo stipris, MPa	51 ± 3	59 ± 2	ISO 527-1
Tamprumo modulis, GPa	2,3 ± 0,1	2,4 ± 0,1	ISO 527-1
Santykinis trūkstamasis pailgėjimas, %	2,9 ± 0,3	3,2 ± 1,0	ISO 527-1
Lenkimo stipris, MPa	83 ± 6	99 ± 1	ISO 178
Lenkimo modulis, GPa	3,1 ± 0,1	3,2 ± 0,1	ISO 178

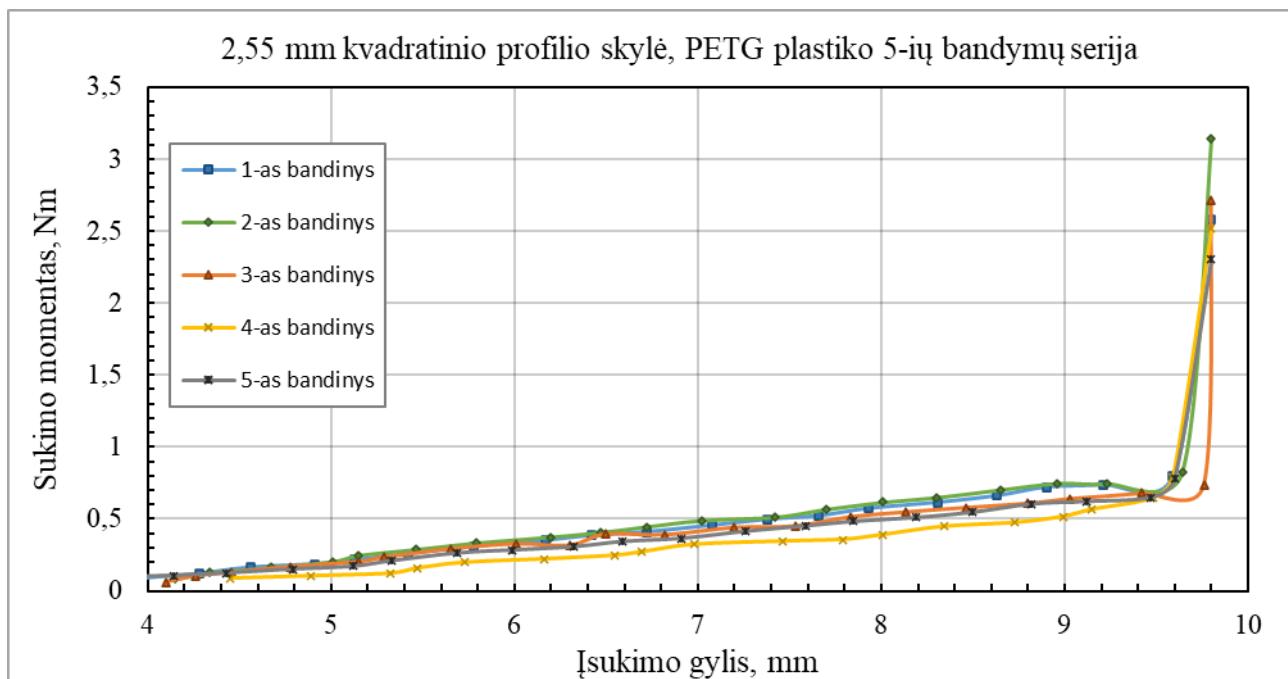
A2 lentelė. *Prusa Polymers* polietileno tereftalato glikolio plastiko (PETG) techninės savybės

