



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

# **3D spausdinimo panaudojimo galimybių aprangos dizaine tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Julija Balsytė**  
Projekto autorė

**Doc. dr. Kęstutis Lekeckas**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2018**



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

# **3D spausdinimo panaudojimo galimybių aprangos dizaine tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Aprangos mados inžinerija (621J40004)

---

**Julija Balsytė**  
Projekto autorė

**Doc. dr. Kęstutis Lekeckas**  
Vadovas

**Prof. dr. Virginija Daukantiėnė**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2018**



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

## **3D spausdinimo panaudojimo galimybių aprangos dizaine tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Julijos Balsytės, baigiamasis projektas tema „3D spausdinimo panaudojimo galimybių aprangos dizaine tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

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

---

(vardas ir pavardė)

---

(parašas)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Aprangos mados inžinerija (621J40004)

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO  
UŽDUOTIS**

Studentui(-ei) *Julijai Balsytei*

1. Baigiamojo projekto tema: **3D spausdinimo panaudojimo galimybių aprangos dizaine tyrimas**  
(*Investigation of 3D Printing Usage for Fashion Design Possibilities*)
2. Projekto tikslas ir uždaviniai: tikslas – ištirti įvairių veiksnių įtaką 3D spausdinimo medžiagų ir šifoninių audinių susiklijavimo stiprumui bei remiantis gautais rezultatais sukurti praplėsto funkcionalumo aprangos kolekciją. Darbo uždaviniai: sukurti 3D elementus, kurių jungtys leistų praplėsti aprangos panaudojimo galimybes; įvertinti tekstilės ir 3D medžiagų charakteristikų įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui; įvertinti skalbimo įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui; sukurti aprangos kolekciją, kurioje būtų panaudota tyrime išanalizuota inovacija, ir nustatyti ar realiaame gaminyje kombinuota sistema sugebės atlaikyti dėvėjimo metu patiriamas apkrovas.
3. Pradiniai Projekto duomenys: informacija apie 3D spausdinimo technologijas, moksliniai straipsniai.
4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos: darbas turi būti originalus bei atitikti magistrinio baigiamajam projektui keliamus reikalavimus.
5. Projekto aprašomosios dalies struktūra: įvadas, literatūros apžvalga ir problemos analizė, tiriamoji dalis: mokslinių tyrimų metodologija, eksperimentinė dalis, mokslinių tyrimų rezultatų analizė, projektinė dalis, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.
6. Grafinės Projekto dalies sudėtis: darbo aiškinamasis plakatas su pagrindiniais tyrimų rezultatais, pagamintas kolekcijos modelio prototipas.
7. Projekto konsultantai: nėra

Magistrantas: .....  
(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas.....  
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas.....  
(vardas, pavardė, parašas, data)

## TURINYS

<b>ĮVADAS</b> .....	<b>10</b>
<b>1. LITERATŪROS APŽVALGA</b> .....	<b>11</b>
1.1. 3D spausdinimo technologijų analizė ir jų pritaikymas aprangoje.....	11
1.2. 3D spausdintų elementų pritaikymas aprangoje .....	21
1.2.1. Tekstilės medžiagas imituojančios 3D struktūros.....	22
1.2.2. Tiesioginis 3D objektų užspausdinimas ant tekstilės medžiagų .....	24
1.3. Literatūros apžvalgos apibendrinimas .....	27
<b>2. TIRIAMOJI DALIS</b> .....	<b>29</b>
2.1. Tyrimo objektai.....	29
2.2. Kombinuotų 3D ir tekstilės medžiagų sistemų kūrimo ir gamybos metodika .....	30
2.3. 3D ir tekstilės medžiagų susiklijavimo stiprumo nustatymo metodika.....	33
2.4. Skalavimo įtakos kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui nustatymo .....	34
metodika .....	34
2.5. 3D ir tekstilės medžiagų sistemų tyrimų rezultatai ir jų aptarimas.....	35
2.6. Tekstilės ir 3D medžiagų charakteristikų įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui.....	37
2.7. Skalavimo įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui .....	41
<b>3. TYRIMŲ REZULTATŲ ĮGYVENDINIMAS DIZAINO PROJEKTE</b> .....	<b>45</b>
3.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatų taikymo galimybės.....	45
3.2. Reikalavimai kuriamos kolekcijos modeliams .....	45
3.3. Perspektyvinių mados tendencijų prognozė.....	46
3.4. Įkvėpimo šaltinio analizė.....	49
3.5. Kolekcijos devizo formulavimas .....	52
3.6. Bendra kolekcijos charakteristika .....	52
3.7. Tyrimų rezultatų įgyvendinimas eksperimentiniame modelyje.....	52
<b>IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS</b> .....	<b>55</b>
<b>LITERATŪROS SĄRAŠAS</b> .....	<b>57</b>
<b>PRIEDAI</b> .....	<b>63</b>
1 PRIEDAS. Tekstilės medžiagų sandaros rodiklių statistiniai duomenys.....	63
2 PRIEDAS. 3D medžiagų ir audinių sistemų stiprumo ir tūsumo rodiklių statistinė analizė.....	65
3 PRIEDAS. 3D ir tekstilės medžiagų sistemų stiprumo ir tūsumo rodiklių statistinė analizė po skalavimo.....	67
4 PRIEDAS. Kolekcijos „SUFRAŽISTĖ“ inspiracijų žemėlapis .....	69
5 PRIEDAS. Pirminės kolekcijos „SUFRAŽISTĖ“ idėjos planšetas .....	70

## Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Stereolitografijos veikimo principo schema [6].....	12
1.2 pav. D. Hsu papuošalų kolekcija, panaudojant SLA technologiją [10, 11] .....	13
1.3 pav. Medžiagos išpurškimo technologijos veikimo principo schema [13] .....	13
1.4 pav. Iris van Herpen kūryba: a) 2009–2012 m; b) 2013–2017 m; c) 2018 m [17].....	14
1.5 pav. „Adidas“ sportiniai batelių gamyba su 3D atspausdintu padu [19].....	15
1.6 pav. Selektinio kietinimo lazeriu veikimo principo schema [5] .....	16
1.7 pav. SLS pritaikymo pavyzdžiai: a) „Dita Von Teese“ suknelė [23]; b) J. Kyttanen kelioninis rinkinys [24] .....	16
1.8 pav. „Kinematics“ projektas: a) 2013m papuošalai [25]; b) 2014m suknelė [25]; c) „Smart Factory“ pagamintos apyrankės [26]; d) 2017m nauja grandininė struktūra [25].....	17
1.9 pav. SLS pritaikymo pavyzdžiai: a) E. Pompilio kepurės; b) C. Wales DNA projektas [3] .....	18
1.10 pav. Ekstrūzinio lydytojo nusėdinimo modeliavimo veikimo principo schema [5] .....	19
1.11 pav. D. Peleg'ė kūrybą: a) pirmoji <i>ready-to-wear</i> 3D kolekcija; b) A. Purdy suknelė parolimpinėms žaidynėms; c) „The Birth of Venus“ kolekcija; d) individualizuoti švarkai [31] .....	20
1.12 pav. „3D Systems“ kompanijos ir „Cube“ spausdintuvų gamintojų reklaminis projektas [31] ...	20
1.13 pav. 3D objektų tvirtinimas prie tekstilės medžiagų: a) priklijuojant [33]; b) prisiuvant [34]; c) tiesiogiai užspausdinant [35]; .....	21
1.14 pav. Tekstilės medžiagas imituojančios struktūros: a) lanksčių žiedelių [36]; b) lygiojo skersinio mezgimo [37]; c) nėrinių [37] .....	23
1.15 pav. Tekstilės medžiagas imituojančios struktūros: a) drobinio pynimo audinys [38]; b) elastingas korsetas [39]; c) suknelės viršutinė dalis [40] .....	24
2.1 pav. 3D ir tekstilės bandinių paruošimas: a) juostelės susiuvimo schema; b) 3D figūros spausdinimo maketas; c) į <i>g.code</i> įterpiamos kodo eilutės.....	32
2.2 pav. „PRUSA i3 MK2S“: a) 3D spausdintuvas; b) kombinuotos sistemos kūrimo principinė schema .....	33
2.3 pav. Tempimo bandymas: a) „Tinius Olsen H10KT“ tempimo mašina; b) kombinuotos sistemos tvirtinimas spraustuvoje .....	34
2.4 pav. Kombinuotos sistemos suirimo variantai: a) audinio nutrūkimas; b) 3D medžiagos nutrūkimas .....	35
2.5 pav. Tipinės tempimo kreivės: a) A1; b) A2, c) A3; d) A4 audinių .....	36
2.6 pav. 3D medžiagų savybių įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui.....	37
2.7 pav. Audinių pluoštinės sudėties įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui .....	38
2.8 pav. 3D medžiagų charakteristikų įtaka kombinuotų sistemų tįsumui .....	39

2.9 pav. Audinių pluoštinės sudėties įtaka kombinuotų sistemų tūsumui .....	40
2.10 pav. Bandiniai prieš ir po skalbimo: a) TPE; b) TPU1; c) TPU2; d) TPC .....	41
2.11 pav. Skalbimo įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui .....	42
2.12 pav. Skalbimo įtaka kombinuotų sistemų tūsumui .....	43
3.1 pav. Populiariausios 2019 metų spalvos [78].....	47
3.2 pav. 2019 metų madingi siluetai: a) E. Pucci; b) ir f) J. Mendel; c) ir e) H. Zhan; d) R. Getty [79] 47	
3.3 pav. Madingiausi sezono drabužiai: a) M. Hoffman; b) Monse; c) ir d) Novis; e) J. Mendel [79]..	48
3.4 pav. 2019 madingi elementai: a) J. Mendel; b) ir f) Monse; c) Pringle of Scotland; d) H. Zhang; e) Ch. Siriano [79] .....	48
3.5 pav. 3D spausdinimo elementai: a) Iris Van Herper; b) A. Walsh, c) M. Young, d) Z. Hadid; e) C. Francechini .....	49
3.6 pav. Įkvėpimo šaltinis – kalavijas/kardas .....	50
3.7 pav. Įkvėpimo šaltinis – šarvai.....	50
3.8 pav. Įkvėpimo šaltinis – durklai .....	51
3.9 pav. Įkvėpimo šaltinis – kuoka .....	51
3.10 pav. Įkvėpimo šaltinis – šurikenas.....	51
3.11 pav. Kolekcijos devizo pavyzdys.....	52
3.12 pav. Kolekcijos „Sufražistė“ suknelės prototipo: a) meninis vaizdas; b) techninis eskizas .....	53
3.13 pav. Kombinuotos sistemos susiklijavimo stiprumo patikrinimas žmogau figūrai, esant dinaminėje būsenoje.....	54

## Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Tekstilės medžiagų sandaros rodikliai .....	29
2.2 lentelė. 3D spausdinimo medžiagų charakteristikos.....	30
2.3 lentelė. 3D spausdintuvo „PRUSA i3 MK2S“ pagrindinės charakteristikos [73] .....	33



Balsytė, Julija. 3D spausdinimo panaudojimo galimybių aprangos dizaine tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Kęstutis Lekeckas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Polimerų ir tekstilės technologijos (F02), Technologijų mokslai (F).

Reikšminiai žodžiai: Adityvi gamyba ir dizainas, 3D spausdinimas, FDM, polimeras, tekstilė, adhezija, mada

Kaunas, 2018. 71 p.

## SANTRAUKA

Baigiamajame magistro projekte analizuojamos 4 pagrindinės 3D spausdinimo technologijos: SLA, SLS, „PolyJet“ ir FDM, kurios gali būti pritaikomos aprangos gamyboje. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad FDM spausdinimo būdas, kurio metu sluoksnis po sluoksnio yra išliejamos išlydytos polimero gijos, yra labiausiai tinkamas aprangos spausdinimui, kadangi jam reikalingos mažiausios eksploatacinės išlaidos, naudojami polimerai pasižymi geromis mechaninės, cheminės ir šiluminės savybės, o produktų gamyba vykdoma praktiškai be atliekų.

Šiuo metu, norint atspausdinti didelius 3D objektus reikia labai daug laiko ir brangiai kainuojančių mašinų, kai tuo tarpu išausti ar numegzti tekstilės medžiagas galima ženkliai greičiau ir už mažesnę kainą. Dėl šios priežasties nuspręsta polimerus spausdinti tiesiogiai ant tekstilės medžiagų. Pastebėta, kad kieti, nepaslankūs polimerai gali tapti lanksčių sistemų dalimi, o minkštos tekstilės medžiagos įgauti naujas mechanines savybes ir papildomą funkcionalumą. Iš kitos pusės, nepakankamai išsamiai ištirta adhezija tarp 3D ir tekstilės medžiagų vis dar yra pagrindinė problema, kodėl ši technologija neįsitvirtina aprangos pramonėje, todėl buvo iškeltas toks darbo tikslas – ištirti įvairių veiksnių įtaką 3D spausdinimo medžiagų ir šifoninių audinių susiklijavimo stiprumui bei remiantis gautais rezultatais sukurti praplėsto funkcionalumo aprangos kolekciją.

Darbe pirmą kartą nagrinėjama elastingų 3D medžiagų (termoplastinių polimerų) ir liaunų šifoninių audinių charakteristikų įtaką kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tšsumui prieš ir po skalbimo. Iki šiol visi tyrimai buvo orientuojami į tradicinės FDM spausdinimo technologijos medžiagas: PLA, ABS ir nailoną.

Atlikus vieną tempimo bandymą nustatyta, kad kombinuotos sistemos susiklijavimo stiprumas priklauso nuo 3D medžiagos cheminės sudėties ir kietumo bei tekstilės medžiagos storio, tankumo ir pluoštinės sudėties. Ištirta, kad kuo polimeras tampresnis tuo 3D ir tekstilės medžiagų junginys pasižymi didesne ištįsa. Pastebėta, kad po skalbimo šilko audinio su elastanu stiprumas ir tšsumas padidėja su visomis 3D medžiagomis.

Atsižvelgiant į tyrimų rezultatus sukurta 8 modelių kolekcija, iš kurios pagamintas vienas prototipas. Kombinuota sistema į liaunos medžiagos priglundusio silueto gaminį įterpiama siekiant sumažinti įvairiose kūno vietose susidarančius įtempimus, dėl kurių medžiagos dažnai neatlaiko ir suplyšta. Apsirengus prototipą ir atlikus 5 dinaminis judesius nustatyta, kad „NinjaFlex“ polimero ir šilkinio audinio sistema yra pakankamai stipri, jog atlaikytų judėjimo metu patiriamas apkrovas.

Balsytė, Julija. Investigation of 3D printing usage for fashion design possibilities / supervisor assoc. prof. Kęstutis Lekeckas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Polymers and Textiles Technology, Technological Sciences.

Keywords: Additive manufacturing and design, 3D printing, FDM, polymer, textiles, adhesion, fashion Kaunas, 2018. 71 pages.

## SUMMARY

In master's thesis 4 main 3D printing technologies (SLA, SLS, "PolyJet" and FDM) which can be applied in garment production were analyzed. During the literature analysis it was determined that FDM printing method which is known for molding melted polymer filament is the most suitable way for garment printing. This method runs on lowest expenses, uses polymers with good mechanical, chemical, thermal properties and its products production leaves almost no waste at all.

At the moment if you wanted to print big 3D objects you would need a lot of time and expensive machines. Meanwhile you can weave or knit textile material noticeably faster and cheaper. So it was decided to print polymer directly onto textile. It was also noticed that rigid polymers can become a part of flexible system parts allowing soft textile to acquire new mechanical qualities and additional functionality. On the other hand, the lack of research on adhesion between 3D printing material and textile is still the main reason why this technology can't become widely used in clothing industry. The goal of this work was to investigate various factors influence on 3D printing filaments and chiffon fabric adhesion force. Based on received results enriched functionality fashion collection should be created.

For the first time, the polymer-textile system adhesion force and elongation before and after washing was evaluated according to 3D flexible filament (thermoplastic polymer) and thin chiffon fabric characteristics. Up to now, all the other researches were oriented on the traditional FDM printing technology materials such as PLA, ABS and nylon.

During the single axis tensile experiment it was identified that combined system adhesion force depends on 3D filament chemical composition, strength, textile thickness, density and fiber structure. It was researched that the more flexible the polymer, the more bigger elongation of 3D and textile system. It was noticed that washed silk fabric with elastane has increased strength and tensility with all 3D materials.

Based on research results 8 models collection were created and one prototype was prepared. Combined system is inserted into thin material with adherent silhouette fabric to reduce tension in various body parts where the material usually doesn't withstand and rip. After putting on the prototype and completing 5 dynamic moves, it was determined that "NinjaFlex" polymer and silk fabric system is strong enough to withstand the load during the motion.

## IVADAS

Jau nuo seno tekstilės medžiagos tyrinėjamos bei plačiai taikomos pramoninėje gamyboje. Dauguma jų palaiko optimalią žmogaus kūno temperatūrą, turi geras šilumines savybes, yra higroskopiškos, laidžios orui ir garui, dėvėjimo metu gerai išlaiko formą bei išvaizdą, yra atsparios daugkartiniam lenkimui bei trinčiai. Jos leidžia sukurti įmantrias konstrukcijas, kadangi medžiagas galima lengvai lankstyti, susukti ar deformuoti. Iš kitos pusės, šiuolaikinė visuomenė yra persisotinus ir ją nuste- binti darosi vis sunkiau, o jaunosios kartos poreikiai auga su kiekviena diena. Įprastiniai tekstilės ga- minių deriniai ir tradiciniai dizaino sprendimai jau nebepatenkina vartotojo poreikių, todėl siekiant sukurti naujus medžiagų parametrus į pramoninę gamybą yra diegiamos inovatyvios technologijos. Viena iš jų – 3D spausdinimas. Ši inovacija atsirado pakankamai neseniai, tačiau jau spėjo sulaukti nemažai susidomėjimo visame pasaulyje.

Įprastai 3D drabužius žmonės įsivaizduoja, kaip neįprastos formos, kietus ir nepatogius avangar- dinius meno šedevrus, visgi tai yra tik aukštosios mados dizainerių sukurta iliuzija. Norint atspausdinti didelius 3D objektus reikia labai daug laiko ir brangiai kainuojančių mašinų, kai tuo tarpu išausti ar numegzti tekstilės medžiagas galima ženkliai greičiau ir už mažesnę kainą. Tikintis sumažinti 3D spausdinimo laiką ir kainą, polimerai buvo pradėti spausdinti tiesiogiai ant tekstilės medžiagų. Pate- bėta, kad kieti, nepaslankūs 3D objektai gali tapti lanksčių sistemų dalimi, o minkštos tekstilės me- džiagos įgauti naujas mechanines savybes ir papildomą funkcionalumą. Dėl šios priežasties, siekiant praplėsti tekstilės medžiagų funkcionalumą, tyrimams pasirinkti liauni, ploni, sunkiai siuvami audiniai, netinkantys prigludusio silueto drabužiams, kadangi žmogui judant įvairiose kūno vietose susidaro įtempiai, dėl kurių siūlės ar patys audiniai neretai neatlaiko ir gaminyje suplyšta. Sukurta kombinuota sistema tikimasi ne tik pagerinti aprangos prisitaikymą prie vartotojo kūno formų, dėl tamprios 3D medžiagos ištyšos, tačiau ir sumažinti įtempius, susidarančius probleminėse kūno vietose.

Iš kitos pusės, nepakankamai išsamiai ištirta adhezija tarp 3D ir tekstilės medžiagų vis dar yra pagrindinė problema, kodėl ši technologija neįsitvirtina aprangos pramonėje. Didelis dėmesys buvo skiriamas standartinių kietų 3D medžiagų kombinuotų sistemų tyrimams, kai tuo tarpu nieko nėra ži- noma apie sunkiai spausdinamų lanksčių termoplastinių polimerų ir audinių susiklijavimo stiprumą bei skalbimo poveikį šių junginių adhezijai. Atsižvelgiant į tai, buvo iškeltas šio darbo tikslas – ištirti įvai- rių veiksnių įtaką 3D spausdinimo medžiagų ir šifoninių audinių susiklijavimo stiprumui bei remiantis gautais rezultatais sukurti praplėsto funkcionalumo aprangos kolekciją. Siekiant įgyvendinti tikslą už- sibrėžti tokie uždaviniai: sukurti 3D elementus, kurių jungtys leistų praplėsti aprangos panaudojimo galimybes, įvertinti tekstilės ir 3D medžiagų charakteristikų įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui, įvertinti skalbimo įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui, sukurti aprangos kolekciją, kurioje būtų panaudota tyrime išanalizuota inovacija, ir nustatyti ar realia- me gaminyje kombinuota sistema sugebės atlaikyti dėvėjimo metu patiriamas apkrovas.

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1. 3D spausdinimo technologijų analizė ir jų pritaikymas aprangoje

Manoma, kad 3D spausdinimas bus vienas iš pagrindinių varomųjų variklių ketvirtojoje pramonės revoliucijoje, leisiantis masinę gamybą pritaikyti individualizuotiems poreikiams be papildomų investicijų. Jau dabar 3D technologijos aktyviai naudojamos produktų dizaine, medicinoje, odontologijoje, statybų sektoriuje, o pirmosios užuomazgos pastebimos ir madoje.

Pirmasis 3D spausdinimo technologijų panaudojimas fiksuojamas 1980 metais, kuomet daktaras H. Kodama užpatentavo prototipinę spausdinimo technologiją [1]. Šiandieniniame pasaulyje 3D spausdinimas suprantamas kaip adityvus procesas, kurio metu iš pasirinktos medžiagos, sluoksnis po sluoksnio pagaminamas erdvinis objektas [2]. Nuo pirmųjų spausdinimo bandymų daug kas pasikeitė ir dabar galima išskirti tris pagrindines adityvios 3D gamybos sistemų rūšis [3]:

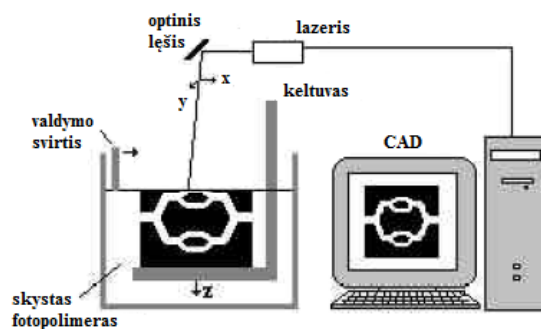
1. *Skysto pagrindo* – tai technologijos, kurių veikimas pagrįstas skystos dervos ar fotopolimero, esančio talpykloje pavertimu į kietą kūną, veikiant šviesa (dažniausiai UV spinduliais). Šiai kategorijai priklauso: „Stereolitografija“ (angl. *Stereolithography*, trumpinama SLA), „PolyJet“, „Kombinuotų medžiagų spausdinimas“ (angl. *Multijet Printing*, trumpinama MJP).
2. *Kieto pagrindo* – tai technologijos, kurias vienija gamybos procesuose dalyvaujantys kieti objektai: vielutės, ritinėliai, laminatai ar granulės. Paminėtos 3D medžiagos gali būti spausdinamos remiantis dviem metodais, priklausomai nuo technologijos pasirinkimo: lydymo ir sukietinimo arba pjaustymo ir sujungimo. Šiai kategorijai priklauso: „Ekstrūzinis lydytojo nusėdinimo modeliavimas“ (angl. *Fused deposition modeling*, trumpinama FDM), „Laminuotų objektų gamyba“ (angl. *Laminated object manufacturing*, trumpinama LOM).
3. *Miltelių pagrindo* – tai technologijos, kuriose pagrindinė rišamoji medžiaga yra milteliai. Dalis šių technologijų veikia tokiu principu kaip ir skysto pagrindo sistemos, kita dalis – kaip kieto pagrindo sistemos. Šiai kategorijai priklauso: „Selektyvusis kietinimas lazeriu“ (angl. *Selective laser sintering*, trumpinama SLS), „Selektyvusis lydymas lazeriu“ (angl. *Selective laser melting*, trumpinama SLM), „Rišamosios medžiagos išpurškimas“ (angl. *Binder Jetting*, trumpinama BJ), „Lydymas elektronų spinduliais“ (angl. *Electronic beam melting*, EBM).

Atlikta literatūros paieška parodė, kad iki šiol pasaulinėje aprangos rinkoje buvo pritaikytos tik keturios 3D spausdinimo technologijos: SLA, „PolyJet“, SLS ir FDM.

Stereolitografija pripažįstama kaip viena seniausių 3D spausdinimo technologijų, kurią 1986 metais užpatentavo Ch. Hull'as [5]. Tai procesas, paremtas skysto fotopolimero pavertimu kietu 3D objektu, veikiant jį ultravioletiniais lazerio spinduliais [6].

Gamybos procesas pradedamas nuo objekto projektavimo, panaudojant vieną iš grafinių automa-

tizuoto projektavimo sistemų (CAD) [5]. Gautas failas turi būti paverčiamas į visiems 3D spausdintuvams suprantamą „Standartinę mozaikinės kalbos“ formatą (angl. Stereolithography, trumpinama STL), specialiai sukurtą 3D spausdinimo technologijoms [7]. Išsaugojus failą STL formatu jis yra sugeneruojamas į atskirus horizontalius sluoksnius, pagal kuriuos vėliau x ir y kryptimis juda lazeris. Po kiekvieno lazeriu padaryto sluoksnio, keltuvas z kryptimi nuleidžia objektą į skystą fotopolimerą, o virš jo esanti valymo svirtis išlygina paviršių. Šis procesas kartojamas tol, kol yra atspausdinamas visas gaminys. Tuomet keltuvas jį iškelia virš fotopolimero [6]. Objektas galutinai apdorojamas nuplaunant jį su tirpikliu ir įdedant į ultravioletinių spindulių krosnelę [5]. Prieš pradėdant produktą naudoti, rankomis pašalinamos pagalbinės medžiagos, palaikančios struktūrą (jeigu jos yra reikalingos) [8]. SLA veikimo principas pavaizduotas 1.1 paveiksle.



**1.1 pav.** Stereolitografijos veikimo principo schema [6]

Pagrindiniai SLA privalumai [3, 4, 5]:

- 1) objektus galima spausdinti nenutrūkstamai visą parą, 7 dienas per savaitę;
- 2) yra galimybė spausdinti objektus nuo keliasdešimt mikronų iki kelių metrų, priklausomai nuo spausdintuvo dydžio;
- 3) spausdinami objektai pasižymi labai geru tikslumu;
- 4) iš visų adityvių gamybos technologijų išsiskiria vienu iš geriausių paviršiaus apdirbimu.

