



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lydžiosios masės formavimo metu sukuriamų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Evelina Melinauskaitė
Projekto autorė

Lekt. Tomas Kuncius
Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Lydžiosios masės formavimo metu sukuriamų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Evelina Melinauskaitė
Projekto autorė

Lekt. Tomas Kuncius
Vadovas

Doc. Darius Eidukynas
Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Evelina Melinauskaitė

Lydžiosios masės formavimo metu sukuriamų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Evelina Melinauskaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentei – Evelinai Melinauskaitei

1. Projekto tema –

Lydžiosios masės formavimo metu sukuriamų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybių tyrimas

(Lietuviškai)

Investigation of Secondary Use Possibilities of Plastic Waste Generated During Fused Deposition Modeling

(Angliškai)

2. Hipotezė

Dauguma lydžiosios masės formavimo metu sukuriamų atliekų gali būti pakartotinai panaudojamos, tačiau pasižymi prastesnėmis mechaninėmis savybėmis.

3. Projekto tikslas ir uždaviniai –

Tikslas: įvertinti ir išanalizuoti lydžiosios masės formavimo technologijos sukuriamų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybes.

Uždaviniai:

1. sukurti spausdinimo metu atsirandančių PLA termoplastiko atliekų perdirbimo technologiją;
2. įvertinti perdirbto plastiko tinkamumą lydžiosios masės formavimo spausdinimo technologijai;
3. atlikti perdirbto ir pirminio plastiko bandinių mechaninių savybių palyginimą;
4. įvertinti perdirbimo proceso atsiperkamumą, ekonominę naudą ir išlaidas.

4. Pradiniai projekto duomenys –

Netaikoma

5. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Medžiagos: „Prusament” PLA, „Prusament” 100 % perdirbtas PLA.

Programinė įranga: spausdinimo paruošimo programa – PrusaSlicer 2.5.0.

Pagrindinė tyimų įranga: smulkinimo įranga, „Noztek Touch” ekstruderis, „Original Prusa i3 MK3S+” 3D spausdintuvas, „Tinius Olsen H25KT” universali testavimo mašina.

Standartai: ASTM D638-14, ASTM D790-17.

Projekto autorė	Evelina Melinauskaitė	2022-09-26
	<i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i> <i>(Data)</i>
Vadovas	Tomas Kuncius	2022-09-26
	<i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i> <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovė	Regita Bendikienė	2022-09-26
	<i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i> <i>(Data)</i>

Melinauskaitė, Evelina. Lydžiosios masės formavimo metu sukuriamų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Tomas Kuncius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: lydžiosios masės formavimas, polilaktinė rūgštis, perdirbimas.

Kaunas, 2023. 68 p.

Santrauka

Šio darbo pagrindinis tikslas išsiaiškinti, kokios yra lydžiosios masės formavimo technologijos sukuriamų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybės. Atlikus literatūros analizę nuspręsta pagaminti perdirbto termoplastiko giją ekstruduojuant susmulkintas PLA atliekas. Eksperimentiniu būdu sukurta metodologija, skirta pasiekti užsibrėžtą 1,75 mm termoplastiko gijos skersmenį esant optimaliausiems ekstruzijos parametrams (greičiui ir temperatūrai). Po sėkmingos ekstruzijos, atlikta perdirbto termoplastiko tinkamumo spausdinimui analizė. Tačiau spausdinimo metu, pastebėta spausdinimo antgalio užsikišimo tendencija. Dėl spausdinimo metu kylančių problemų buvo atlikta pagamintos termoplastiko gijos mikroskopinė analizė. Tyrimo metu aptikta smulkinimo proceso metu atsiradusių priemaišų, kurios dėl skirtingos, lyginant su PLA, lydymosi temperatūros spausdinimo metu užkemša spausdinimo antgalį. Dėl šios priežasties, pagamintos PLA gijos panaudoti tolimesniems tyrimams nebuvo galima. Norint įvertinti antrinio PLA atliekų panaudojimo įtaką spausdinimo procesui, atspausdintų gaminių mechaninėms savybėms ir ekonominę naudą, buvo nuspręsta tolimesniems tyrimams naudoti „Prusament“ 100 % perdirbto PLA termoplastiko giją. Šis termoplastikas pasirinktas, kaip puiki alternatyva tyrimo metu pagamintai perdirbto plastiko gijai, nes yra pagamintas iš pirmą kartą perdirbtų PLA spausdinimo proceso metu atsirandančių atliekų nenaudojant jokių priedų. Perdirbimo įtakai mechaninėms savybėms ištirti buvo pasirinkta atlikti tempimo ir lenkimo bandymus remiantis ASTM D638-14 ir ASTM D790-17 standartais. Palyginamajai analizei tokie patys bandiniai buvo atspausdinti ir iš pirminio „Prusament“ PLA plastiko. Norint surinkti kuo išsamesnius duomenis ir rezultatus bandiniai buvo atspausdinti orientuojant juos trimis skirtingomis kryptimis ant spausdinimo platformos.

Atlikus gautų rezultatų analizę pastebėta, kad nepriklausomai nuo spausdinimo orientacijos pirminio PLA bandinių stiprumo riba tempiant, maksimali atlaikoma jėga bei tamprumo modulis buvo panašūs arba didesni lyginant su perdirbto PLA bandiniais. Lenkimo bandymo rezultatų analizės metu nustatyta, jog antrosios orientacijos perdirbto PLA bandiniai pasižymi panašiomis mechaninėmis savybėmis, kaip ir pirminio PLA bandiniai. Tačiau pirmosios ir trečiosios orientacijos perdirbto PLA bandiniai pasižymėjo mažesne stiprumo riba lenkiant, mažesne maksimalia atlaikoma jėga bei mažesniu lenkimo modulių lyginant su pirminio PLA bandiniais.

Nors šio tyrimo metu pagaminti perdirbto PLA termoplastiko gijos, kuri užtikrintų stabilų spausdinimo procesą, nepavyko, tačiau gauti rezultatai panaudojus „Prusament“ alternatyvą, leidžia teigti, kad susidarant dideliems atliekų kiekiams ir esant didelėms gamybos apimtims PLA perdirbimas yra ne tik naudingas aplinkai, bet ir ekonomiškai pagrįstas procesas.

Melinauskaitė, Evelina. Investigation of Secondary Use Possibilities of Plastic Waste Generated During Fused Deposition Modelling. Master's Final Degree Project / supervisor lect. Tomas Kuncius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: fused deposition modeling, polylactic acid, recycling.

Kaunas, 2023. 68 p.

Summary

The main objective of this work was to investigate the potential for the recycling of the plastic waste generated by fused deposition modeling technology. Following a literature analysis, it was decided to produce recycled thermoplastic filament by extrusion of shredded PLA waste. A methodology was developed experimentally to achieve the target thermoplastic filament diameter of 1,75 mm under optimal extrusion parameters (speed and temperature). After successful extrusion, an analysis of the printability of the recycled thermoplastic was carried out. However, during the printing process, a tendency for the printer nozzle to clog was observed. Due to the problems encountered during printing, a microscopic analysis of the produced thermoplastic filament was performed. The analysis revealed impurities from the shredding process which, due to the different melting temperature compared to PLA, clog the printer nozzle during printing. For this reason, the produced PLA filament could not be used for further investigations. In order to assess the impact of the use of recycled PLA on the printing process, the mechanical properties of the printed products and the economic benefits, it was decided to use Prusament 100 % recycled PLA thermoplastic filament for further studies. This thermoplastic was chosen as an excellent alternative to the recycled plastic filament produced in the study, as it is made from the first recycled waste from the PLA printing process without the use of any additives. To investigate the effect of recycling on the mechanical properties, tensile and flexural tests were chosen in respect of ASTM D638-14 and ASTM D790-17 standards. For comparative analysis, identical samples were printed from virgin Prusament PLA plastic. In order to collect thorough data and results, the samples were printed with three different orientations on the printing platform.

The analysis of the results showed that, regardless of the printing orientation, the tensile strength, the maximum sustained force and the tensile modulus of the virgin PLA specimens were similar or higher compared to the recycled PLA specimens. The analysis of the flexural test results showed that the recycled PLA samples in the second orientation exhibited similar mechanical properties to the virgin PLA samples. However, the first and third orientation recycled PLA specimens exhibited a lower flexural strength, a lower maximum sustained force and a lower flexural modulus compared to the virgin PLA specimens.

Although this study was not successful in producing a filament of recycled PLA thermoplastic that would provide a stable printing process, the results obtained with the Prusament alternative suggest that, in the context of high waste and production volumes, recycling of PLA is not only environmentally beneficial, but also economically viable.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Adityviosios gamybos privalumai	12
1.2. Adityviosios gamybos technologijos.....	13
1.3. Stereolitografija	15
1.4. Selektivus kietinimas lazeriu	17
1.5. Lydžiosios masės formavimas.....	19
1.6. LMF žaliavos	21
1.7. LMF spausdinimo atliekos	22
1.8. PLA perdirbimas	24
2. Metodologija	26
2.1. PLA termoplastiko gijos gamyba	26
2.1.1. Smulkinimas	26
2.1.2. Ekstruzija	27
2.2. 3D spausdinimas.....	28
2.2.1. Bandinių spausdinimas	28
2.2.2. Mikroskopinė termoplastiko gijos analizė.....	30
2.3. Mechaniniai bandymai	31
2.3.1. Bandinių matavimas	32
2.3.2. Tempimo bandymas	33
2.3.3. Lenkimo bandymas	35
3. Rezultatai.....	37
3.1. PLA termoplastiko gijos gamyba	37
3.1.1. PLA atliekų smulkinimas	37
3.2. Perdirbto PLA termoplastiko gijos ekstruzija.....	39
3.3. Bandinių 3D spausdinimas	41
3.4. Mikroskopinė išekstruoto termoplastiko analizė.....	43
3.5. Mechaniniai bandymai	45
3.5.1. Bandinių matavimas	45
3.6. Tempimo mechaniniai bandymai	48
3.7. Lenkimo mechaniniai bandymai	51
3.8. Rekomendacijos tolimesniems tyrimams	54
3.8.1. Rekomendacijos smulkinimui	54
3.8.2. Rekomendacijos ekstruzijai.....	56
4. Ekonominė dalis.....	57
Išvados	61
Literatūros sąrašas	62
Priedai.....	68
1 priedas. Dalyvavimo mokslinės konferencijos „Industrial Engineering 2022“ sertifikatas	68

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Pagrindinės „Prusament PLA” termoplastiko gijos mechaninės charakteristikos [63]..	26
2.2 lentelė. „Original Prusa i3 MK3S+” pagrindiniai parametrai [64]	29
2.3 lentelė. Naudoti spausdinimo parametrai	30
2.4 lentelė. Pagrindiniai „Tinius Olsen H25KT” testavimo mašinos parametrai [67].....	32
2.5 lentelė. Pagrindiniai „KERN ABJ220-4NM” analitinių svarstyklių parametrai [68].....	32
3.1 lentelė. Naudotos ekstruzijos proceso parametrų vertės	39
3.2 lentelė. Pirminio PLA termoplastiko gijos tempimo bandinių parametrai	46
3.3 lentelė. Pirminio PLA termoplastiko gijos lenkimo bandinių parametrai.....	46
3.4 lentelė. Perdirbto PLA termoplastiko gijos tempimo bandinių parametrai.....	47
3.5 lentelė. Perdirbto PLA termoplastiko gijos lenkimo bandinių parametrai.....	47
3.6 lentelė. Pirmosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA tempimo bandinių mechaninės savybės	48
3.7 lentelė. Antrosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA tempimo bandinių mechaninės savybės	49
3.8 lentelė. Trečiosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA tempimo bandinių mechaninės savybės	50
3.9 lentelė. Pirmosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA lenkimo bandinių mechaninės savybės	52
3.10 lentelė. Antrosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA lenkimo bandinių mechaninės savybės	52
3.11 lentelė. Trečiosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA lenkimo bandinių mechaninės savybės	53
4.1 lentelė. PLA perdirbimo įrangos kaina [69], [70]	57
4.2 lentelė. PLA perdirbimo įrangos galia [69], [70].....	58
4.3 lentelė. PLA perdirbimo įrangos pajėgumas [69], [70].....	58
4.4 lentelė. Pirminio ir perdirbto PLA termoplastiko gijos kaina	60

Paveikslų sąrašas

1 pav. Adityviosios gamybos metodų schemos ir procesai [19].....	13
2 pav. 3D spausdinimo proceso etapai [21]	14
3 pav. SLA spausdintuvų schemos: a) – standartinio, b) – atvirkštinio.....	15
4 pav. SKL spausdintuvo schema [32].....	18
5 pav. LMF spausdintuvo schema [38]	20
6 pav. Ekstruderio schema [58].....	24
7 pav. Smulkinimo įranga	27
8 pav. „Noztek Touch” ekstruderis	27
9 pav. „Original Prusa i3 MK3S+” 3D spausdintuvas.....	28
10 pav. Bandinių matmenys, mm : a) tempimo, b) lenkimo.....	29
11 pav. Tempimo bandinių išdėstymas ant spausdinimo platformos: a) pirmasis, b) antrasis, c) trečiasis	29
12 pav. Lenkimo bandinių išdėstymas ant spausdinimo platformos: a) pirmasis, b) antrasis, c) trečiasis	30
13 pav. „Mitutoyo Quick Vision Active” matavimo sistema	31
14 pav. „Tinius Olsen H25KT” universali testavimo mašina	31
15 pav. „Teng Tools” slankmatis	32
16 pav. „KERN ABJ220-4NM” analitinės svarstyklės.....	32
17 pav. Principinė tempimo bandymo schema	33
18 pav. Taškai bandinio centrinėje dalyje deformacijų matavimui	33
19 pav. Pagalbinė detalė tempimo bandinių taškų žymėjimui.....	34
20 pav. „Tinius Olsen” video ekstencijometras su „Sill Optics Correctal T” telecentrinio objektyvu	34
21 pav. Pagalbinė detalė tempimo bandinių pozicionavimui testavimo mašinoje.....	34
22 pav. Principinė lenkimo schema	35
23 pav. Surinktos PLA atliekos: a) surinktų atliekų pavyzdys, b) PLA atliekų masė	37
24 pav. Kito plastiko likučiai tarp smulkinimo peilių.....	37
25 pav. Į didesniu segmentus susilydžiusios plastikos detalės	38
26 pav. Plastikos dalelės po pirmo smulkinimo.....	38
27 pav. Dėžės su PLA atliekomis po smulkinimo masė ir galutinis plastiko dalelių dydis.....	39
28 pav. Perdirbto PLA termoplastiko gija ir jo skersmuo.....	40
29 pav. Bunkeryje virš sraigto susiformavę didesni termoplastiko segmentai	40
30 pav. Dėl termoplastiko „kamščio” sustojęs ekstruderio sraigtas	41
31 pav. Tempimo bandiniai: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos	41
32 pav. Lenkimo bandiniai: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos	42
33 pav. Sustojęs spausdinimo procesas, atspausdinus vieną perdirbo PLA bandinio sluoksnį	42
34 pav. Mikroskopinė užsikimšusio spausdinimo antgalio nuotrauka (didinimas – 3,2x) bei išvalyto antgalio nuotrauka (didinimas – 2,25x).....	43
35 pav. Mikroskopinė užsikimšusio spausdinimo antgalio nuotrauka (didinimas – 3,75x)	43
36 pav. Išlydytos perdirbto PLA termoplastiko gijos su neišsilydžiusiomis plastikos dalelėmis mikroskopinė nuotrauka (didinimas – 3x).....	44

37 pav. Mėlynos ir raudonos spalvos neišsilydžiusių plastiko dalelių mikroskopinė nuotrauka (didinimas – 5x).....	44
38 pav. Nežinomos kilmės plastiko likučiai tarp smulkinimo peilių.....	45
39 pav. Pirmosios orientacijos bandinių tempimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA	48
40 pav. Antrosios orientacijos bandinių tempimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA	49
41 pav. Trečiosios orientacijos bandinių tempimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA	49
42 pav. Pirminio PLA bandiniai po tempimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos	50
43 pav. Perdirbto PLA bandiniai po tempimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos	51
44 pav. Pirmosios orientacijos bandinių lenkimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA	51
45 pav. Antrosios orientacijos bandinių lenkimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA	52
46 pav. Trečiosios orientacijos bandinių lenkimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA	53
47 pav. Pirminio PLA bandiniai po lenkimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos	54
48 pav. Perdirbto PLA bandiniai po lenkimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos	54
49 pav. Iš išvalytų PLA atliekų gijos atspausdinta detalė.....	55
50 pav. Perdirbto (be priemaišų) PLA (viršuje) ir pirminio PLA (apačioje) detalės.....	55
51 pav. Įranga, naudojama skaičiavimuose: a) „GP20 Shredder Hybrid” smulkintuvas [69], b) „Composer 350” termoplastiko gijos gamybos įrenginys [70]	57
52 pav. Perdirbto PLA gijos ritės kainos priklausomybė nuo perdirbamų atliekų kiekio	60

Įvadas

Per pastarąjį dešimtmetį 3D spausdinimas, dar vadinamas adityviaja gamyba, tapo svarbia gamybos pramonės dalimi. Adityvioji gamyba yra trimačio, vientiso, praktiškai bet kokios formos objekto, sukuriama iš skaitmeninio modelio (CAD), gamybos procesas. Tai labai populiarus netradicinė gamybos technologija, paremta „sluoksnis po sluoksniu“ gamybos metodu. XX a. devintajame dešimtmetyje susikūrus [1] šiai technologijai, atsirado galimybė pigiai, greitai, automatizuotai ir beveik be atliekų gaminti sudėtingas konstrukcijas. Ilgą laiką adityviosios gamybos technologijos buvo naudojamos tik prototipavimui ar smulkiaserijinėje gamyboje. Dėl sparčios šios srities plėtros, prieinamumo, naujai tobulinamų sprendimų ir plataus medžiagų pasirinkimo šiandien adityvioji gamyba jau yra naudojama įvairiose pramonės šakose: statybų, tekstilės, automobilių pramonėje bei aviacijoje ir medicinoje. Statybų sektoriuje jau spausdinami ne tik atskiri struktūriniai pastato elementai, bet ir pagrindinės namo konstrukcijos [2]. Be to, 3D spausdinimas gali būti naudojamas ir kuriant būsimųjų statinių ar erdvių dizainą [3]. Tekstilės pramonėje taikant šias technologijas galima pagaminti tiek standžius, tiek lanksčius audinius [4], todėl ateityje šios technologijos gali būti naudojamos personalizuotos aprangos ar papuošalų gamybai. Automobilių pramonėje adityviosios technologijos naudojamos ne tik atskirų detalių ar surinkimo vienetų gamybai, bet ir aplinkosaugos problemoms spręsti, pakartotinai panaudojant metalo laužą [5]. Paminėtina tai, kad aviacijoje 3D spausdinimas leidžia mažinti tiek neigiamą poveikį gamtai, tiek gamybos išlaidas [6]. Adityvioji gamyba taip pat plačiai pritaikoma medicinos sektoriuje įvairių individualių implantų gamyboje [7,8], 3D spausdinti anatomiciniai modeliai dažnai naudingi planuojant operacijas [9]. Adityvioji gamyba taip pat tapo svarbia „Pramonės 4.0“ dalimi. „Pramonė 4.0“ – tai naujausias žingsnis pažangiųjų technologijų automatizavimo link. Čia svarbią rolę atlieka pažangūs adityviųjų technologijų sprendimai, skatinantys pramonės ekonomikos konkurencingumą, informacinių technologijų integracijos akivaizdoje. Dėl savo universalumo, adityvioji gamyba yra vienas pagrindinių veiksmų skatinančių „Pramonės 4.0“ plėtrą, nes įdiegiant jas į gamybos procesą yra mažinamos laiko sąnaudos, piniginės lėšos, gerokai padidėja proceso efektyvumas [10]. Įdiegiant šias technologijas optimizuojamas gamybos procesas, sudaromos sąlygos tiek greitajai prototipų gamybai, tiek visiškai decentralizuotiems pramonės procesams. Išskirtinis 3D spausdinimo privalumas yra tai, kad medžiaga yra pridėjama prie gaminio, o ne pašalinama iš ruošinio. Tai suteikia galimybę gaminti įvairaus funkcionalumo ir sudėtingus gaminius sparčiau, su mažesnėmis finansinėmis išlaidomis ir susidarant minimaliam atliekų kiekiui. Sparčiai plečiantis adityviosios gamybos pritaikymui, taip pat didėja ir šio proceso metu atsirandančių atliekų kiekis. Tai skatina ieškoti galimybių ir metodų, kaip būtų galima šias atliekas panaudoti antrą kartą. Pagrindinės 3D spausdinimo atliekos yra pagalbinės konstrukcijos bei brokuoti gaminiai. Pagrindinės medžiagos, naudojamos 3D spausdinimo technologijoje, yra termoplastikai. Nors plastikų perdirbimas šiomis dienomis yra dažnai taikoma praktika, adityviosios gamybos metu susidarantių atliekų pakartotinis panaudojimas vis dar yra nemažas iššūkis. Įvertinus plastikų keliamą grėsmę aplinkai bei adityviosios gamybos plėtrą, akivaizdu, jog tyrimai šioje srityje yra aktualūs ir reikalingi.