Rekomenduojami plastiko spausdinimo parametrai		Parametrų reikšmės	
Spausdinimo temperatūra, °C		250 ± 10	
Spausdinimo pado temperatūra, °C		80 ± 10	
Spausdinimo greitis, mm/s		iki 200	
Aušinimo ventiliatoriaus greitis, %		50	
Mechaniniai plastiko parametrai	Savybės		Testo metodas
	Horizontalia kryptimi	Vertikalia kryptimi	
Tankis, g/cm ³	1,27		ISO 1133
Tempimo stipris, MPa	47 ± 2	50 ± 1	ISO 527-1
Tamprumo modulis, GPa	1,5 ± 0,1	1,6 ± 0,1	ISO 527-1
Santykinis trūkstamasis pailgėjimas, %	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1	ISO 527-1
Lenkimo stipris, MPa	66 ± 2	70 ± 1	ISO 178
Lenkimo modulis, GPa	1,7 ± 0,1	1,6 ± 0,1	ISO 178

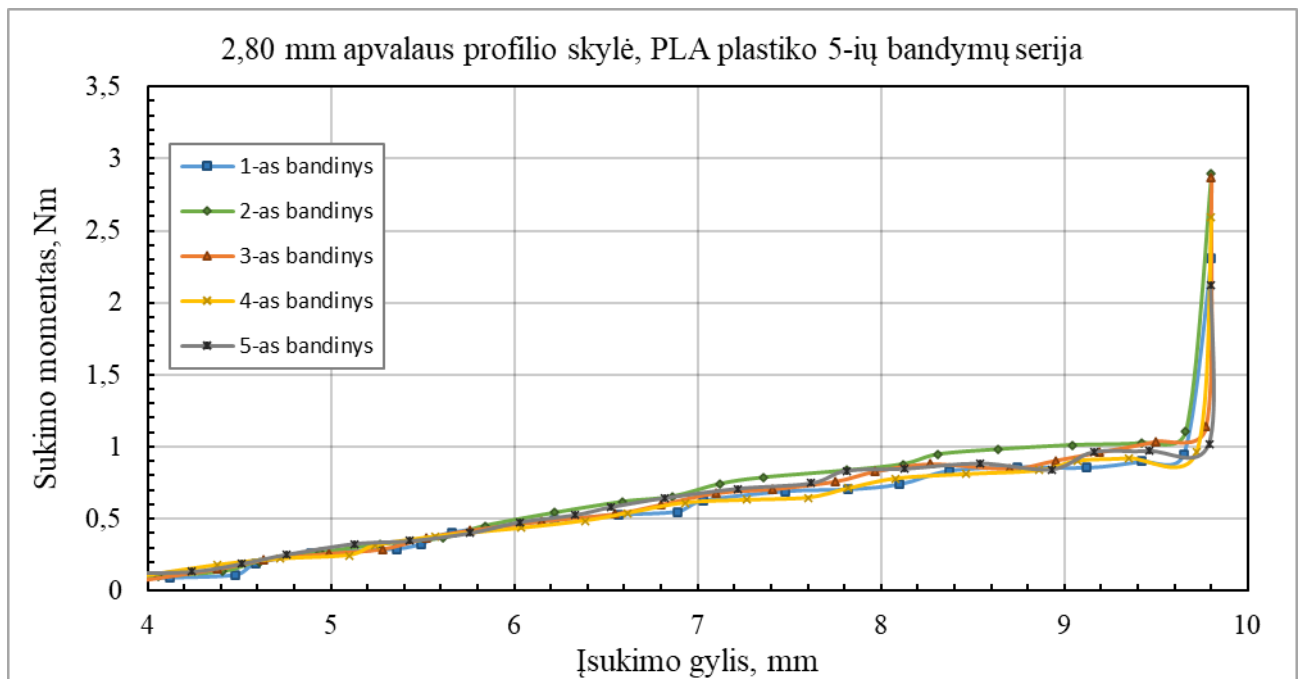
B PRIEDAS. Savisriegio sraigto įsukimo bandymų gautieji duomenys