Pagrindiniai trūkumai [3, 4, 5]:

- 1) figūros, turinčios didesnio nei  $45^\circ$  pasvirimo kampo elementus, reikalauja palaikančiųjų struktūrų, kurios turi būti suprojektuojamos kartu su pagrindiniu objektu;
- 2) reikalingi po gamybiniai apdorojimo procesai, kurie yra varginantys, reikalauja daug laiko, o dėl jų gaminys neretai būna pažeidžiamas;
- 3) spausdinimo procesas yra toksiškas, nemalonus kvapo dėl naudojamu dervų;
- 4) nėra galimybės kombinuoti šios technologijos su tekstilės medžiagomis, kadangi spausdintas gaminys yra panardinamas į skystą fotopolimerą;
- 5) technologija yra labai brangi lyginant su FDM, todėl ją naudoja mažai aprangos kūrėjų.

Stereolitografijos pritaikymo pavyzdžių aprangoje yra labai mažai. Vis dėlto galima paminėti vieną išskirtinę papuošalų kūrėjos D. Hsu, atvykusios iš Taivano studijuoti į Londono „Karališkąjį menų koledžą“, kolekciją „The Aesthetic of Fears“, su kuria 2013 m. ji tapo viena iš dešimties nugalė-

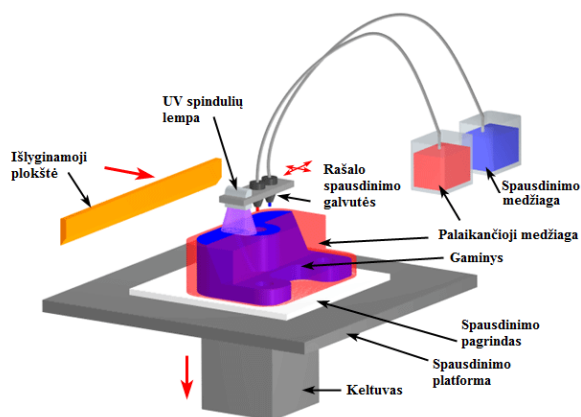
tojų tarptautiniame talentų paramos konkurse [10, 11]. Kolekcija sukurta per du mėnesius, panaudojant SLA technologijos medžiagas: latekso dervą ir fotopolimerą [9]. Kiekvienas iš papuošalų buvo nudažomas jį panardinant į verdantį vandenį [10]. Šios kolekcijos vieno elemento kaina 330 € [9].



1.2 pav. D. Hsu papuošalų kolekcija, panaudojant SLA technologiją [10, 11]

„PolyJet“ yra analogiškas procesas rašaliniam spausdinimui, tik čia spausdinimo medžiaga skystas fotopolimeras, kuris sluoksnis po sluoksnio yra sujungiamas į kietą 3D objektą, sukietinant jį UV spinduliais [3].

„PolyJet“ proceso metu spausdinimo ir palaikančiosios medžiagos tiekiamos į rašalo galvutes, kurios judėdamos horizontaliai X ir Y kryptimis ant spausdinimo pagrindo sukuria pirmąjį sluoksnį. Išlyginamoji plokštė, judėdama pirmyn ir atgal, jį išlygina, o UV spindulių lempa – sukietina. Tuomet keltuvas pajuda žemyn (Z kryptimi) vieno sluoksnio atstumu ir procesas prasideda vėl ir vėl iš naujo, kol gaminys yra atspausdinamas. Vėliau palaikančiosios medžiagos iš 3D objekto gali būti pašalinamos rankomis arba vandens srove [3, 12, 13]. „PolyJet“ veikimo schema pateikiama 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Medžiagos išpurškimo technologijos veikimo principo schema [13]

Pagrindiniai „PolyJet“ privalumai [3, 4, 12]:

- 1) tai vienintelis 3D spausdinimo procesas, kurio metu galima sujungti kelias skirtingas medžiagas į vieną ir tą patį 3D objektą, taip pat jas maišyti tarpusavyje, sukuriant skirtingas medžiagų savybes;
- 2) vienu metu galima spausdinti keliomis spalvomis, taip išgaunant realistišką objekto vaizdą;
- 3) užtikrinama labai aukšta objektų kokybė, kadangi vieno sluoksnio storis – 16 μm;

4) saugus ir švarus procesas, nekeliantis triukšmo, todėl gali būti įrengiamas biuruose.

Pagrindiniai „PolyJet“ trūkumai [3, 4, 13]:

- 1) pagalbinė medžiaga turi būti išplaunama stipria vandens srove, todėl sunku užtikrinti, kad išplovimo mašina bus tinkama naudoti biuruose, o vandens srovė nepažeis atspausdinto objekto;
- 2) didesnės eksploatacinės išlaidos nei FDM spausdinimo technologijos;
- 3) naudojamos medžiagos nėra tikri termoplastikai, todėl šia technologija neįmanoma sukurti tvirtų, ilgaaamžiškų objektų, pasižyminčių geromis mechaninėmis savybėmis.

Nagrinėjant 3D technologijų panaudojimą aprangos pramonėje svarbu paminėti Iris van Herpen, kuri ne tik jauniausia aukštosios mados sindikato Prancūzijoje narė, tačiau ir pirmoji 3D spausdinimą 2009 metais pritaikiusi aprangoje [9, 15]. Pirmieji jos kūriniai buvo ypač nepatogūs, nes tuo metu dar nebuvo lanksčių spausdinimo medžiagų (žr. 1.4 pav. a) ) [15]. Vis dėlto technologijoms žengiant į priekį, autorė su jomis žengė kartu. 2013 metais pradėjo bendradarbiauti su pasaulyje pirmaujančia 3D technologijų kompanija „Stratasys“. Vadovaudamasi savo įgyta patirtimi, ji sujungė turimas žinias apie žmogaus fiziologiją su kompanijos naujausiais atradimais bei išrastomis lanksčiomis medžiagomis, taip sukurdamą dar įstabesnius, originalesnius, inovatyvesnius kūrinius (žr. 1.4 pav. b) ). Dažniausiai dizainerė savo kuriniams realizuoti renkasi „Polyjet“ technologiją, nes ji vienintelė leidžia viename kūrinyje suderinti kelias skirtingas medžiagas [3, 9].

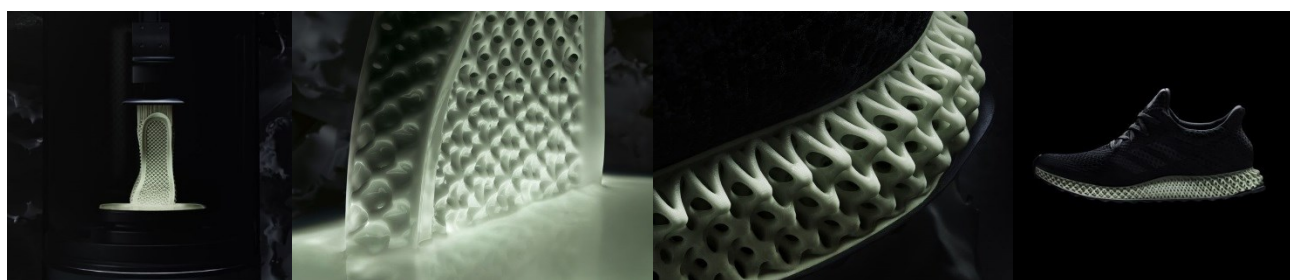
2018 metų kolekciijoje Iris van Herpen bendradarbiaudama su „TU Delft“ mokslininkais pirmą kartą aukštojoje madoje pademonstruoja galimybę sujungti 3D technologijas kartu su tekstilės medžiagomis. Šios kolekcijos sukūrimui pritaikoma modifikuota FDM spausdinimo technologija. Čia kiekvienas drabužis atspausdinamas ne visas iš karto, o mažais gabalėliais, kurie vėliau sujungiami tarpusavyje taip, jog sudarytų tobulai išbaigtą kūrinį. Aprangos pagaminimo laikas yra labai ilgas, o kaina labai didelė, todėl šiuo metu tokių gaminių realizuoti masinėje gamyboje nėra įmanoma, tačiau tikėtina, kad ateityje, patobulėjus technologijoms, tai taps vienu iš būdų individualizuoti gaminius pramoninėje gamyboje (žr. 1.4 pav. c) ) [16].



1.4 pav. Iris van Herpen kūryba: a) 2009–2012 m; b) 2013–2017 m; c) 2018 m [17]



Sportinės avalynės lyderis pasaulyje „Adidas“ įrodė, kad 3D spausdinimo technologijos gali būti panaudojamos ir masinėje gamyboje. Šiuolaikinė aprangos pramonė yra negailestinga ir kelianti daug iššūkių dėl milžiniško savo tempo, todėl siekdama išlaikyti poziciją rinkoje kompanija „Adidas“ bendradarbiaudama su kompanija „Stratasys“, pradėjo kurti avalynės prototipus, pasinaudodama „Polyjet“ technologija. Prototipai leido greitai nustatyti batų defektus ir juos ištobulinti, taip sumažinant pirminių pavyzdžių laiką [3]. 2015 metais kompanija supranta, kad vien prototipų jau nebeužtenka ir sukuria 3D spausdintų batelių riboto tiražo kolekciją (7000 porų, 1 poros kaina 220 \$), panaudodama perdirbtus plastiko butelius. Galiausiai 2017 metais „Adidas“ pradeda bendradarbiauti su kompanija „Carbon“, su kuria gali išplėsti batelių gamybą iki šimtų tūkstančių vienetų. Naujųjų batelių poros kaina – 300 \$ [18]. Jų gamybos procesas vaizduojamas 1.5 paveiksle.



**1.5 pav.** „Adidas“ sportiniai batelių gamyba su 3D atspausdintu padu [19]

Kita 3D spausdinimo technologija – tai 1988 metais, Teksaso universitete C. Deckard'o užpatentuotas „Selektyvusis kietinimas lazeriu“ [1]. Tai procesas, paremtas miltelinių granulių sujungimu į kietą 3D objektą, veikiant jas ultravioletiniais lazerio spinduliais [5].

Kaip ir visuose 3D spausdinimo metoduose, pirmiausiai grafine automatizuota sistema sukuriamas 3D objektas, kuris suskaidomas į atskirus sluoksnius, parenkant failui STL formatą. Lazeris kaitina granulių miltelius iki šiek tiek žemesnės nei virimo temperatūros. Tuo metu milteliai yra sukietinami, taip juos sujungiant tarpusavyje į kietą formą. Kuomet vienas sluoksnis sukietinamas, jis gamybinio stūmokliu nustumiamas į apačią. Tiekimo sistema kyla į viršų išstumdamas naujus miltelius, kuriuos volelis paskleidžia plonu sluoksniu talpykloje. Tuomet vėl lazeriu kaitinami milteliai. Procesas kartojamas vėl ir vėl, kol atspausdinamas objektas. Tik atvėsus gaminyms gali būti išimtas iš mašinos. Milteliai su atspausdintu 3D gaminiu ištraukiami iš mašinos uždėjus stiklinį indą, o vėliau detalė išvaloma rankomis [20, 21]. SLS veikimo principo schema pateikiama 1.6 paveiksle.

Pagrindiniai SLS privalumai [3, 4, 21]:

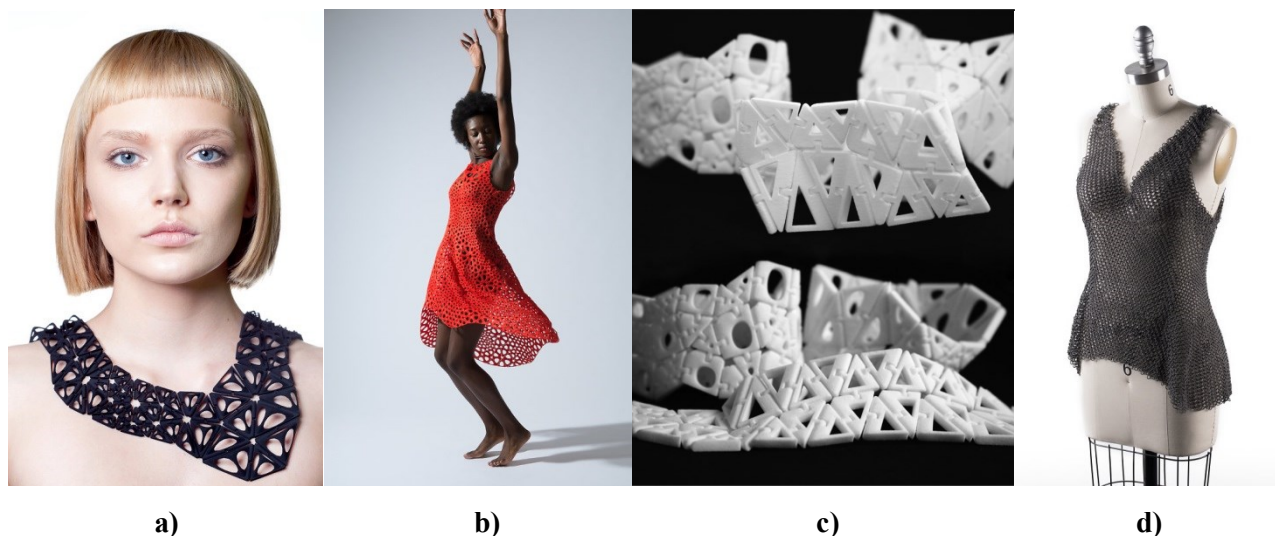
- 1) didelė spausdinamų medžiagų įvairovė: plastikas, stiklas, keramikas ir netgi metalas;
- 2) nereikalingos palaikančios struktūros, kaip kitose 3D technologijose, tai sutrumpina gamybos laiką;
- 3) galima pagaminti sudėtingos konstrukcijos, labai aukštos kokybės, patvarius, lygiu paviršiumi objektus.





2013 metais „Nervous System“ pradėję kurti „Kinematics“ projektą nesitikėjo, kad šis projektas taip išsiplės ir bus vystomas iki šiol. Viskas prasidėjo nuo mažo papuošalo (žr. 1.8 pav. a) ) ir jau 2014 metais išsivystė iki daug didesnio gaminio – suknelės (žr. 1.8 pav. b) ). Projekto tikslas – sukurti vien-tisą gaminį, sudarytą iš šimtų ar tūkstančių paslankių detalių, kuris nereikalautų jokio surinkimo. Kūrė-jai siekė, kad sumaketuotas didelis gaminyš, kuris įprastai netilptų atspausdinti 3D spausdintuvu, simu-liacinės programos pagalba būtų sulankstomas į spausdinimui naudingą formą. Dar viena labai svarbi projekto dalis, tai specialios programėlės, leidžiančios pačiam vartotojui susikurti norimą gaminį, kurį įmonė atspausdina ir pristato į namus už, kaip jie teigia, nedidelę kainą (kaina svyruoja apytiksliai nuo 25 \$ iki 350 \$) [3, 25]. „Kinematics“ sukurta programėle susidomėjo ir viena Lietuvos 3D spausdini-mo įmonė įsikūrusi Kaune – „Smart Factory“, kuri pasinaudojusi ja klientams atspausdino apyrankes su paslankiais sujungimais (žr. 1.8 pav. c) ).

„Kinematics“ projekto kūrinių pagrindinis elementas – trikampis. Jo dydis ir užpildymo raštas gali skirtis. Vis dėlto kompanija nusprendė, kad toks sujungimas nėra pakankamai paslankus, o jo su-lankstymas nepatenkina jų poreikių. Taigi dėl šios priežasties 2017 metais sukūrė naują grandininę struktūrą (žr. 1.8 pav. d) ). Naujasis variantas suteikia galimybę vieną sulankstyta 36 dydžio palaidinę atspausdinti tokiu 3D spausdintuvu, kurio darbinis dydis yra 13 cm x 13 cm x 16,8 cm [25].



**1.8 pav.** „Kinematics“ projektas: a) 2013m papuošalai [25]; b) 2014m suknelė [25]; c) „Smart Factory“ paga-mintos apyrankės [26]; d) 2017m nauja grandininė struktūra [25]

3D spausdinimas gali būti pritaikomas įvairiuose aprangos elementuose. Tai atskleidė profesio-nalus belgų kepurių dizaineris E. Pompilio, bendradarbiaujantis su tokiais žymiais mados namais kaip „Chanel“, „Dior“, „Valentino“ ar „Hugo Boss“ [27]. 2012 metais kūrėjas padedamas „MGX“ ir 3D spausdinimo kompanijos „Materialise“ įgyvendino inovatyvią 3D spausdintų kepurių idėją, kuriai su-kurti buvo panaudotas poliamidas. Vienos kepurės kaina svyruoja nuo 280 \$ iki 675 \$ [3] (žr. 1.9 pav. a) ).

Įdomų projektą 2012 metais sukūrė ir Londono dizainerė C. Wales. Ji sugebėjo iš nailono atspausdinti aukštosios mados kūrinus, kurie gali būti pritaikyti kiekvienam. Jų drabužis idealiai tiktų žmogui, pirmiausiai klientas turi būti nuskenuotas su 3D skeneriu. Po to pagal gautą vaizdinį gaminiai yra idealiai pritaikomi kūno formoms [28]. Personalizuotą aprangos derinį gali sudaryti: korsetas, krūtinės ląstos ar pečių detalės, įvairios veido kaukės ir šalmai bei klubus juosiantys elementai (žr. 1.9 pav. b). Vieno produkto pagaminimo laikas svyruoja nuo 8 iki 20 valandų, o kaina nuo 300 \$ iki 8000 \$ už vieną [3].



**1.9 pav.** SLS pritaikymo pavyzdžiai: a) E. Pompilio kepurės; b) C. Wales DNA projektas [3]

Viena populiariausių 3D spausdinimo technologijų pasaulyje – „Ekstrūzinis lydytojo nusėdimo modeliavimas“, kadangi juo galima atspausdinti ne tik prototipus, tačiau ir baigtinius objektus. Pastebima, kad tai yra daugiausiai naudojamas metodas namų spausdintuvuose. Šią technologiją 1990 metais išrado S. Crump'as, 3D spausdinimo kompanijos „Stratasys“ įkūrėjas.

FDM yra procesas, kurio metu kaitinant ir liejant termoplastiko gijas sluoksnis po sluoksnio atspausdinamas 3D objektas. Pirmiausiai, kaip ir kitose technologijose, gaminio CAD failas turi būti suskaidomas į atskirus liejimo sluoksnius [5]. Tuomet į prietaisą įdedama palaikančios medžiagos ritė, kuri naudojama jeigu gaminyje yra daugiau nei  $45^{\circ}$  pasvirimo kampas nuo horizontalės, ir spausdinimo užpildo ritė. Kuomet spausdintuvas turi tik vieną spausdinimo galvutę, palaikančioji medžiaga yra ta pati kaip ir pagrindinė. Tik įkaitus spausdintuvui užpildas paduodamas į kaitinimo elementą, kuriam yra išlydomas. Skystas plastikas nukeliauja į spausdinimo antgalius, kurie judėdami X ir Y kryptimis ant spausdinimo platformos išlieja pirmąjį sluoksnį [29]. Kol platforma juda žemyn (Z kryptimi) atspausdintas sluoksnis atvėsta ir sukietėja [5]. Po to liejimo procesas kartojamas vėl ir vėl, kol gaunamas baigtinis objektas [29]. Iš gaminio išimamos palaikančiosios medžiagos, jį įdedant į vandenį su ploviklio tirpalu arba tiesiog jas pašalinant ranka. Prieš naudojant gautas objektas gali būti frezuojamas, dažomas ar padengiamas medžiagomis (žr. 1.10 pav.) [5].

Pagrindiniai FDM privalumai [3, 4, 29]:

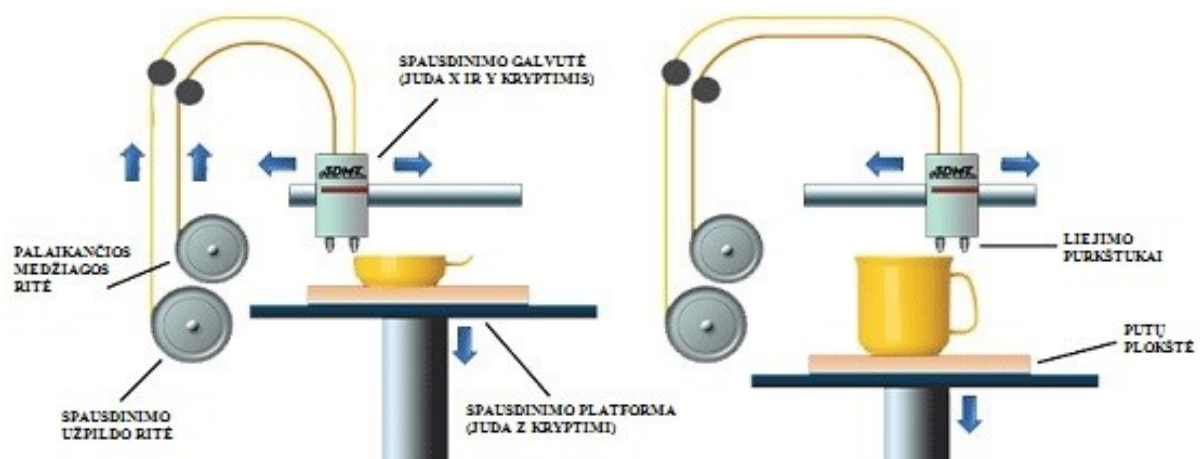
- 1) minimalus spausdinimo medžiagų išnaudojimas, kadangi ji yra lydoma iš karto į baigtinį objektą;
- 2) pagaminti objektai atsparūs mechaniniams, šiluminiams bei cheminiams procesams, nes yra naudo-

jami aukštos kokybės inžineriniai termoplastikai;

- 3) lengva pašalinti pagalbines medžiagas, kadangi jos yra lengvai nuimamos ranka arba išplaunamos vandeniui;
- 4) kitaip nei prieš tai minėtose technologijose, ši leidžia lengvai keisti medžiagas iš vienos į kitą neįteršiant spausdintuvo;
- 5) lyginant su kitomis technologijomis yra pati pigiausia.

Pagrindiniai FDM trūkumai [3, 4, 29]:

- 1) pakankamai mažas tikslumas, matomos rievės tarp atskirų sluoksnių, todėl reikalingas papildomas gaminio poliravimas;
- 2) lėtas spausdinimo procesas, kurį labai sunku pagreitinti;
- 3) vėsdami atspausdinti objektai išsiriečia, dėl 3D medžiagos veikiančių liekamųjų tempimo deformacijų.



1.10 pav. Ekstrūzinio lydytojo nusėdinimo modeliavimo veikimo principo schema [5]

2009 metais nustojus galioti FDM technologijos patentui, šis spausdinimo būdas pradėjo sparčiai populiarėti ir tapo visuotiniu bei daugiausiai tyrinėjamu [29]. Ekstrūzinis lydytojo nusėdinimo modeliavimas plito visose srityse, taip pat ir aprangoje. Čia smarkiai pasižymėjo D. Peleg, kuri įėjo į istoriją bei tapo populiari visame pasaulyje po to, kai 2014–2015 metais studijuodama magistrą Izraelio universitete sukūrė pirmąją 3D *ready-to-wear* kolekciją, atspausdintą namuose su stalniais spausdintuvais. Šią kolekciją jai padėjo įgyvendinti žinoma kompanija „Gerber Technology“ bei dar 6 kitos įmonės. Kiekvienas kolekcijos gaminy buvo atspausdinamas dalimis, iš lanksčios „FilaFlex“ termoplastinio elastomero medžiagos, kurios vėliau buvo sujungtos acetonu. Taip pat atspausdinti ir batai (žr. 1.11 pav. a). Vėliau dizainerė sukūrė suknelę A. Purdy 2016 metų parolimpinių žaidinių atidarymui (žr. 1.11 pav. c) bei dar vieną kolekciją „The Birth of Venus“ (žr. 1.11 pav. d). Galiausiai apkeliavusi visą pasaulį, patekusi į ne vieną knygą, nusprendė, jog atėjo metas pradėti įgyvendinti individualius užsakymus. Tam pasirinko švarkelį iš paskutiniosios kolekcijos. Vartotojas užsukęs į jos internetinį tinklalapį gali susikurti individualizuotą švarkelio dizainą: pasirinkti 3D medžiagos ir pamušalo spal-

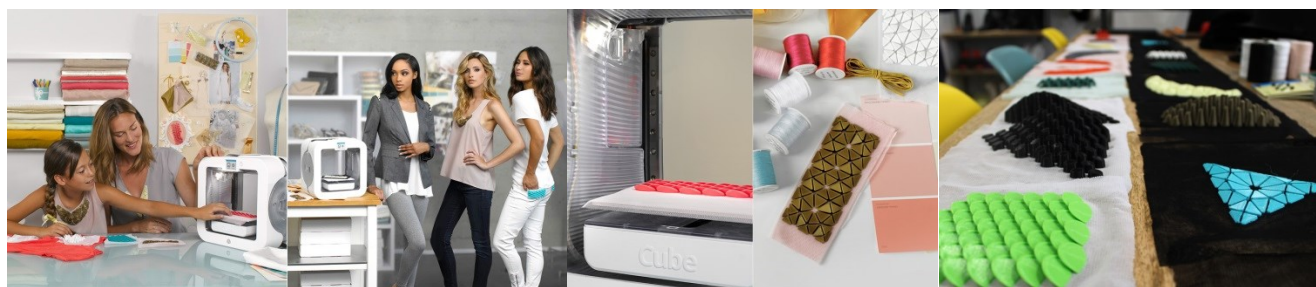


vas, dydį, užrašą ant nugaros (žr. 1.13 pav. b) ). Tai ribotas tiražas, tik 100 vienetų. Vieno gaminio pagaminimas užtrunka daugiau nei 100 valandų, o kaina siekia net 1500 \$ [31].



**1.11 pav.** D. Peleg'ė kūrybą: a) pirmoji *ready-to-wear* 3D kolekcija; b) A. Purdy suknelė parolimpinėms žaidinėms; c) „The Birth of Venus“ kolekcija; d) individualizuoti švarkai [31]

Visus iki šiol pateiktus 3D spausdinimo pritaikymo aprangoje pavyzdžius vienija tai, kad čia įprastinė tekstilės medžiaga yra pakeista 3D medžiaga, tačiau toks atspausdintas kūrinys yra nepraktiškas kasdieniniam nešiojimui, nes tiek kietas, tiek elastingas plastikas yra nepralaidus orui. Dėl šios priežasties vyko nuolatinės paieškos iki tol, kol 2015 metais „3D Systems“ kompanija kartu su FDM technologijos spausdintuvų gamintojais „Cube“ išleido bendrą reklaminių filmuką, kaip trim paprastais žingsniais galima spausdinti ant tekstilės medžiagų. Reklaminiėje medžiagoje pateikiama, jog tiesiog reikia pasirinkti jų sukurtą dizainą ir paleisti spausdinti. Tuomet spausdintuvui sustojus įdedama tekstilės medžiaga ir spausdintuvas baigia spausdinti pasirinktą objektą. Galiausiai gauti 3D elementai yra prisuvami prie norimo drabužio, taip juos pritaikant kasdieniam naudojimui [32] (žr. 1.12 pav.).