Tikslas: įvertinti ir išanalizuoti lydžiosios masės formavimo technologijos sukurtų plastiko atliekų antrinio panaudojimo galimybes.

Uždaviniai:

1. sukurti spausdinimo metu atsirandančių PLA termoplastiko atliekų perdirbimo technologiją;
2. įvertinti perdirbto plastiko tinkamumą lydžiosios masės formavimo spausdinimo technologijai;
3. atlikti perdirbto ir pirminio plastiko bandinių mechaninių savybių palyginimą;
4. įvertinti perdirbimo proceso atsiperkamumą, ekonominę naudą ir išlaidas.

1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje pateikiamas įvadas į 3D spausdinimo technologiją, aptariami šios technologijos privalumai. Taip pat aprašomi pagrindiniai 3D spausdinimo technologijos metodai. Galiausiai pateikiama išsami lydžiosios masės formavimo technologijos, susidarantių atliekų ir jų perdirbimo galimybių analizė.

1.1. Adityviosios gamybos privalumai

3D spausdinimas, lyginant su tradiciniais gamybos metodais, turi nemažai privalumų, kurie ir lėmė sparčią šių technologijų plėtrą įvairiose pramonės srityse. Vienas esminių privalumų, lyginant šias technologijas su tradiciniais gamybos metodais yra tai, kad detalė yra pagaminama pridodant medžiagą, o ne ją nupjaunant nuo ruošinio. Tai leidžia gaminti universalius, sudėtingos formos ir geometrijos gaminius, nes produkto geometrinį sudėtingumą apriboja nebe gamybos technologijos ribotumas, o norimas funkcionalumas ir dizainas. Kompleksiškos detalės, pavyzdžiui, trimatės struktūros su susiaurinimais ar ertmėmis, dažniausiai yra sunkiai ar labai brangiai pagaminamos tradicinėmis gamybos technologijomis kaip tekinimas, frezavimas ar liejimas. Adityvioji gamyba leidžia greitai ir efektyviai pagaminti net ir tuščiavidures struktūras. Tokios sudėtingos geometrijos gali būti sukurtos būtent dėl to, kad medžiaga naudojama (pridedama) tik tose vietose, kur jos reikia. Taigi adityvioji gamyba suteikia gamintojams maksimalią geometrinių dizaino laisvę. Galimybė lengvai, greitai ir ekonomiškai pagaminti sudėtingas detales ar jų junginius, leidžia gerokai sumažinti gamybos ir pasiruošimo išlaidas.

3D spausdinimas taip pat dažnai yra kur kas greitesnis ir pigesnis procesas lyginant su tradicinėmis gamybos technologijomis, ypač gaminant mažas arba vidutinio dydžio detales nedideliais kiekiais. Tai ypač akivaizdu atliekant lyginimą su tradicinėmis liejimo technologijomis. Pagrindinė to priežastis yra tradicinėje gamyboje naudojamų liejimo įrankių ir formų kūrimas. Pavyzdžiui, naudojant injekcinį liejimą, pagaminti daug smulkių detalių gali užtrukti vos kelias minutes ar net sekundes, tačiau kol yra pagaminama speciali ir brangi liejimo forma, visas gamybos procesas įprastai užsitęsia iki kelių savaičių ar mėnesių. Dėl šių injekcinį liejimą apsunkinančių, faktorių 3D spausdinimas yra kur kas lankstesnė technologija.

Dažnai gaminant sudėtingos konstrukcijos ar formos detales reikia apjungti injekcinio liejimo, apdirbimo, sujungimo ir kitus procesus, o tai turi įtaką galutinei gaminio kainai. Reikia paminėti, kad 3D spausdinimo technologijomis detalė dažnai yra pagaminama viena operacija. Taip pat siekiant padengti tradicinės gamybos metu atsirandančius gamybos įrankių, surinkimo, darbo jėgos bei jau anksčiau minėtų liejimo formų išlaidas įmonės priverstos galvoti apie masinę gamybą. Ši sąlyga 3D spausdinimo technologijoms dažniausiai negalioja ir detalės gamybos sąnaudos beveik visuomet išlieka tokios pačios, nepriklausomai nuo gaminamo kiekio. Prie tradicinės gamybos išlaidų taip pat prisideda ir transportavimo išlaidos, o kompaktiškus ir lengvai prieinamus tam tikros technologijos 3D spausdintuvus nesudėtinga naudoti vietoje.

Kitas svarbus aspektas yra galimybė personalizuoti gaminius. Kadangi kiekvieno papildomo vieneto gamybos sąnaudos yra vienodos, gaminių galima keisti neribotai. Šį privalumą galima išnaudoti prototipams kurti. 3D spausdinimo metu prototipas gali būti gaminamas daug kartų, vis atliekant konstrukcijos pakeitimus, kol pasiekiamas norimas rezultatas. Prototipavimas yra ypač svarbus prieš pradodant gaminti masinę gamybą, tačiau naudingas ir tolimesnėje gamybos proceso dalyje, atliekant gaminio patobulinimus prieš tai atsižvelgus į vartotojų atsiliepimus. Tai padaro šią technologiją ne

tik patrauklia gamintojams, bet ir prisideda prie socialinio įtraukimo skatinimo [11]. Tokiu būdu gali būti gaminami tiek ypatingiems poreikiams, konkrečiam atvejui ir pacientui pritaikyti implantai, tiek individualizuota įvairių apimčių aprangos prekių gamyba.

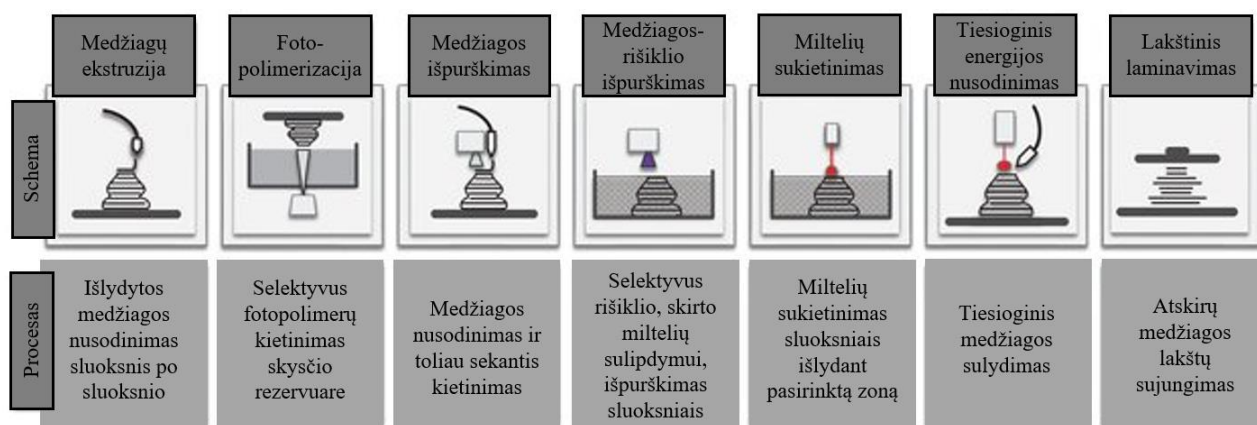
Adityvioji gamyba taip pat yra sąlyginai draugiška aplinkai technologija. Lyginant su tradiciniais gamybos metodais yra mažinamas anglies dioksido pėdsakas, sunaudojama mažiau energijos bei žaliavų ir sukuriama mažiau atliekų. Tam įtaką turi unikali 3D spausdinimo savybė gaminti gaminį sluoksnis po sluoksnio, o ne nupjaunant ją nuo ruošinio, nesvarbu ar tai būtų modelis, prototipas, įrankis, forma, ar galutinis produktas. Dažniausiai pagrindinės šių technologijų atliekos yra atraminės konstrukcijos arba brokuotos detalės. 3D spausdinimo CO₂ pėdsaką mažina ir retesnis produktų transportavimo poreikis ar transportavimas daug mažesniais atstumais. Be to, naudojant 3D spausdintuvus galima spausdinti pagal poreikį ir mažomis partijomis, užuot kaupus atsargines ir perteklines dalis sandėlyje.

Dar vienas svarbus adityviosios gamybos privalumas yra platus medžiagų spektras. Spausdinimo procese, priklausomai nuo pasirinktos įrangos ir technologijos, gali būti naudojamos skirtingų būvių ir struktūrų medžiagos, pradedant dažniausiai naudojamais polimerais ir baigiant metalais [12], keramika [13] ar kompozitais [14]. 3D spausdinimas suteikia galimybę gamybai naudoti ne tik standartines medžiagas, bet ir tokias medžiagas kaip tekstilė [15], cementas [16] ar net bioaktyvūs rašalai, kuris ateityje galėtų būti naudojamas kaulinio audinio inžineriniams sprendimams [17].

1.2. Adityviosios gamybos technologijos

Nemažai 3D spausdinimo privalumų, tokių kaip platus spausdinimo medžiagų pasirinkimas ar dizaino ir konstrukcijos laisvė gaminant sudėtingas konstrukcijas, yra įmanoma dėl plataus adityviosios gamybos technologijų spektro. Technologijos gali skirtis detalės formavimo principais, naudojamomis medžiagomis, skirtinga paviršiaus kokybe, mechaninėmis savybėmis, gamybos trukme ar kaina.

Adityviosios gamybos technologijos pagal jų esminius veikimo principus yra klasifikuojamos į 7 kategorijas: medžiagų ekstruziją (angl. *material extrusion*), fotopolimerizaciją (angl. *vat photopolymerization*), medžiagos išpurškimą (angl. *material jetting*), medžiagos-rišiklio išpurškimą (angl. *binder jetting*), miltelinį sukietinimą (angl. *powder bed fusion*), tiesioginį energijos nusodinimą (angl. *direct energy deposition*) ir lakštinį laminavimą (angl. *sheet lamination*) [18]. Pirmame paveiksle atvaizduotos jų schemas bei trumpai aprašyti veikimo principai.



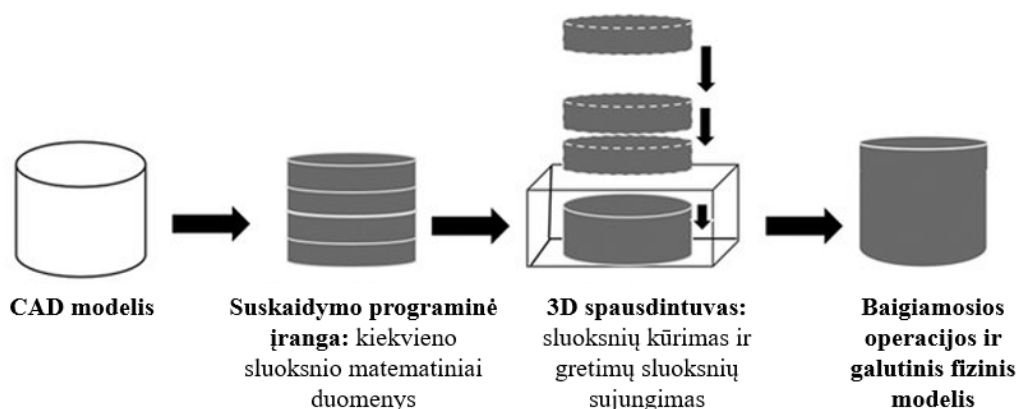
1 pav. Adityviosios gamybos metodų schemas ir procesai [19]

Adityviosios gamybos technologijos taip pat gali būti klasifikuojamos pagal naudojamos medžiagos būseną ir metodus naudojančius [15]:

- kietas medžiagas (laminavimas (angl. *laminated object manufacturing*), lydžiosios masės formavimas (angl. *fused deposition modelling*), elektrinio lanko adityvioji gamyba (angl. *wire and arc additive manufacturing*), lydymas elektronų spinduliais (angl. *electron beam free form fabrication*));
- miltelines medžiagas (selektyvus kietinimas lazeriu (angl. *selective laser sintering*), elektronų pluošto lydymas (angl. *electron beam melting*), selektyvus lydymas lazeriu (angl. *selective laser melting*), metalo kietinimas lazeriu (angl. *laser metal deposition*));
- skystas medžiagas (medžiagų išpurškimas (angl. *material jetting*), stereolitografija (angl. *stereolithography*), skaitmeninės šviesos apdorojimas (angl. *digital light processing*)).

Nepaisant skirtingų medžiagų bei metodų joms sukietinti, 3D spausdinimas dažniausiai susideda iš kelių pagrindinių etapų [20] atvaizduotų antrame paveikslėlyje:

1. Pirmame žingsnyje yra sukuriama norimo objekto CAD (trimatis skaitmeninis) modelis. Prieš pradėdant suprojektuoto prototipo gamybą, šiame žingsnyje taip pat galima atlikti įvairias simuliacijas ar baigtinių elementų analizes, nustatyti gaminamo modelio mechaninėms savybėms, aplinkos poveikiui ar nuovargiui. Šios simuliacijos ir skaitmeniniai modeliai padeda išvengti broko, pakartotinos gamybos, o tai leidžia mažinti finansines išlaidas ir laiko sąnaudas.
2. Sekantis žingsnis yra modelio paruošimas spausdinimui. Šis žingsnis susideda iš kelių etapų. Pirmiausia turi būti sugeneruojamas modelio standartinės teseliacijos kalbos (.stl) failas. Tuomet jis įkeliamas į specialią programą (angl. *Slicer programme*), kurioje objektas yra suskaidomas į sluoksnius, pagal pasirinktus parametrus, sukuriama gamybos programa. Objekto gamybos programa dar gali būti vadinama G kodu.
3. Trečiajame žingsnyje yra pagaminamas trimatis objektas. Šis etapas atliekamas skirtingais būdais, priklausančiais nuo pasirinkto adityviosios gamybos technologijos, pagal G kodą sluoksnis po sluoksnio formuojant norimą objektą 3D spausdintuvu.
4. Paskutiniame žingsnyje yra atliekamos tam tikros baigiamosios operacijos. Viena jų gali būti pagalbinių konstrukcijų pašalinimas, šlifavimas, dažymas, smėliavimas ar galvanizavimas.



2 pav. 3D spausdinimo proceso etapai [21]

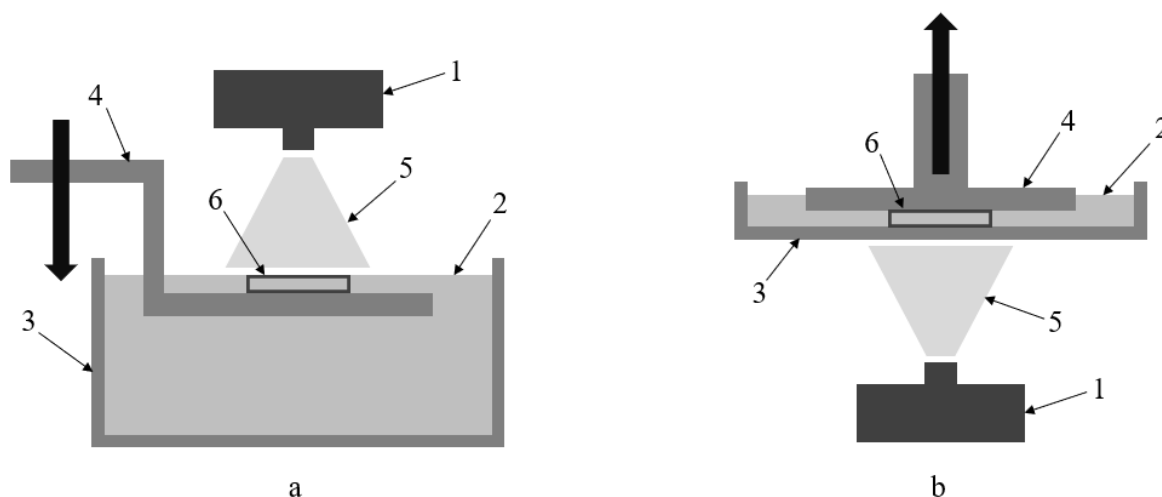
Šiuo metu populiariausi 3D spausdinimo metodai yra: selektyvus sukietinimas lazeriu (SKL), stereolitografija (SLA) ir lydžiosios masės formavimas (LMF).