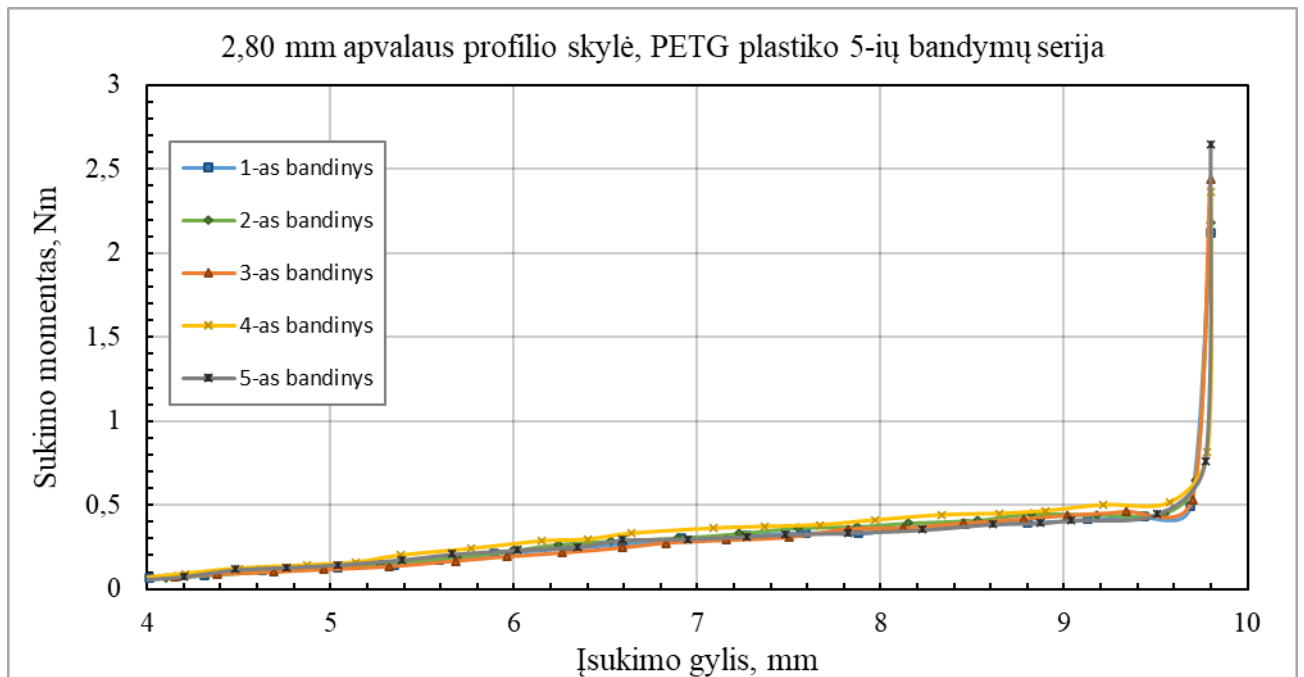
B1 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė



B2 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė

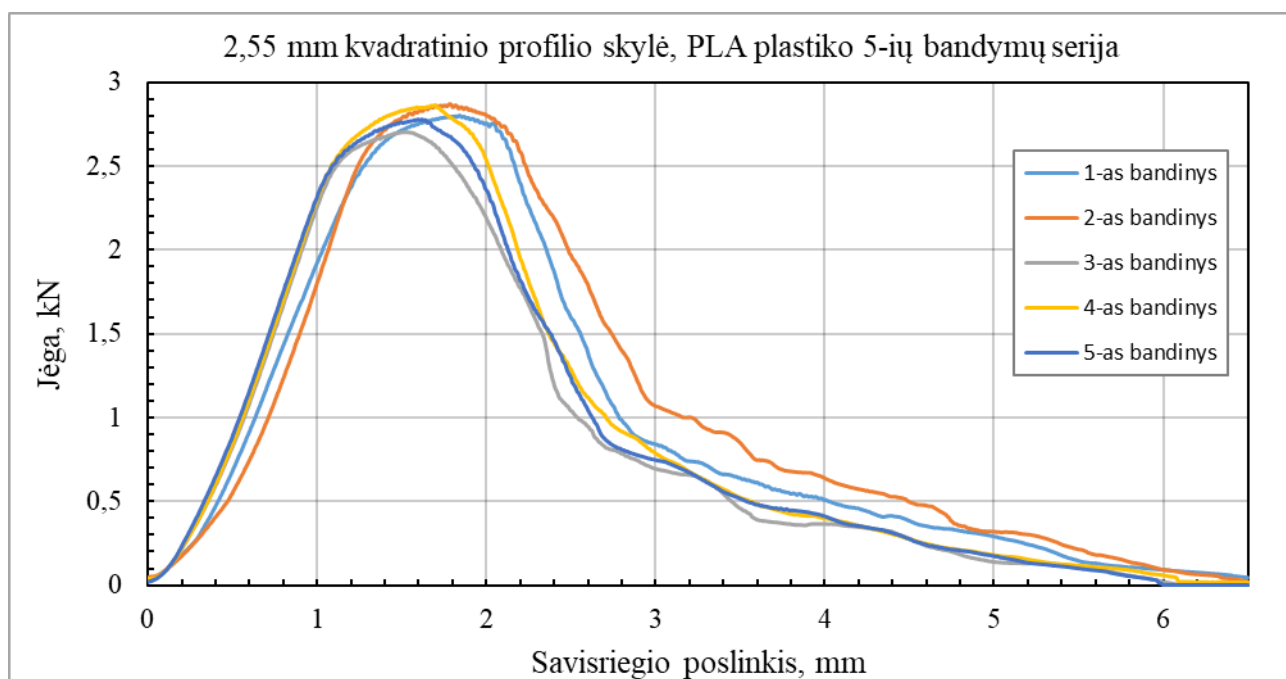


B3 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė

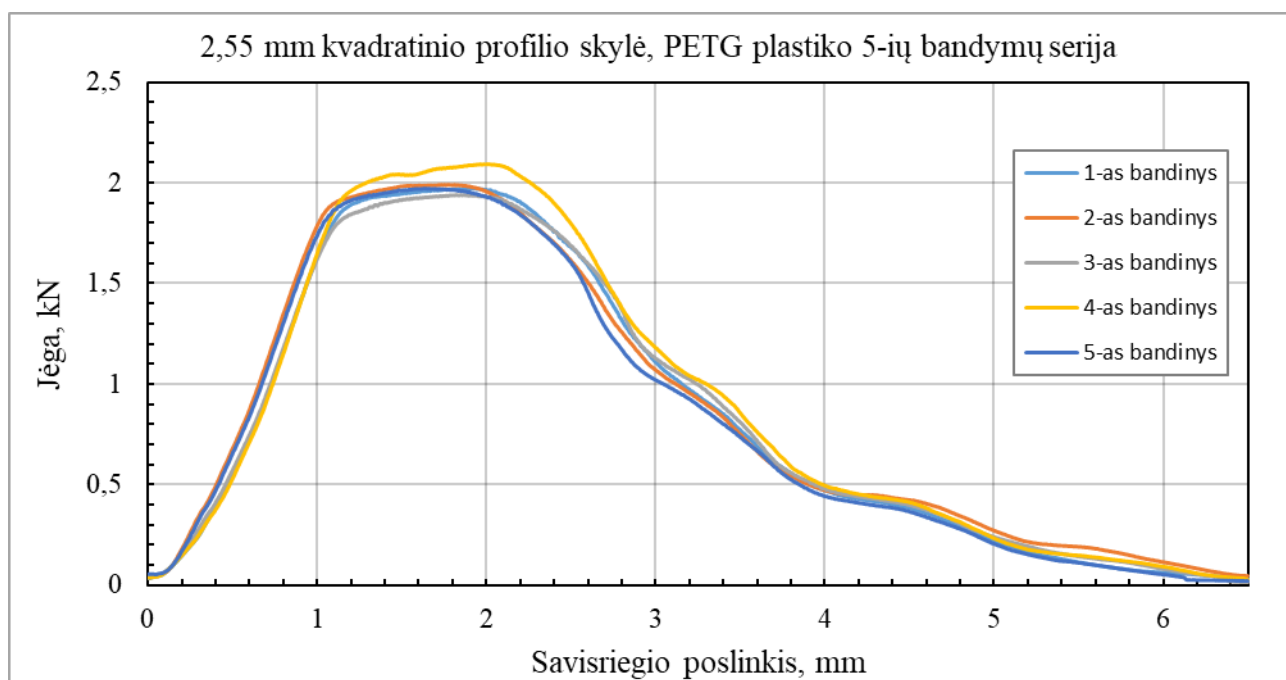