**1.12 pav.** „3D Systems“ kompanijos ir „Cube“ spausdintuvų gamintojų reklaminis projektas [31]

Po šio reklaminio projekto tiek dizaineriai, tiek įvairios įmonės pradėjo plačiau žvelgti į 3D technologijų panaudojimą aprangoje. Galima pastebėti 3 skirtingus būdus kaip 3D spausdinimas gali būti tvirtinamas prie tekstilės medžiagų: priklijuojant, prisiuvant ar tiesiogiai užspausdinant. Priklijavimas yra vienas paprasčiausių ir reikalaujančių mažiausiai pastangų. Norimi objektai yra pirmiausiai atspausdinami ir vėliau numatytose vietose tekstiliniiais klijais priklijuojami prie medžiagos. Šiuo principu naudojasi Niujorko dizainerė A. Walsh (žr. 1.13 pav. a) ) [33].

3D objekto prisiuvimas prie tekstilės medžiagų reikalauja daugiau patirties bei žinių nei priklijavimas. Gali būti prisiuvami tik tokie objektai, kurie yra atspausdinti iš lanksčių, minkštų medžiagų, o jų storis yra nedidelis. Taigi elementai netenka 3D funkcijos, o jų dizainas yra smarkiai apribojamas. Šį metodą naudoja naujas Ispanijos prekės ženklas „Chuic shop“. Kūrėjai iš termoplastino elastomero atspausdina lanksčią aplikaciją ir vėliau ją prisiuva prie marškinėlių ar džemperio (žr. 1.13 pav. b) ) [34].

Tiesioginis 3D užspausdinimas ant tekstilės medžiagų yra pats sudėtingiausias bei ne visuomet pavykstantis. Tam didelę įtaką daro tiek tekstilės, tiek 3D medžiagų pasirinkimas. Sėkmingiausi bandymai fiksuojami ant tinklelio medžiagos, kadangi jis turi skylutes, per kurias 3D medžiaga susikabina. Daug sudėtingesnis spausdinimas tampa ant tankiai supintų medžiagų. Vis dėlto vienas sėkmingų pavyzdžių yra prekės ženklo „Labeledby.“ spausdinimas ant džinso, odos, organzos ar kitų tekstilės medžiagų [35]. Kaip matyti iš kūrėjų darbų, 3D spausdinimas gali būti pritaikomas kraštų apdorojimui, užsegimui: užtrauktukas, spaudės, sagos (žr. 1.13 pav. c) ).



**1.13 pav.** 3D objektų tvirtinimas prie tekstilės medžiagų: a) priklijuojant [33]; b) prisiuvant [34]; c) tiesiogiai užspausdinant [35];

## 1.2. 3D spausdintų elementų pritaikymas aprangoje

Per pastarąjį dešimtmetį mokslinių tyrinėjimų apie 3D spausdintas struktūras skaičius išaugo eksponentiškai. Tam didelę įtaką padarė 2009 metais nustojęs galioti FDM technologijos patentas. Nors aprangos gamyboje pritaikomos SLS, SLA ir „PolyJet“ technologijos, tačiau dauguma akademi-  
nių tyrimų autorių renkasi FDM spausdinimo būdą, kadangi jis reikalauja mažiausiai investicijų, yra

nesudėtingas bei lengvai įdiegiamas įmonėse. Atsižvelgiant į faktą, jog 3D technologijos yra ženkliai lėtesnės nei įprastiniai gamybos procesai: audimas ir mezgimas, jos vis dar nebuvo įdiegtos pramonės įmonėse. Dėl šios priežasties mokslininkai atlieka įvairius tyrimus, siekdami atrasti naujas 3D spausdinimo panaudojimo galimybes, leidžiančias jas pritaikyti gamyboje.

Visus 3D technologijų panaudojimo aprangoje mokslinius tyrinėjimus galima suskirstyti į du laikotarpius:

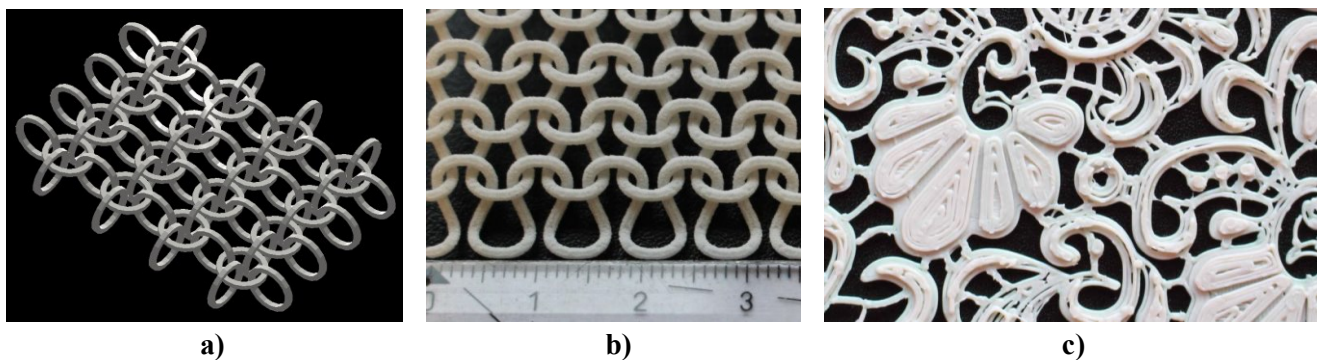
1. *ankstyvąjį* (2008 – 2015 m.), kuomet buvo stengiamasi atspausdinti tekstilės medžiagas imituojančias 3D struktūras;
2. *dabarties* (nuo 2015 m. iki dabar), kai pradėtos tyrinėti galimybės tiesiogiai spausdinti ant tekstilės medžiagų.

### **1.2.1. Tekstilės medžiagas imituojančios 3D struktūros**

Siekiant, kad 3D struktūros būtų tinkamos pakeisti tekstilės medžiagas, naudojamas kasdieniams aprangos gaminiams, jos turi būti lanksčios, dėvėjimo metu išlaikančios formą, higroskopiškos, laidžios orui ir garui, stiprios, atsparios daugkartiniam tempimui, lenkimui, cheminiam valymui ir trinčiai.

J. R. Cambell'as [36] vienas iš pirmųjų pradėjo analizuoti 3D objektų lankstumą bei nurodė gaires tolesniems tyrimams. Tyrimo metu mokslininkas buvo išsikėlęs teoriją, kad užspausdinus kietą objektą ant audinio gauta struktūra bus lanksti. Vis dėlto pasirinktas vientisas PLA polimero bandinys, sudarytas iš tūbelių, lankstumu nepasižymėjo. Taip pat nepasiteisino ir atskirų sudėtingų objektų spausdinimas ant medžiagos, kadangi jiems buvo reikalingos palaikančiosios struktūros, kurios įprastai atspausdinus figūrą būna pašalinamos, tačiau šiuo atveju polimerui įsiskverbus į audinį to padaryti neįmanoma. Galiausiai tyrėjas nustatė, kad spausdinimas ant tekstilės medžiagų nėra tinkamas, o lanksčiausia medžiaga gaunama sudarant ją iš atskirų žiedelių (žr. 1.14 pav. a ).

R. Melnikova [37] lygindama SLS ir FDM technologijomis atspausdintas lygiojo skersinio mezgimo struktūras nustatė, kad FDM bandinys iš minkšto PLA polimero savo savybėmis yra panašesnis į tekstilės medžiagą nei SLS bandinys (žr. 1.14 pav. b ). Spausdinant „Plauen“ nėrinius (žr. 1.14 pav. c ) pastebėta, kad struktūroje nutrūkimų neatsiranda jeigu jos dalys yra pakankamo skersmens. Palyginus standartinę PLA medžiagą su minkštu PLA polimeru įsitikinta, kad ji nėra tinkama, nes lenkiama greitai lūžta. Tuo tarpu minkštas PLA yra lankstus, o palaikytas karštame vandenyje tampa dar minkštesnis bei lankstesnis.



**1.14 pav.** Tekstilės medžiagos imituojančios struktūros: a) lanksčių žiedelių [36]; b) lygiojo skersinio mezgimo [37]; c) nėrinių [37]

L. N. Partsch [38] nustatė, kad pirminio 3D modelio dydis skiriasi nuo atspausdinto objekto, o bandinio matai X ir Y spausdinimo kryptimis pakinta skirtingai. Taip pat ištyrė spausdintas drobinio pynimo struktūras, kurios buvo supintos iš zigzago formos siūlų arba apvalių ataudų ir tiesių metmenų gijų (žr. 1.15 pav. a) ). Gauti rezultatai parodė, kad svarbu tarp gijų pasirinkti tinkamą atstumą, jog spausdinant jos nesusiklijuotų, o liktų atskiros ir galėtų judėti viena kitos atžvilgiu. Jeigu siūlai nesuskimba tarpusavyje atspausdinta struktūra pasižymi lankstumu bei šlytimi.

Norint, kad 3D struktūra pasižymėtų pralaidumu orui joje turi būti dirbtinai sukuriamos skylės. J. Mikkonen [39] pasinaudodama „PolyJet“ technologija atspausdino trijų skirtingų tipų: su vertikaliomis skylėmis, horizontaliomis skylėmis bei vientisus, lanksčius bandinius iš „TangoBlack+“ 3D medžiagos. Objektų stiprumas nustatomas analogiškai, kaip ir tekstilės medžiagų, remiantis standartiniu tempimo bandymu. Gauti rezultatai parodė, jog stipriausi bandiniai yra vientisi (plyšimo jėga 60 N), tačiau jie aprangai yra netinkami, nes nepraleidžia oro. Šiek tiek silpnesni už juos buvo bandiniai su vertikaliomis skylėmis (plyšimo jėga 42 N). Remiantis gautais rezultatais buvo sukurtas korsetas (žr. 1.15 pav. b) ), kuris idealiai prilunda prie kūno. Kadangi gaminys tempiasi horizontaliai, dėl šios priežasties skylės yra panaudojamos šia kryptimi. Atskiroms korseto dalims sutvirtinti panaudojamos kietos jungtys, kurios tarpusavyje susisega, o prie lanksčios 3D medžiagos prisisiuva tarsi sagos (pritaikyta pramoninei gamybai, jog būtų galima siūti su automatine sagų prisiuvimo mašina). Vis dėlto sukurtas gaminys turi ir minusų: jeigu korsetas per daug išsilenkia jis tampa trapus ir greitai plyšta bei jo svoris yra pakankamai didelis.

Atspausdintas 3D figūros pagrindas, net ir su labai daug skylių struktūroje yra pakankamai stiprus atlaikyti suknelės iš tekstilės medžiagos apatinę dalį (žr. 1.15 pav. c) ). Toks 3D objektas pagaminamas iš viso be atliekų. Šiuo metu aprangos pramonėje tai yra didelis trūkumas, kadangi daug siuvimo atliekų patenka į aplinką ir teršia ją. Be to, net 50 % gamybos kainos sudaro medžiagos kaina, todėl tai padėtų sumažinti ir pagaminimo kaštus. Taip pat spausdinimo procesas padeda išvengti medžiagos pjovimo lazeriu, kirpimo bei siuvimo operacijų. Vis dėlto 3D spausdinimas turi ir daug trūkumų. Dauguma spausdintuvų turi riboto dydžio platformas, kas priverčia gaminius suskaidyti į smulkesnes dalis, o tai pareikalauja papildomo laiko atspausdintam gaminiui sujungti. Norint atspausdinti didelius



objektus reikia labai daug laiko, kai tuo tarpu išausti ar numegzti tekstilės medžiagas galima ženkliai greičiau ir už mažesnę kainą. Atspausdintos 3D struktūros nepasižymi tokiais geromis higieninėmis ir eksploatacinėmis savybėmis, kaip tekstilės medžiagos, kadangi jos savo parametrais yra analogiškos plastikui ar gumoms [40]. Atlikus šią analizę galima teigti, kad gaminy sudarytas vien iš 3D objektų šiuo metu nėra tinkamas pramonei gamybai.



**1.15 pav.** Tekstilės medžiagas imituojančios struktūros: a) drobinio pynimo audinys [38]; b) elastingas korsetas [39]; c) suknelės viršutinė dalis [40]

### 1.2.2. Tiesioginis 3D objektų užspausdinimas ant tekstilės medžiagų

Kadangi didelių 3D elementų spausdinimas reikalauja labai daug laiko, brangių ir galingų 3D mašinų, o jų savybės nėra iš tolo panašios į tekstilės medžiagų, mokslininkai nusprendė, jog geriausias kelias realizuoti 3D spausdinimą aprangoje yra tiesioginis polimero užspausdinimas ant tekstilės medžiagos. Naudojant šį metodą, tekstilės medžiagoms galima suteikti papildomas funkcines savybes, o 3D figūroms – lankstumą [41, 42].

Kombinuotų sistemų lankstumas priklauso nuo [41]:

- tarpų tarp 3D figūrų;
- figūrų formos ir dydžio;
- figūros užspausdinimo pozicijos: ar ji užspausdinta tiesiogiai ant tekstilės medžiagos, ar įterpta į polimero vidurį (šiuo būdu galima pasiekti, kad struktūra į skirtingas puses linktu skirtingu kampu).

Siekiant, tiesiogiai, norimoje vietoje, užspausdinti polimerą ant tekstilės medžiagos ji turi būti pritvirtinama prie spausdinimo platformos. Kitu atveju medžiaga, dėl spausdinimo galvutės slėgio į ją, bus nustumama nuo platformos. R. S. Sanatgar'a [43] nurodė, jog medžiagas prie platformos geriausia pritvirtinti dvipuse lipnia juosta. Iš kitos pusės šis metodas nėra tinkamas ypatingai elastingoms medžiagoms, kadangi nuplėšiant nuo platformos jos deformuojasi. Be to neretai dalis klijų lieka ant medžiagos. Nustatyta, jog geriausias būdas medžiagas pritvirtinti prie platformos yra centrinę paviršiaus

dalį iškloti šveičiamuoju popieriumi ir tik medžiagos kraštus stabilizuoti, panaudojant dvipusę lipnią juostą [42].

E. Pei [44] nustatė, kad liekamosios tempimo deformacijos polimero vėsimo metu daro didelę įtaką jo ir tekstilės medžiagos sukibimui, kadangi dėl šios priežasties atspausdintas objektas traukiasi bei išsiriečia. Viena iš galimybių to išvengti yra įterpti tekstilės medžiagą į polimero vidurį. Tuomet spausdinama struktūra tvirtai prikimba prie platformos ir tai neleidžia jai deformuotis. Norint pasiekti gerą kombinuotos sistemos susiklijavimą, nereikia palikti papildomo tarpelio tekstilės medžiagai įdėti į jeigu jos storis neviršija 0,4 mm. Nustatyta, kad spausdinimo galvutė, nesant tarpeliui, medžiagą veikia jėga ir karščiu, todėl pagerėja polimero ir tekstilės medžiagos susiklijavimas. Geras sukibimas kombinuotoje sistemoje užtikrinamas tuomet, kada tekstilės medžiaga turi skylutes, tarpelius arba yra mažo tankumo. Iš kitos pusės šią problemą galima išspręsti medžiagoje dirbtinai sukūriant skylės [42].

Nustatyta, jog polimeras efektyviai užspausdinamas ant tekstilės medžiagos tik tuomet, kai kombinuota sistema susiklijuoja tvirtai, 3D objektas nedaro įtakos tekstilės medžiagos kritumui bei 3D figūra atlaiko šlyties ir tempimo deformaciją. E. Pei [44] organoleptiškai nuo 1 iki 10 įvertino populiariausių polimerų FDM technologijoje: ABS, PLA, nailono sistemas su sintetiniais bei natūraliais audiniais ir megztinėmis medžiagomis. Buvo vertinamos keturios savybės: polimero išsiritimas, sukibimo tvirtumas, spausdinimo kokybė ir lankstumas. Tyrimo metu nustatyta, kad iš polimerų PLA pasižymi geriausiomis savybėmis su visomis tirtomis tekstilės medžiagomis, kadangi liekamosios tempimo deformacijos jam daro mažiausią įtaką. Lyginant tekstilės medžiagas, geriausias sukibimas su polimeru yra būdingas medvilnės bei vilnos su poliesteriu audiniams ir sojos megztinei medžiagai.

Nustatyta, kad kuo daugiau prieš spausdinimą megztinė medžiaga yra ištempama ant platformos, tuo labiau deformuojasi galutinis objektas. Bandinių deformacijai neturi įtakos atspausdintų objektų dydis ir skaičius. Didinant atstumą tarp atskirų figūrų didėja išsiritimo lygis. Aukšta platformos temperatūra užfiksuoja megztinės medžiagos išsitemimą, dėl to galutinis objektas išsiriečia minimaliai [45].

Ant megztinės medžiagos užspausdinus 3D elementus jie pakeičia jos savybes. Įprastai tempiant mezginį viena kryptimi – kita jo kryptis susispaudžia, tačiau užspausdinti polimero sluoksniai to padaryti neleidžia. Nustatyta, kad šiai savybei įtaką daro atspausdintų sluoksnių skaičius. Kombinuota sistema, esant 20 % ištiesai, yra stabilesnė bei tvirtesnė už kiekvieną medžiagą atskirai [46].

Norint, kad kombinuotos sistemos būtų sėkmingai pritaikomos aprangos pramonėje svarbu užtikrinti gerą 3D ir tekstilės medžiagos sukibimą. Dėl šios priežasties didžioji dalis mokslinių tyrimų yra skirti nustatyti įvairių parametrų įtaką 3D ir tekstilės medžiagų susiklijavimo stiprumui (adhezijai). Adhezija šiuo atveju apibūdinama, kaip molekulinis ryšys, susidarantis tarp dviejų skirtingos prigimties kontaktuojančių paviršių, iš kurių vienas yra polimeras (adhezyvas), o kitas – tekstilės medžiaga (substratas) [47].

Susiklijavimo stiprumas tarp 3D ir tekstilės medžiagos priklauso nuo polimero klampumo. Pagal mikroeologinę adhezijos teoriją nustatyta, kad kuo klampesnis polimeras, tuo jis sunkiau įsiskverbia į tekstilės medžiagos poras, vadinasi ir susiklijavimo stiprumas tokio polimero yra mažesnis [47, 48].

Nustatyta, kad didesnę poveikį adhezijai daro tekstilės medžiagų sandaros rodikliai (pynimas, pluoštinė sudėtis, paviršius, storis, tankumas) nei polimero savybės. Satininio pynimo medžiagos pasižymi geresniu sukibimu nei drobinio. Mažiausia susiklijavimo jėga fiksuojama labai tankiose ir plonose medžiagose arba sudarytose iš nesusukto pluošto, kaip anglies gijos. Geriausiai su PLA polimeru susiklijuoja medvilnė ir poliesteris. Stipresnė adhezija susidaro tarp tų medžiagų, kurių paviršius yra nelygus, šiurkštus ar plaukuotas, kadangi skystas polimeras užpildo tekstilės medžiagos paviršiaus nelygumus, poras ir išėmas. Dėl šios priežasties padidėja faktinio kontakto plotas bei ryšių tarp adhezivo ir substrato skaičius, o kartu ir susiklijavimo stiprumas [42, 47, 49, 50].

Spausdinimo metu esant vienodam atstumui tarp spausdinimo platformos ir tekstilės medžiagos, substratas patiria tuo didesnę slėgį, kuo jis yra storesnis. Slėgis į medžiagą padidina polimero įsiskverbimą, o kartu ir susiklijavimo stiprumą [51, 52].

Didelę įtaką sukibimui daro tinkamas spausdinimo parametrų parinkimas. Adhezijos priklausomybę nuo spausdinimo galvutės temperatūros dydžio paaiškina difuzinė adhezijos teorija. Kuo spausdinimo galvutės temperatūra yra aukštesnė tuo polimero klampumas mažesnis, o makromolekulės juda daugiau ir greičiau. Dėl to padidėja difuzinė skvarba į medžiagą, vadinasi padidėja ir polimero kontakto su tekstilės medžiagomis faktinis plotas. Be to, kuo aukštesnė temperatūra tuo medžiaga ilgiau vėsata, todėl įsiskverbimo laikas pailgėja, taigi padidėja ir medžiagų susiklijavimo stiprumas [41, 42, 43, 47].

Kol polimeras nepasiekia stiklėjimo temperatūros (PLA  $\approx 55$  °C), tol spausdinimo platformos temperatūra neturi įtakos adhezijai. Kuomet temperatūra yra apie 100 °C, tuomet ji pasižymi tiesine priklausomybe su sukibimo stiprumu (kylant temperatūrai susiklijavimo stiprumas didėja). Iš kitos pusės didesnė nei 60-65 °C temperatūra stipriai veikia spausdinamo objekto kokybę, todėl aukštesnė temperatūra nei ši gali būti naudojama tik pirmame sluoksnyje [43, 53].

Nustatyta, kad kuo polimero sluoksnis yra toliau nuo kaitinamos spausdinimo platformos, tuo jis prasčiau susilydo su šalia esančiu sluoksniu. Vadinasi tekstilės medžiaga į kombinuotą sistemą turi būti įterpiama kuo žemesniame sluoksnyje [54].

Ne tik spausdinimo kokybei, tačiau ir susiklijavimo stiprumui daro įtaką spausdinimo greitis. Nustatyta, kad tiek per mažas, tiek per didelis greitis neigiamai veikia adheziją (optimaliausias spausdinimo greitis PLA medžiagai 50 mm/min) [43]. Minkšti, elastingi polimerai spausdinimo metu yra veikiami trinties, dėl kurios jų gijos nebenukeliauja iki spausdinimo galvutės. Mažesnis spausdinimo greitis, padeda sumažinti trintį [42].

Tiesioginio užspausdinimo ant tekstilės medžiagų susiklijavimo stiprumui didžiausią įtaką daro tinkamo atstumo tarp spausdinimo platformos ir galvutės parinkimas. Šis atstumas matuojamas pagal pirmojo atspausdinto sluoksnio storį. Jeigu pirminis tekstilės medžiagos storis buvo 0,6 mm, o gautas kombinuotosios sistemos pirmojo sluoksnio storis yra 0,5 mm, vadinasi medžiaga yra suslegiama 0,1 mm. Nustatyta, kad optimaliausias medžiagos slėgimas, siekiant užtikrinti didžiausią adheziją kombinuotoje sistemoje, yra 0,2 mm žemiau jos pradinio storio. Ši sąlyga negalioja, plonomis (iki 0,4 mm storio) tekstilės medžiagoms. Iš kitos pusės jeigu atstumas tarp spausdinimo galvutės ir platformos yra per mažas, tuomet polimeras nebegali praeiti ir būti užspausdintas ant tekstilės medžiagos [51, 55, 56, 57].

Prieš tiesiogiai užspausdinant polimerus ant tekstilės medžiagų, pirmiausiai jos buvo išskalbtos. Tyrimo rezultatai parodė, kad medvilnės susiklijavimo stiprumas po skalbimo pagerėja, o poliesterio – pablogėja. Skalavimo metu buvo pašalintas vaškas ir tepalai, todėl medvilnė įgavo geresnes hidrofilines savybes, o poliesteris – priešingai [49].

Nustatyta, kad medžiagų atsparumas dilimui priklauso nuo pluoštinės sudėties, o ne polimero savybių. Po 10 000 ciklų „Brailio raštas“ ant medvilnės audinio išliko beveik nepakitęs, kai tuo tarpu nuo poliesterinio audinio visi taškėliai nukrito [58].

### **1.3. Literatūros apžvalgos apibendrinimas**

3D spausdinimas – tai adityvus gamybos procesas, vis labiau populiarėjantis visose gyvenimo srityse. Iš daugybės spausdinimo technologijų tik keletas buvo panaudota aprangos gamybai: FDM, SLS, SLA ir „PolyJet“. Vienintelis FDM spausdinimo būdas, kurio metu sluoksnis po sluoksnio yra išliejamos išlydytos polimero gijos, tapo populiarus visame pasaulyje ne tik pramonės įmonėse, tačiau ir namų naudojime. Svarbiausi faktoriai nulėmę technologijos populiarėjimą – mažos eksploatacinės išlaidos, naudojamų polimerų geros mechaninės, cheminės ir šiluminės savybės, produktų gamyba praktiškai be atliekų.

Per pastaruosius 10 metų eksponentiškai išaugo 3D technologijų tyrinėjimas. Iš pradžių buvo orientuojamasi į 3D struktūrų, atkartojančių audinių savybes, kūrimą. Norint atspausdinti didelius objektus reikia labai daug laiko, kai tuo tarpu išausti ar numegzti tekstilės medžiagas galima ženkliai greičiau ir už mažesnę kainą. Geriausias būdas išspręsti šią problemą yra kombinuoti FDM technologiją su tekstilės medžiagomis. Panaudojant tiesioginio polimero užspausdinimo ant medžiagos metodą, ne tik modifikuojamos tekstilės medžiagų mechaninės savybės ir 3D figūrų lankstumas, tačiau taip pat sukuriama kombinuotos sistemos su visiškai naujais parametrais. Dėl šios priežasties, kad kombinuotos struktūros būtų sėkmingai pritaikomos aprangos pramonėje, svarbu užtikrinti gerą 3D ir tekstilės medžiagų sukibimą. Nustatyta, jog 3D ir tekstilės medžiagų susiklijavimo stiprumui daro įtaką tekstilės medžiagų sandaros rodikliai (pluoštinė sudėtis, pynimas, storis, tankumas, paviršius, apdaila), po-

limero klampumas, spausdinimo parametrai (spausdinimo platformos temperatūra, spausdinimo galvutės temperatūra, spausdinimo greitis, atstumas tarp platformos ir spausdinimo galvutės).

Adhezijos stiprumas tarp 3D ir tekstilės medžiagų vis dar yra pagrindinė problema, kodėl ši technologija neįsitvirtina aprangos pramonėje. Iki šiol moksliniuose darbuose buvo tyrinėjama adhezija tik tarp dažniausiai FDM technologijoje naudojamų PLA (polilaktidas), ABS (akrilnitrilo, stireno ir polibutadieno kopolimeras), nailono polimerų ir tekstilės medžiagų. Iš kitos pusės nieko nėra žinoma apie sunkiai spausdinamų lanksčių termoplastinių polimerų, tokių kaip TPE, TPU ir TPC ir audinių susiklijavimo stiprumą. Nors buvo tyrinėjama įvairių parametrų įtaka kombinuotų sistemų adhezijai, tačiau dar niekas iki šiol neištyrė skalbimo įtakos susiklijavimo stiprumui. Todėl buvo iškeltas toks šio **darbo tikslas** – ištirti įvairių veiksnių įtaką 3D spausdinimo medžiagų ir šifoninių audinių susiklijavimo stiprumui bei remiantis gautais rezultatais sukurti praplėsto funkcionalumo aprangos kolekciją.

Tikslui įgyvendinti iškelti tokie **uždaviniai**:

1. sukurti 3D elementus, kurių jungtys leistų praplėsti aprangos panaudojimo galimybes;
2. įvertinti tekstilės ir 3D medžiagų charakteristikų įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tįsumui;
3. įvertinti skalbimo įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tįsumui;
4. sukurti aprangos kolekciją, kurioje būtų panaudota tyrime išanalizuota inovacija, ir nustatyti ar realiame gaminyje kombinuota sistema sugebės atlaikyti dėvėjimo metu patiriamas apkrovas.