1.3. Stereolitografija

Vienas anksčiausiai susiformavusių 3D spausdinimo metodų yra stereolitografija (SLA). Šis metodas yra išskirtinis, nes detalių gamyba atliekama vykdant skystų dervų (fotopolimerų) fotokietinimo procesą. Rezervuare esanti skysta derva yra sukietinama panaudojant ultravioletinių spindulių (UV) lempą arba lazerį. Fotokietinimo metu susidaro tinkliniai ryšiai, todėl dervos būseną pakinta iš skystosios į kietąją.

Klasifikuojant pagal lazerio padėtį ir platformos judėjimo trajektoriją yra išskiriami du pagrindiniai SLA spausdintuvų tipai. Standartiniai SLA spausdintuvai (žr. 3 pav., a) veikia iš apačios į viršų, antrojo tipo SLA spausdintuvų (žr. 3 pav., b) veikimo principas yra priešingas – jie juda iš viršaus į apačią [22]. Standartiniai SLA spausdintuvai yra naudojami rečiau, juose spausdinimo metu UV lazeris apšvitina skystą polimerą iš viršaus tuo pat metu, kai spausdinimo platforma leidžiasi į apačią.

Dažniau naudojami antrojo tipo stereolitografijos spausdintuvai. Tokio tipo spausdintuvuose lazeris (1) yra įrengtas apačioje ir polimerą (2) iš apačios apšvitina per rezervuaro (3) dugną. Pradedant spausdinimą, SLA atvirkštinio veikimo įrenginiu, polimeru užpildytu rezervuaru spausdinimo platforma (4) juda žemyn tol, kol tarp spausdinimo platformos ir rezervuaro dugno lieka plonas skysto polimero sluoksnis. Tuomet UV lazerio spinduliu (5) šis dervos sluoksnis yra sukietinamas. Sekančiame žingsnyje platforma šiek tiek pakyla ir tokiu būdu ant jau sukietėjusio dervos sluoksnio automatiškai užliejamas naujas skysto fotopolimero sluoksnis. Platformai nusileidus tiek, kad tarp sukietėjusio sluoksnio ir spausdinimo platformos apačios atstumas būtų lygus vieno sluoksnio aukščiui, fotokietinimo procesas vėl kartojamas. Taip sluoksnis po sluoksnio suformuojamas modelis (6).



3 pav. SLA spausdintuvų schemas: a) – standartinio, b) – atvirkštinio

Antrojo tipo stereolitografijos metodas yra populiariesnis, nes lyginant su standartiniu, pasižymi keliais privalumais. Pirmiausia atvirkštinis metodas yra saugesnis žmogui dėl jo konstrukcijos. Lazeriui esant įrenginio apačioje, po rezervuaru, darbuotojas yra apsaugotas nuo apšvietos bei galimai kenksmingų spindulių. Sandarumas yra dar vienas šio metodo privalumas. Kadangi procesas vyksta izoliuotoje aplinkoje, tarp dviejų paviršių (spausdinimo platformos ir rezervuaro dugno) bei dar nesukietinto skysto polimero, tai leidžia ir sukietinamą fotopolimerą apsaugoti nuo išorinių veiksnių.

Kai detalė yra traukiama iš dervos, o ne nuleidžiama į dervą, proceso metu reikia ir mažesnio dervos kiekio. Dėl šios priežasties galima gerokai sumažinti spausdinimo medžiagai tenkančias medžiagos išlaidas. Įprastai SLA spausdintuvuose nesukietinta derva gali būti naudojama pakartotinai, tačiau vis tiek gali pasitaikyti neplanuoti sukietintų dervos dalelių, kurias būtina išfiltruoti. Taigi naudojant atvirkščiuosius SLA spausdintuvus mažesni dervos kiekiai gali būti papildomai paveikti ir išsaugoma daugiau kokybiškos dervos.

Kadangi atvirkštiesiems SLA spausdintuvams reikia mažesnės dervos talpyklos, šie spausdintuvai gali būti mažesni ir juose paprastai būna mažiau mechaninių dalių. Pavyzdžiui, iš apačios į viršų spausdinantiems spausdintuvams, priešingai nei standartiniams SLA spausdintuvams, nereikia volelio. Volelis įprastai yra naudojamas naujo dervos sluoksnio paskirstymui, tačiau atvirkščiuosiuose spausdintuvuose veikiant gravitacijai, tolygus dervos pasiskirstymas įvyksta automatiškai. Vienas svarbiausių iš viršaus į apačią veikiančių spausdintuvų privalumų yra aukštesnė ir tikslesnė spausdinamų detalių paviršiaus kokybė. Gamybos metu detalei visu paviršiumi kontaktuojant su skystu fotopolimeru ir lygiu rezervuaro dugnu užtikrinama gera detalių paviršiaus kokybė [23].

Stereolitografijos fotopolimerinės dervos paprastai yra sudarytos iš kelių pagrindinių sudedamųjų dalių: monomerų, oligomerų / rišiklių, fotoiniciatorių ir kitų priedų. Būtent monomerai ir oligomerai lemia tinklinius ryšius. Susidarius tinkliniams ryšiams dervos būseną pakinta iš skystosios į kietąją. UV spindulių veikiamoje dervoje esantys fotoiniciatoriai skyla į radikalus. Tuomet radikalai reaguodami su oligomerais sudaro ilgas tinklines polimerų grandines [24]. Kiti, į dervos sudėtį įeinantys komponentai, naudojami, kad būtų pagerintos tam tikros savybės arba suteikiamos naujos. Vieni iš dažnai naudojamų komponentų yra pigmentai, kurie suteikia dervai norimą spalvą. Taip pat tai gali būti nanomedžiagos, kurios yra dedamos siekiant pagerinti fotopolimero savybes.

Nors stereolitografijos metodu gaminant detales susidaro mažai atliekų, tačiau galimybės jas perdirbti yra ribotos. Tai lemia stereolitografijos metodui naudojamų žaliavų prigimtis. Lyginant su lydžiosios masės formavimo ir selektyvaus kietinimo lazeriu metodais, kuriuose naudojami termoplastikai, stereolitografija išsiskiria, nes joje naudojami reaktoplastai. Nors ir termoplastikai, ir reaktoplastai yra polimerai, jų savybės bei struktūra skiriasi. Šiuo atveju svarbu tai, jog šie polimerai skirtingai reaguoja į aukštos temperatūros aplinką. Žvelgiant į jų struktūrą, termoplastikai yra sudaryti iš ilgų linijinių polimerų grandinių, o reaktoplastai – iš tinklinių [25]. Apdorojus termoplastikus ir pakartotinai juos veikiant aukšta temperatūra, šie gali vėl išsilydyti. O pakartotinai kaitinant reaktoplastus, jų būseną nekinta ir forma išlieka ta pati. Taigi, turėdami mažą lydymosi temperatūrą, termoplastikai dažniau pritaikomi tokiuose procesuose, kur yra naudojamos perdirbtos medžiagos. Reaktoplastai, priešingai, turi aukštą lydymosi temperatūrą, todėl gali nepakeisdami geometrinių formų atlaikyti aukštas temperatūras ir yra dažniau naudojami tuomet, kai reikia didelio medžiagos patvarumo.

Stereolitografijos privalumai [26]:

- lengva išgauti sudėtingas konstrukcijas;
- nedaug atliekų, nesukietinta derva gali būti naudojama pakartotinai;
- kokybiškas detalių paviršius ir didelis matmenų tikslumas.

Stereolitografijos trūkumai [26]:

- dervos kaina yra sąlyginai didelė;
- lyginant su lydžiosios masės formavimo ir selektyvaus sukietinimo lazeriu spausdintuvais, reikia pakankamai dažnai keisti spausdinimo platformą. Šios problemos priežastys yra pažeidimai, atsirandantys nuo spausdinimo platformos nuimant detales;
- stereolitografijos metodu pagaminti modeliai yra jautrūs saulės spinduliams, todėl ilgą laiką veikiami saulės spindulių gaminiai gali būti pažeisti, gali pakisti jų savybės.

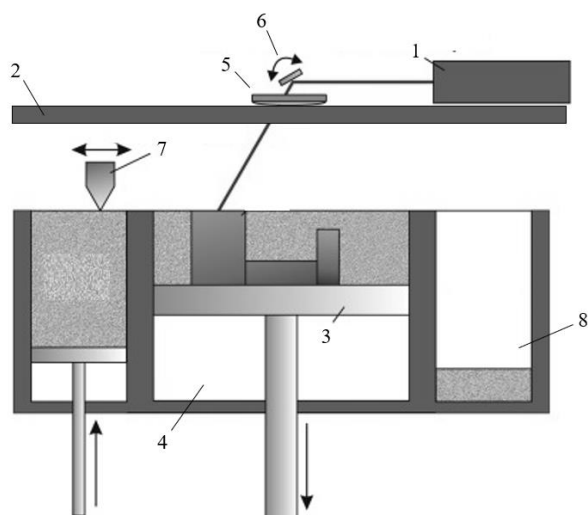
1.4. Selektivus kietinimas lazeriu

Selektyvus sukietinimas lazeriu (SKL) yra dar viena plačiai paplitusi 3D spausdinimo technologija. Ji skirta gaminti detalėms iš termoplastikų [27], metalo [28], keramikos [29], smėlio [30] ir įvairių kompozitų [31]. SKL proceso metu miltelių pavidalo medžiaga yra sluoksnis po sluoksnio sulydoma, panaudojant infraraudonųjų spindulių lazerio šilumą. Taigi esminiai SKL spausdintuvo (žr. 4 pav.) struktūriniai elementai yra galingas lazeris (1) bei infraraudonosios spinduliuotės kaitinimo elementas (2).

Selektyvaus sukietinimo lazeriu procesas susideda iš kelių žingsnių [32]. Pirmajame žingsnyje termoplastiko miltelių sluoksnis yra paskirstomas ant SKL spausdintuvo kameroje (4) esančios Z ašimi judančios platformos (3). Spausdintuvo kamera dažniausiai būna užpildyta inertinėmis dujomis (pvz., azotu). Tai atliekama, siekiant išvengti prastesnės detalių kokybės dėl žaliavos oksidacijos aplinkos ore esančiu deguonimi. Be to, SKL 3D spausdinimo metu susidaro garai, galintys užteršti prietaiso konstrukcines dalis. Inertinės dujos padeda eliminuoti ir šią problemą.

SKL technologijos sekančiame žingsnyje, panaudojant infraraudonąją spinduliuotę, miltelių pavidalo medžiaga yra pakaitinama iki tam tikros temperatūros. Parenkama tokia temperatūra, kuri yra aukštesnė nei žaliavos stiklėjimo temperatūra, tačiau žemesnė nei jos lydymosi temperatūra. Po to, žaliavos milteliai lokaliai sluoksnis po sluoksnio yra sulydomi lazeriu. Sulydomos sluoksnio srities forma, atitinka gaminamos detalės skerspjūvio formą būtent tame sluoksnyje. Tam, kad milteliai būtų sulydyti, iš lazerio šaltinio yra skleidžiamas lazerio spindulys. Šis spindulys optiniais komponentais (5) sufokusuojamas ir skaitytuvų sistema (6) nukreipiamas į tam tikrą spausdinamos detalės skerspjūvio poziciją.

Kitas žingsnis yra platformos nusileidimas atstumu, lygiu vieno spausdinamos detalės sluoksnio aukščiui. Tuomet spausdintuve esančia mente arba voleliu (7) ant platformos automatiškai pasklaidomas naujas medžiagos sluoksnis. Perteklinis medžiagos kiekis yra pašalinamas nustumiant jį į perteklinės medžiagos rezervuarą (8). Žaliava iš šio rezervuaro, po sijojimo, gali būti panaudojama kito spausdinimo metu.



4 pav. SKL spausdintuvo schema [32]

Šie etapai kartojami tol, kol atspausdinamas paskutinis gaminamos detalės sluoksnis ir detalė yra pilnai pagaminta. Reikia nepamiršti, jog, po to, seka būtini baigiamieji darbai (pvz., detalių valymas, smėliavimas).

Selektyvaus sukietinimo lazeriu technologija suteikia galimybę gaminti itin sudėtingos konstrukcijos 3D detales. Nepaisant SKL technologijos privalumų ir ypatybių, yra tam tikrų šalutinių procesų bei fizikinių reiškinių (pvz., miltelių sklaida, koalescencija, lazerių sąveika, šiluminė elgsena), susijusių su SKL metodu į kuriuos būtina atsižvelgti, siekiant užtikrinti maksimalią šiuo būdu pagamintų detalių kokybę [33].

Selektyvus sukietinimas lazeriu yra laikomas vienu universaliausių gamybos procesų, atsižvelgiant į medžiagų sąnaudas ir struktūros stabilumą. Šiuo metodu pagamintų detalių eksploatacinės savybės priklauso nuo naudojamo termoplastiko miltelių savybių ir proceso parametrų. Optimizavus parametrus, galima pasiekti pageidaujamas mechanines savybes spausdinamiems gaminiams. Tačiau dėl SKL metodu pagamintų detalių matmenų tikslumo bei žaliavų apribojimų reikia tolimesnės šios technologijos plėtros [34].

SKL metodo privalumai:

- nereikia pagalbinių konstrukcijų, nes pagalbines funkcijas atlieka spausdinimo procese naudojami milteliai. Detalės spausdinimo metu yra apsuptos miltelių, kurie detales laiko tam tikrose pozicijose, todėl po spausdinimo nėra pagalbinių konstrukcijų, kurias reikėtų išlaužyti,
- lyginant su LMF metodu pagamintomis detalėmis, SKL metodu pagamintos detalės pasižymi aukštesne detalių paviršiaus kokybe bei mechaninėmis savybėmis,
- spausdinant didesnius detalių kiekius, ši technologija yra greitesnė ir gali būti pigesnė nei spausdinant detales LMF metodu.

SKL trūkumai:

- baigiamosios operacijos atspausdinus detales šia technologija yra privalomos. Po spausdinimo atliekamas valymas, smėliavimas, plovimas,

- be būtinu baigiamųjų operacijų, gali reikėti papildomo apdorojimo mechaniniais ar cheminiais metodais. Šie procesai atliekami siekiant užtikrinti aukštesnę detalių paviršiaus kokybę bei didesnį matmenų tikslumą.

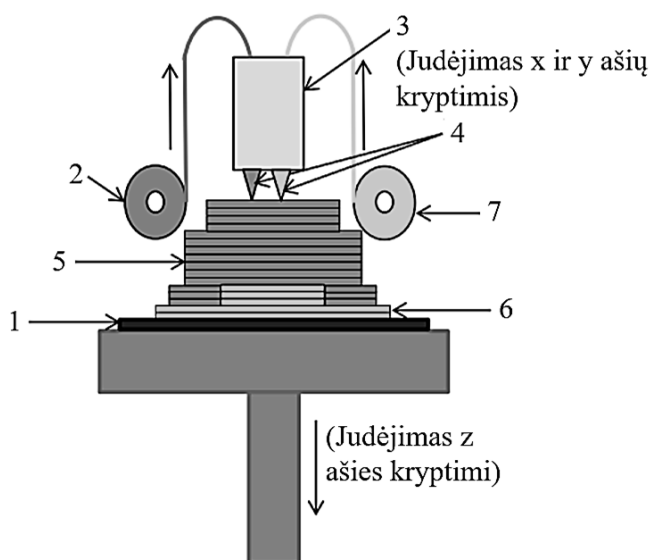
1.5. Lydžiosios masės formavimas

Tiek pramonėje, tiek privačiame sektoriuje labiausiai paplitęs 3D spausdinimo metodas yra lydžiosios masės formavimas (LMF) [35]. Kartais tokio tipo spausdintuvai naudojami net ir namų sąlygomis atliekant asmeninius projektus ir užsiimant 3D spausdinimu kaip pomėgiu. Būtent LMF tipo spausdintuvai pasirenkami dėl mažos kainos, kompaktiškumo ir paprasto naudojimosi.

Lydžiosios masės formavimo technologija yra tendencingai naudojama kuriant fizinius ir funkcinis prototipus su skaitmenine gamyba. Fiziniai modeliai tokiu būdu gali būti sukuriami vos per kelias valandas su minimaliais matmenų svyravimais, nepriklausomai nuo geometrinių apribojimų. Svarbus šios 3D spausdinimo technologijos išskirtinumas yra galimybė lanksčiai naudoti tokias medžiagas: termoplastikus, polimerinius kompozitus, lydinius ir metalus su žema lydymosi temperatūra [36].

Spausdinimo procesas lydžiosios masės formavimo spausdintuvu (žr. 5 pav.) yra gana paprastas – termoplastikas yra sluoksnis po sluoksnio išliejamas ant spausdinimo platformos (1). Tam pirmiausia reikia termoplastiko giją (2) išlydyti spausdinimo galvutėje (3). Išlydytas termoplastikas per spausdinimo antgalį (angl. *nozzle*) (4) išliejamas ant įkaitintos spausdinimo platformos. Procesu metu spausdintuvo galvutė juda pagal anksčiau minėtą, specialioje paruošimo programoje sukurtą G kodą. Po pirmojo sluoksnio atspausdinimo, tarpas tarp spausdinimo platformos ir spausdinimo antgalio turi padidėti atstumu, lygiu vieno spausdinimo sluoksnio aukščiui. Priklausomai nuo spausdintuvo konstrukcijos spausdinimo galvutė gali kilti į viršų arba spausdinimo platforma leistis žemyn. Taip kartojant šiuos žingsnius, sluoksnis po sluoksnio yra pagaminama norima detalė (5).

Spausdinant detales lydžiosios masės formavimo metodu reikia atsižvelgti, jog dažniausiai detalėms atspausdinti reikia pagalbinės konstrukcijos (6). Pasibaigus spausdinimo procesui šios konstrukcijos turi būti pašalinamos nuo pagamintos detalės. Tačiau pašalinant pagalbinės konstrukcijas gali būti pažeidžiamas detalės paviršius, o kartais net nulaužiami smulkūs elementai. Įprastai pagalbinės konstrukcijos spausdinamos iš tos pačios medžiagos, kaip ir visa detalė, tik retesne struktūra. Siekiant išvengti neigiamos įtakos detalės paviršiaus kokybei, pagalbinės konstrukcijos gali būti spausdinamos iš kitos, lengviau pašalinamos medžiagos (7). Tokios medžiagos pavyzdžiu galėtų būti polivinilo alkoholis (PVA), tirpstantis šiltame vandenyje [37]. Kai detalei atspausdinti būna parinktas polilaktinės rūgšties polimeras (PLA), pagalbinėms konstrukcijoms atspausdinti dažnai naudojamas polietilentereftalato glikolis (PETG) [18]. PLA su PETG spausdinimo metu nesukuria stiprių ryšių tarp sluoksnių, todėl po spausdinimo pagalbinės konstrukcijos gali būti lengvai ir švariai pašalinamos. Svarbu įvertinti, jog spausdinant modelį ir pagalbinės konstrukcijas iš skirtingų žaliavų, reikia atskirų spausdinimo antgalių.