B4 pav. Savisriegio sraigto įsukimo momento priklausomybės nuo įsukimo gylio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė

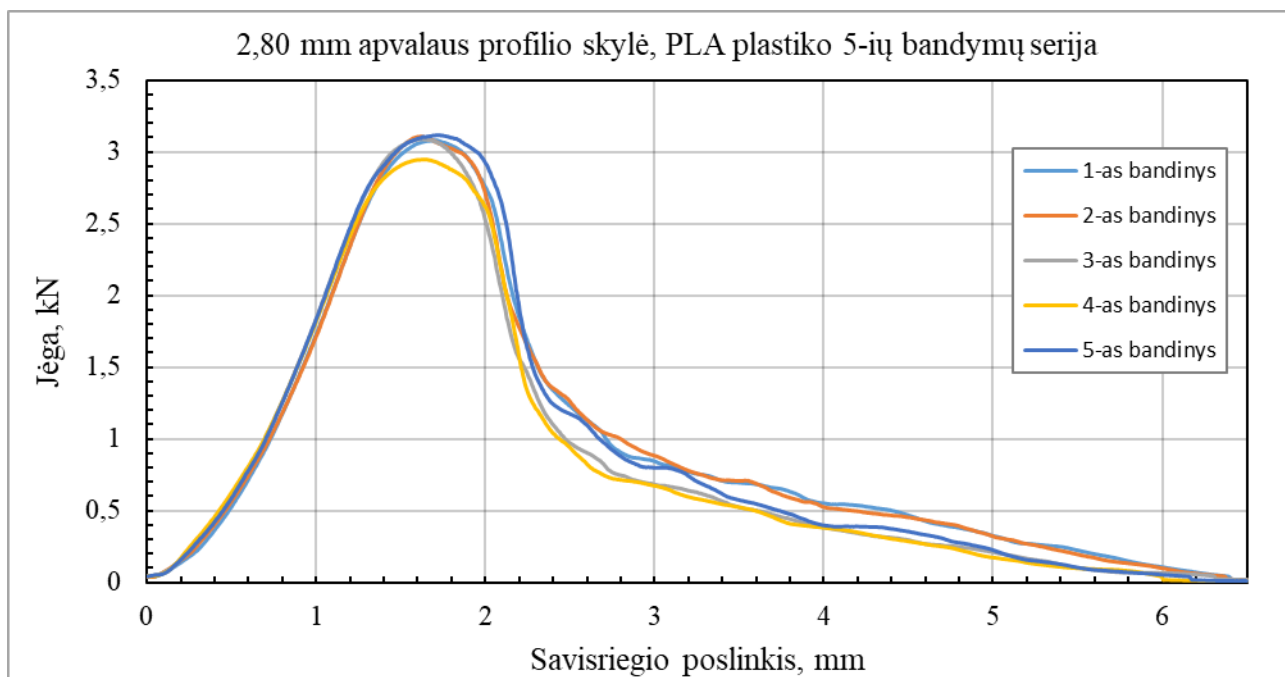
C PRIEDAS. Savisriegio sraigto ištraukimo bandymų gautieji duomenys