## 2. TIRIAMOJI DALIS

### 2.1. Tyrimo objektai

Šiuo metu pasaulinėje rinkoje dominuoja dviejų skirtingų pluoštinių sudėčių lengvi, ploni ir sunkiai siuvami šifoniniai audiniai – sintetiniai (poliesteriniai), naudojami kasdieninėje aprangoje, bei natūralūs (šilkiniai), plačiai paplitę vakariniuose, šventiniuose drabužiuose. Siekiant nustatyti įvairių veiksmų įtaką tekstilės ir 3D medžiagų susiklijavimo stiprumui prieš ir po skalbimo, tyrimo objektais pasirinkti 4 skirtingi šifoniniai audiniai: 2 – sintetinio ir 2 natūralaus pluošto. Atsižvelgiant į tai, kad suklijuotoms tekstilės ir 3D medžiagų struktūroms didelę įtaką daro pluoštinė sudėtis, šifoniniai audiniai parenkami taip, jog būtų galima įvertinti elastano (EL) poveikį kombinuotų junginių sukibimo stiprumui.

Tyrimo objektai – drobinio pynimo audiniai, kurių storis (nuo  $0,19 \pm 0,00$  mm iki  $0,38 \pm 0,01$  mm), paviršinis tankis (nuo  $25,8 \pm 0,6$  g/m<sup>2</sup> iki  $56,6 \pm 1,7$  g/m<sup>2</sup>) ir tankumas ataudų kryptimi (nuo  $33 \pm 0,7$  cm<sup>-1</sup> iki  $42 \pm 0,7$  cm<sup>-1</sup>) artimi vienas kitam.

Visos audinių struktūros charakteristikos nustatomos vadovaujantis standartais. Pagal LST EN ISO 5084:2000 keliamus reikalavimus, panaudojant elektroninį stormatį J-40-T, kurio matavimo tikslumas yra 0,01 mm, išmatuojamas medžiagų storis [59]. Paviršinis tankis apskaičiuojamas pagal LST EN 12127:1999 standartą, o jam reikalingų bandinių masė pasverama elektroninėmis svarstyklėmis „Kern&Sohn EG420 – 3NM“ (svėrimo tikslumas – 0,01 g) [60]. Siūlų tankumas audinyje apskaičiuojamas pagal LST EN 1049-2:1998 [61] (žr. 2.1 lentelę).

#### 2.1 lentelė. Tekstilės medžiagų sandaros rodikliai

Audinio kodas	Pluoštinė sudėtis	Pynimas	Storis, mm	Paviršinis tankis, g/m <sup>2</sup>	Siūlų ilginis tankis ataudų kryptimi $T_A$ , tex	Tankumas ataudų kryptimi, cm <sup>-1</sup>	Apdaila
A1	100% poliesteris	Drobinis	$0,19 \pm 0,00$	$53,4 \pm 0,4$	$5,8 \pm 1,08$	$42 \pm 0,7$	Dažytas
A2	97% poliesteris, 3% elastanas		$0,38 \pm 0,01$	$56,6 \pm 1,7$	$8,1 \pm 0,17$	$33 \pm 0,7$	Dažytas, gofruotas
A3	100% šilkas		$0,13 \pm 0,00$	$25,8 \pm 0,6$	$1,6 \pm 0,03$	$41 \pm 0,6$	Dažytas
A4	98% šilkas, 2% elastanas		$0,21 \pm 0,01$	$39,8 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,08$	$38 \pm 0,7$	Dažytas

**Pastaba.** Audinių sandaros rodiklių statistiniai duomenys pateikiami 1 PRIEDE.

Kita tyrimo objektų grupė tai 3D spausdinimo medžiagos. Remiantis literatūros analize nustatyta, kad lanksčių TPU (termoplastinių poliuretano), TPE (termoplastinių elastomero), kurie priklauso tai pačiai cheminei klasei ir turi panašias savybes, bei TPC (biologinėmis savybėmis pasižyminčių termoplastinių ko-poliesterių) polimerų parametrų įtaką adhezijai vis dar nėra iširta. Nors šias medžiagas dėl minkštumo ir elastingumo yra sudėtinga spausdinti, vis dėlto jos yra labiausiai tinkamos aprangos gamybai, kadangi šie polimerai yra ilgaamžiai, atsparūs UV spinduliams, chemiškai poveikiui, skal-

bimui. Iš visų FDM technologijos medžiagų pasirinkti polimerai pasižymi didžiausia trūkimo ištįsa ir atsparumu smūgiams [62].

Lyginant gamintojų pateikiamas savybes TPC yra mažiausiai tamprus (kietumo indeksas – 45D), TPU yra vidutinio elastingumo (kietumo indeksas:  $85A \leq TPU$ ), o TPE – tampriausias iš visų išvardintų medžiagų (kietumo indeksas:  $TPE < 85A$ ), dėl to jį sudėtingiausia spausdinti [62].

Siekiant išsiaiškinti, kuri pluoštų kategorija pagal savo savybes yra tinkamesnė kombinuotoms struktūroms su audiniais, iš kiekvienos grupės buvo atrinkta po viena ar dvi medžiagas, besiskiriančias savo lankstumu (žr. 2.2 lentelę).

**2.2 lentelė.** 3D spausdinimo medžiagų charakteristikos

Eil. Nr.	Medžiaga Rodiklis	FilaFlex <sup>®</sup> Original 82A , TPE	NinjaFlex, TPU1	PolyFlex <sup>™</sup> , TPU2	Flex45, TPC
1	2	3	4	5	6
1.	Cheminė sudėtis	Termoplastinis elastomeras	Termoplastinis poliuretan	Termoplastinis poliuretan	BIO termoplastinis kopolimeris
2.	Spausdinimo siūlo skersmuo, mm	1,75	1,75	1,75	1,75
3.	Tankumas, g/cm <sup>3</sup>	1,14	1,2	1,17-1,24	1,14
4.	Tempimo modulis, MPa	-	12	9,4	95
5.	Atsparumas tempimui, MPa	42	26	29	24
6.	Santykinė trūkimo ištįsa, %	665	660	330	530
7.	Kietumo indeksas	82A	85A	95A	45D
8.	Spausdinimo temperatūra, °C	225-235	225-235	220-235	220-260
9.	Spausdinimo platformos temperatūra, °C	-	40	-	-
10.	Spausdinimo greitis, mm/s	20-40	10-20	30-90	-

**Pastaba.** Visos lentelėje nurodytos vertės pateikiamos gamintojų techninėse dokumentacijose ir yra pagrįstos tyrimais, atliktais pagal standartus [63, 64, 65, 66]. Tikslī medžiagų cheminė sudėtis nepateikiama, nes tai yra konfidenciali informacija.

## 2.2. Kombinuotų 3D ir tekstilės medžiagų sistemų kūrimo ir gamybos metodika

Kombinuota sistema kuriama ne tik nustatyti jos susiklijavimo stiprumą po eksploatacines sąlygas imituojančių veiksnių, tačiau ir praplėsti liaunų, sunkiai pritaikomų priglundusiuose drabužiuose, medžiagų dizaino galimybes. Įprastai šifono audiniai nėra tinkami priglundusiems gaminiams, kadangi žmogui judant įvairiose kūno vietos susidaro įtempiai, dėl kurių medžiaga dažnai neatlaiko ir drabužis suplyšta. Remiantis tuo, kuriama sistema siekiama sumažinant įtempių poveikį siūlei, išlaikant polimero 3D estetinį vaizdą.

Norint, kad audinių ir 3D medžiagų sistemos atlaikytų dėvėjimo metu patiriamas apkrovas (100 N/m – 140 N/m), o jų sujungimas būtų elastingas, turi būti tinkamai parinkti gamybos parametrai, to-

kie kaip: audinio bei 3D figūros dydžiai ir formos, 3D spausdinimo parametrai ir technologija [67].

Sistemos jungiamos iš skirtingų medžiagų, vadinasi kiekvienai iš jų atskirai turi būti paruošiami atitinkami bandiniai. Žmogui judant didžiausios apimties deformacijos fiksuojamos krūtinės, nugaros, sėdmenų, kelių, alkūnių bei pilvo zonose [68]. Remiantis tuo, galima daryti išvadą, kad vertikalios gaminių siūlės patiria didžiausią tempimą, todėl 3D figūros turi būti išdėstytos taip, kad sujungtų šias siūles. Atsižvelgiant į šį faktą, tyrimams bus naudojami tik ataudų krypties bandiniai. Suklijavimui su viena 3D medžiaga iš kiekvieno šifoninio audinio iškerpama po dešimt 50 x 140 mm dydžio juostelių (iš viso keturioms 3D medžiagoms po 40 juostelių). Kiekviena iš juostelių susiuvama 6 klasės detalių ir gaminio kraštų apdirbimo siūle 6.04.03, panaudojant universalią suvimo mašiną: dygsnio tipas – 301, dygsnio tankis – 5 dygs/cm [69]. Siūlės schema pateikiama 2.1 paveikslo a) dalyje pagal standarto LST ISO 4916:2002 reikalavimus [70].

3D medžiagos tamprumui didelę įtaką daro atspausdintų sluoksnių skaičius. Kuo bandinys plonesnis, tuo jis yra liaunesnis, vadinasi ir jėga reikalinga jam ištempti yra mažesnė. Kadangi 3D medžiaga bus užspausdinama ant liaunų šifoninių audinių, o dėvėjimo metu patiriamos apkrovos yra santykinai nedidelės, todėl ir 3D figūros storis, jungiantis dvi tekstilės medžiagos juosteles, turi būti kuo plonesnis. Dėl šios priežasties projektuojamos figūros storis jungimo vietoje numatytas 2,5 mm.

Figūros dizainas kuriamas atsižvelgiant į detalei keliamus funkcinius reikalavimus (storis jungimo vietoje 2,5 mm), tačiau kartu išlaikant ir jo 3D estetinį vaizdą. Tuomet grafine automatizuota projektavimo sistema „Solidworks“ nubraižoma 60 x 7 x 12 mm dydžio figūra (žr. 2.1 pav. b)), kuri išsaugoma specialiai 3D spausdinimui sukurtu STL (*Stereolitografijos*) formatu, suskaidančiu figūros paviršių į atskirus trikampus [71]. Vis dėlto, šio formato spausdintuvas vis dar nesupranta, todėl objekto paruošimui spausdinti turi būti panaudojama dar viena programinė įranga „Cura“ – 3D modelių pjaustyklė, kurios dėka sukurtas objektas yra paverčiamas į specialią kalbą (kodą) – *g.code*, užrašomą koordinatėmis ir funkcijomis, nurodančiomis kokius veiksmus turi atlikti spausdintuvas. Norima spausdinti figūra atidaroma pjaustyklėje. Atsižvelgiant į 2.2 lentelėje nurodytas 3D medžiagų charakteristikas visiems plastikams parenkami vienodi spausdinimo parametrai: sluoksnio storis – 0,2 mm, gaminio užpildymas – 25 %, spausdinimo temperatūra – 230 °C, spausdinimo platformos temperatūra – 40 °C, spausdinimo greitis 15 mm/s. Taip pat remiantis tuo, kad dėl liekamųjų tempimo deformacijų vėsdamas plastikas traukiasi ir išsiriečia papildomai pirmajame sluoksnyje turi būti nurodomas sukibimą su platformą sustiprinantis 3 mm pločio kraštas (spausdinimo funkcija *brim*). Galiausiai pažymėjus visus norimus parametrus objektas yra paverčiamas į *g.code* iš kurio matyti, kad jam atspausdinti prireiks 0,58 m (~1 g) medžiagos ir 38 min, iš viso bus atlikta 57 sluoksniai, o spausdintuvas turės nuskaityti 8265 kodo eilutes.

Dėl liekamųjų tempimo deformacijų bandinys taip pat negali būti spausdinamas iš karto ant tekstilės medžiagos. Šiuo atveju pirmiausiai turi būti išliejamas 1 mm aukščio 3D medžiagos pagrindas ir

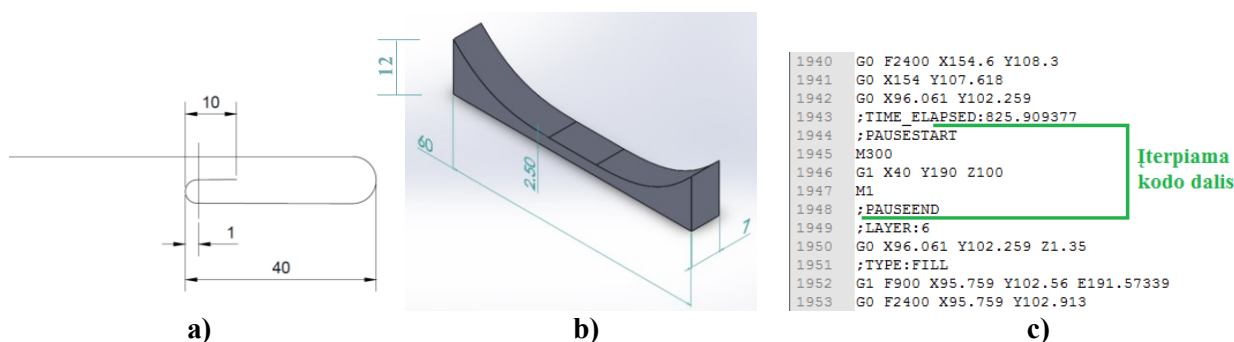


tik po to įdedama medžiaga. Svarbu, kad šio pagrindo aukštis būtų kuo žemesnis, kadangi kuo toliau sluoksnis yra nuo plokštumos, to jo sukibimas su prieš tai buvusiu sluoksniu mažėja [54].

Papildomo tarpelio medžiagai įdėti, siekiant užtikrinti geresnę adheziją, projektuoti nereikia, kadangi tiriamų medžiagų storis neviršija 0,4 mm [41].

Norint, jog spausdintuvas visada sustotų toje pačioje vietoje į *g.code* turi būti įterpiamos papildomos komandos eilutės (žr. 2.1 pav. c), kurios atlieka šiuos veiksmus:

- 1) sustabdo spausdintuvą baigus spausdinti 5 sluoksnį;
- 2) garsiniu signalu praneša apie spausdintuvo sustojimą;
- 3) spausdinimo galvutę nusiunčia į koordinatėmis (40;190;100) pažymėtą vietą;
- 4) paspaudus valdymo panelėje esantį mygtuką, grąžina spausdinimo galvutę į buvusią poziciją ir tęsia darbą toliau.

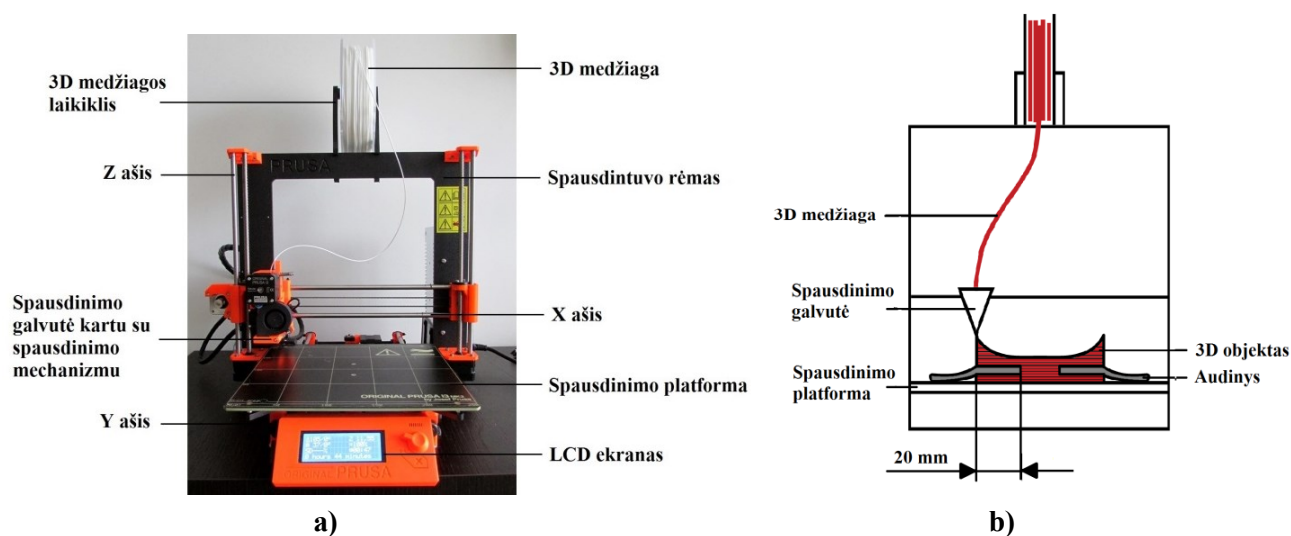


**2.1 pav.** 3D ir tekstilės bandinių paruošimas: a) juostelės susiuvimo schema; b) 3D figūros spausdinimo maketas; c) į *g.code* įterpiamos kodo eilutės

Literatūros analizė parodė, kad iš visų aptartų FDM technologija yra populiariausia, kadangi ji vienintelė turi platų stalinių (personalinių) spausdintuvų pasirinkimą, nereikalauja didelių investicijų ir gali būti lengvai pritaikoma 3D spausdinimui ant tekstilės medžiagų. Kombinuotosios sistemos kūrimui pasirinktas 3D uždaros konstrukcijos stalinis spausdintuvas „PRUSA i3 MK2S“ (žr. 2.2 pav. a), spausdintuvo parametrai nurodomi 2.3 lentelėje), kuris 2018 metais buvo išrinktas kaip mažiausiai klaidų darantis, galintis spausdinti nesustodamas išstisus paras. Jo kaina yra net keturis kartus mažesnė nei pagrindinio jo konkurento rinkoje „Ultimaker 2+“, todėl bus reikalingos žymiai mažesnės investicijos naujai technikai [72]. Spausdintuvo veikimas paremtas adityviu principu, kurio metu sluoksnis po sluoksnio yra išliejamas, prieš tai išlydytos, 3D medžiagos gijos.

Gamybos procesas pradedamas nuo 3D medžiagos ritės įdėjimo į laikiklį. Tuomet LCD ekrane parenkamas spausdinimo galvutės įkaitinimas „FLEX“ medžiagai. Spausdintuvui pasiekus reikiamą temperatūrą nurodoma paduoti medžiagą į spausdintuvą. Paruošus spausdintuvą darbui, parenkamas reikiamas 3D objekto failas, esantis SD kortelėje. Tik įkaitus spausdintuvui iki faile nurodytos temperatūros užpildas paduodamas į kaitinimo elementą, kuriame yra išlydomas. Skystas polimeras nukeliauja į spausdinimo galvutę, kuri judėdama X kryptimis išlieja pirmąjį sluoksnį ant judančios Y kryptimi spausdinimo platformos. Spausdinimo galvutei judant aukštyn (Z kryptimi) atspausdintas sluoks-

nis atvėsta ir sukietėja. Po to liejimo procesas kartojamas dar keturis kartus, kol spausdintuvas supypia ir nukeliauja į objekto kode nurodytas koordinatas. Tuomet virš atspausdintos figūros iš abiejų pusių 2 cm atstumu nuo kraštų įdedami audinio bandiniai, kurių kraštai dvipuse lipnia juosta pritvirtinami prie platformos, siekiant užtikrinti medžiagos stabilumą. Paspaudus valdymo panelėje esantį mygtuką spausdintuvas paleidžiamas liejimo procesą kartoti vėl ir vėl, kol bandinys bus pagamintas. Baigus spausdinti kombinuota sistema yra nuimama nuo platformos. Rankomis nuvalomos susidariusios polimero gijos bei žirkklėmis nukerpami papildomi apačios sukibimą su platformą sutvirtinantys kraštai.



2.2 pav. „PRUSA i3 MK2S“: a) 3D spausdintuvas; b) kombinuotos sistemos kūrimo principinė schema

2.3 lentelė. 3D spausdintuvo „PRUSA i3 MK2S“ pagrindinės charakteristikos [73]

Eil.Nr.	Parametras	Reikšmė
1.	Maksimalus spausdinamo objekto dydis, mm	250 x 210 x 200
2.	Spausdinamo sluoksnio storis, mm	0,05-0,35
3.	Spausdinimo greitis, mm/s	iki 100
4.	Spausdinimo galvutės diametras, mm	0,4
5.	Tinkamos eksploatacinės medžiagos	PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex, Laywood, Laybrick, Bamboofill, Bronzefill, ASA, T-Glase, nailonas, polikarbonatai
6.	Eksploatacinės medžiagos diametras, mm	1,75

### 2.3. 3D ir tekstilės medžiagų susiklijavimo stiprumo nustatymo metodika

Siekiant nustatyti ar sukurtos kombinuotosios struktūros atlaikys dėvėjimo metu patiriamas apkrovas, pasirinkta atlikti vienakryptį (vienašį) juostelės metodo tempimo bandymą, laikantis LST ISO 13934-1:2013 standarto [74]. Kadangi tempiama sistema yra originali ir anksčiau nenaudota jokiuose tyrimuose jos pusciklės tempimo charakteristikos: stiprumas ir tąsumas, turi būti nusakomos ne standartiniais rodikliais (trūkimo jėga  $F_{tr}$  ir trūkimo ištįsa  $\Delta l_{tr}$ ), o tikslingai įvardintais šiais parametrais: ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga  $F_{tr}$  ir ištraukimo iš tarp sluoksnio ištįsa  $\Delta l_{tr}$ .

Tyrimo objektai paruošiami pagal 2.2 poskyrįje nurodytą metodiką. Kiekvienos rūšies bandinių naudojama po 5. Prieš bandymą visos kombinuotos sistemos išlaikomos ne mažiau kaip 24 valandas kondicinėse sąlygose, esant santykiniam drėgnumui  $\varphi = 65 \pm 2 \%$  ir temperatūrai  $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  pagal standarto LST EN ISO 139:2006 keliamus reikalavimus [75]. Tempimo bandymams naudojama CRE tipo tempimo mašiną „Tinius Olsen H10KT“ (žr. 2.3 pav.).



a)

b)

**2.3 pav.** Tempimo bandymas: a) „Tinius Olsen H10KT“ tempimo mašina; b) kombinuotos sistemos tvirtinimas spraustuvuose

Bandymas pradamas nuo tempimo mašinos parametrų nustatymo. Parenkamas 100 mm atstumas tarp spraustuvų, viršutinio spraustuvo greitis  $v = 100 \text{ mm/min}$ , tempimo jėgos diapazonas 0 – 500 N. Kombinuotos sistemos spraustuvuose tvirtinamos be pradinės įtempimo jėgos.

Viršutiniame tempimo mašinos spraustuje įtvirtinamas vienas audinio juostelės galas, o apatiniame spraustuje kitas. Kuomet kombinuota sistema yra užfiksuota „Tinius Olsen H10KT“ mašinoje, tuomet per kompiuteryje atidarytą „QMat“ programą yra paleidžiamas tempimo procesas, kurį atlieka viršutinis spraustuvas. Programa realiu laiku matuoja ištraukimo iš tarp sluoksnių jėgą  $F_{tr}$  ir ištraukimo iš tarp sluoksnių ištįsą  $\Delta l_{tr}$ , o gautus rezultatus perteikia braižydama tempimo kreivę. Nutrūkus bandiniui viršutinis spraustuvas grįžta į pradinę padėtį. Galiausiai išimami nutrūkusios kombinuotosios sistemos galai. Analogiškai išbandomi ir kiti bandiniai [76].

Jeigu bandiniai išslysta iš spraustuvų rezultatai yra neregistruojami. Kombinuotų sistemų kūrimo metu, dėl audinio struktūros ir apdirbimo, sujungimo vietose susidaro įvairios klostelės, todėl bandiniai pasižymintis dideliais nuokrypiais turi būti atmetami.

## **2.4. Skalbimo įtakos kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui nustatymo metodika**

Siekiant įvertinti kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumą po eksploatacines sąlygas imituojančių veiksnių, nuspręsta atlikti sukurtų bandinių skalbimą laikantis LST ISO 6330:2012 standarto

reikalavimų [77]. Tyrimui atlikti panaudojama vertikalios ašies automatinė skalbimo mašina „AEG“. Bandiniai skalbiami „Perwoll renew 3D color effect“ skystu bespalviu skalbikliu, kurį sudaro: anijoninės paviršinio aktyvumo medžiagos, nejoninės paviršinio aktyvumo medžiagos, muilas, fosfonatai, kvapiosios medžiagos. Sintetinio ir natūralaus pluošto medžiagoms turi būti naudojami du skirtingi skalbimo režimai. Poliesteriui: vandens temperatūra – 40 °C, skalbimo trukmė – 32 min. Šilkui pritaikomas ypatingai švelnus skalbimas, imituojantis rankinį, kurio metu buvo pasirinkta vandens temperatūra – 30 °C, skalbimo trukmė – 15 min. Atliekami 5 skalbimo ciklai. Po kiekvieno iš jų bandiniai ištiesinami ant horizontalios plokštumos ir džiovinami daugiau nei 10h.

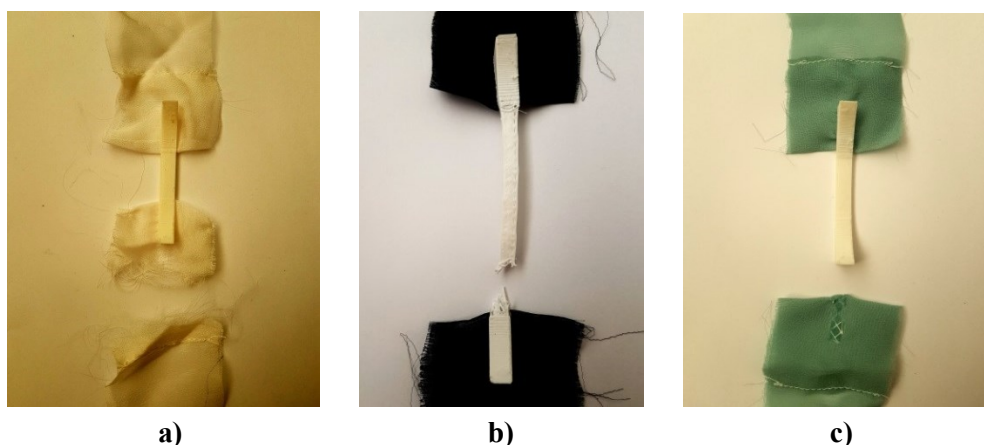
Kombinuotų sistemų stiprumas nustatomas pagal 2.3 poskyryje aprašytą vienašį juostelės tempimo bandymą. Rezultatai palyginami su gautais prieš skalbimą.

## 2.5. 3D ir tekstilės medžiagų sistemų tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Siekiant nustatyti kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumą bei tąsumą buvo palyginti tekstilės (žr. 2.1 lentelę) ir 3D medžiagų (žr. 2.2 lentelę) junginių, po eksploatacines sąlygas imituojančių veiksmų: skalbimo ir tempimo, tyrimo rezultatai (žr. 2 ir 3 PRIEDUS).