5 pav. LMF spausdintuvo schema [38]

Atliekant 3D spausdinimą lydžiosios masės formavimo metodu vieni svarbiausių parametru yra sluoksnio aukštis, spausdinimo ir platformos temperatūra, spausdinimo antgalio skersmuo, spausdinimo greitis, spausdinimo antgalio skersmuo bei modelio užpildymo santykis (procentas). Šie parametrai labiausiai nulemia modelio mechanines savybes bei paviršiaus kokybę [39].

Spausdinant detales lydžiosios masės formavimo metodu vienas iš parametru, kurį galima parinkti, yra sluoksnio aukštis. Adityviojoje gamyboje sluoksnio aukštis matuojamas z ašies kryptimi. Šis parametras yra tiesiogiai susijęs su detalės gamybos trukme ir paviršiaus kokybe. Kuo sluoksnio aukštis mažesnis, tuo daugiau sluoksnių reikia atspausdinti, todėl spausdinimo trukmė pailgėja. Spausdinant lydžiosios masės formavimo metodu, sluoksnio aukštis įprastai gali svyruoti nuo 0,05 mm iki 0,3 mm [40]. Tačiau šis parametras gali nulemti ne tik spausdinimo trukmę. Esant dideliame spausdinimo sluoksnio aukščiui suprastėja gaminio paviršiaus kokybė, nes jaučiami atskiri detalės sluoksniai. Taigi kiekvienu atveju svarbu įvertinti, kuris faktorius yra reikšmingesnis – spausdinimo trukmė ar paviršiaus kokybė.

Spausdinimo temperatūra yra vienas labiausiai ištirtų lydžiosios masės formavimo proceso parametru. Šis parametras turi įtaką LMF metodu atspausdintų detalių tikslumui. Detalių matmenų tikslumas yra būtinas, siekiant užtikrinti įrangos patikimumą, nes gaminamos detalės turi atitikti numatytus matmenis. Ypač, jei detalės vėliau naudojamos surinkimuose, nes priešingu atveju pagamintos detalės gali netikti į suprojektuotą konstrukciją. Atliekant spausdinimą su aukštesne temperatūra, gija yra takesnė, gali laisviau plėstis. Dėl šios priežasties atsiranda didesni matmenų nuokrypiai [41]. Siekiant to išvengti, lydžiosios masės formavimo metodu gaminant detales svarbu parinkti tinkamą spausdinimo temperatūrą.

Spausdinimo greitis yra kitas svarbus parametras. Iš esmės jis nusako, kaip greitai 3D spausdintuvai gali atspausdinti detalę iš termoplastiko. Įprastai spausdinimo greitį apibūdina medžiagos kiekis, kuris yra išliejamas ant platformos per tam tikrą laiką. Spausdinimo greičiui įtaką turi užpildymo santykis (procentas), sluoksnio aukštis, ekstruzijos temperatūra. Kuo greičiau spausdintuvai spausdina, tuo daugiau medžiagos per tą patį laiką yra išliejama. Vidutinis lydžiosios masės formavimo spausdintuvų greitis yra apie 100 mm/sec. Galima rasti ir penkis kartus greičiau veikiančių LMF spausdintuvų, tačiau nustatyta, jog esant didesniame greičiui, gali būti sunkiau tiksliai

išgauti tam tikras smulkias formas. Taip pat nustatyta, jog spausdinimo greitis turi įtaką tiesių linijų, apskritimo ir kvadrato formos elementų atkartojamumui bei matmenų tikslumui [42].

Taip pat svarbu įvertinti spausdinimo antgalio skersmens įtaką spausdinimo proceso rezultatams. Kuo didesnis antgalio skersmuo, tuo platesnė termoplastiko gija išliejama iš 3D spausdintuvo. Esant platesnėms termoplastiko gijoms, sumažėja su kita gija sąveikaujantis gijos paviršiaus plotas. Taigi sumažėja ir galimybė tarp termoplastiko gijų įsiterpti orui. Kuo mažiau oro patenka į gaminamos detalės struktūrą, tuo geresnis detalės vientisumas, detalė būna stipresnė ir standesnė [43].

Kitas parametras – užpildymo santykis (procentas) – yra termoplastiko gijos kiekis, sunaudotas tam tikram elementui atspausdinti, dar kitaip žinomas kaip užpildymo tankis. Šis parametras daro tiesioginę įtaką atspausdinto modelio stiprumui, svoriui bei spausdinimo trukmei. Į užpildymo santykį svarbu atsižvelgti siekiant mažinti žaliavos sąnaudas bei gaminio kainą. Taip pat svarbus ir pasirinktas užpildymo raštas. Net nepasikeitus gaminio masei ar žaliavai, tačiau pakeitus užpildymo struktūrą, detalės mechaninės savybės gali skirtis. Yra nustatyta, jog detalės su linijine užpildo struktūra pasižymi didžiausiu tamprumo moduliu, nes naudojant šią struktūrą gaunamas geresnis sukibimas tarp sluoksnių ir mažinamas oro ertmių tūris [44].

LMF privalumai yra [45]:

- nedidelės gamybos išlaidos,
- trumpa gamybos trukmė – detalė gali būti atspausdinama vos per kelias valandas,
- technologijos ir įrenginių veikimo principas gali būti lengvai įsisavinamas, todėl patogu naudotis net ir pradedantiesiems vartotojams.

O prie LMF trūkumų priskiriama [45]:

- prasta detalės paviršiaus kokybė, lyginant su kitomis adityviosios gamybos technologijomis,
- atskirų spausdinimo sluoksnių matomumas, ypač spausdinant didesniu greičiu,
- prastesnės mechaninės savybės, lyginant su kitomis adityviosios gamybos technologijomis.

Vienas didžiausių lydžiosios masės formavimo trūkumų yra detalių anizotropiškumas, kuris ir lemia mažesnę detalių mechaninį stiprumą lyginant su tradiciniais gamybos metodais (pvz., injekciniu liejimu) pagamintomis detalėmis. Papildomi įtempiai LMF spausdinimo metu atsiranda išliejant karštą termoplastiko giją ant jau atvėsusio ankstesnio detalės sluoksnio [46].

1.6. LMF žaliavos

Kaip jau minėta anksčiau, 3D spausdinimui naudojamų medžiagų įvairovė yra labai didelė, tačiau pagrindinė šios technologijos žaliava vis tiek išlieka polimerai. Termoplastikai yra laikomi labiausiai tinkama žaliava lydžiosios masės formavimo procesui dėl jų žemos lydymosi temperatūros, kuri patenka į komerciškai prieinamų LMF spausdintuvų temperatūros diapazoną. Be to, detalės iš termoplastikų pasižymi tinkamu stiprumu ir dėl to gali būti panaudotos įvairiose srityse.

Kokio tipo ir būvio plastikai pasirenkami didele dalimi priklauso nuo konkretaus 3D spausdinimo metodo. Lydžiosios masės formavimui dažniausiai naudojami polimerai yra akrilnitrilo butadieno stirenas (ABS), polikarbonatas (PC), polipropilenas (PP), poliamidas (PA), polietilenas (PE), polimetilmetakrilatas (PMMA) ir polilaktinės rūgšties polimeras (PLA) [38].

Šiuo metu lydžiosios masės formavimo technologijoje, PLA yra laikoma perspektyviausia medžiaga. Dėl savo unikalių savybių ir ypatybių ši medžiaga plačiai naudojama daugelyje pramonės šakų. Lyginant su kitais termoplastikais, PLA turi nedidelį atsparumą smūgiams, žemesnę lydymosi temperatūrą ir sąlyginai mažą apdorojimo langą, t. y. norimas rezultatas gaunamas siaurose proceso parametrų ribose [47]. Be to, PLA yra hidrofobinis termoplastikas (netirpstantis vandenyje) ir pasižymi nedideliu irimo greičiu. Dėl didelio stiprumo bei tamprumo modulio ir bioskaidumo, PLA yra komerciškai prieinamas biologinės kilmės polimeras, naudojamas įvairiose srityse. Gaminant detales su lydžiosios masės formavimo technologija, PLA yra pasirenkamas ir vertinamas dėl jo efektyvumo ir puikių savybių priimtina kaina.

PLA turi ir nemažai kitų privalumų. Visų pirma šis polimeras pasižymi geru biologiniu suderinamumu, yra netoksiškas, nedirginantis ir esant poreikiui gali būti termiškai suskaidytas hidrolizės būdu. PLA yra sąlyginai standus, jo stiklėjimo temperatūra yra apie 60-70°C, o lydymosi temperatūra 170–180 °C. Naudojant PLA ilgą laiką, termoplastikas nepraranda nei savo plastiškumo, nei tvirtumo [48].

Priešingai nei dauguma plastikų, grynas sintetinis PLA yra gaunamas iš atsinaujinančių žemės ūkio išteklių, o ne iš naftos produktų. Cukranendrių, kukurūzų bei bulvių krakmolos gali būti pagrindinė žaliava šio termoplastiko gamybai, todėl PLA yra bioskaidus. Taigi tinkamomis sąlygomis PLA gali būti suskaidomas į vandenį, anglies dioksidą bei biomasę [49]. PLA irimą sąlygoja įvairūs procesai. Į juos įeina fotodegradacija, hidrolitiniai, oksidaciniai, terminiai, mikrobiologiniai ir fermentiniai procesai [50]. Kalbant apie PLA kompostavimą, šiam polimerui suirti, kompostuojant 50–60 °C temperatūroje, įprastai užtenka dviejų mėnesių [51].

1.7. LMF spausdinimo atliekos

Adityvioji gamyba yra laikoma ekologiškesne tradicinių gamybos metodų versija. Naudojant lydžiosios masės formavimo technologiją iš gaminių nereikia pašalinti santykinai didelio kiekio medžiagos, nes spausdinant detalę pagaminama sluoksniuojant medžiagą. Toks proceso modelis padeda gerokai sumažinti susidarantių atliekų kiekį. Kita vertus, dėl plataus 3D spausdintuvų naudojimo, ypač LMF technologijos, bei didelio vartotojų padarytų klaidų dažnio, susidarantių atliekų kiekis gali išaugti. Dauguma komercinių lydžiosios masės formavimo spausdintuvų vartotojų nėra tinkamai apmokyti jais naudotis. Dėl to, realiai sukuriamas atliekų kiekis gali būti didesnis nei būtų sukuriamas idealiomis proceso sąlygomis, be jokių žmogiškųjų ar prietaiso klaidų [52].

Įprastomis sąlygomis lydžiosios masės formavimo metu pagrinde susidaro dviejų tipų atliekos: pagalbinės konstrukcijos bei norimo rezultato neatitinkantys gaminiai. Pagalbinėms konstrukcijoms sunaudojamos medžiagos kiekiui įtaką gali turėti gaminamos detalės kompleksiskumas, orientavimas spausdinimo platformoje, neapgalvotas ir neoptimalus modelio projektavimas.

Lydžiosios masės formavimo metu susidaranti atliekos kelia aplinkosaugines ir ekonomines problemas [53]. Atliekant LMF proceso atliekų analizę, dažnai daugiausiai dėmesio skiriama po spausdinimo liekančiomis pagalbinėms konstrukcijoms. Tačiau toks sąlyginai mažas kiekis atliekų susidaro tik idealiomis proceso sąlygomis be jokių nuokrypių. Būtent lūkesčių neatitinkantys, brokuoti gaminiai yra didžioji LMF proceso metu susidarantių atliekų dalis [54].

Pramonės sektoriuje yra kritiškai svarbu atkreipti dėmesį į ilgalaikį technologijos tvarumą. Pasaulinis judėjimas, siekiant sušvelninti klimato kaitos požymius, neišvengiamai daro įtaką gamybos

tendencijas. Efektyvesnis išteklių panaudojimas suteikia galimybę mažinti gamybos žaliavų poreikį. Prie to teigiamai prisideda adityviosios gamybos technologijos. Tačiau svarbu galvoti ir apie kitą svarbų tvarumo aspektą – galimybę perdirbti ir pakartotinai panaudoti 3D spausdinimo atliekas.

Siekiant mažinti lydžiosios masės formavimo technologijoje atsirandančių atliekų problemą, yra siūlomi keli galimi sprendimo būdai. Pirmasis, jau anksčiau minėtas, būdas susidoroti su atliekomis, yra kompostavimas. Natūralus PLA atliekų skaidymas yra pasyvus būdas atsikratyti proceso metu susidarančių atliekų. Tačiau reikia nepamiršti, jog kompostuojant PLA į aplinką išsiskiria anglies dioksidas, kuris sukelia šiltnamio efektą [55]. Kadangi, šis reiškinys sukelia globalinį atšilimą, PLA kompostavimas nėra rekomenduojamas sprendimas, kovojant su 3D spausdinimo atliekomis.

Daugelyje šalių vis dar įprasta didelę dalį plastiko atliekų transportuoti į sąvartynus. Juose plastiko atliekos sparčiai kaupiasi ir kelią grėsmę aplinkai. Be to, jei norima palaikyti pakankamą PLA atliekų irimo greitį, reikia ypatingų aplinkos sąlygų, kurios sąvartynuose nėra užtikrinamos. Taigi yra svarbu atsakingai vertinti atliekų valdymą. Vis dažniau skatinama naudotis žiedinės ekonomikos principais, kad būtų atkurti ir pakartotinai panaudoti ištekliai.

Kitas sprendimas galėtų būti plastikų rūšiavimas ir perdirbimas perdirbimo centruose. Visų pirmą šis procesas gali būti sudėtingas ar neįmanomas dėl neegzistuojančio 3D spausdinimo atliekų žymėjimo, kurio dėl proceso ypatybių LMF atliekos dažniausiai neturi. Kita vertus, PLA lydymosi temperatūra yra mažesnė nei standartinių plastikų, todėl jis priskiriamas septintam plastikų tipui – „Kiti plastikai“. Septinto tipo plastikai yra arba plastikų mišiniai, arba dėl tam tikrų savybių negali būti priskirti kitoms plastikų grupėms ir perdirbami kartu su jais. Dėl šios priežasties PLA negali būti apdorotas kartu su kitais plastikais perdirbimo centruose.

Galiausiai prieinama prie sprendimo PLA atliekas perdirbti individualiai. Perdirbimas įprastai yra apibūdinamas kaip pakartotinis atliekų panaudojimas. Egzistuoja keli būdai, kurie gali padėti susidoroti su vis augančiu plastiko atliekų kiekiu. Dažniausiai atliekų regeneravimui arba transformavimui į produktus ar žaliavas turi būti atlikti įvairūs procesai. Pakartotinė ekstruzija, mechaninis perdirbimas, cheminis perdirbimas bei terminiai procesai, kurių metu gaunama energija.

Mechaninis termoplastikų perdirbimas susideda iš atliekų išskirstymo, valymo, smulkinimo ir pakartotinio išlydymo. Plastiko perdirbimas lyginant su kitų medžiagų – metalų, kompozitų ir keramikos – perdirbimu yra kompleksiškesnis [56]. Pagrindinis iššūkis siekiant naudoti perdirbtą termoplastiką yra susijęs su priemaišomis. Priemaišose gali būti skirtingų klasių ir skirtingą irimo lygį, dėl apdoravimo ir tarnavimo laiko, pasiekusių polimerų. Siekiant užtikrinti geras perdirbtos medžiagos mechanines savybes, priemaišų neturėtų būti arba jos turi būti beveik identiškos pagrindinei medžiagai.

Išskiriamas pirminis ir antrinis termoplastikų perdirbimas. Pirminis atliekų perdirbimas leidžia regeneruoti plastiko likučius be priemaišų. Pirminio perdirbimo metu gauto plastiko savybės yra artimos pradiniai medžiagai. Šis būdas dažnai naudojamas siekiant atsikratyti plastiko likučių susidarančių tam tikrose gamybos proceso etapuose, pavyzdžiui, vykstant ekstruzijos procesui.

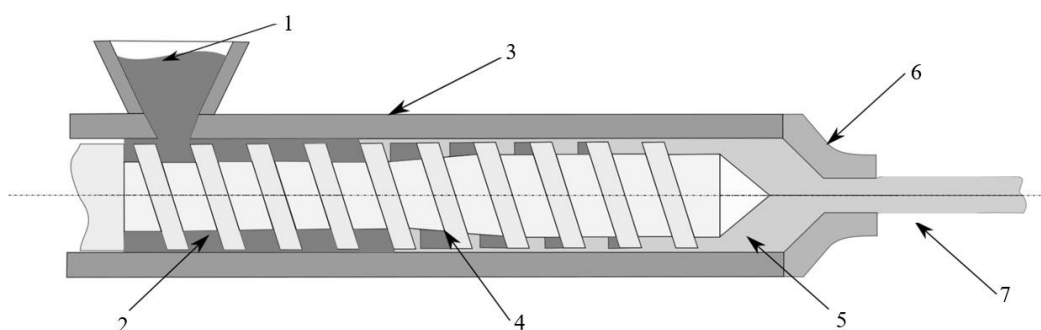
Antrinio perdirbimo metu dirbama su medžiagomis, kurios gali turėti priemaišų. Dėl to, prieš pradant perdirbimo procesus, pirmiausia iš plastiko pašalinami teršalai. Paskui vyksta tokie patys procesai kaip ir pirminio perdirbimo metu, tačiau tokiu būdu gautos medžiagos dažnai pasižymi šiek tiek prastesnėmis savybėmis, nes visiškai panaikinti priemaišų nepavyksta.

Kalbant apie terminius procesus, plastikai kaip energijos šaltinis, yra labai efektyvus energijos šaltinis. Nepaisant to, jog plastikų šilumingumas prilygsta mazutui, šis sprendimas būtų labai kenksmingas aplinkai [57]. Tokio tipo procesai kaip plastikų pirolizė, į aplinką gali išskirti dioksinus ir kitus organinius teršalus.

Taigi perdirbti plastikus yra būtina siekiant atsisakyti plastikų pirolizės ir spręsti lėtos plastikų irimo problemą. Kalbant apie aplinkosaugą, akivaizdu, jog efektyviausias plastiko atliekų valdymo būdas yra iš esmės mažinti plastikų naudojimą. Tačiau plastikai, ypač pakuočių formoje, yra labiau paplitusi ir ilgiau aplinkoje išliekanti medžiaga nei stiklas ar metalas. Tai lemia naudojimo paprastumas, vartotojiška visuomenė, savybių pranašumas bei mažesnės išlaidos. Kadangi sąvartynai yra tik laikinas sprendimas, svarbu inicijuoti žiedinę ekonomiką ir skatinti plastikų perdirbimą visuose procesuose, tarp jų ir adityviojoje gamyboje. Šis sprendimas potencialiai gali mažinti ne tik aplinkos taršą, bet ir išlaidas žaliavoms, dėl pakartotino panaudotos medžiagos panaudojimo.