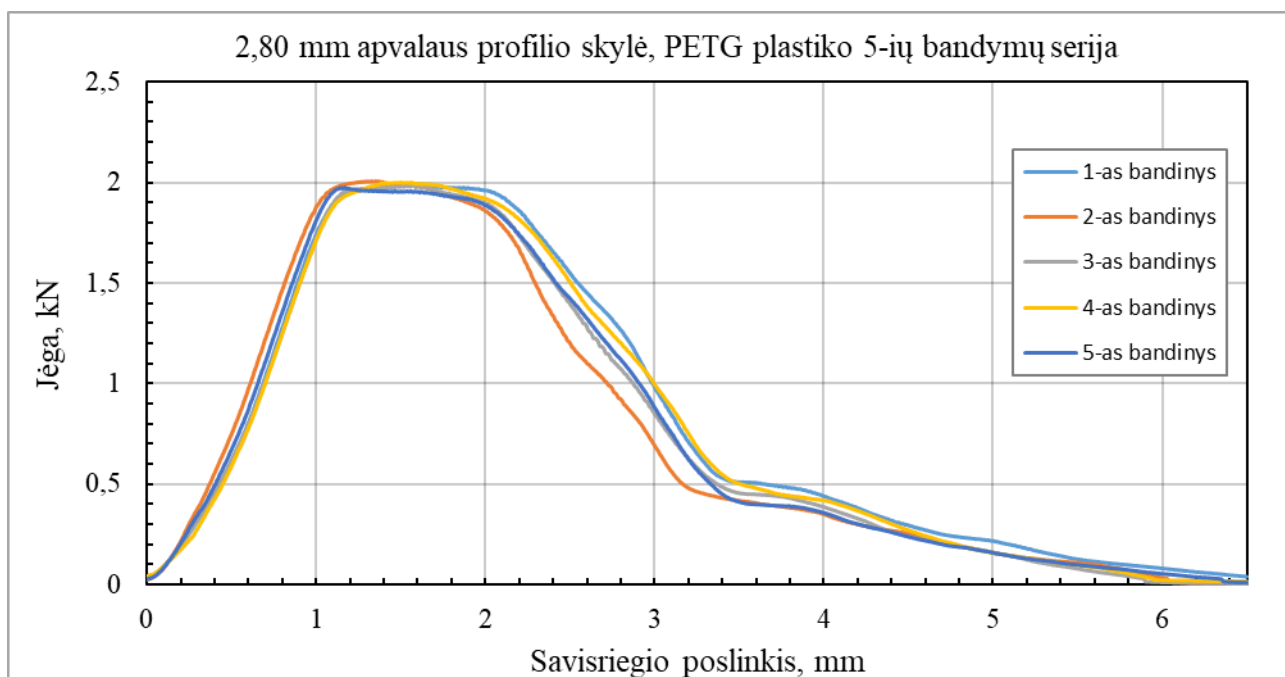
C1 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė



C2 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,55 mm kvadratinio profilio skylė

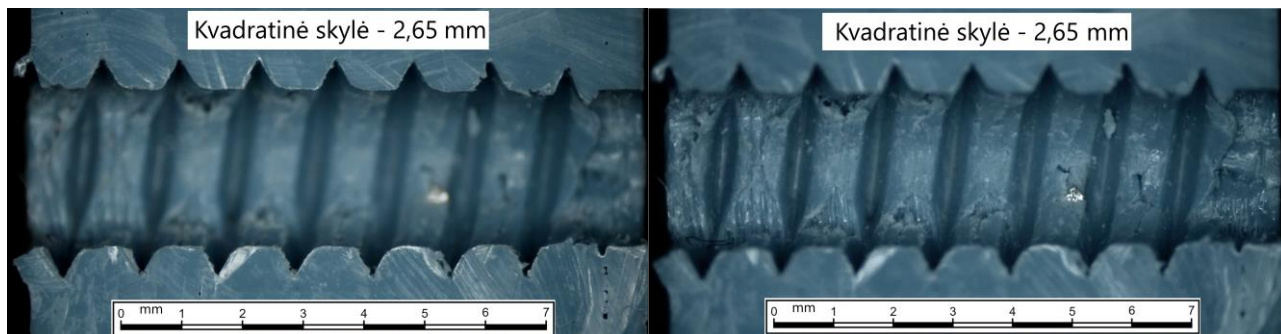


C3 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PLA plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė

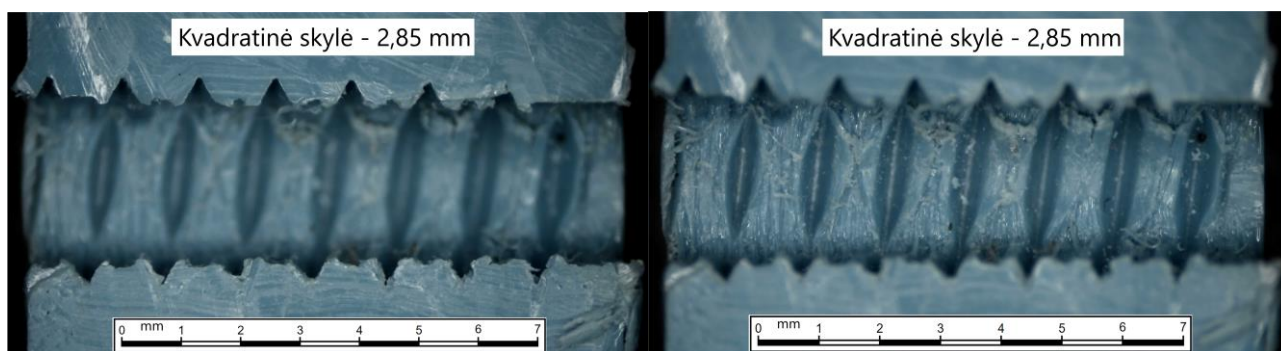


C4 pav. Savisriegio sraigto ištraukimo jėgos priklausomybės nuo savisriegio sraigto poslinkio, kai naudojami PETG plastiko ruošiniai su 2,80 mm apvalaus profilio skylė

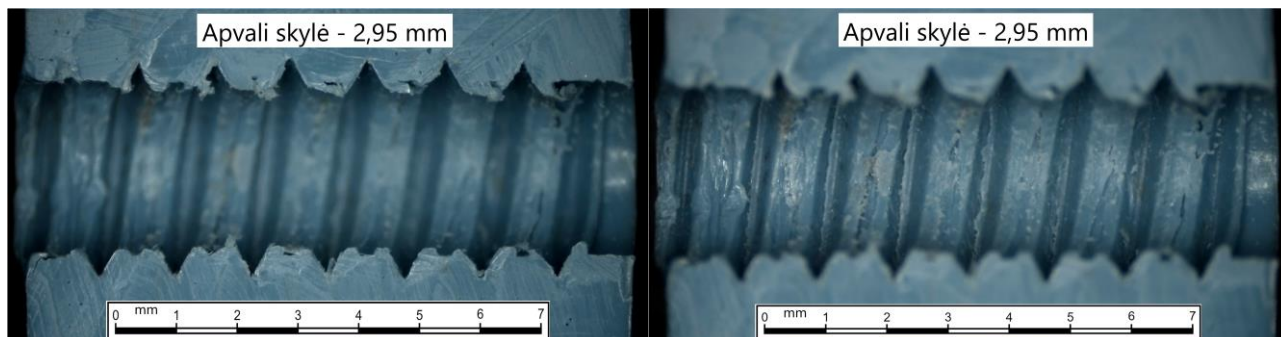
**D PRIEDAS. Polietileno tereftalato glikolio plastiko (PETG) bandiniuose savis-
riegio sraigto suformuoti sriegio skerspjūviai**



D1 pav. Kvadratinio profilio 2,65 mm skylės skerspjūvis



D2 pav. Kvadratinio profilio 2,85 mm skylės skerspjūvis



D3 pav. Apvalaus profilio Ø2,95 mm skylės skerspjūvis