Atliekant vienašį juostelės metodo tempimo bandymą užfiksuotos trys skirtingos tyrimo baigtys:

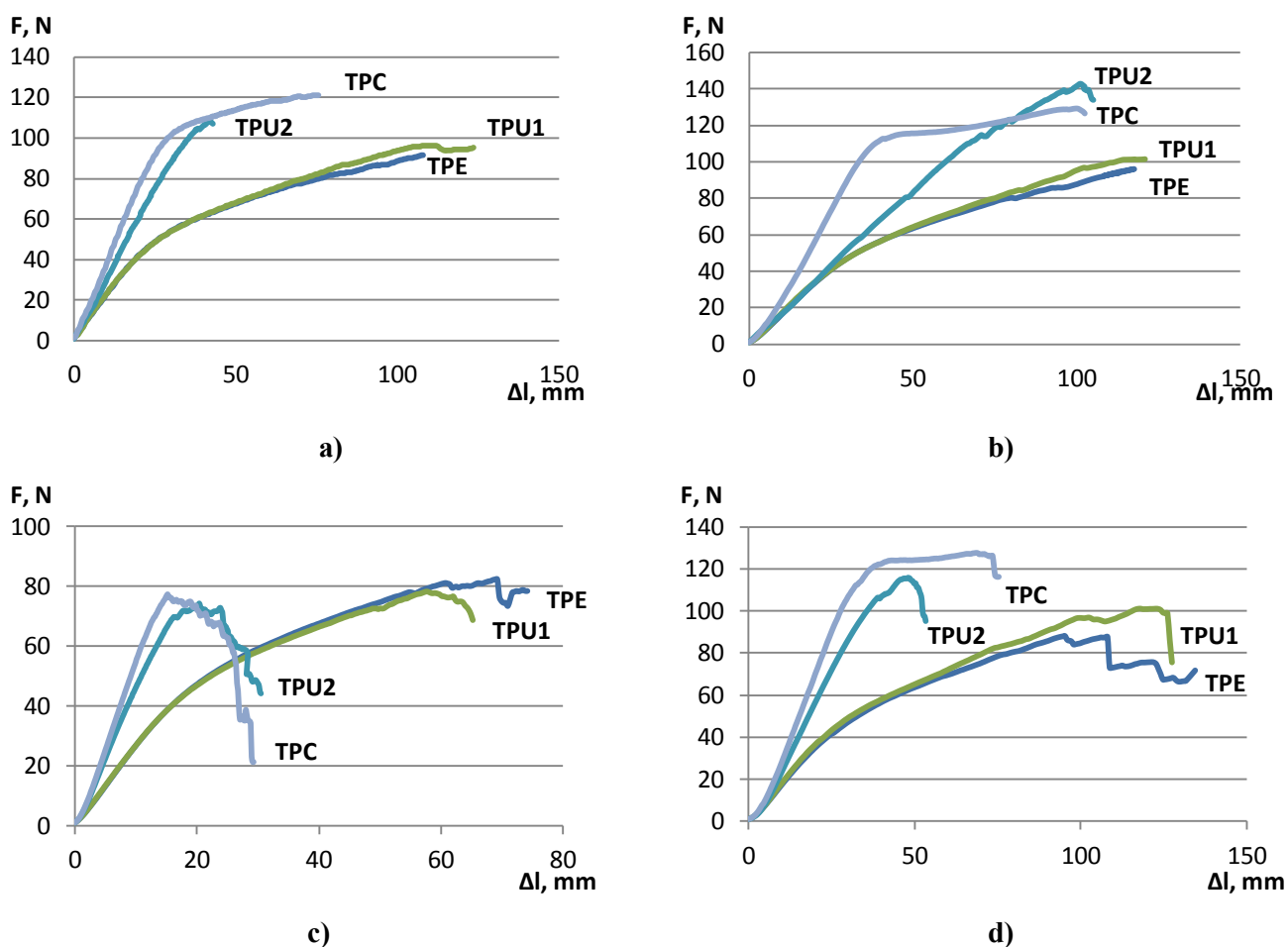
- 1) tekstilės medžiagos nutrūkimas prie 3D medžiagos (žr. 2.4 pav. a) );
- 2) 3D medžiagos nutrūkimas ploniausioje vietoje (žr. 2.4 pav. b) );
- 3) tekstilės medžiagos ištraukimas iš tarp sluoksnių, kuomet polimeras atsiklijuoja nuo audinio (žr. 2.4 pav. c) ).



**2.4 pav.** Kombinuotos sistemos suirimo variantai: a) audinio nutrūkimas; b) 3D medžiagos nutrūkimas; c) 3D medžiagos atsiklijavimas

2.5 paveiksle pavaizduotos kombinuotų sistemų tipinės tempimo kreivės. Iš jų matyti, kad kuo 3D medžiaga standesnė, tuo pradinėje kreivės tempimo zonoje tempimo jėga didėja staigiau. Pagal kietumo indeksą TPE (82A) ir TPU1 (85A) plastikai yra labai panašaus tamprumo. Tai įrodo ir tapachios šių medžiagų pradinės tempimo kreivės zonos.

Iš pateiktų tipinių tempimo kreivių galima manyti, kad TPU2 (95A) ir TPC (45D) plastikų standumas yra labai panašus, vis dėlto iš jų standesnis yra TPC plastikas.



2.5 pav. Tipinės tempimo kreivės: a) A1; b) A2, c) A3; d) A4 audinių

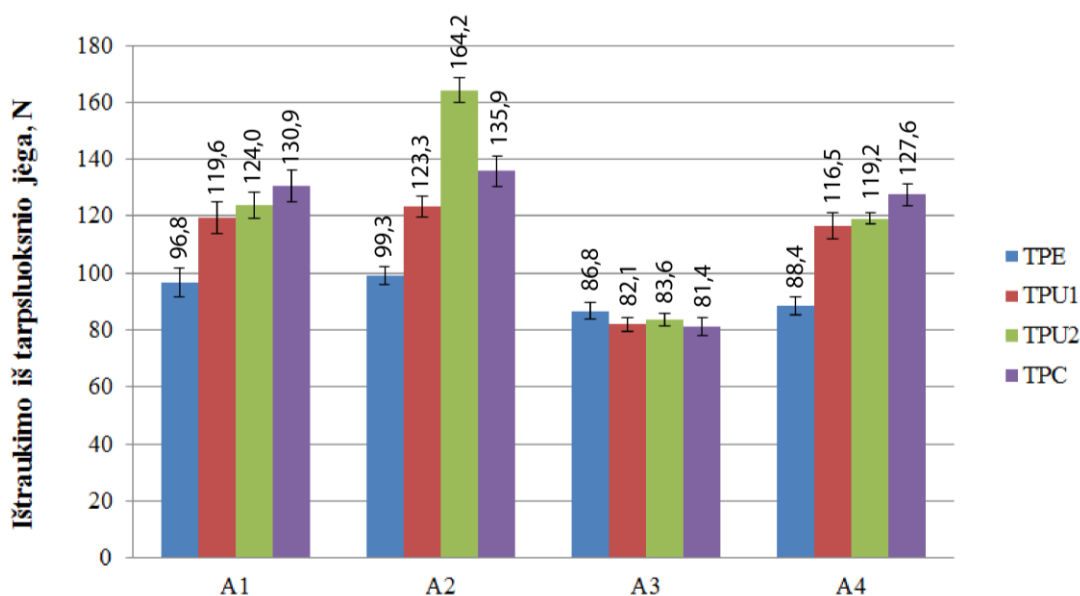
Nuo kreivės persilenkimo zonos 3D objekto gijos bei audinio siūlai vis labiau tempiasi, o jėgos, reikalingos įveikti pasipriešinimą lenkiant, dar smarkiau didėja, kol išlieti 3D medžiagos sluoksniai pradeda vienas nuo kito atsiskirti. Išsisluoksniavimą vaizduoja matomi kreivių netolygūs kitimai. Galima daryti išvadą, kad dėl audinio siūlų ir polimero gijų tįsimo tarp jų atsiranda vis didesni tarpai, todėl silpnėja sistemos susiklijavimas ir galiausiai junginys nutrūksta. Toks sistemos nutrūkimas būdingas TPE ir TPU plastikui. Iš kitos pusės junginių su TPC medžiaga nutrūkimas vyksta kiek kitaip. Tempiamos TPC gijos viena su kita stipriai spaudžiasi kol susilydo į vientisą standų darinį, kuris galiausiai neatlaikęs didelės jėgos nutrūksta (žr. 2.4 pav. b) ).

Iš visų bandinių grupių reikėtų išskirti sistemas su audiniu A3. Šių sistemų silpnoji grandis yra tekstilės medžiaga. Nors pradinėje kreivės zonoje tempimo jėga didėja kaip ir kitose medžiagose, tačiau jėgai pasiekus tam tikrą dydį, pirmiau pradeda plyšta medžiagos siūlai, o ne išsisluoksniuoti junginys. Tai atspindi ir audinio A3 kreivių nukrypimai.

## 2.6. Tekstilės ir 3D medžiagų charakteristikų įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tąsumui

Siekiant nustatyti 3D ir tekstilės medžiagų įtaką kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui, buvo tiriama 16 skirtingų junginių, sudarytų iš TPE, TPU1, TPU2 ir TPC polimerų bei A1, A2, A3 ir A4 audinių. Bandiniai buvo pagaminti esant vienodoms spausdinimo sąlygoms: sluoksnio storis – 0,2 mm, gaminio užpildymas – 25 %, spausdinimo temperatūra – 230 °C, spausdinimo platformos temperatūra – 40 °C, spausdinimo greitis 15 mm/s.

2.6 paveiksle pateikiama 3D medžiagų įtaka ištraukimo iš tarp sluoksnio jėgos dydžiui. Kadangi A3 audinio ir 3D medžiagų junginiuose pirmiau nutrūksta tekstilės medžiaga, todėl šiuo atveju negalima įvertinti polimerų įtakos kombinuotų struktūrų stiprumui.



2.6 pav. 3D medžiagų savybių įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui

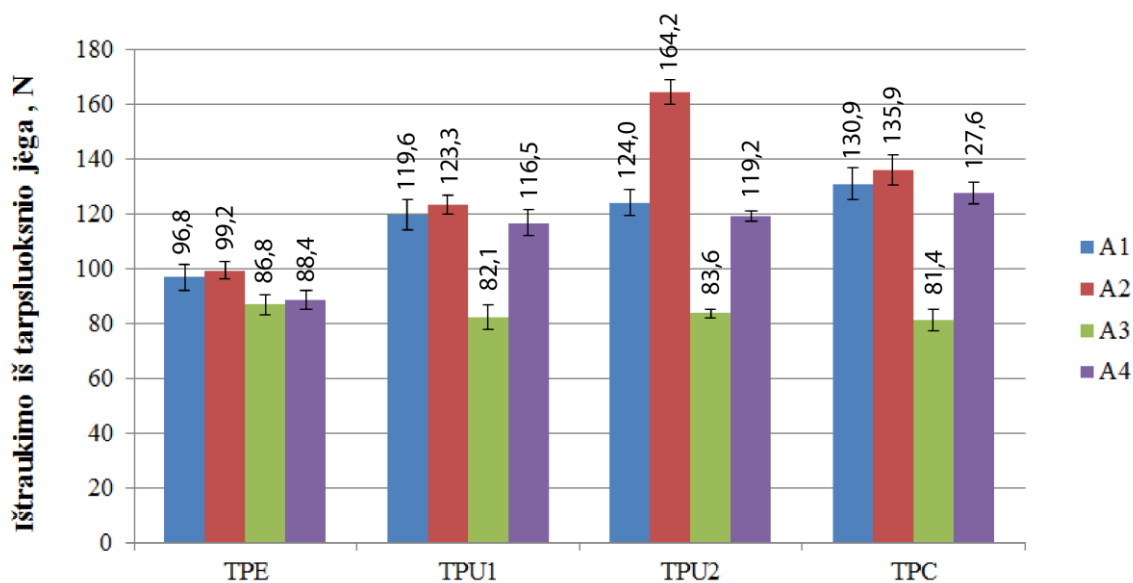
Analizuojant 2.6 paveikslą galima pastebėti bendrą tendenciją, kad kuo 3D medžiaga standesnė, tuo ji pasižymi didesne ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga. Visų kombinuotų sistemų silpnoji dalis yra liaunas 1 mm aukščio pagalbinis pagrindas, kuris padeda išvengti spausdinimo metu polimerus veikiančių liekamųjų tempimo deformacijų. Iš kitos pusės kuo polimeras tampresnis, tuo pagrindas yra stipriau veikiamas ištraukimo iš tarp sluoksnio jėgos. Atsižvelgiant į tai galima daryti prielaidą, kad tampresniuose 3D medžiagose pagalbinio sluoksnio gijos viena nuo kitos atsiskiria esant mažesnei jėgai, taip susilpnindamos visą sistemą.

TPE (82A) ir TPU1 (85A) kietumo indeksas nurodo, kad šių medžiagų tamprumas yra labai panašus, o tipinės tempimo kreivės (žr. 2.5 pav.) tai patvirtina. Vis dėlto lyginant jas tarpusavyje pastebima, kad TPU1 ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga yra net 23,6 % didesnė junginyje su A1 audiniu, 24,2 % – A2 ir 23,6 % – A4. Pagal kietumo indeksą TPU2 (95A) yra žymiai kietesnis už TPU1 (85A), vadinasi pagal pirmąją išvadą jis turėtų pasižymėti ženkliai didesniu jėgos skirtumu nei tarp TPE ir TPU1. Vis dėlto kombinuotoje sistemoje su A1 medžiaga ji yra didesnė tik 3,6 %, o su A4 – 2,3 %, o su A3 – 2,3 %.



vadinasi medžiagos cheminė sudėtis yra svarbesnis faktorius sistemos stiprumui nei plastiko kietumo indeksas. Polimero klampumas priklauso nuo jo cheminės sudėties. Remiantis mikrereologine adhezijos teorija galima daryti išvadą, kad TPU yra klampesnis už TPE. TPU būdingas didesnis susiklijavimo stiprumas, kadangi kuo polimeras klampesnis, tuo jis sunkiau įsiskverbia į tekstilės medžiagų poras.

TPE ir TPU polimerai priklauso tai pačiai cheminei klasei ir turi panašias savybes, o TPC medžiaga priskiriama visai kitai kategorijai. Analizuojant šios medžiagos elgseną tempimo metu matyti, kad ji iš visų medžiagų, junginyje su A1 ir A4 audiniu, pasižymi didžiausia ištraukimo iš tarp sluoksnių jėga, kadangi ji yra standžiausia ir turi kitokią cheminę sudėtį. Vis dėlto kombinuotoje sistemoje su A2 nustatyta jėga yra net 12,3 % mažesnė nei su TPU2 3D medžiaga. Šiuo atveju polimeras pasiekė maksimalią ribą, kurios metu jis neištraukiamas iš tarp sluoksnių, o nutrūksta pats. Remiantis 2.2 lentelės duomenimis galima pastebėti, kad analizuojama 3D medžiaga pasižymi ženkliai didesniu tempimo modulių (TPU1 = 12 MPa, TPU2 = 9,4 MPa, TPC = 95 MPa) nei kitos medžiagos, o jos atsparumas tempimui yra mažiausias iš visų tirtų plastikų (TPE = 42 MPa, TPU1 = 26 MPa, TPU2 = 29 MPa, TPC = 24 MPa). Galima daryti prielaidą, kad šie du veiksniai nulėmė tai, jog silpniausia junginio grandis yra 3D medžiaga.



2.7 pav. Audinių pluoštinės sudėties įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui

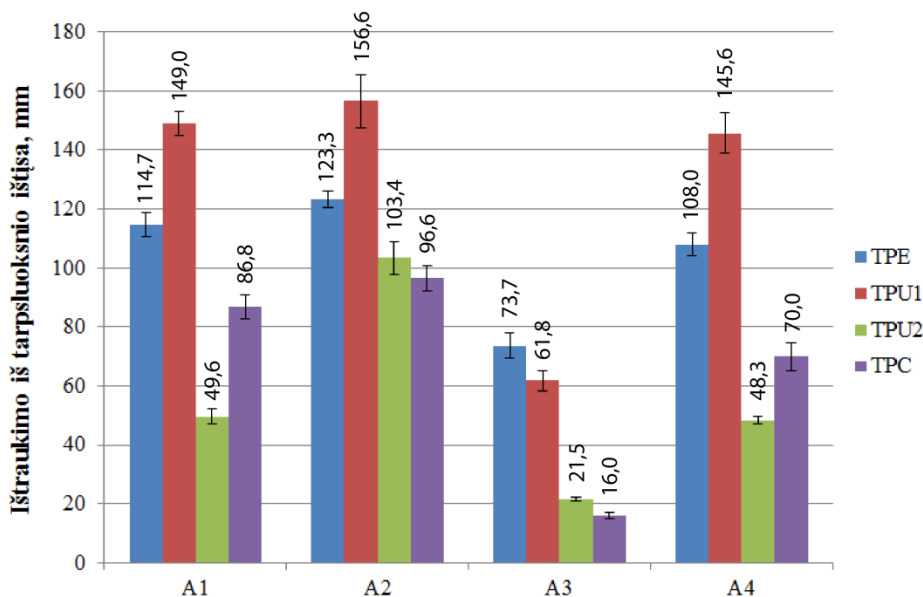
Siekiant nustatyti tekstilės medžiagų pluoštinės sudėties įtaką kombinuotų 3D ir tekstilės medžiagų sistemų susiklijavimo stiprumui, buvo tiriami sintetinio (poliesterinio) – A1 ir A2 bei natūralaus (šilkinio) – A3 ir A4 pluošto audiniai (žr. 2.7 pav.). Gauti rezultatai parodė, jog poliesterinių audinių sistemos yra stipresnės už šilkinų su visomis tirtomis 3D medžiagomis.

Lyginant ištraukimo iš tarp sluoksnių jėgos dydį, kai A2 poliesteris su elastanu ir A1 – be, pastebima, jog visais atvejais šiek tiek stipresnis yra A2 audinys (TPE: A1 = 96,8 ± 6,1 N < A2 = 99,2 ± 3,9 N; TPU1: A1 = 119,6 ± 6,9 N < A2 = 123,3 ± 4,4 N; TPE: A1 = 124,0 ± 5,8 N < A2 = 164,2 ± 5,5 N; TPU1: A1 = 130,9 ± 6,9 N < A2 = 135,9 ± 6,6 N).

Vertinant elastano įtaką šilkiniam audiniui pastebima, jog be jo A3 audinys suplyšta pasiekęs  $81,4 \pm 4,6 \text{ N} - 86,8 \pm 5,0 \text{ N}$  ištraukimo iš tarp sluoksnių jėgą. Iš analizuojamos A4 tekstilės medžiagos, turinčios 2 % elastano, rezultatų matyti, kad net ir toks nedidelis kiekis EL jei suteikia pakankamai stiprumo, kad tempiamas suirtu ne pats audinys, o išsisluksniuotų tiriama sistema.

Iš 2.7 diagramos matyti, kad A2 medžiaga pasižymi didžiausiu sukibimo stiprumu su visais polimerais. Tam turi įtakos medžiagos storis, tankumas ir paviršiaus nelygumai. Remiantis 2.1 lentelėje pateiktais duomenimis A2 medžiaga yra storičiausia ( $0,38 \pm 0,01 \text{ mm}$ ) iš visų, todėl patiria didžiausią spausdinimo galvutės slėgį, dėl kurio padidėja polimero įsiskverbimas į audinį. Šis audinys yra rečiau-  
sias ( $33 \pm 0,7 \text{ cm}^{-1}$ ), vadinasi 3D medžiaga gali lengviau įsiskverbti į jį. Galiausiai A2 šifonas turi ne-  
lygią, klostuotą struktūrą, todėl polimeras užpildydamas nelygumus, poras ir išėmas padidina ne tik  
faktinio ploto bei ryšių skaičių tarp adhezivo ir substrato, bet ir susiklijavimo stiprumą.

Siekiant nustatyti 3D ir tekstilės medžiagų įtaką kombinuotų sistemų tūsumui, buvo ištirti tie pa-  
tys 16 skirtingų junginių, sudarytų iš TPE, TPU1, TPU2 ir TPC polimerų bei A1, A2, A3 ir A4 audi-  
nių. 2.8 paveiksle pateikiama 3D medžiagų įtaka ištraukimo iš tarp sluoksnių ištiesos dydžiui.

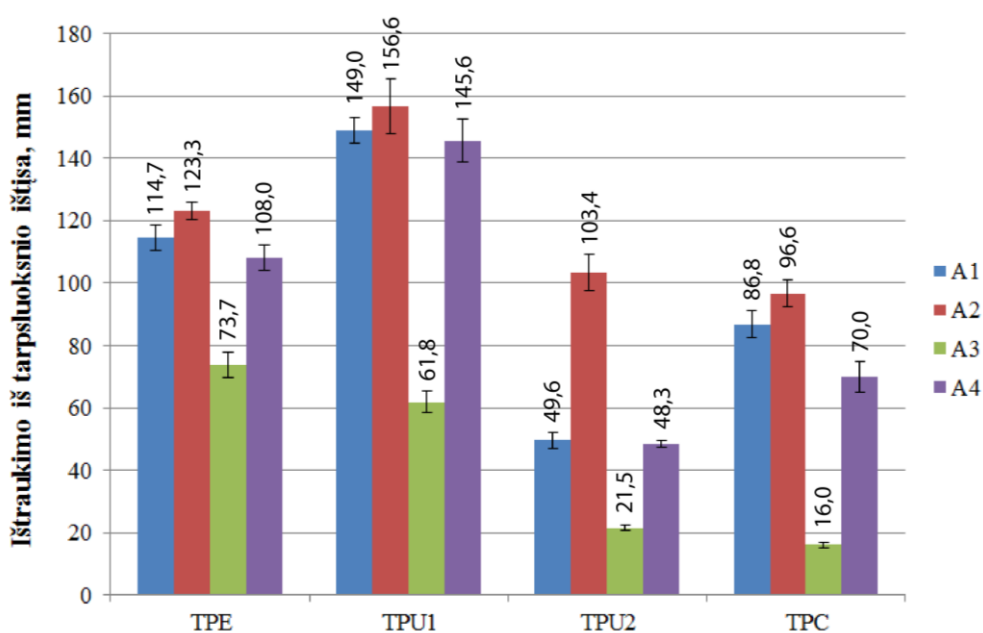


2.8 pav. 3D medžiagų charakteristikų įtaka kombinuotų sistemų tūsumui

Tinkamai įvertinti kombinuotų sistemų tūsumą galima tik palyginant bandinius su A3 medžiaga, kadangi jie iš visų sistemų išsiskiria tuo, jog audinys plyšta esant labai panašiai ištraukimo iš tarp-  
sluoksnių jėgai ( $81,4 \pm 4,6 \text{ N} - 86,8 \pm 5,0 \text{ N}$ ). Remiantis tuo matyti, kad TPE medžiaga yra tampriausia  
( $73,7 \pm 5,2 \text{ mm}$ ). Labai panaši į ją TPU1 ( $61,8 \pm 4,2 \text{ mm}$ ). Nuo pirmųjų dviejų savo tūsumu smarkiai  
skiriasi likusios dvi medžiagos. 3 vietoje pagal tai yra TPU2 ( $21,5 \pm 0,9 \text{ mm}$ ), o pati kiečiausia TPC  
( $16,0 \pm 1,1 \text{ mm}$ ). Analizuojant 2.2 lentelėje pateiktus 3D medžiagų rodiklius matyti, kad gamintojų  
pateikti 3D medžiagų kietumo indeksai atitinka tyrimo metu gautiems rezultatams (medžiagos išdės-  
tomos nuo tūšiausios iki kiečiausios): TPE = 82A < TPU1 = 85A < TPU2 = 95A < TPC = 45D.



Siekiant nustatyti tekstilės medžiagų pluoštinės sudėties įtaką kombinuotų sistemų tąsumui, buvo pasirinkta palyginti dvi pluoštų grupes: turinčias elastano ir ne. Analizuojant 2.9 diagramą matyti, kad kombinuotosios sistemos su A1 audiniu be elastano visais atvejais (su 3D TPE medžiaga 7,5 %, TPU1 – 4,7 %, TPU2 – 108,5 %, TPC – 11,3 %) yra mažiau tamprios nei su A2 (3 % EL). Iš 2.7 paveikslo pastebima, kad A3 ir A4 audiniai junginyje su 3D TPE medžiaga pasižymi panašia ištraukimo iš tarpfluksnio jėga ( $86,8 \pm 4,6 \text{ N} \approx 88,4 \pm 4,1 \text{ N}$ ), vadinasi atsižvelgiant į tai juos galima palyginti tarpusavyje. Remiantis 2.9 paveiksle pateiktomis ištraukimo iš tarpfluksnio ištiesos reikšmėmis matyti, kad audinys A3 be elastano, junginyje su TPE polimeru, pasižymi 46,5 % mažesne ištiesa nei A4, turintis 2 % EL. Taigi galima daryti išvadą, kad audinių pluoštinė sudėtis turi įtakos kombinuotų sistemų tąsumui (audiniai su EL yra tąsesni nei be).