1.8. PLA perdirbimas

3D spausdinimo technologijai perdirbti PLA įprastai yra naudojama ekstruzija. Ekstruzija tai procesas, kurio metu, naudojant ekstruderį (žr. 6 pav.), per norimo skersmens antgalį išstumiami medžiaga. Proceso metu, termoplastiko granulės arba milteliai yra pilami į bunkerį (1), iš kurio patenka į ertmę (2) tarp įkaitinto ekstruderio korpuso (3) ir sraigto (4). Sraigtas stumia išsilydžiusį plastiką (5) ekstruderio galvutės (6) link ir yra pro ją išliejamas į giją (7).



6 pav. Ekstruderio schema [58]

Ekstruzijos proceso metu dėl šlyties, temperatūros bei sąlyčio su deguonimi vyksta termoplastiko irimas. O termoplastiko fizikinės savybės daro didelę įtaką galutinių produktų kokybei. Pakartotinai atliekant termoplastiko ekstruziją aukštose temperatūrose gali kardinaliai pakisti medžiagos klampumas, molekulinė masė ar atsparumas trūkiui [59]. Be to, medžiagos kokybei įtaką gali turėti ir proceso temperatūra.

Correia ir kt. [60] atliko tyrimus siekiant sukurti pilnai uždara PLA perdirbimo schemą. Tačiau susidūrė su problema dėl PLA trapumo, kuris neleido tinkamai atlikti ekstruzijos ir išgauti vientisos perdirbto plastiko gijos. Parinkta ekstruzijos proceso temperatūra buvo 165-180 °C, o sraigto sukimosi greitis 4 aps./min. Toliau vykdant tyrimus, buvo dedami priedai siekiant sukurti ilgesnes polimero grandines ir pagerinti medžiagos mechanines savybes. Tačiau šiuo būdu išspręsti problemos taip pat nepavyko. Dėl nepavykusio ekstruzijos proceso, šių tyrimų metu, detalės iš 100 % perdirbto PLA lydžiosios masės formavimo technologija nebuvo atspausdintos.

Sasse'è ir kt. [61] taip pat atliko bandymus siekiant perdirbti PLA atliekas į 3D spausdinimui skirtas gijas. Parinkta proceso temperatūra kaitinimo zonoje buvo didėjanti nuo 170 °C iki 190 °C, o ties ekstrudero antgaliu temperatūra buvo 145 °C. Ekstrudero sraigto greitis buvo 15 aps./min. Šių tyrimų metu siekiant pagerinti termoplastiko savybes perdirbto PLA gija, koekstruzijos metodu buvo padengta pirminio PLA sluoksniu. Tačiau detalės pagamintos iš šiuo metodu sukurtos termoplastiko gijos pasižymėjo didesniu trapumu ir mažesne stiprumo riba tempiant nei detalės, pagamintos tik iš pirminio PLA termoplastiko.

Kuo ir kt. [62] pavyko sukurti kokybišką PLA giją, tačiau buvo naudojama tik 40 % perdirbto PLA. Proceso parametrai: ekstruzijos greitis 490 mm/min, temperatūra 184 °C. Tyrimo metu pavyko gauti perdirbto termoplastiko giją, iš kurios pagamintos detalės pasižymėjo didele stiprumo riba tempiant. Mažas pirminio PLA procentas gijos sudėtyje, leido sumažinti spausdinimui reikalingos medžiagos savikainą.

Atsižvelgiant į 3D spausdinimo technologijos plėtrą bei lydžiosios masės formavimo technologijos populiarumą svarbu vystyti adityviosios gamybos metu susidarančių atliekų perdirbimą. Apžvelgus tyrimus PLA pakartotinio panaudojimo tema, galima pastebėti, jog perdirbant PLA dar kyla nemažai iššūkių, todėl tolimesni PLA pakartotinio panaudojimo tyrimai yra aktualūs ir reikalingi.

2. Metodologija

Pagrindinis šio baigiamojo projekto tikslas yra sukurti PLA atliekų perdirbimo technologiją ir palyginti pirminio bei perdirbto termoplastiko bandinių mechanines savybes. Šiuos tyrimus galima suskirstyti į tris pagrindines dalis:

1. PLA termoplastiko gijos gamybą. Ši dalis apima PLA atliekų smulkinimą ir susmulkintų atliekų ekstruziją siekiant išgauti termoplastiko giją skirtą lydžiosios masės formavimo technologijai.
2. Tinkamumo spausdinimui analizę. Šis etapas apima iš perdirbto PLA termoplastiko pagamintos gijos tinkamumo spausdinimui LMF technologija vertinimą bei užsikišusio spausdinimo antgalio ir termoplastiko gijos mikroskopinę analizę.
3. Mechaninius bandymus. Šioje dalyje atliekami tempimo ir lenkimo bandymai siekiant palyginti pirminio ir perdirbto PLA bandinių mechanines savybes.

2.1. PLA termoplastiko gijos gamyba

Siekiant atlikti numatytus tyrimus apie metus laiko buvo kaupiamos įvairios termoplastiko atliekos, susidarančios 3D spausdinimo metu. Atrinktos tik tos atliekos, kurios susidarė naudojant lydžiosios masės formavimo technologiją ir „Prusament PLA” termoplastiką. Pagrindinės šios plastiko gijos mechaninės charakteristikos pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Pagrindinės „Prusament PLA” termoplastiko gijos mechaninės charakteristikos [63]

Lydomosi temperatūra, °C	Tamprumo modulis, GPa	Stiprumo riba tempiant, MPa	Stiprumo riba lenkiant, MPa	Lenkimo modulis, MPa	Stiklėjimo temperatūra, °C
180–220	2.3	45,6	103	3150	~ 60

2.1.1. Smulkinimas

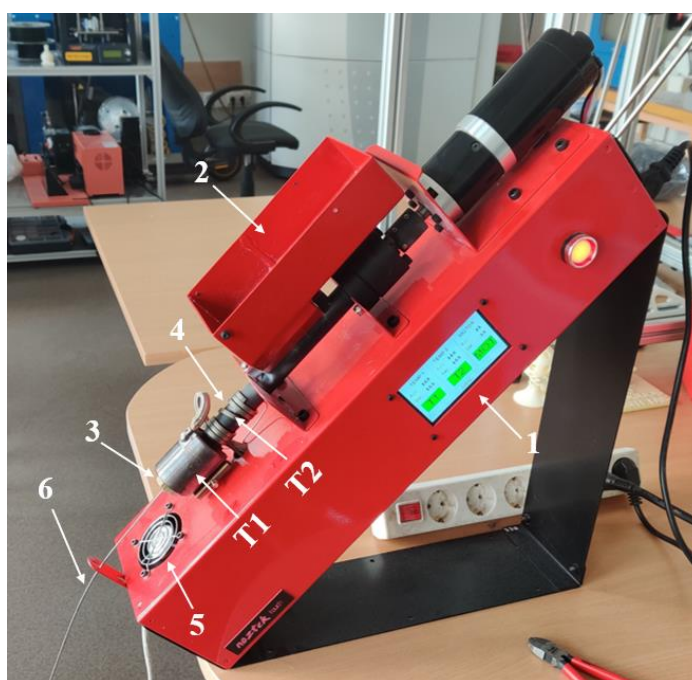
Smulkinimas yra būtinas prieš atliekant termoplastiko ekstruziją, nes net ir sąlyginai nedidelės atliekos yra per didelės, dėl ekstruzijos procese naudojamos įrangos (ypač dėl padavimo sraigto) apribojimų. Smulkinimas buvo atliekamas nestandartine smulkinimo įranga (gamintojas ir pagrindinės charakteristikos nežinomos) (žr. 7 pav.), sudaryta iš dviejų pagrindinių dalių: variklio su pavaromis (I) ir smulkinimo dalies (II). Plastiko atliekos buvo beriamos į bunkerį (1) ir smulkinamas besisukančiais peiliais (2). Peilių sukimosi kryptis gali būti reguliuojama jungtuku (3)



7 pav. Smulkinimo įranga

2.1.2. Ekstruzija

Plastiko ekstruzijai buvo naudojamas „Noztek Touch” ekstruderis (žr. 8 pav.).



8 pav. „Noztek Touch” ekstruderis

Pasiruošimas gijos ekstruzijai prasideda nuo įrenginio įjungimo. Tada valdymo ekrane (1) parenkamos norimos kaitinimo zonų T1 ir T2 temperatūros bei pradedamas ekstruderio įkaitinimas. Kaitinimo zona T1 yra prieš ekstruzijos antgalį (3), o kaitinimo zona T2 yra už bunkerio (2) su kaitinimo apvijomis (4). Siekiant stabilaus ekstruzijos proceso, kaitinimo zonų temperatūrai pasiekti nustatytą vertę ir nusistovėti yra skiriamos 25 min.

Nusistovėjus nustatytai temperatūrai įjungiamas variklis ir įjungiamas sukis plastiko padavimui skirtas sraigtas. Taip pat įjungiamas ir išekstrudintos termoplastiko gijos aušinimui skirtas ventiliatorius (5). Paruošiamieji procesai yra baigti ir galima pradėti plastikos gijos ekstruziją.

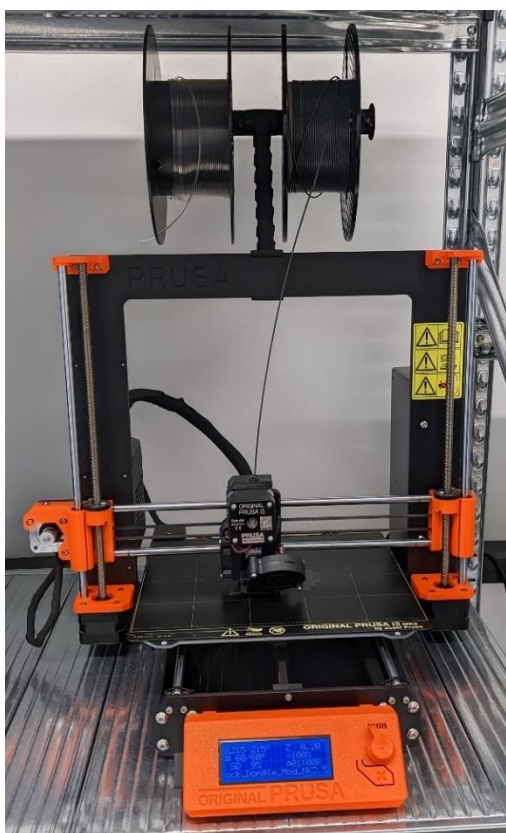
Susmulkintas termoplastikas yra beriamas į ekstruderio bunkerį. Plastikos dalelės patenka ant bunkerio dugne esančio sraigto ir sraigto apvijų yra stumiamos į toliau esančią kaitinimo zoną. Kaitinimo zonoje plastikas yra išlydomas ir toliau sraigtu stumiamas iki ekstruderio antgalio. Išlydytas plastikas dėl sraigto sukimosi yra išspaudžiamas pro antgalį ir iškart aušinamas, taip suformuojant termoplastiko giją (6).

“Noztek Touch” ekstruderyje nėra dalies, atliekančios plastikos gijos traukimo ar vyniojimo ant ritės funkciją, tačiau ekstruderis yra laikomas ant stovo 45 ° kampu. Dėl jo padėties, gijos gaminimo proceso metu gravitacija atlieka traukimo funkciją ir termoplastiko gija pastoviu greičiu tįsta žemyn. Prasidėjus termoplastiko ekstruzijai yra skiriamos 5 minutės proceso nusistovėjimui. Vėliau maždaug du pirmieji termoplastiko gijos metrai yra nukerpami ir nevertinami.

2.2. 3D spausdinimas

2.2.1. Bandinių spausdinimas

Toliau vykdomiems bandymams lydžiosios masės formavimo spausdintuvu buvo spausdinami bandiniai mechaniniams bandymams. Bandiniai buvo spausdinami „Original Prusa i3 MK3S+“ 3D spausdintuvu (žr. 9 pav.). Pagrindiniai šio spausdintuvo parametrai pateikti 2.2 lentelėje.

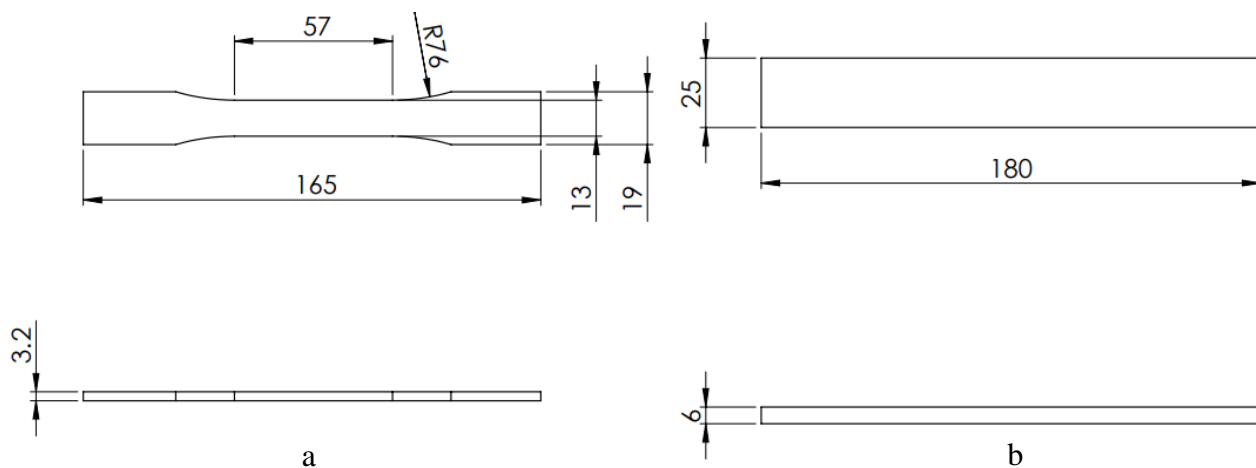


9 pav. „Original Prusa i3 MK3S+“ 3D spausdintuvus

2.2 lentelė. „Original Prusa i3 MK3S+” pagrindiniai parametrai [64]

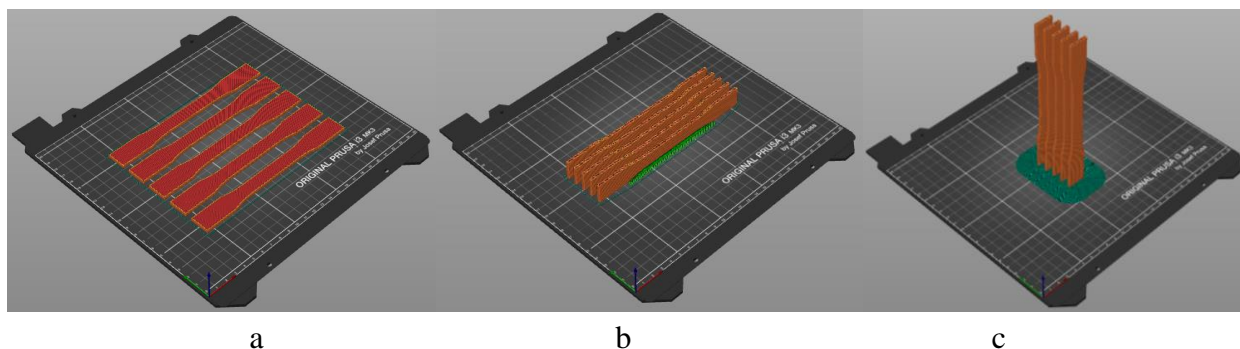
Maksimalus spausdinamos detalės dydis	25×21×21 cm
Sluoksnio aukštis	0,05-0,35 mm
Antgalio skersmuo	0,4 mm
Plastiko gijos skersmuo	1,75 mm
Tinkamos medžiagos	Įvairūs termoplastikai: PLA, PETG, ABS ir kt.
Maksimalus judėjimo greitis	200+ mm/s
Maksimali antgalio temperatūra	300 °C
Maksimali platformos temperatūra	120 °C
Spausdintuvo matmenys	7 kg, 50×55×40 cm
Elektros energijos suvartojimas	Naudojant PLA – 80W, naudojant ABS – 120W

Šiam etapui pirmiausia pagal ASTM D638-14 [65] ir ASTM D790-17 [66] standartus buvo sukurti, atitinkamai, tempimo ir lenkimo bandinių trimačiai modeliai. Modeliai buvo kurti naudojant „SolidWorks 2021” programinę įrangą. Bandinių matmenys pateikti 10 paveiksle.



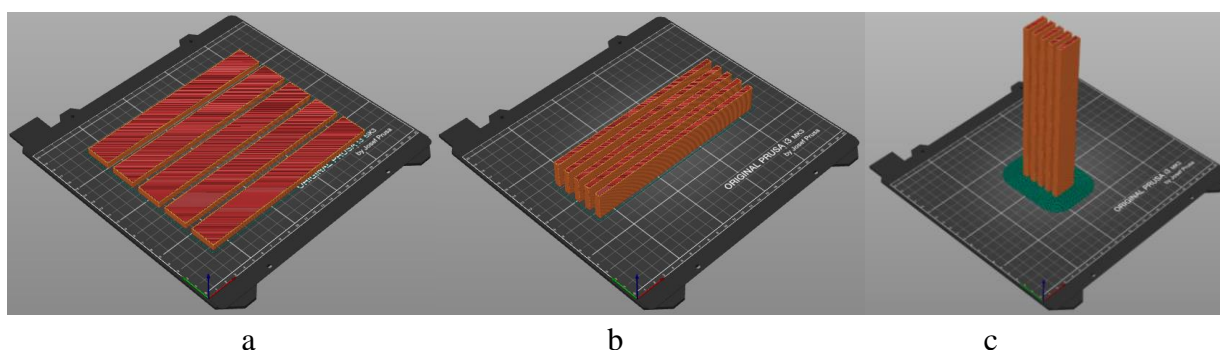
10 pav. Bandinių matmenys, mm : a) tempimo, b) lenkimo

Tiek tempimo, tiek lenkimo mechaniniams bandymams buvo spausdinta po 5 bandinius trimis skirtingomis orientacijomis. Skirtingas bandinio orientavimas (žr. 11-12 pav.) buvo naudojamos siekiant įvertinti orientacijos ant spausdinimo platformos įtaką struktūrų mechaninėms savybėms, kai apkrova bandinį veikia statmenai ir išilgai spausdinimo sluoksniams. Šių orientacijų bandiniai buvo spausdinti tiek iš pradinio, tiek iš antrinio PLA termoplastiko, vėliau siekiant palyginti ir įvertinti mechaninių bandymų rezultatus.



11 pav. Tempimo bandinių išdėstymas ant spausdinimo platformos: a) pirmasis, b) antrasis, c) trečiasis

Bandinių spausdinimo programų parengimui .stl formatu išsaugoti bandinių modeliai buvo perkelti į spausdinimo paruošimo programą „PrusaSlicer 2.5.0”.



12 pav. Lenkimo bandinių išdėstymas ant spausdinimo platformos: a) pirmasis, b) antrasis, c) trečiasis

Šioje programoje modeliai, buvo paruošiami spausdinimo procesui parenkant atitinkamus spausdinimo parametrus pateiktus 2.3 lentelėje. Pagalbinės konstrukcijos buvo naudotos tik spausdinant tempimo bandinį antrąja orientacija, kai siekiama išgauti išlenktą tempimo bandinio formą. O spausdinant bandinius trečiaja orientacija buvo naudota 20 mm apvado (angl. *brim*) funkcija. Tai aplink detalę esantis plonas termoplastiko apvijų sluoksnis, besiliečiantis su detalės kraštu. Jo reikia tam, kad aukštos ir plonos detalės dėl vibracijų spausdinimo metu nenukristų, kitaip tariant padidinti liaunos detalės kontakto zoną su spausdinimo platforma. Tai leidžia padidinti adheziją tarp detalės ir platformos užtikrinant stabilesnį spausdinimo procesą.

2.3 lentelė. Naudoti spausdinimo parametrai

Sluoksnio aukštis, mm	Antgalio skersmuo, mm	Užpildymo santykis, %	Spausdinimo platformos temperatūra, °C	Spausdinimo temperatūra, °C	Spausdinimo greitis, mm/s
0,3	0,4	100	60	225	60

2.2.2. Mikroskopinė termoplastiko gijos analizė

Mikroskopinei termoplastiko gijos analizei buvo naudojama „Mitutoyo Quick Vision Active” matavimo sistema (žr. 13 pav.). Šio sistemos skiriamoji geba 0,00010 mm. Naudotas lęšis su galimybe keisti didinimą 0,75-5,25x ribose.



13 pav. „Mitutoyo Quick Vision Active” matavimo sistema

2.3. Mechaniniai bandymai

Tiek pirminio PLA, tiek perdirbto PLA bandinių mechaniniai bandymai buvo atliekami naudojant „Tinius Olsen H25KT” universalią testavimo mašiną (žr. 14 pav.).



14 pav. „Tinius Olsen H25KT” universali testavimo mašina

Pagrindiniai testavimo mašinos parametrai pateikti lentelėje 2.4.

2.4 lentelė. Pagrindiniai „Tinius Olsen H25KT” testavimo mašinos parametrai [67]

Maksimali apkrova	25 kN
Jutikliai	0,25 kN; 5 kN
Bandymo greitis	0,001-300 mm/min
Galia	220/240V, 50-60 Hz, 2000W
Apkrovos matavimo tikslumas	± 0.5 %
Padėties matavimo tikslumas	± 0.01 %
Greičio tikslumas	± 0.005 %

2.3.1. Bandinių matavimas

Atspausdinti bandiniai buvo išmatuoti ir susverti. Matmenims nustatyti buvo naudojamas „Teng Tools” 150 mm, 0,01 mm tikslumo slankmatis (žr. 15 pav.). Buvo matuojamas bandinių plotis ir aukštis ties bandinio viduriu, nes šie matmenys vėliau naudojami skaičiavimuose.



15 pav. „Teng Tools” slankmatis

Masei nustatyti naudotos „KERN ABJ220-4NM” analitinės svarstyklės (žr. 16 pav.). Pagrindiniai svarstyklių parametrai pateikti 2.5 lentelėje.



16 pav. „KERN ABJ220-4NM” analitinės svarstyklės

2.5 lentelė. Pagrindiniai „KERN ABJ220-4NM” analitinių svarstyklių parametrai [68]

Maksimali svėrimo riba, g	Padalos vertė, g	Atsikartojamumas, mg	Tiesiškumas, mg
210	0,0001	0,2	0,3

2.3.2. Tempimo bandymas

Tempimo bandymas buvo atliktas pagal bandymo metodiką, aprašytą ASTM D638-14 standarte. PLA bandinių apkrovos greitis buvo 50 mm/min. Principinė tempimo bandymo schema pateikta 17 paveiksle. Tempimo bandymo metu siekiama nustatyti ir palyginti pirminio ir perdribto PLA stiprumo ribas tempiant.



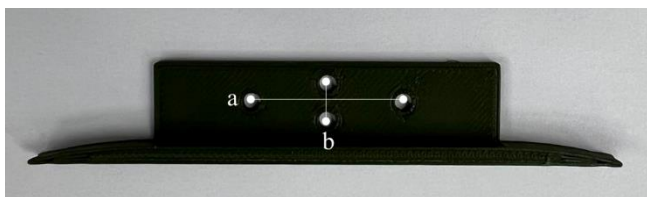
17 pav. Principinė tempimo bandymo schema

Prieš tempimo bandymus, centrinėje bandinių dalyje buvo sužymėta po keturis taškus (žr. 18 pav.), kurie vėliau buvo naudojami nustatyti skersinėms ir išilginėms deformacijoms tempimo bandymo metu.



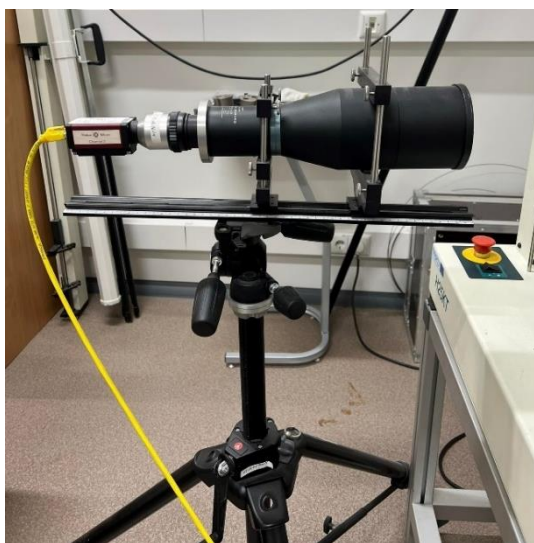
18 pav. Taškai bandinio centrinėje dalyje deformacijų matavimui

Siekiant, kad visuose bandiniuose taškai būtų sužymėti vienodai, žymėjimas buvo atliekamas naudojant pagalbines detales (žr. 19 pav.). Atstumai buvo parinkti tokie, jog tilptų įrangos matymo lauke: $a = 25$ mm, $b = 6$ mm.



19 pav. Pagalbinė detalė tempimo bandinių taškų žymėjimui

Deformacijos buvo matuojamos „Tinius Olsen“ video ekstencijometru su „Sill Optics Correctal T“ telecentrinu objektyvu (žr. 20 pav.).



20 pav. „Tinius Olsen“ video ekstencijometras su „Sill Optics Correctal T“ telecentrinu objektyvu

Siekiant, jog tempimo bandinys į testavimo mašiną kiekvieną kartą būtų įdedamas taip pat, buvo naudojama pagalbines įstatymo detalė (žr. 21 pav.).



21 pav. Pagalbinė detalė tempimo bandinių pozicionavimui testavimo mašinoje

Tempimo įtempiai buvo apskaičiuoti pagal formulę:

$$\sigma = \frac{F}{A}; \quad (1)$$

čia σ – tempimo įtempiai, MPa;

F – jėga, veikianti bandinį, N;

A – bandinio skerspjūvio plotas, mm².

Tamprumo modulis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}; \quad (2)$$

čia E – tamprumo modulis, MPa;

$\Delta\sigma$ – skirtumas tarp dviejų tempimo įtempių, skirtinguose deformacijos taškuose, MPa;

$\Delta\varepsilon$ – skirtumas tarp dviejų skirtingų deformacijos taškų.

2.3.3. Lenkimo bandymas

Lenkimo bandymas buvo atliktas pagal bandymo metodiką, aprašytą ASTM D790-17 standarte. PLA bandiniai buvo lenkiami taikant 3 taškų lenkimo metodą (žr. 22 pav.). Bandiniai buvo dedami ant dviejų 10 mm skersmens atraminių ritinėlių ir jėga buvo perduodama trečiuoju 10 mm skersmens ritinėliu. PLA bandinių apkrovos greitis buvo 2 mm/min, o atstumas tarp atraminių ritinėlių – 98 mm. Lenkimo bandymo metu siekiama nustatyti ir palyginti pirminio ir perdribto PLA stiprumo ribas lenkiant.



22 pav. Principinė lenkimo schema

Lenkimo įtempiai buvo apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}; \quad (3)$$

čia σ – lenkimo įtempiai, MPa;

P – jėga, veikianti bandinį, N;

L – atstumas tarp atraminių ritinėlių, mm;

b – bandinio plotis, mm;
 h – bandinio aukštis, mm.

Lenkimo modulis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}; \quad (4)$$

čia E – lenkimo modulis, MPa;

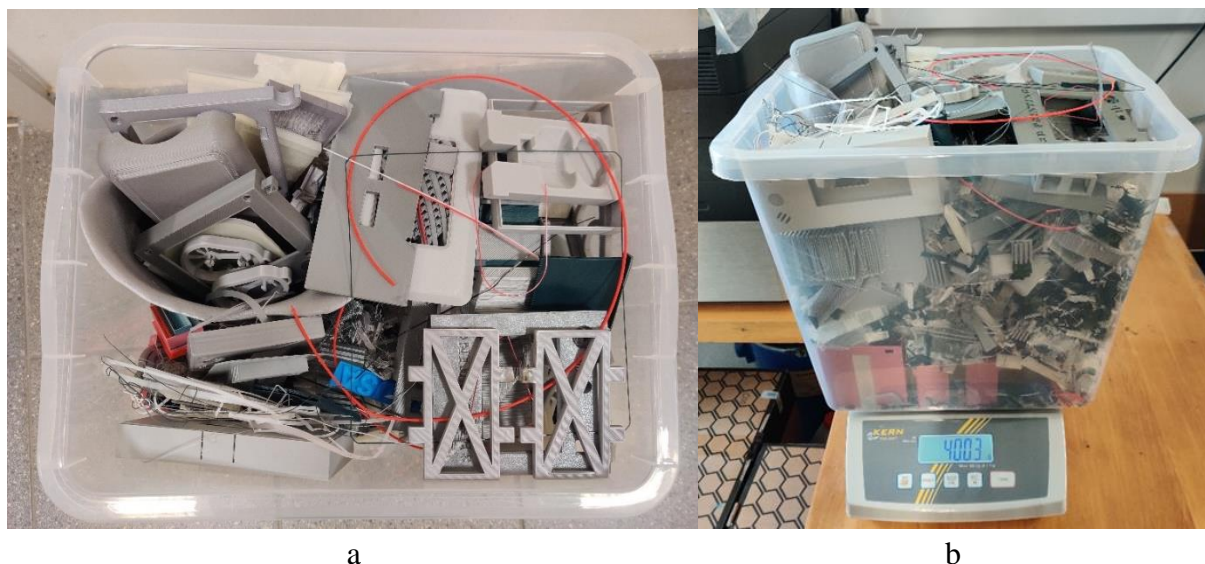
$\Delta\sigma$ – skirtumas tarp dviejų lenkimo įtempių, skirtinguose deformacijos taškuose, MPa;

$\Delta\varepsilon$ – skirtumas tarp dviejų skirtingų deformacijos taškų.

3. Rezultatai

3.1. PLA termoplastiko gijos gamyba

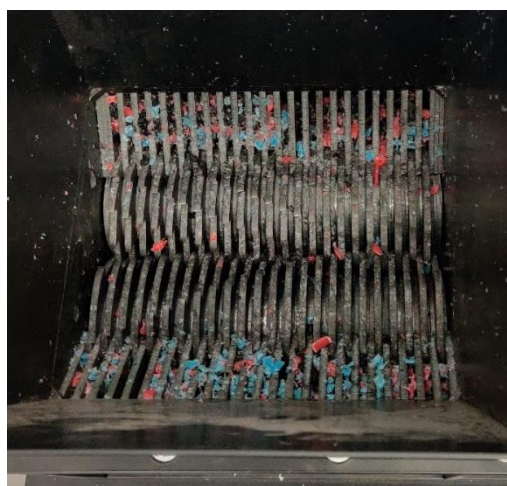
Didžiąją dalį surinktų PLA termoplastiko atliekų (žr. 23 pav., a) sudarė brokuotos, nepavykusios detalės. Dalis atliekų buvo ir pagalbinės spausdinimo konstrukcijos. Iš viso per metus laiko buvo sukaupta 4003 g PLA atliekų (žr. 23 pav., b).



23 pav. Surinktos PLA atliekos: a) surinktų atliekų pavyzdys, b) PLA atliekų masė

3.1.1. PLA atliekų smulkinimas

Prieš smulkinimo procesą smulkinimo įranga buvo mechaniškai išvalyta siekiant pašalinti prieš tai smulkinto plastiko likučius. Valymas truko apie dvi valandas, tačiau visiškai pašalinti plastiko likučių nepavyko, nes jie buvo įstrigę tarp smulkinimo peilių. Norint visiškai pašalinti prieš tai smulkintą plastiką įrenginio smulkinimo zona turi būti visiškai perrinkta. (žr. 24 pav.).



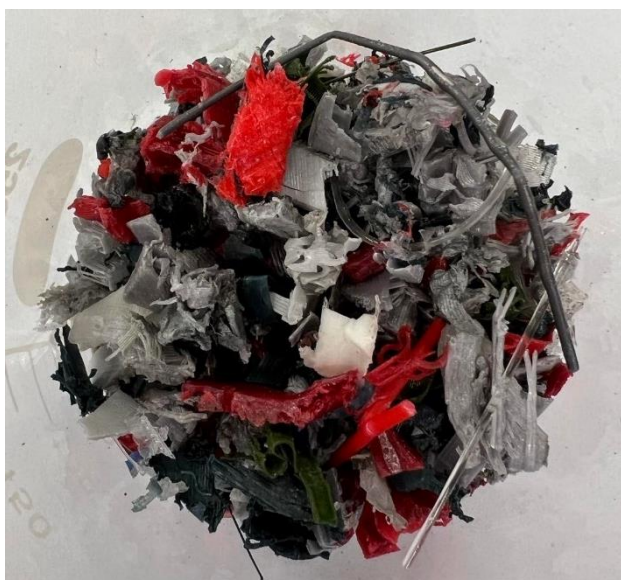
24 pav. Kito plastiko likučiai tarp smulkinimo peilių

Termoplastiko atliekų smulkinimas užtruko apie dvi su puse valandos. Kadangi PLA pasižymi žema stiklėjimo temperatūra (~70 – 80 °C), kurią pasiekus termoplastikas pradeda minkštėti, todėl smulkinimo metu dėl trinties tarp smulkinimo peilių ir PLA plastiko pakilus darbo zonos temperatūrai, termoplastiko detalės susilydo į didesnius segmentus (žr. 25 pav.).



25 pav. Į didesniu segmentus susilydžiusios plastikos detalės

Po pirminio smulkinimo atliekant ekstruziją buvo pastebėta, jog plastikos dalelės yra per didelės. Dalelių dydis variavo nuo kelių milimetrų iki 1,5 cm (žr. 26 pav.).



26 pav. Plastikos dalelės po pirmo smulkinimo

Dėl dalelių dydžio kilo įvairios problemos, kurios neleido užtikrinti stabilaus ir patikimo ekstrudavimo proceso:

1. didesnės termoplastiko dalys nepateko tarp sraigto apvijų ir dėl to negalėjo būti nustumtos į ekstruderio kaitinimo zoną;
2. dėl skirtingo dalelių dydžio plastiko padavimas nebuvo tolydus, ekstruzijos procesas nestabilus;
3. dėl proceso nestabilumo nebuvo užtikrinamas pastovus plastiko gijos skersmuo.

Siekiant išvengti aukščiau minėtų problemų plastikas buvo susmulkintas procesą pakartojant dar tris kartus. Šie smulkinimai užtruko apie 2,5 valandos. Proceso laikas sutrumpėjo, nes į smulkintuvo darbo zoną patekdavo vis mažesnės plastikos dalelės. Pabaigus smulkinimo procesus buvo gauta 3897 g (atėmus – 587 g – dėžės masę) susmulkinto PLA termoplastiko dalelių, kurių dydis neviršijo 5 mm (žr. 27 pav.).



27 pav. Dėžės su PLA atliekomis po smulkinimo masė ir galutinis plastiko dalelių dydis

3.2. Perdirbto PLA termoplastiko gijos ekstruzija

Prieš pradėdant susmulkintų PLA plastiko atliekų ekstruziją atliekamas ekstruderio valymas. Valymas buvo atliekamas išsukus ekstruderio antgalį ir įkaitinus įrenginio darbinės zonas iki 280 °C temperatūros (tiek T1, tiek T2 kaitinimo zonose). Didžioji dalis prieš tai naudojamo plastiko likučių išstumta sukantis sraigtiui, likusi dalis atvėsinus įrenginį iki 80 – 100 °C pašalinta mechaniškai.

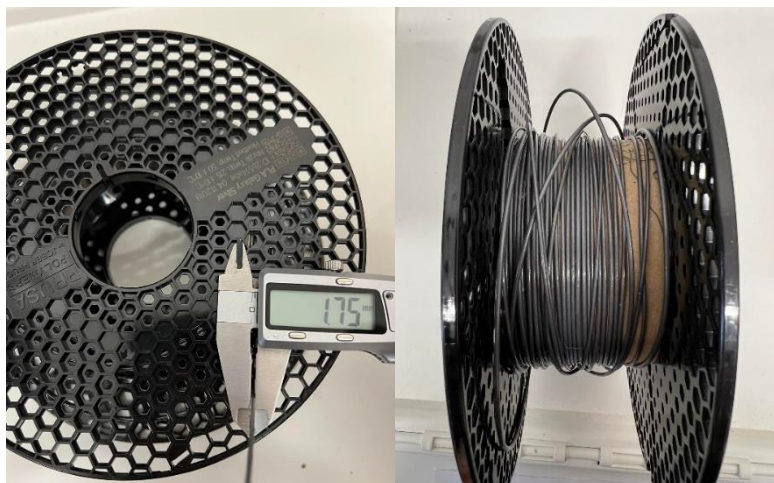
Pirmiausia perdirbto PLA termoplastiko gijos ekstruzijos tyrimai buvo atliekami parinkus 160 °C T1 kaitinimo zonoje, 180 °C T2 kaitinimo zonoje, o ekstruzijos greitį – 35 aps./min. Buvo naudojamas 1,75 mm skersmens antgalis. Tačiau siekiant gauti nekintančio skersmens nenutrūkstancią termoplastiko giją buvo išbandytos įvairios kaitinimo zonų temperatūros ir ekstruzijos greičio kombinacijos. Taip pat naudoti du skirtingo skersmens antgaliai (žr. 3.1 lentelę).