2.9 pav. Audinių pluoštinės sudėties įtaka kombinuotų sistemų tąsumui

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad:

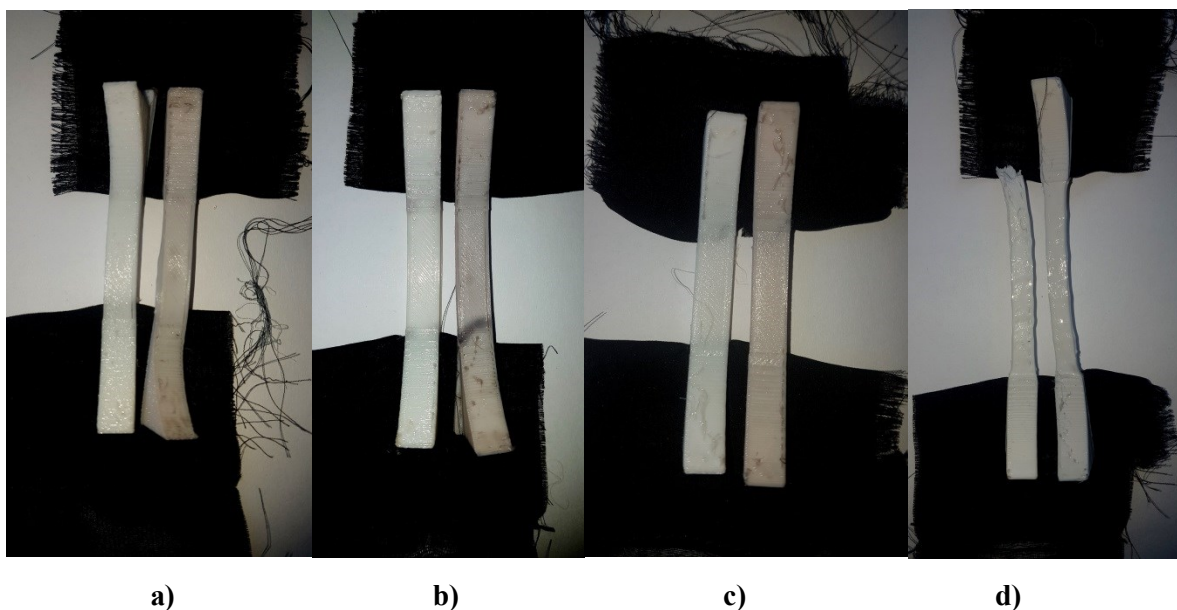
- kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui didesnę įtaką daro polimero cheminė sudėtis (klampumas) nei kietumas, kadangi tarp termoplastinio elastomero ir termoplastinio poliuretano susidaro didesnis ištraukimo iš tarpfluksnio jėgos skirtumas (TPU1 (kietumo indeksas – 85A) stipresnis už TPE (kietumo indeksas – 82A) su A1 – 23,6 % ir A4 – 23,6 % audiniais) nei tarp dviejų termoplastinių poliuretanų (TPU2 (kietumo indeksas – 95A) stipresnis už TPU1 (kietumo indeksas – 85A) su A1 – 3,6 % ir A4 – 2,3 % audiniais);
- 3D ir tekstilės medžiagų sistemos stiprumas priklauso nuo tekstilės medžiagos pluoštinės sudėties, paviršiaus nelygumo, tankumo ir storio: nelygus paviršius, mažas tankumas ir didelis storis padidina polimero įsiskverbimą į audinį. Poliesterinių medžiagų sistemos stipresnės už šilkinųjų. Elastano kiekis poliesteriniuose audiniuose nulemia, kad A2 (3 % EL) medžiagos kombinuotos sistemos yra

stipresnės už A1 (be EL), o elastano kiekis šilkinėse medžiagose suteikia tokio stiprumo, jog pirmiausiai plyšta ne audinys, o išsisluoksniuoja junginys;

- A2 audinys pasižymi didžiausia ištraukimo iš tarpsluoksniu jėga, kadangi yra storiausias ( $0,38 \pm 0,01$  mm), rečiausias ( $33 \pm 0,7$  cm<sup>-1</sup>), nelygiu paviršiumi, sudarytu iš klostelių;
- nuo 3D medžiagų tamprumo priklauso kombinuotų sistemų tūsumas. Kuo plastikas tūsesnis tuo junginys pasižymi didesne ištraukimo iš tarpsluoksniu ištiesą;
- tekstilės medžiagų pluoštinė sudėtis daro įtaką kombinuotų sistemų tūsumui. Nustatyta, jog junginiai turintys elastano ištiesa daugiau nei tie, kurie neturi (sistemos su A1 audiniu yra mažiau tamprios už tokias pat su A2 medžiaga: TPE – 7,5 %, TPU1 – 4,7 %, TPU2 – 108,5 %, TPC – 11,3 %).

## 2.7. Skalavimo įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui

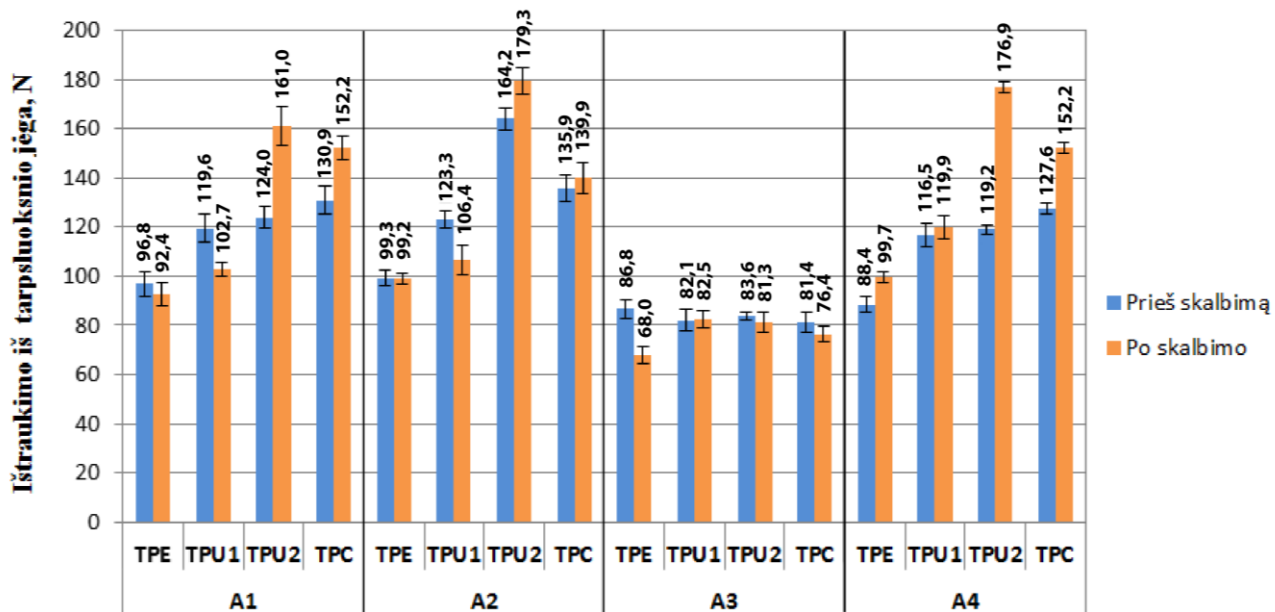
Skalavimas daro įtaką ne tik kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui bei tūsumui, tačiau ir 3D medžiagų nusidažymui. Iš 2.10 paveikslo matyti, kad tiek TPE, tiek TPU polimerai nusidažo nuo juodo audinio juos išskalbus. Vieninteliam TPC plastikui audinio spalva neturi įtakos. Galima daryti išvadą, kad renkantis audinį svarbu tinkamai parinkti jo spalvą, siekiant, jog jis nepakenktų kombinuotos sistemos estetiniam vaizdai.



**2.10 pav.** Bandiniai prieš ir po skalavimo: a) TPE; b) TPU1; c) TPU2; d) TPC

Vertinant skalavimo įtaką kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui ir tūsumui buvo matuojamos junginių ištraukimo iš tarpsluoksniu jėgos bei ištiesos prieš ir po skalavimo.

2.11 paveiksle pateikiamos ištraukimo iš tarpsluoksniu jėgos priklausomybės nuo skalavimo. A3 audinys pirmiau plyšta nei išyra kombinuotoji sistema, todėl skalavimas daro įtaką tik pačios tekstilės medžiagos stiprumo savybėms, tačiau ir šios daugeliu atveju kinta tik paklaidų ribose.



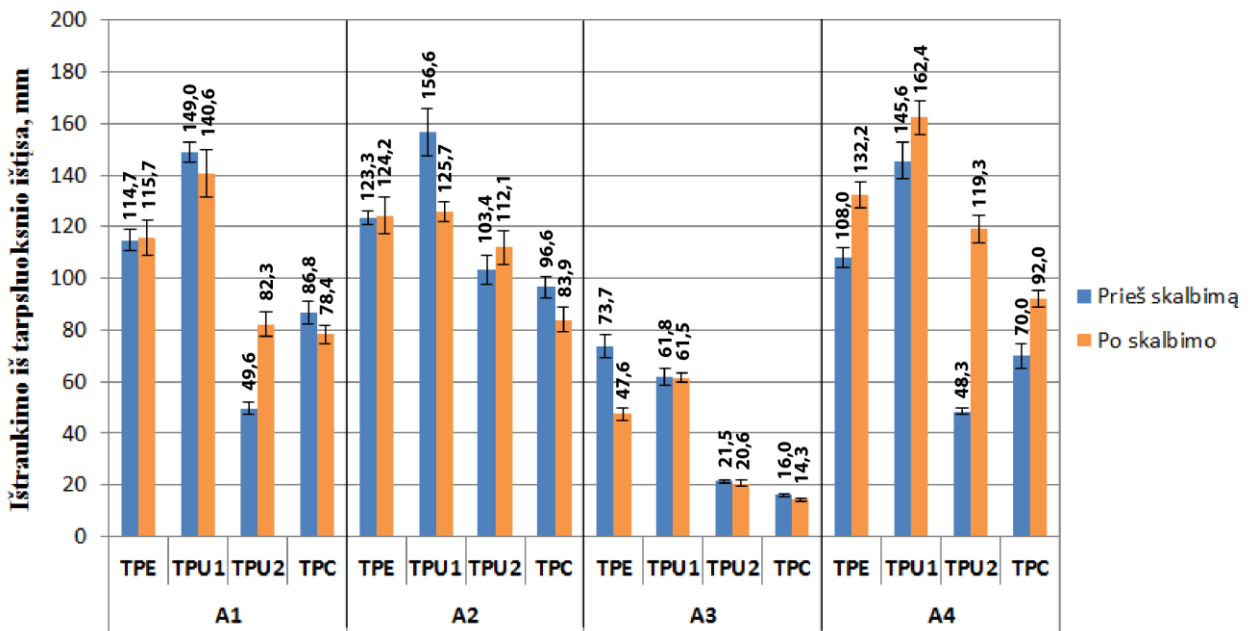
2.11 pav. Skalavimo įtaka kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui

Analizuojant diagramą galima pastebėti, jog vienintelis A4 audinys su visomis keturiomis 3D medžiagomis pasižymi didesne (TPE – 12,8 %, TPU1 – 2,9 %, TPU2 – 48,4 %, TPC – 19,3 %) ištraukimo iš tarp sluoksnių jėga po skalavimo. Taigi galima daryti prielaidą, kad šiuo atveju kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui didesnę įtaką turėjo A4 audinio sandaros rodikliai. Po skalavimo buvo matomas tirtos medžiagos susitraukimas, todėl tai galėjo sudaryti sąlygas tvirtesniai medžiagų susikabinimui tarpusavyje, kuris ir nulėmė padidėjusią ištraukimo iš tarp sluoksnių jėgą.

A1 ir A2 yra sintetinio pluošto audiniai, kurių susiklijavimo stiprumas junginiuose su 3D medžiagomis kinta labai panašiai. Vis dėlto lyginant kombinuotąsias sistemas su TPU2 ir TPC polimerais pastebima, jog junginiai su A2 audiniu sustiprėja mažiau nei su A1 ( $A2TPU2 = 9,2 \% < A1TPU2 = 29,8 \%$ ,  $A2TPC = 3,2 \% < A1TPC = 16,3 \%$ ). Atsižvelgiant į tai, jog prieš skalbimą ištraukimo iš tarp sluoksnių jėgos dydžiui įtakos turėjo tekstilės medžiagoje esantis elastanas, galima manyti, kad ir po skalavimo medžiagų pluoštinė sudėtis turėjo didžiausią poveikį kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui. Galiausiai galima daryti išvadą, kad audinių, turinčių pluoštinėje sudėtyje elastano, ištraukimo iš tarp sluoksnių jėga padidėja mažiau nei tos pačios rūšies be EL.

Vertinant 3D spausdinimo medžiagų įtaką kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui po skalavimo galima pastebėti, jog šiuo atveju tai nepriklauso nuo medžiagos cheminės sudėties (klampumo), kadangi TPU1 medžiagos susiklijavimo stiprumas su A1 ir A2 audiniu pamažėja, kai tuo tarpu TPU2 priešingai – padidėja. Analizuojant polimerų poveikį ištraukimo iš tarp sluoksnių jėgai prieš skalbimą buvo pastebėta, kad tam turi įtakos medžiagų kietumas. Remiantis 2.10 paveikslu matoma, jog po skalavimo tąsesnės TPU1 medžiagos susiklijavimo stiprumas sumažėja, kai tuo tarpu kietesnių TPU2 ir TPC – padidėja. Matyti, jog po skalavimo TPC polimero trūkimo jėga padidėja nuo  $135,9 \pm 6,6$  N iki

152,2 ± 6,2 N. Galiausiai galima daryti išvadą, jog skalbimas veikia polimerus priklausomai nuo 3D medžiagų kietumo.



2.12 pav. Skalavimo įtaka kombinuotų sistemų tąsumui

2.12 paveiksle pateikiamos ištraukimo iš tarp sluoksnio ištiesos priklausomybės nuo skalavimo. Žinoma, jog A3 audinys pirmiau plyšta nei išyra, todėl skalavimo įtaka kombinuotosios sistemos tąsumui kaip ir stiprumui negali būti vertinama.

Kombinuotų struktūrų su A4 audiniu tąsumas po skalavimo kinta analogiškai kaip ir stiprumas, vadinasi galima daryti prielaidą, kad tekstilės medžiagos susitraukimas daro vienodą įtaką tiek stiprumui, tiek tąsumui.

Nors TPC stiprumas padidėja (žr. 2.10 pav.), tačiau ištraukimo iš tarp sluoksnio ištiesą su A1 ir A2 audiniu sumažėja (su A1 – 10,7 %, A2 – 15,1 %). Taigi remiantis tuo, galima daryti išvadą, jog skalbimas veikia medžiagos cheminę sudėtį, dėl kurios pakinta TPC savybės.

TPE polimero tąsumas su A1 ir A2 audiniu kinta paklaidų ribose. Vis dėlto vertinant skirtingų 3D medžiagų tąsumą po skalavimo buvo padaryta išvada, kad tai priklauso nuo medžiagos kietumo. Jeigu atmesime TPC rezultatus, kurie kaip manoma išsikreipė dėl polimero cheminės struktūros pasikeitimo, galima tvirtinti, kad ištraukimo iš tarp sluoksnio ištiesa taip pat priklauso nuo 3D medžiagos kietumo, kadangi to paties pluošto TPU1 ir TPU2 plastikai elgiasi skirtingai: TPU1 ištraukimo iš tarp sluoksnio ištiesa sumažėja, o TPU2 – padidėja.

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad:

- audinio spalva turi įtakos 3D medžiagos nusidažymui po skalavimo (juodas audinys nudažo baltą polimerą);
- skalbimas neturi įtakos junginiams su A3 audiniu, kadangi pirmiau plyšta medžiaga, o ne išsiuoksnioja kombinuotoji sistema;

- po skalbimo A4 audinys susitraukia, dėl to susiglaudžia tiek 3D, tiek tekstilės medžiagos gijos stipriau susikabindamos ir taip padidindamos ištraukimo iš tarp sluoksnių jėgą bei ištiesimą su visomis 3D medžiagomis;
- poliesterinių audinių susiklijavimo stiprumui turi įtakos tekstilės medžiagoje esantis elastanas: A1 (be EL) pasižymi didesniu stiprumu po skalbimo nei A2;
- po skalbimo 3D medžiagų cheminės sudėties neturi įtakos kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumui bei tįsumui, kadangi TPU1 ištraukimo iš tarp sluoksnių jėga ir ištiesimas su A1 ir A2 audiniu pamažėja, kai tuo tarpu TPU2 priešingai – padidėja;
- susiklijavimo stiprumui ir tįsumui daro įtaką tik polimerų kietumas, nes tįsesnės TPU1 medžiagos ištraukimo iš tarp sluoksnių jėga bei ištiesimas sumažėja, kai tuo tarpu kietesnių TPU2 ir TPC plastikų – padidėja;
- skalbimas nedaro įtakos TPE plastiko kombinuotoms sistemoms, kadangi su A1 ir A2 audiniu medžiagos ištraukimo iš tarp sluoksnių jėga ir ištiesimas kinta paklaidų ribose;
- skalbimas veikia TPC plastiko cheminę sudėtį, kadangi po skalbimo ištraukimo iš tarp sluoksnių jėga padidėja, o ištiesimas sumažėja.

### **3. TYRIMŲ REZULTATŲ ĮGYVENDINIMAS DIZAINO PROJEKTE**

#### **3.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatų taikymo galimybės**

Liauni, ploni, sunkiai siuvami audiniai netinkami priglundusio silueto drabužiams, kadangi žmogui judant įvairiose kūno vietose susidaro įtempiai, dėl kurių medžiagos neretai neatlaiko ir gaminys suplyšta. Sukurta kombinuota sistema, ne tik padeda aprangai prisitaikyti prie vartotojo kūno formų, dėl tamprios 3D medžiagos ištiesos, tačiau ir sumažina įtempius probleminėse vietose. Kuo polimeras minkštesnis ir tampresnis, tuo jo prisitaikymas geresnis. Tyrimai parodė, kad didžiausia ištiesa pasižymi TPE ir TPU1 medžiagos. Visgi dėl TPU1 polimero mažesnio klampumo jo įsiskverbimas į audinį yra ženkliai geresnis, todėl ir stiprumas šių kombinuotų sistemų yra didesnis. Galiausiai galima daryti išvadą, kad geriausia iš tirtų 3D medžiagų, sistemoms su liaunu audiniu gaminti yra TPU1 („NinjaFlex“).

Kombinuotų sistemų adhezijai didelę įtaką daro ne tik polimeras, bet ir tekstilės medžiaga. Nors A2 audinys dėl paviršiaus nelygumo, didžiausio storio ir mažiausio tankumo, iš visų tirtų medžiagų, prieš skalbimą pasižymėjo didžiausia ištiesa bei stiprumu, vis dėlto po skalbimo A4 audinio abu parametrai buvo geresni. Atsižvelgiant į tai, kad kuriamas drabužis turi didelę pridėtinę vertę dėl panaudojamų 3D technologijų, kombinuotajai sistemai parenkamas šilko su elastanu (A4) audinys, kurio savybės po skalbimo pagerėja.

Sukurtos ir ištirtos sistemos gali būti panaudojamos įvairiausiuose drabužiuose: suknelėse, sijonuose, palaidinėse, kelnėse, švarkuose. Žmogui judant didžiausias deformacijas patiria menčių, sėdmenų, kelių, alkūnių, krūtinės ir pilvo zonos. Remiantis tuo, gaminyje gali būti atliekami įvairūs, inovatyviomis dizaino idėjomis paremti konstrukciniai skaidymai, kuriuose įterpiamos kombinuotos sistemos. 3D elementai gali būti panaudojami ne tik įtempių mažinimui, tačiau ir išskirtinio dizaino sukūrimui.

#### **3.2. Reikalavimai kuriamos kolekcijos modeliams**

Projektuojama aštuonių modelių kolekcija, susidedanti iš įvairių drabužių tipų: suknelių, kelnų, sijonų, švarkų, liemenių, palaidinių ir kt. Kiekviename modelyje, atsižvelgiant į jo siluetą ir konstrukcinius ypatumus, pritaikytos sukurtos ir ištirtos kombinuotos sistemos ar skirtingi 3D elementai, sujungiantys juos tarpusavyje į vientisą visumą. Remiantis pasirinkto asortimento daugialypiškumu, kolekcija skirta 2019 metų sezonui.

Gaminio vartotojas – tai veikli, aktyvi, stipri, žinanti ko nori iš gyvenimo, norinti išsiskirti iš pilkos kasdienybės moteris nuo 18 iki 45 metų. Dėl šios priežasties apranga turi būti tinkama dėvėti tiek darbe, kur nėra nustatytas griežtas aprangos protokolas, tiek po darbo, einant į restoraną, spektaklį, mados renginį ar tiesiog pasivaikščioti lauke.

Kolekcijos modeliams 3D technologijos sukuria aukštą pridėtinę vertę. Siekiant, kad gaminio išvaizdą ir savybės patenkintų išrankių klienčių, kurios visados žino ko nori, lūkesčius drabužiai turi atitikti estetinius, ergonominius, higieninius ir eksploatacinius reikalavimus. Estetinių požiūriu drabužiai turi būti sukurti remiantis naujausiomis mados tendencijomis, tačiau išlikti madingi ne vieną sezoną, išryškinti moters kūno formų privalumus ir paslėpti trūkumus. Reiktų nepamiršti, kad klientės nuolat judės, todėl kuriami drabužiai turi būti komfortiški, tenkinti sanitarines, higienines normas ir standartus, patogūs apsivilkti, nusivilkti, užsisegti. Didelis dėmesys turi būti skiriamas medžiagų bei kombinuotų sistemų parinkimui, kadangi jos turi atrodyti ne tik prabangiai ir išskirtinai, tačiau ir palaikyti optimalią žmogaus kūno temperatūrą, turėti geras šilumines savybes, būti higroskopiškos, laidžios orui ir garui, patvarios, stiprios, dėvėjimo metu gerai išlaikyti formą bei išvaizdą, atsparios daugkartiniam tempimui, lenkimui, cheminiam valymui, trinčiai.

Siekiant, kad kolekcija atrodytų vientisa, užbaigta bei kokybiška visiems kolekcijos modeliams turi būti panaudotos tos pačios apdailinės detalės. Remiantis tyrimu rezultatais, gaminiams parinktos stipriausiu sukibimu, didžiausia ištįsa ne tik prieš skalbimą, bet ir po skalbimo pasižyminčios 3D ir tekstilės medžiagų sistemos. Visi 3D elementai turi būti spausdinami tuo pačiu spausdintuvu, parenkant vienodus parametrus, gaminiams naudojamos tos pačias medžiagas ir jų spalvos. Visi drabužiai turi turėti atsparius skalbimui prekės ir dydžio ženklus, kurie tvirtinami nugaros priekaklio viduryje, bei gaminio priežiūros ženklą, įsiuвамą kairėje šoninėje siūlėje. Pagaminti drabužiai turi būti kabinami ant pakabų, po to dedami į plastikinius maišelius, prie jų prekės ženklo – prisegamos firminės etiketės.

Numatoma gaminti riboto tiražo kolekcijos modelius skirtus ne tik demonstruoti įvairių mados renginių metu, bet ir aktyviai dėvėti, todėl į tai turi būti atsižvelgta kuriant, konstruojant gaminius bei parenkant jiems technologinį apdirbimą. Turi būti siekiama, kad gaminių pasiuvimas pasižymėtų aukščiausio lygio kokybe. Detalių sujungimui turi būti panaudojamos universalios siuvimo mašinos, skirtos lengvoms ir vidutinio storio medžiagoms, detalių kraštų apsiūlėjimui – ketursiūliai overlokai, gaminių apačių palenkimui – mažosios mechanizacijos priemonės. Visos siuvimo mašinų siūlės turi būti sureguliuotos pagal standartizuotus reikalavimus, atsižvelgiant į siuvas medžiagas – teisingai parinkti adatų storiai ir forma.

### **3.3. Perspektyvinių mados tendencijų prognozė**

„Mada nėra vien suknelės. Mada yra danguje ir gatvėse. Mada susijusi su idėjomis, su gyvenimo būdu, su tuo, kas vyksta“ (*Coco Chanel*). Žemėje gyvena milijardai žmonių, kurie žvelgia į viską iš skirtingų taškų, turi savitą skonį bei požiūrį į meną ir madą. Dėl šios priežasties neįmanoma, kad kiekvieną sezoną nusistovėtų kelios, tam tikros, išgrynintos mados tendencijos. Jų visada bus daug ir tai nereiškia, kad kuri nors iš tendencijų dėl to bus mažiau svarbi. Vis dėlto išanalizavus žinomiausių dizainerių kolekcijas galima įžvelgti, kad 2019 metais didelis dėmesys bus skiriamas: moderniam A tipo



siluetai, ryškioms ir efektingoms rankovėms, įvairiems akcentams nugaros dalyje, avangardo motyvams, susiliejančiams su klasikiniiais sprendimais, įvairių detalių gausai, riešuto rudos, baltos ir juodos neįprastai kombinacijai, garstyčių spalvai, įvairių faktūrų bei raštų medžiagų deriniams.

Kaip ir kiekvieną sezoną, taip ir 2019 metais bus madingos klasikinės spalvos – juoda, balta, pilki atspalviai. Iš kitos pusės šiais metais dizaineriai ypatingai daug dėmesio skiria spalvoms. Populiariausios iš jų: garstyčių geltona, žaliai mėtinė, rožinė, alyvinė, tamsiai mėlyna (žr. 3.1 pav.).



3.1 pav. Populiariausios 2019 metų spalvos [78]

Vyraujantys siluetai: X, A, 2A ar net 3A. Daugumoje dizainerių kolekcijų išlieka populiarus X siluetas, galbūt todėl, kad jis ypatingai pabrėžia moters taliją, priartindamas jos figūrą prie tobulų proporcijų. Dažniausiai šio silueto modeliai viršutinėje dalyje aptempti, o apatinėje laisvi, plazdantys (žr. 3.2 pav. a), b)). Vis dar išlieka madingas ir A siluetas, nors kai kurie dizaineriai vis dar siūlo drastiškai išplatėjančius (žr. 3.2 pav. c)), tačiau daugumos kūryboje jie kiek subtilesni, moteriškesni (žr. 3.2 pav. d)). Ryškiausia šio sezono naujiena 2A ar net 3A siluetas (žr. 3.2 pav. e), f)). Jis taikomas tiek derinant apsiaustą su sijonu, tiek tuniką su sijonu ar tiesiog kelis sijono ar suknelės sluoksnius. Ilgis gali kisti nuo labai trumpų iki žemės.



3.2 pav. 2019 metų madingi siluetai: a) E. Pucci; b) ir f) J. Mendel; c) ir e) H. Zhan; d) R. Getty [17]



Nagrinėjama sezono didelis dėmesys bus skiriamas įvairių marškinių interpretacijoms, pateikiamoms suknelių ar palaidinių, kombinuotų iš kelių skirtingų audinių, pavidalu (žr. 3.3 pav. a), b) ir c). Populiariausios kelnės – kiulotai iki pusės blauzdos (žr. 3.3 pav. d). Nesvarbu ar tai vasara ar žiema, moteris vilkės dirbtinius kailinius, rodančius, kad jos yra prieš gyvūnų žudymą (žr. 3.3 pav. e).



**3.3 pav.** Madingiausi sezono drabužiai: a) M. Hoffman; b) Monse; c) ir d) Novis; e) J. Mendel [17]

2019 kolekcijose apstu įvairiausių raukinių ir raukinukų, klosčių ir volanų (žr. 3.4 pav. a), b). Svarbiausia šio sezono akcentas masyvios, išpūdingos rankovės. Jos, kaip ir pats drabužis, sudarytos iš vieno ar kelių A silueto sluoksnių (žr. 3.4 pav. c), d). Nors drabužių asimetrija pamažu traukiasi iš dizainerių kūrybos, vis dėlto šiame sezone ji vis dar išlieka madinga ir yra pritaikoma įvairiuose skeltukuose, pabrėžiančiuose graškias moters kojas (žr. 3.4 pav. e) ir f).



**3.4 pav.** 2019 madingi elementai: a) J. Mendel; b) ir f) Monse; c) Pringle of Scotland; d) H. Zhang; e) Ch. Siriano [17]

Vis daugiau dizainerių savo kūryboje panaudoja 3D spausdinimą, kadangi tai prideda jų kolekcijoms išskirtinumo, praplečia gaminių pateikimo galimybes (žr. 3.5 pav. a), b). Dėl ergonominių, higieninių ir eksploatacinių savybių stokos polimerai vientisiems aprangos deriniams nėra praktiški, todėl plačiausiai yra taikomi batams (žr. 3.5 pav. c), d) ar kitiems aksesuarams (žr. 3.5 pav. e). Dizainerių polėkis į savo kolekcijas inkorporuoti 3D elementus parodo, kad tai yra labai perspektyvi sritis, kuri gali atverti nemažai kelių atrasti savo išskirtinumą tradicinės siūtinės aprangos kontekste.



3.5 pav. 3D spausdinimo elementai: a) Iris Van Herper; b) A. Walsh, c) M. Young, d) Z. Hadid; e) C. Franceschini

### 3.4. Įkvėpimo šaltinio analizė

Pasaulyje vyrauja stereotipas, jog moteris turi būti glėžna, dažniausiai namų šeimininkė, besirūpinanti vaikais ir vyru. Vis dėlto mano vizijose piešiamas visai kitoks moters portretas. Tai moteris, kuri žino tikrąją atkaklumo reikšmę, nusakančią, jog vėl ir vėl siekiant to paties tikslo viskas gali būti įmanoma. Tai moteris, kuri vadovaujasi B. Tracy žodžiais, kad: „Sėkmingi žmonės sudaro ne daugiau nei 10 % planetos gyventojų. Ir ar būsi sėkmingas ar nesėkmingas, visų pirma priklausys nuo to, apie ką dažniausiai galvosi. Sėkmingi žmonės galvoja apie tai, ko jie nori, ir apie tai, kaip įgyvendinti tikslus!!!“. Ji pasižymi sufražistiniu mąstymu, kuris vadovaujasi tuo, jog nebūtinai turi būti vyras, kad nusipelnytum tų pačių galimybių ar sąlygų užimti aukščiausius pozicijas darbe. Turinti šį charakterio bruožą moteris, kovoja ne tik už save, tačiau ir už kitas likimo drauges, stengdamasi suteikti ne tik sau, bet ir kitoms stiprybės bei palaikyti sunkiausia akimirka. Ji supranta, jog „žmonės, kurie mus įkvėpia siekti to, kas neįmanoma, fizinės treniruotės, išspaudžiančios devintą prakaitą ir rizika, išplečianti veiksmų laisvę – tai sveikas stresas, skatinantis augti...“ (*Timothy Ferriss*).

„Drabužiai tai ginklai: kai reikia, rengiamės kaip į kovos lauką – nugalėti konkurento ar pavergti objekto, užkariauti pasaulio, parodyti, kad jis mums nerūpi ar kad priklausome visai kitoms erdvėms“ (*Laura Mizgirytė-Latour*). Vadovaujantis šiuo požiūriu įkvėpimo šaltiniu buvo pasirinktas senovinis ginklas, tačiau tai ne šaunamasis ginklas ar bombos, vaizduojančios viską nušluojančią pražūtį ir kruviną mirtį. Tai tokie ginklai, kurie visais laikais kūrė stiprybės, atkaklumo, didelio ryžto ir atsakomybės už savo veiksmus asociacijas. Gal dėl to pagrindinis įkvėpimo šaltinis, tai kardas arba kitaip kalavijas, apipintas daugybės legendų, o dar kitaip – riterių „draugas“ (žr. 3.6 pav.).





**3.6 pav.** Įkvėpimo šaltinis – kalavijas/kardas

Kitas svarbus elementas – šarvai. Jie saugo žmogaus kūną tarsi kokonas nuo išorinių negandų, pavojaus, apkalbų ir kitų niekšybių. Šarvai sudaryti ne iš vieno sluoksnio. Pirmiausiai prie pat žmogaus eina minkščiausias, medžiaginis, tampriai apgaubiantis visą kūną, artimiausias jo sielai, kuri parodo tik savo namiškiams, su juo jis tarsi nuogas ir visiems prieinamas. Kitas sluoksnis – tai grandinės šarvų apsaugos. Jos saugo žmogaus širdį bei jautriausias kūno vietas. Ši dalis pasiekama visiems jo draugams, tačiau vis dėlto jiems dažniausiai neparodomas gilesnysis sluoksnis. Galiausiai ant viršaus žmogų saugo storiausieji plokšteliniai šarvai. Tai apsauga nuo priešų, nepažįstamųjų, siekiančių pažeisti ar kitaip sužlugdyti esybę.

Ties kiekvienu šarvų sluoksniu moteris parodo skirtingą savo veidą, būdo bruožus, su kiekvienu sluoksniu mūsų herojė tampa vis galingesnė, stipresnio charakterio ir aršesnė. Kuo daugiau negandų, tuo ji stipresnė ir atkaklesnė, labiau norinti padėti kitiems ir ginti juos per daugelį metų savo užaugintų šarvų sluoksniu (žr. 3.7 pav.).



**3.7 pav.** Įkvėpimo šaltinis – šarvai

Durklai – visais laikais buvo laikomi ne tik buities pagalbininkais, tačiau ir pasalūnišku ginklu, kuris panaudojamas slapčia, siekiant išnešti savo sveiką kailį ar organizuojant klastingą užpuolimą. Šis ginklas puikiai parodo, jau nuo seno išsisknijusi žmonių poreikį pulti kitus iš pasalos, tik šiais laikais dažniausiai šis durklas būna liežuvio ir neretai jis žeidžia daug labiau nei fizinės žaizdos (žr. 3.8 pav.).



**3.8 pav.** Įkvėpimo šaltinis – durklai

Naujosios Zelandijos gyventojai Maoriai laikė, kad kuokose slypi pačių kovotojų dvasia. Tai ginklas, kuris atsirado dar akmens amžiuje, žmonės jį darydavosi net iš gyvulių kojų. Jis padėdavo jiems išgyventi ir apsiginti nuo negandų. Tai šventas ginklas, skirtas ne užpulti priešininką, bet gynybai ir svarbiausia išgyvenimui (žr. 3.9 pav.).



**3.9 pav.** Įkvėpimo šaltinis – kuoka

Šurikenas – ginklas atsiradęs Japonijoje iš kasdinių daiktų, tokių kaip adatos, vinys, peiliai. Jo paskirtis niekad nebuvo šaltakraujiškai žudyti, o kaip pagalba suklaidinti priešą. Tik priešui atsipalaidavus ir galvojant, kad nieko aplinkui nėra jis buvo paleidžiamas iš toli su tikslu pataikyti į silpniausią vietą, tokią kaip akys ar veidas. Priešas niekad negalėjo žinoti iš kur šurikenas atlėks, kadangi kaip staigiai jis atsirasdavo taip ir pradingdavo. Dauguma skriaudų šiandieniniame pasaulyje įvyksta mums patiems nežinant ir pajaučiama tik kai priešas yra toli toli. Dažniausiai net nesuprantame kas mums pakenkė (žr. 3.10 pav.).



**3.10 pav.** Įkvėpimo šaltinis – šurikenas

Remiantis visais istoriniai faktai apie ginklus sudaromas inspiracijų žemėlapis, kuriame vyrauja ne tik ginklai, tačiau ir mados bei gatvės mados naujausios tendencijos. Siūlomos makiažo, avalinės, medžiagų idėjos. O visą tai apjungiamo į vieną pavidalą, kurio maketas pateikiamas 4 PRIEDE.

### **3.5. Kolekcijos devizo formulavimas**

Kolekcijos pavadinimas kilo tiesiogiai iš koncepcijos, kurioje apibūdinama moteris kovotoja, kuri gina ne tik save, tačiau ir kitas likimo drauges, stengdamasi suteikti ne tik sau bet ir kitoms stiprybės bei palaikyti sunkiausia akimirka. Tai moteris – kuri žino tikrąją atkaklumo reikšmę, nusakančią, jog vėl ir vėl siekiant to paties tikslo viskas gali būti įmanoma. Tai moteris – kuri nepasiduoda visuomenės stereotipams, o tuo labiau nesivadovauja jais, ji tiki kad moterys gali būti tokios pat geros ir gal net geresnės nei vyrai profesinėje srityje ir niekadoms nenuvertina kito žmogaus besivadovaudamos iš anksto nustatytomis nuostatomis. Visa tai ir dar daugiau apibūdina vienas žodis – SUFRAŽISTĖ. Devizo šrifto pavyzdys pateikiamas 3.11 paveiksle.

**Sufražistė**

3.11 pav. Kolekcijos devizo pavyzdys

### **3.6. Bendra kolekcijos charakteristika**

Kuriama 8 modelių kolekcija pasižymi Japonišku minimalizmu, išgrynintomis formomis, padedančiomis atsiskleisti ne tik moters kūno linijoms, tačiau ir išraiškingiems 3D elementams, atspausdintiems tiesiai ant audinių. Modeliai skirti dėvėti tiek darbe, kur nėra nustatytas griežtas aprangos protokolas, tiek po darbo, einant į restoraną, spektaklį, mados renginį ar tiesiog pasivaikščioti lauke.

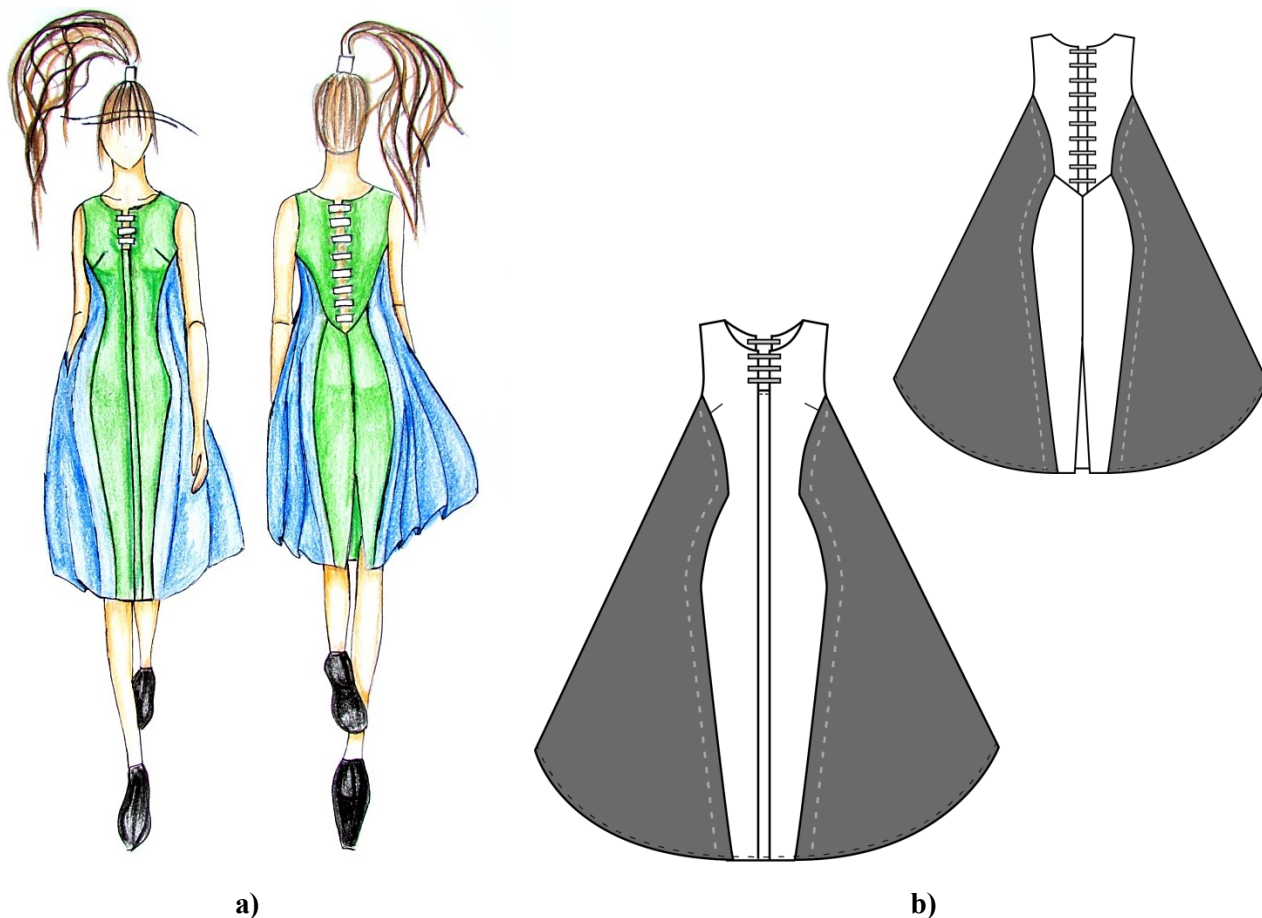
Kolekcija skirta 2019 metų sezonui, todėl atsižvelgiant į nagrinėtas mados tendencijas, modeliams parenkami įvairūs siluetai, ilgai bei madingi elementai, pvz. išraiškingos rankovės sudarytos iš vieno ar net kelių A siluetaų. Taip pat įtraukiami populiarūs gaminiai, tokie kaip marškiniai ar kiulotai. Kolekcijos koloritas švelnus, tačiau pasižymintis kontrastu, siekiant parodyti moters dvilypiškumą, švelniąsias ir šiukščiąsias puses. Naudojamos medžiagos: šilkiniai šifonai, prabangūs krepai, „NinjeFlex“ balta 3D medžiaga.

Pradinės kolekcijos idėjos planšetas pateiktas 5 PRIEDE.

### **3.7. Tyrimų rezultatų įgyvendinimas eksperimentiniame modelyje**

Kombinuota sistema į liaunos medžiagos prigludusio silueto gaminį įterpiama siekiant sumažinti įvairiose kūno vietose susidarančius įtempimus, dėl kurių medžiagos dažnai neatlaiko ir suplyšta. Moksliniuose tyrimuose didelis dėmesys skiriamas 3D ir tekstilės medžiagų susiklijavimo stiprumui. Remiantis tuo, labai svarbu įsitinkinti ar nustatyta tvirčiausia kombinuota sistema, sudaryta iš šilkinio

šifono, kurio pluoštinėje sudėtyje yra 2 % elastano, ir „NinjaFlex“ polimero, sugebės atlaikyti dėvėjimo metu patiriamas apkrovas realiam gaminyje. Siekiant tai patikrinti, pagaminamas vienas iš 8 kolekcijos modelių (midi ilgio prigludusio silueto suknelė), kurio meninis vaizdas ir techninis eskizas pateikiamas 3.12 paveiksle.



**3.12 pav.** Kolekcijos „Sufražistė“ suknelės prototipo: a) meninis vaizdas; b) techninis eskizas

Šifono audinys persimato, dėl šios priežasties konstruojamos dvigubos gaminio priekio ir nugaros detalės. Suknelėje pritaikoma 3D figūra, identiška naudotai tyrimo metu. Priekio iškirptėje pažymimos trijų figūrų vietos, o nugaros viduryje – 10, priekyje kas 3 cm, o nugaroje kas 4 cm.

Polimeras užspausdinamas ant tekstilės medžiagos, pagal 2.2 poskyryje pateikiama kombinuotų 3D ir tekstilės medžiagų sistemų kūrimo metodika. Paruoštos detalės yra susiuvamos tarpusavyje universalia siuvimo mašina, skirta vidutinio plonumo ir ploniems audiniams, detalių kraštai apdorojami ketursiūle medžiagos krašto apsiūlėjimo mašina, o apačios palenkiamos, panaudojant mažosios mechanizacijos priemones.

Siekiant įvertinti gaminyje esančių kombinuotų sistemų stiprumą, atliekami pagrindiniai dinaminiai judesiai (žr. 3.13 pav.), kurių metu įvairiose kūno vietose susidaro įtempiai [79].





**3.13 pav.** Kombinuotos sistemos susiklijavimo stiprumo patikrinimas žmogaus figūrai, esant dinaminėje būsenoje

Atlikus judesius nustatyta, kad „NinjaFlex“ polimero ir šilkinio audinio sistema yra pakankamai stipri, jog atlaikytų judėjimo metu patiriamas apkrovas. Kombinuotos sistemos, esančios vertikaliose priekio ir nugaros siūlėse, panaikina menčių ir krūtinės zonose susidarančius įtempimus. Lipant laiptais gaminio apatinėje dalyje neatsiranda įtempiai, kadangi čia yra skeltukas.



## IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Nustatyta, kad tempiamos kombinuotos sistemos ištįsa kinta priklausomai nuo 3D medžiagos kietumo nuo 14,3 mm iki 162,4 mm. Remiantis, tuo galima daryti išvadą, kad sukurtas 3D objektas padidina maksimalią tekstilės medžiagos ištįsą ir kartu leidžia praplėsti liaunų, netinkančių prigludusio silueto gaminiams, medžiagų funkcionalumą.
2. Kombinuotų sistemų susiklijavimo stiprumas priklauso nuo 3D spausdinimo medžiagos. Nustatyta, kad stipresnę įtaką adhezijai daro polimero cheminė sudėtis nei kietumas, kadangi tarp TPU ir TPE susidaro didesnis ištraukimo iš tarpfluksnio jėgos skirtumas (TPU1 (kietumo indeksas – 85A) stipresnis už TPE (kietumo indeksas – 82A) su A1 – 23,6 % ir A4 – 23,6 % audiniais) nei tarp dviejų TPU (TPU2 (kietumo indeksas – 95A) stipresnis už TPU1 (kietumo indeksas – 85A) su A1 – 3,6 % ir A4 – 2,3 % audiniais).
3. 3D ir tekstilės medžiagų susiklijavimo stiprumas priklauso nuo tekstilės medžiagos pluoštinės sudėties, paviršiaus nelygumo, tankumo ir storio. Stori, mažo tankumo ir nelygaus paviršiaus audiniai pasižymi geresniu polimero įsiskverbimu į audinį ir didesniu ploto bei ryšių tarp adhezivo ir substrato skaičiumi, todėl jų susiklijavimo stiprumas yra didesnis nei plonų, tankių lygaus paviršiaus audinių. Remiantis tuo matyti, kad A2, storiausias ( $0,38 \pm 0,01$  mm), rečiausias ( $33 \pm 0,7$  cm<sup>-1</sup>), nelygaus paviršiaus, audinys pasižymi geriausiu sukibimu su visomis 3D medžiagomis. Nustatyta, kad poliesterinių medžiagų sistemos stipresnės už šilkinių, o audinių su elastanu už junginius be EL.
4. Kombinuotų sistemų tįsumas priklauso nuo 3D medžiagų tamprumo ir tekstilės medžiagos pluoštinės sudėties. Kuo plastikas minkštesnis tuo junginys pasižymi didesne ištįsa (esant panašiai jėgai tamprumo kitimas pagal kietumą: TPE (82A) =  $73,7 \pm 5,2$  mm > TPU1 (85A) =  $61,8 \pm 4,2$  mm > TPU2 (95A)  $21,5 \pm 0,9$  mm > TPC (45D) =  $16,0 \pm 1,1$  mm). Sistemos turinčios elastano pasižymi didesne ištįsa nei tos, kurios neturi (junginiai su A1 audiniu yra mažiau tamprūs už tokius pat su A2 medžiaga: TPE – 7,5 %, TPU1 – 4,7 %, TPC – 11,3 %).
5. Po skalbimo kombinuotų sistemų stiprumas ir tįsumas pakinta priklausomai nuo polimerų kietumo. Tįsesnės TPU1 medžiagos jėga bei ištįsa sumažėja, kai tuo tarpu kietesnių TPU2 ir TPC plastikų – padidėja.
6. Skalbimas veikia TPC plastiko cheminę sudėtį, kadangi po skalbimo trūkimo jėga padidėja nuo  $135,9 \pm 6,6$  N iki  $152,2 \pm 6,2$  N, o ištįsa sumažėja (su A1 – 10,7 %, A2 – 15,1 %).
7. Skalbimas daro įtaka kombinuotos sistemos susiklijavimo stiprumui ir tįsumui priklausomai nuo tekstilės medžiagos cheminės sudėties. Poliesterinis audinys be elastano A1 pasižymi didesniu stip-

rumu po skalbimo nei A2 (3 % EL) ( $A2TPU2 = 9,2 \% < A1TPU2 = 29,8 \%$ ,  $A2TPC = 3,2 \% < A1TPC = 16,3 \%$ ). Skalbimas padidina šilkinio audinio A4 (2 % EL) susiklijavimo stiprumą ir tąsumą su visomis 3D medžiagomis ( $TPE \approx 12,8 \%$ ,  $TPU1 \approx 2,9 \%$ ,  $TPU2 \approx 48,4 \%$ ,  $TPC \approx 19,3 \%$ ).

8. Po skalbimo tekstilės medžiaga nudažė atspausdintą polimerą, todėl renkantis audinio spalvą svarbu atsižvelgti ar ji nepakenks 3D objekto estetinei išvaizdai.
9. Tyrime išanalizuota „NinjaFlex“ polimero ir šilkinio audinio sistema yra tinkama moteriškos, praplėsto funkcionalumo, drabužių kolekcijos „SUFRAŽISTĖ“ gamybai. Nustatyta, kad 3D objekto funkcinis dekoras, užspausdintas pagal darbe pasiūlytą metodiką, pasiteisino, kadangi žmogui atliekant dinamiškus judesius polimero ir tekstilės medžiagos junginys atlaiko judėjimo metu patiriamas apkrovas.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016-11-21]. Prieiga per: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>.
2. *What is 3D printing?* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-11-21]. Prieiga per: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/#Material-Jetting>.
3. CHUA, C.K. and K. F. LEONG. *3D printing and additive manufacturing principles and applications* (The 4th edition of Rapid Prototyping: Principles and Applications). Singapore: *World Scientific*, 2014, 518p. ISBN 978-9814571401.
4. *Knowledge Base* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-11-21]. Prieiga per: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/>.
5. *Types of 3D printers or 3D printing technologies overview* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-11-21]. Prieiga per: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>.
6. SACHLOS, E. and CZERNUSZKA, J.T. *European Cells and Materials. Department of Materials, University of Oxford, Parks Road, Oxford, OX1 3PH, UK, 2003, vol. 5, pp 33. ISSN 1473-2262.*
7. *Konvertavimas į .STL* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-11-21]. Prieiga per: <http://www.jautis.com/index.php?id=9>.
8. *10 Types of 3D Printing Technology – Simply Explained* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-11-21]. Prieiga per: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>.
9. WARNIER, C., VERBRUGGEN, D., EHMANN, S. and R. KLANTEN. *Printing things vision and Essentials for 3D printing*. Berlin: Gestalten verlag GmbH & Co. KG, 2014, 255p. ISBN 978-3-89955-516-5.
10. *The Aesthetic of Fears by Dorry Hsu* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2018-03-28]. Prieiga per: <https://www.dezeen.com/2013/08/05/the-aesthetic-of-fears-3d-printed-jewellery-insects-dorry-hsu/>
11. *ITS 2013 finalists* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2018-03-28]. Prieiga per: <http://www.vogue.it/en/talents/contests-and-more/2013/05/its-2013-finalists-part-three>.
12. MOORE, J. P. and C. B. WILLIAMS. Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting, *Rapid Prototyping Journal*, 2015, Vol. 21, No.6, pp.675-685.
13. „Polyjet“ technology [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2018-03-28]. Prieiga per: <http://www.mkstechgroup.com/polyjet-technology/#>.
14. *PolyJet ir FDM technologijos privalumai ir trūkumai* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-03-28]. Prieiga per: <http://inre.lt/spausdinu3d/technologijos/technologiju-palyginimo-matrica/>.
15. *Meet Iris van Herpen, the Dutch Designer Boldly Going Into the Future* [interaktyvus]. 2016 [žiū-

- rėta 2018-04-03]. Prieiga per: <https://www.vogue.com/article/iris-van-herpen-dutch-designer-interview-3d-printing>.
16. *3D Printed Dress from Iris van Herpen Pushes Boundaries of Fashion* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-03]. Prieiga per: <https://3dprint.com/201774/3d-printed-dress-iris-van-herpen/>.
  17. *Fashion collection* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-04-03]. Prieiga per: <https://www.vogue.com/fashion-shows/designer/iris-van-herpen>.
  18. *Partially 3D Printed adidas Futurecraft 4D Shoes Launch Commercially This Week in NYC* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-03]. Prieiga per: <https://3dprint.com/200338/adidas-futurecraft-4d-launch/>.
  19. *Adidas reveals the first 3D-printed shoe it'll mass-produce* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2018-04-03]. Prieiga per: <https://www.theverge.com/2017/4/7/15216724/adidas-3d-printed-sneaker-futurecraft>.
  20. *What is Selective Laser Sintering?* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2016-12-20]. Prieiga per: <http://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>.
  21. BUTLER, J. Using selective laser sintering for manufacturing, *Assembly Automation*, 2011, Vol. 31, No. 3, pp.212-219.
  22. *FDM vs. SLS 3D Printing - What They Mean and When to Use Them* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-12-20]. Prieiga per: <https://www.sculpteo.com/en/3d-printing/fdm-vs-sls-3d-printing-technologies/>.
  23. *3D-printed dress for Dita Von Teese by Michael Schmidt and Francis Bitonti* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2018-04-12]. Prieiga per: <https://www.dezeen.com/2013/03/07/3d-printed-dress-dita-von-teese-michael-schmidt-francis-bitonti/>.
  24. *Janne Kyttanen 3D-prints essential travel items with Lost Luggage kit* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2018-04-12]. Prieiga per: <https://www.dezeen.com/2014/05/07/janne-kyttanen-3d-printed-lost-luggage-kit/>.
  25. „Nervous System“ projects [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-04-12]. Prieiga per: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/sets/kinematics/>.
  26. „Smart Factory“ meno gaminių galerija [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-04-12]. Prieiga per: <http://smartfactory.lt/galerija/menas/>.
  27. *Master hat designer Elvis Pompilio goes 3D printing* [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2018-04-16]. Prieiga per: <https://i.materialise.com/blog/master-hat-designer-elvis-pompilio-goes-3d-printing/>.
  28. *Project DNA by Catherine Wales* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2018-04-16]. Prieiga per: <https://www.dezeen.com/2013/06/27/project-dna-3d-printed-accessories-by-catherine-wales/>.
  29. MICKIEWICZA Al. A. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of metallurgy and materials*. AGH University of science and technology, Krakow, Poland, 2013, vol. 58, issue 4, pp. 1415-1418.