3.1 lentelė. Naudotos ekstruzijos proceso parametrų vertės

Keičiami ekstruzijos proceso parametrai:	Naudotos parametrų reikšmės:
Kaitinimo zonų temperatūra	150-220 °C
Ekstruzijos greitis	15-40 aps./min
Antgalio skersmuo	1,75 mm, 2,85 mm

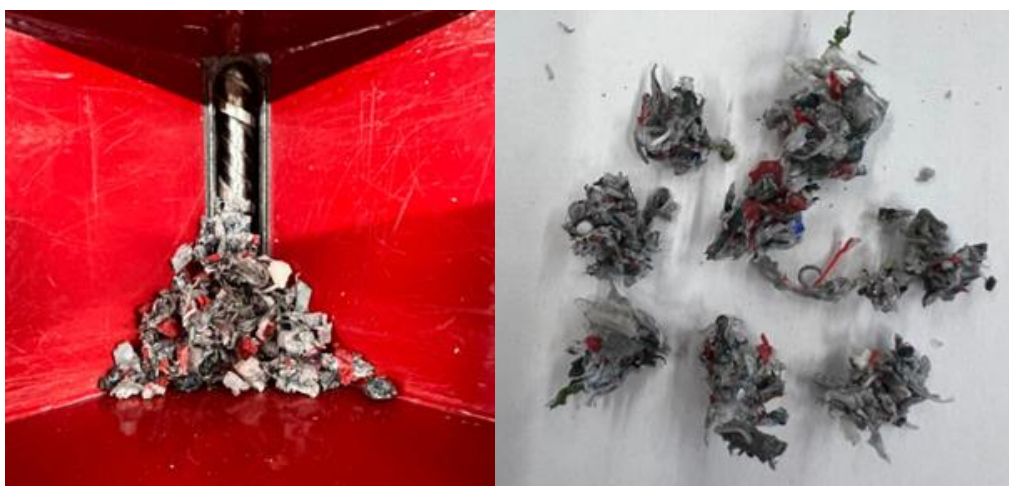
Ekstruzijos tikslas buvo gauti 1,75 mm skersmens vientisą plastiko giją. Iš pradžių atliekant ekstruziją su pirminiais parametrais pavyko gauti 1,5 mm nekintančio skersmens termoplastiko giją, tačiau po tam tikro laiko procesas pradėjo lėtėti, kol galiausiai sustojo. Buvo iškelta hipotezė, kad parinkti parametrai neleidžia termoplastikui lengvai ir be pasipriešinimo patekti į darbo zoną ir būti išekstrudintam per ekstruzijos antgalį. Todėl buvo nuspręsta pakeisti proceso parametrus. Siekiant, kad plastikas lengviau judėtų sistemoje, buvo didinama temperatūra. Tačiau, kuo didesnė temperatūra, tuo plonesnė plastiko gija suformuojama. Taip pat buvo keičiamas ekstruzijos greitis, tačiau stabilaus proceso pasiekti nepavyko, nes esant didesniai greičiui, PLA termoplastiko dalelės patiria didesnę trintį ir sąveiką su sraigtu ir smulkios dalelės susilydo dar nepatekusios į kaitinimo zoną. Dėl šio fenomeno užtikrinti stabilaus ekstruzijos proceso nepavyko.

Siekiant gauti didesnę termoplastiko gijos skersmenį ir priartinti jį prie reikiamo 1,75 mm, buvo išbandytas 2,85 mm skersmens ekstrudero antgalis. Išbandžius skirtingas kaitinimo zonų temperatūras bei ekstruzijos greičius (žr. 3.1 lentelę), galiausiai buvo parinktos 210 °C ir 180 °C temperatūros, atitinkamai T1 ir T2 kaitinimo zonose, bei 25 aps./min sraigto sukimosi greitis. Su šiais parametrais pavyko gauti 1,75 mm skersmens termoplastiko giją, kurios skersmuo svyravo $\pm 0,05$ mm zonoje (žr. 28 pav.).



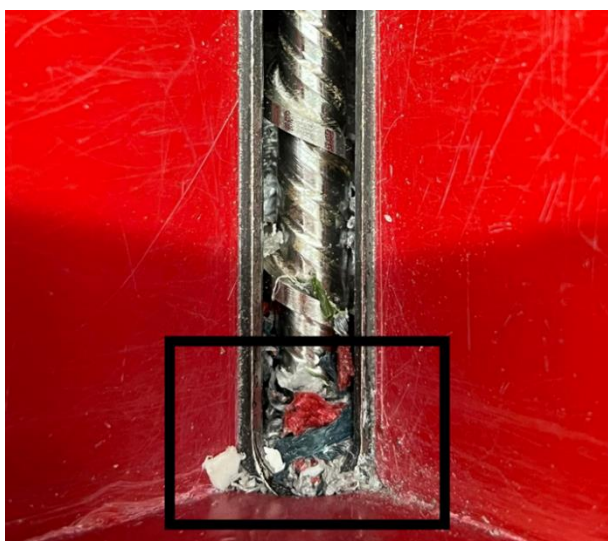
28 pav. Perdirbto PLA termoplastiko gija ir jo skersmuo

Atlikus termoplastiko gijos ekstruziją, buvo priimtos tam tikros išvados. Ekstruzijos proceso metu bunkeryje svarbu užtikrinti nuolatinį plastiko dalelių judėjimą ir maišymą. Kadangi PLA turi žemą stiklėjimo temperatūrą, net esant 70-80 °C temperatūrai šis termoplastikas minkštėja. Taigi besisukant ekstrudero sraigui, dėl trinties bei kondukcijos tarp metalinių prietaiso dalių, sraigas įkaista, o taip pat įkaista ir bunkeryje esančios termoplastiko dalelės. Dėl šios priežasties suminkštėjęs termoplastikas susilydo į didesnius segmentus (žr. 29 pav.), kurie tampa per didelį ir sunkiai patenka tarp sraigto apvijų.



29 pav. Bunkeryje virš sraigto susiformavę didesni termoplastiko segmentai

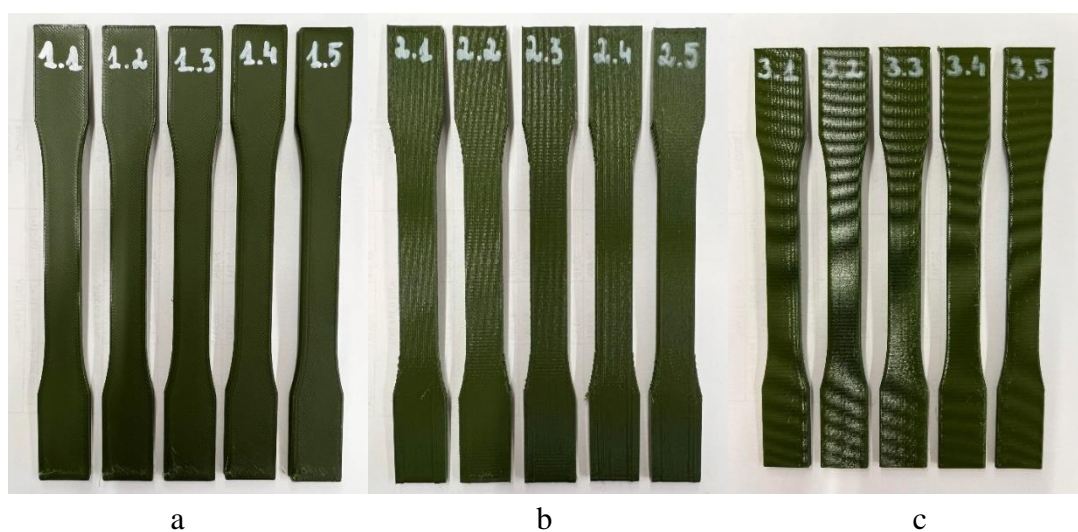
Šiems segmentams patekus tarp sraigto apvijų, jie susilydo ir suformuoja dar didesnius segmentus aplink sraigą (žr. 30 pav.), kurie galiausiai sustabdo sraigto sukimąsi ir patį ekstruzijos procesą.



30 pav. Dėl termoplastiko „kamščio“ sustojęs ekstrudiero sraigtas

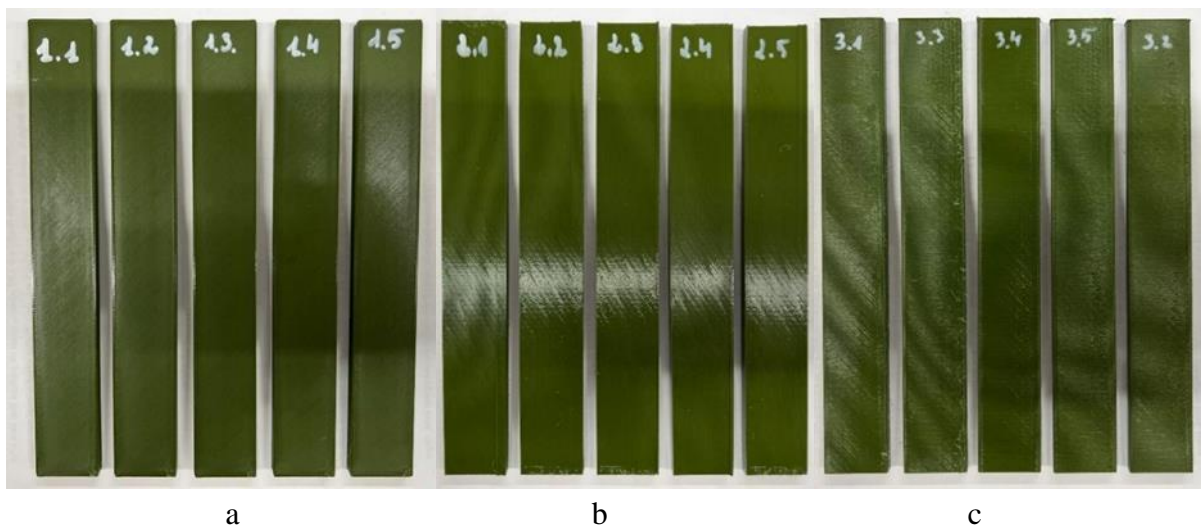
3.3. Bandinių 3D spausdinimas

Šiame etape buvo spausdinami bandiniai mechaniniam testavimui. Pirmiausia buvo spausdinami bandiniai iš pirminio PLA termoplastiko gijos. Iš viso buvo atspausdinta 15 tempimo bandinių (žr. 31 pav.), po penkis bandinius trimis skirtingomis orientacijomis.



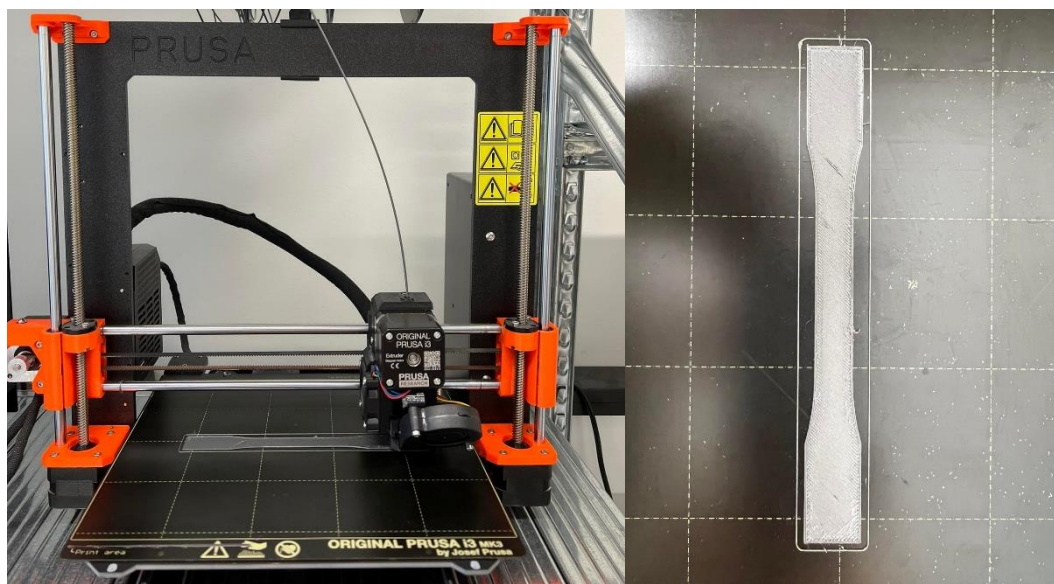
31 pav. Tempimo bandiniai: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos

Taip pat buvo atspausdinta ir 15 pirminio PLA lenkimo bandinių (žr. 32 pav.), po penkis bandinius trimis skirtingomis orientacijomis.



32 pav. Lenkimo bandiniai: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos

Sekančiame etape buvo pradėti spausdinti bandiniai iš ekstruzijos metu pagamintos perdirbto PLA termoplastiko gijos. Tačiau pastebėta, kad atspausdinus pirmąjį bandinio sluoksnį spausdinimo antgalis užsikimšdavo ir spausdinimo procesas sustodavo. Išvalius antgalį spausdinimas buvo kartojamas ir spausdinimo antgalis vėl užsikimšdavo atspausdinus tik pirmąjį bandinio sluoksnį (žr. 33 pav.). Valymo ir spausdinimo procesas buvo pakartotas keletą kartų, tačiau spausdinimas visada sustodavo pabaigus spausdinti pirmąjį bandinio sluoksnį. Buvo iškelta hipotezė, kad spausdinimo antgalis užsikemša dėl perdirbto PLA termoplastiko gijoje esančių kitų termoplastikų priemaišų, atsiradusių netinkamai išvalius smulkinimo įrenginį.

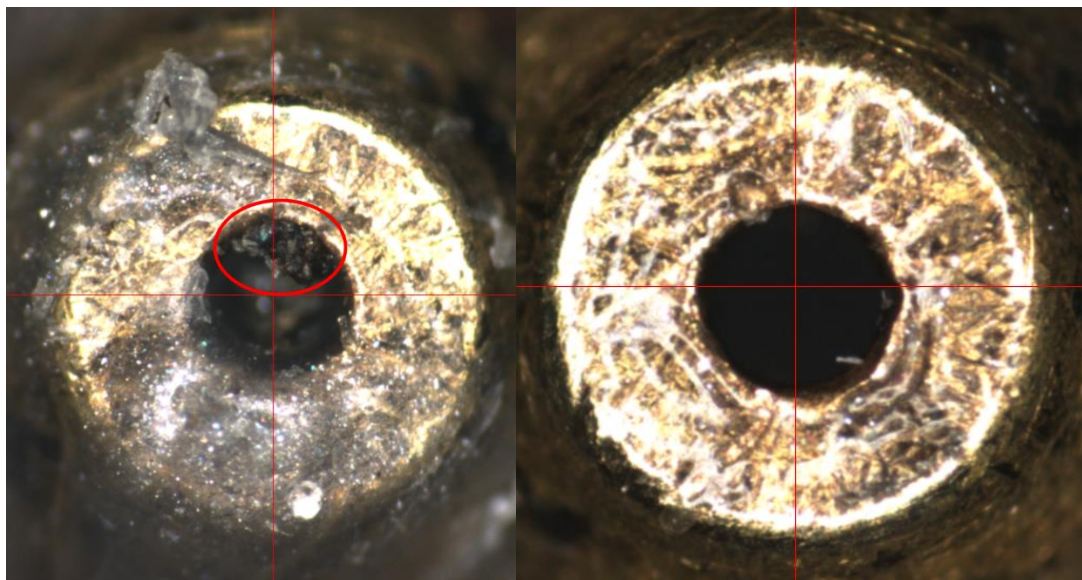


33 pav. Sustojęs spausdinimo procesas, atspausdinus vieną perdirbo PLA bandinio sluoksnį

Kadangi iš ekstruzijos metu pagamintos plastiko gijos, dėl pastovaus antgalio kišimosi, bandinių atspausdinti nepavyko, tolimesniems tyrimams pasirinktas naudoti „Prusament“ iš 100 % perdirbto PLA pagaminta gija. Šis termoplastikas beveik tobulai atitinka darbo metu išekstrudintą giją ir gali būti naudojamas kaip alternatyva ir pakaitalas. Jis yra pagamintas perdirbant pirminio „Prusament“ PLA spausdinimo atliekas. Kaip ir iš pirminio PLA, iš perdirbto PLA viso buvo atspausdinta 15 tempimo ir 15 lenkimo bandinių, kiekvienu atveju po penkis bandinius trimis skirtingomis orientacijomis.

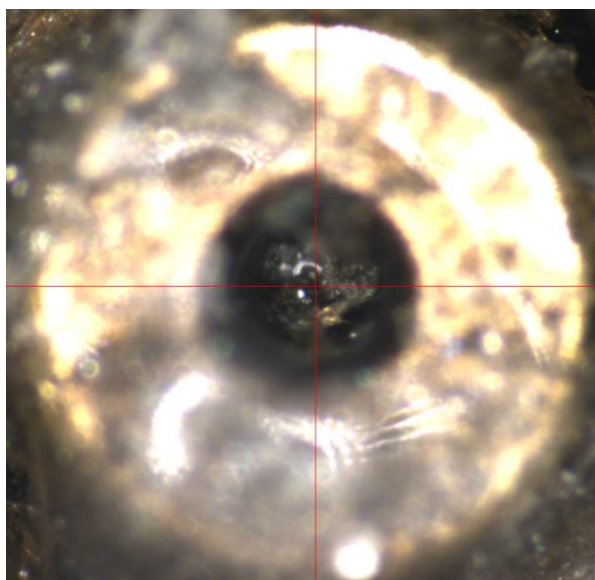
3.4. Mikroskopinė išekstruoto termoplastiko analizė

Siekiant įvertinti spausdinimo antgalio būklę ir išsiaiškinti užsikimšimo priežastį po spausdinimo su perdirbtu PLA termoplastiku buvo atlikta mikroskopinė spausdinimo antgalio analizė (žr. 34 pav.). Analizės metu gautuose nuotraukose matyti, jog lyginant su išvalytu antgaliu, panaudoto antgalio darbinė skylė turi užsikimšimo požymių, taip pat prie vidinės skylės sienelės yra susikaupęs plastiko darinys.