30. *FDM vs SLA: 3D Printing Explained and Compared* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-12-20].  
Prieiga per: <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>.
31. Denit Peleg [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2018-04-17]. Prieiga per: <<https://danitpeleg.com/>>;
32. *3d systems textiles: 3d printed fashion out-of-the-box & into the cube* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2018-04-17]. Prieiga per: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-systems-textiles-fashion-out-of-the-box-into-the-cube-3d-printer-57075/>.
33. *Alexis Walsh* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-04-19]. Prieiga per: <http://www.alexiswalsh.com/>.
34. „*Chuic shop*“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-04-19]. Prieiga per: <http://chuic.es/>.
35. „*Labeledby*.“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-04-19]. Prieiga per: <http://www.labeledby.nl/>.
36. CAMBELL, J.R. Inkjet4Tex: creative implications of 3D inkjet printing technologies for textiles. *Undisciplined! Design Research Society Conference 2008*, Sheffield Hallam University, Sheffield, UK, 2008, July 16-19, pp. 168/1-168/12.
37. MELNIKOVA, R., EHRMANN, A. and K. FINSTERBUSCH. 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2014, Vol.62, 012018, 6p.
38. PARTSCH, L. N., VASSILIADIS, S. and P. PAPAGEORGAS. 3D printed textiles fabrics structures. *5th International Istanbul Textile Congress 2015*, Istanbul, Turkey, 2015, September 11-12, 7p.
39. MIKKONEN, J., MYLLYMÄKI, R., KIVIOJA, S., VANHAKARTANO, S. and H. SUONSILTA. Printed material and fabric. *Proceedings from the Nordic Design Research Society Conference*, 2013, pp. 313-321.
40. VALTAS, A. and D. SUN. 3D printing for garments production: an exploratory study. *Journal of Fashion technology & Textile Engineering*, 2016, Vol.4, No.3, 4p.
41. RIVERA, M. L., MOUKPERIAN, M., ASHBROOK, D., MANKOFF, J. and S. E. HUDSON. Stretching the Bounds of 3D printing with embedded textiles. *Proceedings of CHI 2017*, Denver, CO, USA, May 6-11, 2017, 12p.
42. DÖPKE, C., MARTENS, Y., GRIMMELSMANN, N. and A. EHRMANN. 3D-Printing on Textile Fabrics. *Textiles: Advances in Research and Applications*, 2017, 13p.
43. SANATGAR, R. H., CAMPAGNE, C. and V. NIERSTRAZ. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. *Applied Surface Science*, 2017, Vol.403, pp. 551-563.
44. PEI, E., SHEN, J., WATLING, J. Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, Vol.21, No.5, pp. 556-571.
45. NEUß, J., LUTZ, M., GRIMMELSMANN, N., KORGER, M., EHRMANN, A. Interaction between 3D deformation of textiles fabrics and imprinted lamellae. *Proceedings of Aachen-Dresden-*

- Denkendorf International Textile Conference*, Dresden, 2016, November 24-25, 5p.
46. GRIMMELSMANN, MEISSNER, H., EHRMANN, A. 3D printed auxetic forms on knitted fabrics for adjustable permeability and mechanical properties. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, Vol.137, 012011, 8p.
  47. LUKOŠEVIČIENĖ, Natalija. Klijavimo metodų taikymas siuvant drabužius: paskaitų konspektas. Antras leidimas. Vilnius: 1989, 68p.
  48. BRINKS, G. J., WARMOESKERKEN, M.M.C.G., AKKERMAN, R. and W. ZWEERS. The added value of 3D polymer deposition on textiles, *13th AUTEX World Textile Conference*, Dresden, 2013, May 22-24.
  49. KORGER, M., BERGSCHNEIDER, J., LUTZ, M., MAHLTIG, B., FINSTERBUSCH, K. and M. RABE. Possible applications of 3D printing technology on textile substrates. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, Vol.141, 012011, 5p.
  50. RICHTER, C., SCHMÜLLING, S., EHRMANN, A. and K. FINSTERBUSCH. FDM printing of 3D forms with embedded fibrous materials. *International Conference on Design, Manufacturing and Mechatronics*, Wuhan, China, 17 – 18 April 2015, pp.961-969.
  51. MARTENS, Y. and A. EHRMANN. Composites of 3D-printed polymers and textiles fabrics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol.225, 012292, 6p.
  52. GRIMMELSMANN, N., LUTZ, M., KORGER, M., MEISSNER, H. and A. EHRMANN. Adhesion of 3D printed material on textile substrates. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, Vol.24, No.1, pp. 166-170.
  53. SPAHIU, T., GRIMMELSMANN, N., EHRMANN, A., PIPERI, E. and E. SHEHI. Effect of 3D printing on textile fabric. *1<sup>st</sup> International Conference “Engineering and Entrepreneurship“ Proceedings*, 2017, 7p.
  54. SABANTINA, L., KINZEL, F., EHRMANN, A. and K. FINSTERBUSCH. Combining 3D printed forms with textile structures – mechanical and geometrical properties of multi-material systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol.87, 012005, 5p.
  55. DÖPKE, C., GRIMMELSMANN, N. and A. EHRMANN. 3D printing on knitted fabrics. *Proceedings of 48th IFKT Congress*, Mönchengladbach, June 8-11, 2016, 5p.
  56. EHRMANN, A. 3D printing in the textile chain. *Technical brief*, 2018, No.5, pp. 37-39.
  57. DÖPKE, C., GRIMMELSMANN, N. and A. EHRMANN. A new dimension in finishing textiles: 3D printing onto warp-knitted textiles – possibilities and technical limitations. *Kattenwirk-Praxis, English Edition*, 2017, No.1, pp. 25-27.
  58. KREIKEBAUM, E., LUTZ, M., DOERFEL, M., FINSTERBUSCH, K. and A. EHRMANN. 3D printing of Braille on textiles. *Technical Textiles*, 2016, No.5, pp. E187-E188.
  59. LST EN ISO 5084:2000. Tekstilė. Tekstilės medžiagų ir gaminių storio nustatymas (ISO



- 5084:1996) = Textiles – Determination of thickness of textiles and textile products (ISO 5084:1996): Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2000.
60. LST EN 12127:1999. Tekstilė. Tekstilės medžiagos. Paviršinio tankio nustatymas naudojant mažus bandinius = Textiles – Fabrics – Determination of mass per unit area using small samples: Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1999.
61. LST EN 1049-2:1998. Tekstilės medžiagos. Audiniai. Sandara. Bandymo būdas. 2-oji dalis. Siūlų skaičiaus vienetiniame ilgyje nustatymas (modifikuotas ISO 7211-2:1984) = Textiles – Woven fabrics – Construction – Methods of analysis – Part 2: Determination of number of threads per unit length (ISO 7221-2:1984 modified): Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1998.
62. TPU ir TPE palyginimas [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2018-02-08]. Prieiga per: <https://rigid.ink/blogs/news/172062855-what-is-the-difference-between-tpe-and-tpu-flexible-filament>.
63. „FilaFlex<sup>®</sup>“ techninė dokumentacija [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2018-02-08]. Prieiga per: <https://recreus.com/img/pdf/FILAFLEX%2082A%20TECHNICAL%20SHEET%20&%20MSDS%202017.pdf>.
64. „NinjaFlex<sup>®</sup>“ techninė dokumentacija [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2018-02-08]. Prieiga per: <https://ninjatek.com/wp-content/uploads/2016/05/NinjaFlex-TDS.pdf>.
65. „PolyFlex<sup>™</sup>“ techninė dokumentacija [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-02-08]. Prieiga per: [http://www.polymaker.com/wp-content/uploads/2015/06/PolyFlex\\_TDS-v1.pdf](http://www.polymaker.com/wp-content/uploads/2015/06/PolyFlex_TDS-v1.pdf).
66. „Flex45“ techninė dokumentacija [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2018-02-08]. Prieiga per: <https://www.dutchfilaments.com/wp-content/uploads/2018/TDS/FLEX%2045%40df%202017-04-12%20UK.pdf>.
67. RICHARD, J., BASSET, R., POSTLE and N. PAN. Experimental Methods for Measuring Fabric Mechanical Properties: A Review and Analysis, *Textile Research Journal*, 1999, Vol. 69, No.11, pp.866-875;
68. BRAGANÇA, S., AREZES, P., CARVALHO, M., & S. ASHDOWN. Effects of different body postures on anthropometric measures. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, Vol. 485. pp. 313-322.
69. LST ISO 4915:2002. Tekstilė. Dygsnių tipai. Klasifikacija ir terminija (tapatus ISO 4915:1991) = Textiles – Stitch types – Classification and terminology (identical ISO 4915:1991): Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
70. LST ISO 4916:2002 Tekstilė. Siūlių tipai. Klasifikacija ir terminija (tapatus ISO 4916:1991) = Textiles – Seam types – Classification and terminology (identical ISO 4916:1991): Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.

71. *The 4 Most Important 3D Printer File Formats – Simply Explained* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-02-16]. Prieiga per: <https://all3dp.com/3d-printing-file-formats/>.
72. *3D printer guide* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-02-17]. Prieiga per: <https://www.3dhubs.com/best-3d-printer-guide#workhorse>.
73. „PRUSA i3 MK2S“ printer [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-02-21]. Prieiga per: <https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/59-original-prusa-i3-mk2-kit.html>.
74. LST ISO 13934-1:2013. Tekstilė. Tempiamosios medžiagų savybės. 1 dalis. Didžiausios jėgos ir pailgėjimo esant šiai jėgai nustatymas juostelės metodu (ISO 13934:2013) = Textiles – Tensile properties of fabrics – Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method (ISO 13934-1:2013): Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.
75. LST EN ISO 139:2006. Tekstilė. Standartinė kondicionavimo ir bandymo aplinka (ISO 139:2005) = Textiles – Standard atmospheres for conditioning and testing (ISO 139:2005): Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
76. DAUKANTIENĖ, V., DOMSKIENĖ, J. ir V. VAITKEVIČIENĖ. Siuvinių medžiagotyra. Kaunas: Technologija, 2007. ISBN 9955-09-972-0.
77. LST ISO 6330:2012 Tekstilė. Buitinio skalbimo ir džiovinimo procedūros bandant tekstilę (ISO 6330:2012) = Textiles – Domestic washing and drying procedures for textile testing (ISO 6330:2012): Lietuvos standartas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
78. Spalvų mados tendencijos [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2018-03-17]. Prieiga per: <http://www.lenzing-fibers.com/service/trends-spring-summer-2019/>.
79. MACKEVIČIENĖ, E., BANIONIENĖ, J. ir R. TITAS. Siuvinių konstravimo pagrindai: laboratoriniai darbai. Kaunas: Technologija, 2014. ISBN 978-9955-25-117-0.

## PRIEDAI

### 1 PRIEDAS. Tekstilės medžiagų sandaros rodiklių statistiniai duomenys

**1p lentelė.** A1 audinio sandaros rodiklių matavimo duomenys ir rezultatai

Audinio kodas	Bandinio numeris	Masė, g	Storis, mm	Tankumas ataudų kryptimi, cm <sup>-1</sup>	Išardytų siūlų masė ataudų kryptimi $m_{sa}$ , g	Išardytų siūlų ilgis ataudų kryptimi $l_{sa}$ , mm
A1	1	0,53	0,19	42	0,04	150
	2	0,53	0,19	42	0,04	150
	3	0,54	0,19	42	0,03	150
	4	0,53	0,19	41	0,04	150
	5	0,54	0,19	41	0,03	150
Aritmetinis vidurkis		0,53	0,19	42	0,04	150
Vidutinis kvadratinis nuokrypis		0,01	0	0,55	0,01	0
Dispersija		0,00	0	0,30	0,00	0
Variacijos koeficientas, %		1,03	0	1,32	15,22	0
Absoliutinė atsitiktinė paklaida		0,01	0	0,68	0,01	0
Santykinė atsitiktinė paklaida, %		1,27	0	1,63	18,89	0
Pasikliautoji intervalo pradžia		0,53	0,19	41	0,03	150
Pasikliautoji intervalo pabaiga		0,54	0,19	42	0,04	150

**2p lentelė.** A2 audinio sandaros rodiklių matavimo duomenys ir rezultatai

Audinio kodas	Bandinio numeris	Masė, g	Storis, mm	Tankumas ataudų kryptimi, cm <sup>-1</sup>	Išardytų siūlų masė ataudų kryptimi $m_{sa}$ , g	Išardytų siūlų ilgis ataudų kryptimi $l_{sa}$ , mm
A2	1	0,58	0,38	32	0,04	151
	2	0,58	0,38	33	0,04	151
	3	0,56	0,37	32	0,04	151
	4	0,56	0,38	33	0,04	151
	5	0,55	0,37	33	0,04	151
Aritmetinis vidurkis		0,57	0,38	33	0,04	151
Vidutinis kvadratinis nuokrypis		0,01	0,01	0,55	0	0
Dispersija		0,00	0,00	0,30	0	0
Variacijos koeficientas, %		2,37	1,46	1,68	0	0
Absoliutinė atsitiktinė paklaida		0,02	0,01	0,68	0	0
Santykinė atsitiktinė paklaida, %		2,94	1,81	2,09	0	0
Pasikliautoji intervalo pradžia		0,55	0,37	32	0,04	151
Pasikliautoji intervalo pabaiga		0,58	0,38	33	0,04	151

**3p lentelė.** A3 audinio sandaros rodiklių matavimo duomenys ir rezultatai

Audinio kodas	Bandinio numeris	Masė, g	Storis, mm	Tankumas ataudų kryptimi, cm <sup>-1</sup>	Išardytų siūlų masė ataudų kryptimi $m_{sa}$ , g	Išardytų siūlų ilgis ataudų kryptimi $l_{sa}$ , mm
1		2	3	4	5	6
A3	1	0,26	0,13	41	0,01	153
	2	0,26	0,13	41	0,01	154
	3	0,26	0,13	40	0,01	153
	4	0,25	0,13	41	0,01	154
	5	0,26	0,13	41	0,01	154
Aritmetinis vidurkis		0,26	0,13	41	0,01	153,6
Vidutinis kvadratinis nuokrypis		0,01	0	0,45	0	0,55
Dispersija		0,00	0	0,20	0	0,30
Variacijos koeficientas, %		1,73	0	1,10	0	0,36
Absoliutinė atsitiktinė paklaida		0,01	0	0,56	0	0,68

1	2	3	4	5	6
Santykinė atsitiktinė paklaida,%	2,15	0	1,36	0	0,44
Pasikliautinoji intervalo pradžia	0,25	0,13	40	0,01	152,92
Pasikliautinoji intervalo pabaiga	0,26	0,13	41	0,01	154,28

4p lentelė. A4 audinio sandaros rodiklių matavimo duomenys ir rezultatai

Audinio kodas	Bandinio numeris	Masė, g	Storis, mm	Tankumas ataudų kryptimi, $\text{cm}^{-1}$	Išardytų siūlų masės ataudų kryptimi $m_{sa}$ , g	Išardytų siūlų ilgis ataudų kryptimi $l_{sa}$ , mm
A4	1	0,39	0,20	38	0,02	152
	2	0,40	0,20	38	0,02	153
	3	0,40	0,21	37	0,02	152
	4	0,40	0,21	37	0,02	152
	5	0,40	0,22	38	0,02	153
Aritmetinis vidurkis		0,40	0,21	38	0,02	152,4
Vidutinis kvadratinis nuokrypis		0,01	0,01	0,55	0	0,55
Dispersija		0,00	0,00	0,30	0	0,30
Variacijos koeficientas,%		1,12	4,02	1,46	0	0,36
Absoliutinė atsitiktinė paklaida		0,01	0,01	0,68	0	0,68
Santykinė atsitiktinė paklaida,%		1,40	4,99	1,81	0	0,45
Pasikliautinoji intervalo pradžia		0,39	0,20	37	0,02	151,72
Pasikliautinoji intervalo pabaiga		0,40	0,22	38	0,02	153,08

## 2 PRIEDAS. 3D medžiagų ir audinių sistemų stiprumo ir tūsumo rodiklių statistinė analizė

1p lentelė. FilaFlex® medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištisa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPE	A2TPE	A3TPE	A4TPE	A1TPE	A2TPE	A3TPE	A4TPE
1	103,38	95,10	90,20	91,70	119,10	120,00	77,80	109,88
2	90,50	97,30	84,80	85,10	111,00	125,10	75,10	101,05
3	93,80	102,25	86,40	85,10	119,40	121,95	68,25	111,00
4	98,00	99,40	90,80	88,60	112,00	122,35	77,00	108,00
5	98,30	102,25	81,90	91,70	112,00	127,00	70,32	110,00
Aritmetinis vidurkis	96,80	99,26	86,82	88,44	114,70	123,28	73,69	107,99
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	4,89	3,12	3,73	3,30	4,17	2,76	4,21	4,03
Dispersija	23,92	9,76	13,93	10,90	17,43	7,64	17,70	16,21
Variacijos koeficientas, %	5,05	3,15	4,30	3,73	3,64	2,24	5,71	3,73
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	6,07	3,88	4,63	4,10	5,18	3,43	5,22	5,00
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	6,27	3,91	5,34	4,63	4,52	2,78	7,09	4,63
Pasikliautoji intervalo pradžia	90,72	95,38	82,19	84,34	109,52	119,85	68,47	102,99
Pasikliautoji intervalo pabaiga	102,87	103,14	91,45	92,54	119,88	126,71	78,92	112,98

2p lentelė. NinjaFlex medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištisa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPU 1	A2TPU 1	A3TPU 1	A4TPU 1	A1TPU 1	A2TPU 1	A3TPU 1	A4TPU 1
1	124,00	122,50	86,10	120,38	148,00	148,00	65,40	147,00
2	111,00	120,63	78,20	122,13	142,40	146,00	59,30	138,00
3	124,88	122,50	87,70	110,50	152,00	165,00	65,18	139,20
4	118,50	121,63	78,96	114,50	152,40	161,00	61,28	150,00
5	119,50	129,45	79,60	115,00	150,00	163,00	57,98	154,00
Aritmetinis vidurkis	119,58	123,34	82,11	116,50	148,96	156,60	61,83	145,64
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	5,53	3,50	4,44	4,72	4,07	8,91	3,37	6,90
Dispersija	30,60	12,25	19,67	22,25	16,53	79,30	11,37	47,65
Variacijos koeficientas, %	4,63	2,84	5,40	4,05	2,73	5,69	5,45	4,74
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	6,87	4,35	5,51	5,86	5,05	11,06	4,19	8,57
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	5,74	3,52	6,71	5,03	3,39	7,06	6,77	5,88
Pasikliautoji intervalo pradžia	112,71	119,00	76,61	110,65	143,91	145,54	57,64	137,07
Pasikliautoji intervalo pabaiga	126,44	127,69	87,62	122,36	154,01	167,66	66,01	154,21

**3p lentelė.** PolyFlex™ medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištūsa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPU 2	A2TPU 2	A3TPU 2	A4TPU 2	A1TPU 2	A2TPU 2	A3TPU 2	A4TPU 2
1	125,40	161,80	84,80	121,50	50,70	99,75	21,12	50,00
2	121,00	163,80	83,40	118,75	49,43	105,50	22,20	48,60
3	131,55	171,60	80,80	120,13	52,60	112,00	22,20	48,00
4	120,63	160,00	85,00	119,38	49,50	97,50	20,60	46,80
5	121,38	163,60	84,10	116,25	45,83	102,25	21,60	48,23
Aritmetinis vidurkis	123,99	164,16	83,62	119,20	49,61	103,40	21,54	48,33
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	4,64	4,43	1,70	1,94	2,47	5,65	0,70	1,15
Dispersija	21,55	19,67	2,88	3,77	6,12	31,96	0,48	1,33
Variacijos koeficientas, %	3,74	2,70	2,03	1,63	4,98	5,47	3,23	2,39
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	5,76	5,51	2,11	2,41	3,07	7,02	0,86	1,43
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	4,65	3,35	2,52	2,02	6,19	6,79	4,01	2,96
Pasikliautinoji intervalo pradžia	118,23	158,65	81,51	116,79	46,54	96,38	20,68	46,89
Pasikliautinoji intervalo pabaiga	129,75	169,67	85,73	121,61	52,68	110,42	22,41	49,76

**4p lentelė.** Flex45 medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištūsa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPC	A2TPC	A3TPC	A4TPC	A1TPC	A2TPC	A3TPC	A4TPC
1	126,30	134,25	87,30	127,50	82,50	101,00	17,28	66,35
2	127,65	130,95	82,40	128,70	87,90	97,38	16,20	74,16
3	126,45	131,55	80,30	122,63	87,90	99,60	15,20	63,93
4	137,10	139,80	76,24	126,00	92,63	95,00	16,40	70,40
5	136,80	143,00	80,60	133,35	82,80	90,05	15,12	74,90
Aritmetinis vidurkis	130,86	135,91	81,37	127,64	86,75	96,61	16,04	69,95
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	5,58	5,29	4,01	3,92	4,21	4,31	0,90	4,79
Dispersija	31,19	27,94	16,07	15,38	17,72	18,61	0,81	22,91
Variacijos koeficientas, %	4,27	3,89	4,93	3,07	4,85	4,47	5,62	6,84
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	6,93	6,56	4,98	4,87	5,23	5,36	1,12	5,94
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	5,30	4,83	6,12	3,82	6,02	5,54	6,97	8,49
Pasikliautinoji intervalo pradžia	123,93	129,35	76,39	122,77	81,52	91,25	14,92	64,01
Pasikliautinoji intervalo pabaiga	137,79	142,47	86,34	132,51	91,97	101,96	17,16	75,89



### 3 PRIEDAS. 3D ir tekstilės medžiagų sistemų stiprumo ir tūsumo rodiklių statistinė analizė po skalbimo

**1p lentelė.** FilaFlex® medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištūsa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPE	A2TPE	A3TPE	A4TPE	A1TPE	A2TPE	A3TPE	A4TPE
1	88,80	95,90	63,75	101,00	110,10	120,00	44,70	136,00
2	87,10	100,88	72,00	102,88	108,88	124,05	48,20	134,10
3	98,00	99,90	65,78	98,30	120,95	116,13	46,50	125,13
4	96,70	98,30	70,10	96,90	125,00	126,00	51,20	136,95
5	91,50	101,00	68,25	99,50	113,50	135,00	47,40	129,00
Aritmetinis vidurkis	92,42	99,20	67,98	99,72	115,69	124,24	47,60	132,24
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	4,79	2,14	3,30	2,33	7,01	7,12	2,40	5,02
Dispersija	22,93	4,56	10,87	5,41	49,19	50,67	5,75	25,21
Variacijos koeficientas, %	5,18	2,15	4,85	2,33	6,06	5,73	5,04	3,80
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	5,94	2,65	4,09	2,89	8,71	8,84	2,98	6,23
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	6,43	2,67	6,02	2,90	7,53	7,11	6,25	4,71
Pasikliautinoji intervalo pradžia	86,48	96,54	63,88	96,83	106,98	115,40	44,62	126,00
Pasikliautinoji intervalo pabaiga	98,36	101,85	72,07	102,60	124,39	133,07	50,58	138,47

**2p lentelė.** NinjaFlex medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištūsa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPU 1	A2TPU 1	A3TPU 1	A4TPU 1	A1TPU 1	A2TPU 1	A3TPU 1	A4TPU 1
1	104,45	105,40	80,90	122,13	146,00	124,50	67,58	155,00
2	99,70	100,80	78,92	115,50	133,05	120,00	66,68	165,00
3	104,00	116,38	82,80	123,63	152,00	130,05	68,70	170,00
4	99,50	103,80	88,60	124,63	130,05	127,05	70,70	166,00
5	105,63	105,80	81,30	113,63	142,05	127,05	64,88	156,00
Aritmetinis vidurkis	102,66	106,44	82,50	119,90	140,63	125,73	67,71	162,40
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	2,85	5,90	3,68	5,00	9,08	3,76	2,18	6,58
Dispersija	8,14	34,77	13,53	24,98	82,38	14,12	4,75	43,30
Variacijos koeficientas, %	2,78	5,54	4,46	4,17	6,45	2,99	3,22	4,05
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	3,54	7,32	4,57	6,21	11,27	4,67	2,71	8,17
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	3,45	6,88	5,53	5,18	8,01	3,71	4,00	5,03
Pasikliautinoji intervalo pradžia	99,11	99,12	77,94	113,70	129,36	121,06	65,00	154,23
Pasikliautinoji intervalo pabaiga	106,20	113,76	87,07	126,11	151,90	130,40	70,41	170,57

**3p lentelė.** PolyFlex™ medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištįsa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPU 2	A2TPU 2	A3TPU 2	A4TPU 2	A1TPU 2	A2TPU 2	A3TPU 2	A4TPU 2
1	172,20	184,40	87,60	179,40	89,75	120,10	21,84	122,25
2	165,00	180,00	80,80	178,20	84,20	118,00	19,80	126,00
3	159,40	174,60	76,48	173,60	79,00	107,38	19,10	117,00
4	155,95	173,00	83,30	175,40	80,50	107,88	21,88	119,00
5	152,40	184,60	78,24	177,75	78,00	106,88	20,40	112,00
Aritmetinis vidurkis	160,99	179,32	81,28	176,87	82,29	112,05	20,60	119,25
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	7,80	5,39	4,37	2,33	4,79	6,44	1,24	5,30
Dispersija	60,87	29,09	19,13	5,45	22,93	41,53	1,53	28,06
Variacijos koeficientas, %	4,85	3,01	5,38	1,32	5,82	5,75	6,00	4,44
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	9,69	6,70	5,43	2,90	5,95	8,00	1,53	6,58
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	6,02	3,73	6,68	1,64	7,22	7,14	7,44	5,51
Pasikliautinoji intervalo pradžia	151,30	172,62	75,85	173,97	76,34	104,05	19,07	112,67
Pasikliautinoji intervalo pabaiga	170,68	186,02	86,71	179,77	88,24	120,05	22,14	125,83

**4p lentelė.** Flex45 medžiagos susiklijavimo su audiniu pirminiai stiprumo ir tūsumo matavimų duomenys

Eil. nr.	Ištraukimo iš tarp sluoksnio jėga $F_{tr}$ , N				Ištraukimo iš tarp sluoksnio ištįsa $\Delta l_{tr}$ , mm			
	A1TPC	A2TPC	A3TPC	A4TPC	A1TPC	A2TPC	A3TPC	A4TPC
1	156,80	131,40	77,12	157,00	76,10	83,72	13,90	95,63
2	144,15	140,85	78,16	152,80	75,28	78,30	14,60	95,00
3	153,80	142,20	78,32	145,80	83,63	89,30	14,40	88,48
4	153,20	136,05	77,84	157,00	76,20	80,10	13,30	90,50
5	153,00	148,95	70,43	148,50	80,70	88,00	15,40	90,60
Aritmetinis vidurkis	152,19	139,89	76,37	152,22	78,38	83,88	14,32	92,04
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	4,75	6,62	3,35	5,03	3,62	4,79	0,79	3,11
Dispersija	22,54	43,79	11,25	25,27	13,13	22,95	0,62	9,69
Variacijos koeficientas, %	3,12	4,73	4,39	3,30	4,62	5,71	5,49	3,38
Absoliutinė atsitiktinė paklaida	5,89	8,22	4,16	6,24	4,50	5,95	0,98	3,86
Santykinė atsitiktinė paklaida, %	3,87	5,87	5,45	4,10	5,74	7,09	6,81	4,20
Pasikliautinoji intervalo pradžia	146,30	131,67	72,21	145,98	73,88	77,94	13,34	88,18
Pasikliautinoji intervalo pabaiga	158,08	148,11	80,54	158,46	82,88	89,83	15,30	95,91