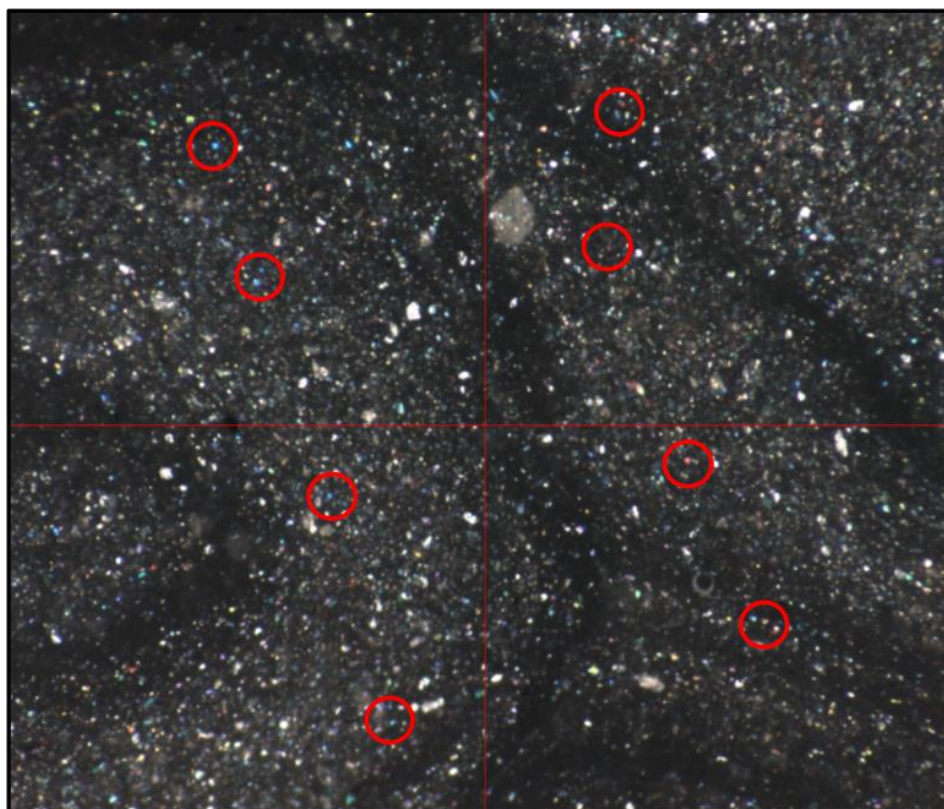
34 pav. Mikroskopinė užsikimšusio spausdinimo antgalio nuotrauka (didinimas – 3,2x) bei išvalyto antgalio nuotrauka (didinimas – 2,25x)

Kitoje mikroskopinėje nuotraukoje (žr. 35 pav.) matoma, jog giliau plastiko sankaupos yra aklinau užsikimšusios spausdintuvo antgalį.



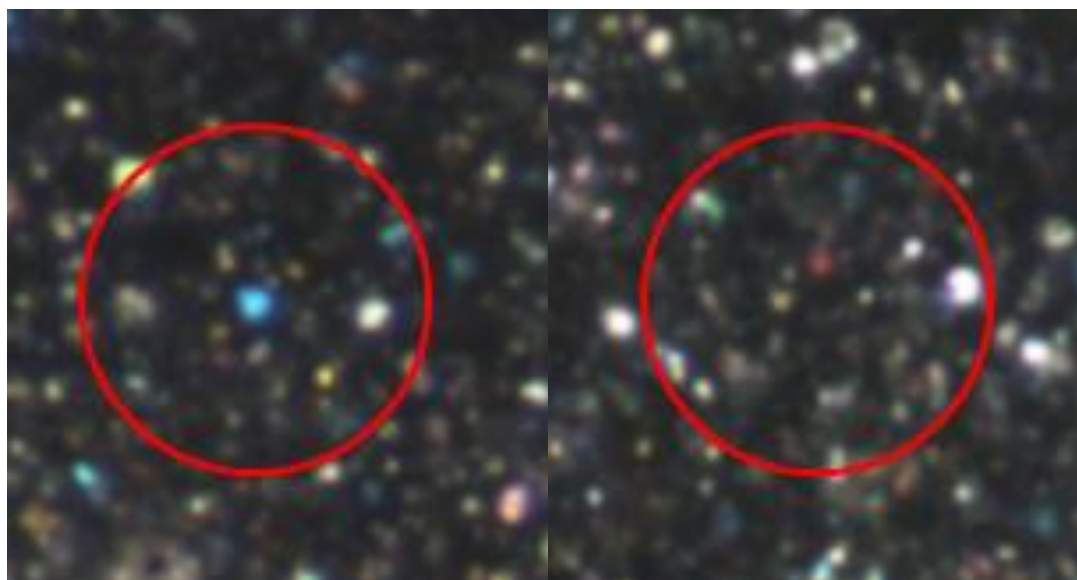
35 pav. Mikroskopinė užsikimšusio spausdinimo antgalio nuotrauka (didinimas – 3,75x)

Siekiant nustatyti, kodėl termoplastikas kaupiasi antgalio viduje, gija buvo išlydyta ant metalinės plokštelės ir atlikta perdirbtos PLA gijos mikroskopinė analizė. Mikroskopinėje nuotraukoje (žr. 36 pav.) matyti, jog išlydytame termoplastike yra neišsilydžiusių plastiko dalelių.



36 pav. Išlydytos perdirbto PLA termoplastiko gijos su neišsilydžiusiomis plastiko dalelėmis mikroskopinė nuotrauka (didinimas – 3x)

Daugiausiai yra matomos mėlynos ir raudonos spalvos neišsilydžiusios plastiko dalelės (žr. 37 pav.).



37 pav. Mėlynos ir raudonos spalvos neišsilydžiusių plastiko dalelių mikroskopinė nuotrauka (didinimas – 5x)

Neišsilydžiusio plastiko dalelės perdirbto PLA gijoje gali būti kito termoplastiko, turinčio aukštesnę lydymosi temperatūrą, arba reaktoplastiko priemaišos. Jeigu tai aukštos lydymosi temperatūros termoplastiko priemaišos, tai tiek ekstruzijos, tiek 3D spausdinimo metu proceso temperatūra yra per maža, jog plastikas išsilydytų, todėl jo dalelės kaupiasi įrangos darbinuose kanaluose ir juos

užkemša. Jeigu tai reaktoplastikas, tai nepaisant proceso temperatūros, plastikas jau nebegali būti išlydytas ir dėl plastiko dalelių sancaupų įranga taip pat gali užsikimšti.

Nežinomos kilmės plastiko priemaišų galėjo atsirasti PLA termoplastiko atliekų smulkinimo metu. Kaip jau minėta anksčiau, smulkinimo įrangos visiškai pilnai išvalyti nebuvo įmanoma, nes nežinomos kilmės plastiko likučiai buvo įstrigę tarp plastiko peilių taip, kad juos pašalinti būtų galima tik visiškai išardžius įrenginį. 38 paveiksle galima matyti, jog tarp smulkinimo peilių daugiausia buvo būtent mėlynos ir raudonos spalvos plastiko atliekų.



38 pav. Nežinomos kilmės plastiko likučiai tarp smulkinimo peilių

3.5. Mechaniniai bandymai

3.5.1. Bandinių matavimas

Atspausdinti bandiniai buvo matuojami slankmačiu ir sveriami tiksliomis svarstyklėmis. Iš neperdirbto PLA termoplastiko atspausdintų tempimo ir lenkimo bandinių gabaritiniai matmenys atitinkamai pateikti 3.2 ir 3.3 lentelėse.

3.2 lentelė. Pirminio PLA termoplastiko gijos tempimo bandinių parametrai

Bandinio nr.	Plotis, mm	Aukštis, mm	Skerspjūvio plotas, mm ²	Svoris, g
1.1	13,14	3,17	41,65	10,03
1.2	13,32	3,18	42,36	10,02
1.3	13,33	3,20	42,66	10,02
1.4	13,10	3,18	41,66	10,02
1.5	13,17	3,18	41,88	10,02
Vidurkis	13,21	3,18	42,04	10,02
2.1	13,63	3,39	46,21	10,56
2.2	13,68	3,41	46,65	10,56
2.3	13,66	3,40	46,44	10,56
2.4	13,68	3,41	46,65	10,56
2.5	13,70	3,40	46,58	10,56
Vidurkis	13,67	3,40	46,51	10,56
3.1	13,16	3,56	46,85	10,25
3.2	13,33	3,50	46,66	10,33
3.3	13,28	3,54	47,01	10,34
3.4	13,32	3,51	46,75	10,34
3.5	13,20	3,48	45,94	10,32
Vidurkis	13,26	3,52	46,64	10,32

Pirminio PLA tempimo bandinių plotis svyruoja nuo 13,10 mm iki 13,70 mm, o aukštis – nuo 3,17 mm iki 3,56 mm.

3.3 lentelė. Pirminio PLA termoplastiko gijos lenkimo bandinių parametrai

Bandinio nr.	Plotis, mm	Aukštis, mm	Skerspjūvio plotas, mm ²	Svoris, g
1.1	24,99	5,90	147,44	31,52
1.2	24,96	5,93	148,01	31,53
1.3	24,95	5,90	147,21	31,49
1.4	25,10	5,91	148,34	31,47
1.5	25,27	5,89	148,84	31,48
Vidurkis	25,05	5,91	148,05	31,50
2.1	25,26	5,98	151,05	32,78
2.2	25,33	6,06	153,50	32,76
2.3	25,32	6,09	154,20	32,78
2.4	25,21	5,99	151,01	32,77
2.5	25,47	6,05	154,09	32,77
Vidurkis	25,32	6,03	152,68	32,77
3.1	25,25	6,09	153,77	32,78
3.2	25,22	6,14	154,85	32,78
3.3	25,22	6,17	155,61	32,80
3.4	25,14	6,31	158,63	32,77
3.5	25,26	6,16	155,60	32,81
Vidurkis	25,22	6,17	155,61	32,79

Pirminio PLA lenkimo bandinių plotis svyruoja nuo 24,95 mm iki 25,47 mm, o aukštis – nuo 5,89 mm iki 6,31 mm.

Iš perdirbto PLA termoplastiko atspausdintų tempimo ir lenkimo bandinių gabaritiniai matmenys pateikti atitinkamai 3.4 ir 3.5 lentelėse.

3.4 lentelė. Perdirbto PLA termoplastiko gijos tempimo bandinių parametrai

Bandinio nr.	Plotis, mm	Aukštis, mm	Skerspjūvio plotas, mm ²	Svoris, g
1.1	13,31	3,21	42,73	9,89
1.2	13,4	3,3	44,22	9,85
1.3	13,27	3,22	42,73	9,86
1.4	13,32	3,24	43,16	9,84
1.5	13,3	3,23	42,96	9,86
Vidurkis	13,32	3,24	43,16	9,86
2.1	13,55	3,37	45,66	10,37
2.2	13,57	3,36	45,60	10,36
2.3	13,56	3,37	45,70	10,37
2.4	13,58	3,37	45,76	10,36
2.5	13,56	3,38	45,83	10,37
Vidurkis	13,56	3,37	45,70	10,37
3.1	13,34	3,54	47,22	10,05
3.2	13,32	3,57	47,55	10,04
3.3	13,36	3,56	47,56	10,05
3.4	13,33	3,54	47,19	10,04
3.5	13,35	3,55	47,39	10,06
Vidurkis	13,34	3,55	47,36	10,05

Perdirbto PLA tempimo bandinių plotis svyruoja nuo 13,27 mm iki 13,58 mm, o aukštis – nuo 3,21 mm iki 3,57 mm.

3.5 lentelė. Perdirbto PLA termoplastiko gijos lenkimo bandinių parametrai

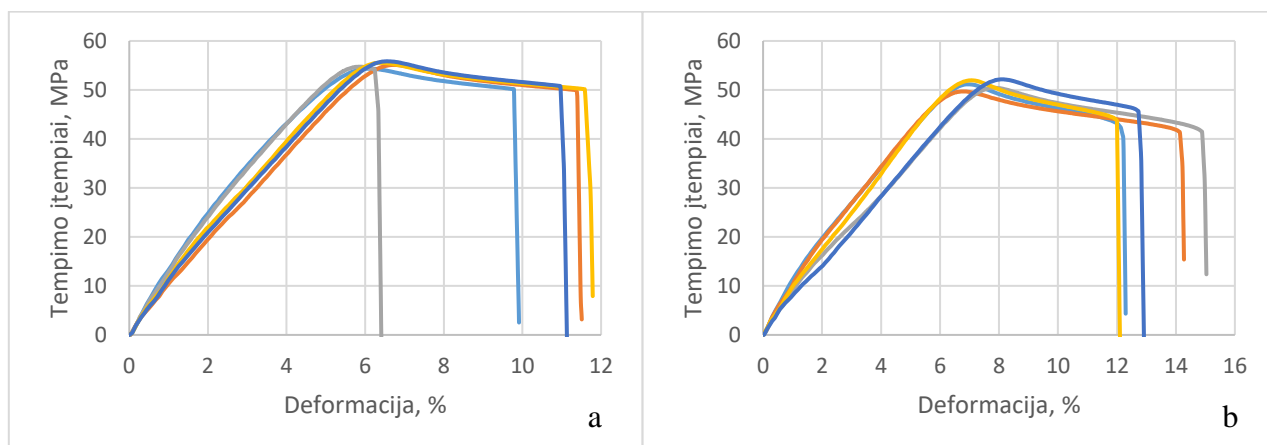
Bandinio nr.	Plotis, mm	Aukštis, mm	Skerspjūvio plotas, mm ²	Svoris, g
1.1	24,99	5,85	146,19	31,03
1.2	25,00	5,84	146,00	31,01
1.3	25,01	5,84	146,06	31,03
1.4	24,99	5,86	146,44	31,07
1.5	24,98	5,87	146,63	31,05
Vidurkis	24,99	5,85	146,19	31,04
2.1	25,07	6,11	153,18	32,49
2.2	25,05	6,07	152,05	32,55
2.3	25,05	6,1	152,81	32,48
2.4	25,1	6,08	152,61	32,52
2.5	25,05	6,09	152,55	32,54
Vidurkis	25,06	6,09	152,62	32,52
3.1	25,06	6,03	151,11	32,08
3.2	25,01	6,01	150,31	32,09
3.3	25,06	6,03	151,11	32,07
3.4	25,04	6,02	150,74	32,09
3.5	25,03	6,03	150,93	32,10
Vidurkis	25,04	6,02	150,74	32,09

Perdirbto PLA lenkimo bandinių plotis svyruoja nuo 24,98 mm iki 25,10 mm, o aukštis – nuo 5,84 mm iki 6,11 mm.

Tiek pirminio, tiek perdirbto PLA tempimo bei lenkimo antrosios orientacijos bandiniai yra plačiausi, o trečiosios – aukščiausi. Pirmosios orientacijos bandiniai pasižymi mažiausiu pločiu ir aukščiu.

3.6. Tempimo mechaniniai bandymai

Mechaniniai tempimo bandymai buvo atliekami dviem etapais. Pirmojo etapo metu bandiniai 1 mm/min greičiu buvo tempiami tol, kol bandinys pasiekdavo 0,3 mm išilginę deformaciją. Šis bandymas skirtas tamprumo moduliui apskaičiuoti. Antrojo etapo metu bandiniai buvo tempiami 50 mm/min greičiu iki trūkimo (žr. 39-41 pav.). Tempimo bandymų parametrai: stiprumo riba tempiant, maksimali jėga ir tamprumo modulis pateikti 3.6-3.8 lentelėse. Stiprumo riba tempiant parodo bandinio įtempius, kurie susidaro esant didžiausiai apkrovai, kurią bandinys gali atlaikyti. Tamprumo modulis apibūdina medžiagos pasipriešinimą deformacijai. Kuo tamprumo modulis didesnis, tuo medžiagos pasipriešinimas deformacijai didesnis.



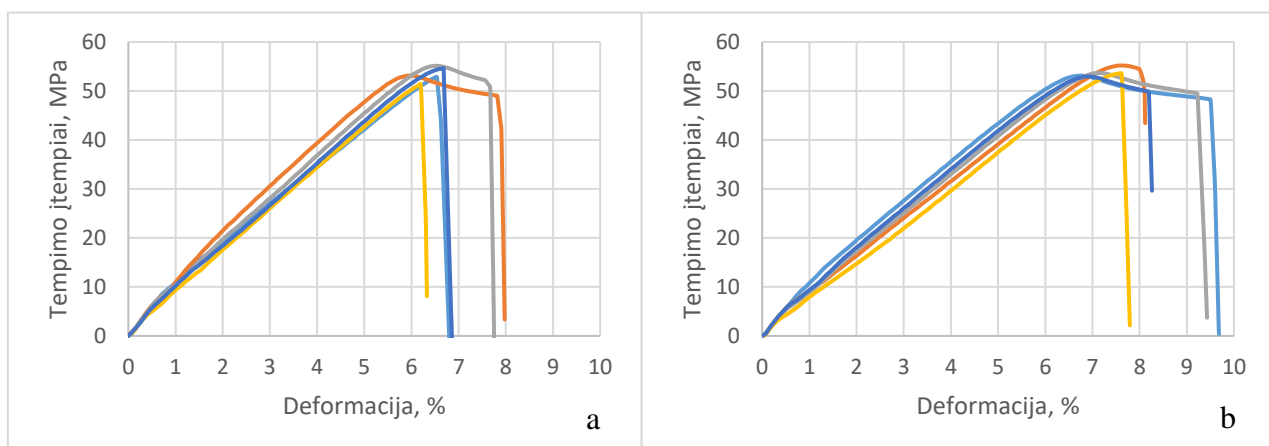
39 pav. Pirmosios orientacijos bandinių tempimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbtos PLA

3.6 lentelė. Pirmosios orientacijos pirminio ir perdirbtos PLA tempimo bandinių mechaninės savybės

Bandinio Nr.	Stiprumo riba tempiant, MPa		Maksimali jėga, N		Tamprumo modulis, MPa	
	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA
1.1	48,2	42,1	2263	2098	3211,6	3011,1
1.2	45,1	46,0	2334	2032	3674,1	2505,1
1.3	45,3	42,4	2335	2062	3348,0	3058,4
1.4	42,6	41,2	2313	2117	3214,6	3059,6
1.5	41,7	44,2	2339	2130	4304,4	2915,2
Vidurkis	44,6	43,2	2316,8	2087,8	3550,5	2909,9

Pirmosios orientacijos pirminio ir perdirbtos PLA bandinių vidutinė stiprumo riba tempiant buvo panaši – pastebėtas tik 3 % skirtumas. Tačiau pirminio PLA bandinių maksimalios atlaikytos jėgos ir

tamprumo modulio vidurkiai buvo atitinkamai – 11 % ir 22 % didesni, lyginant su iš perdirbto PLA atspausdintais bandiniais.

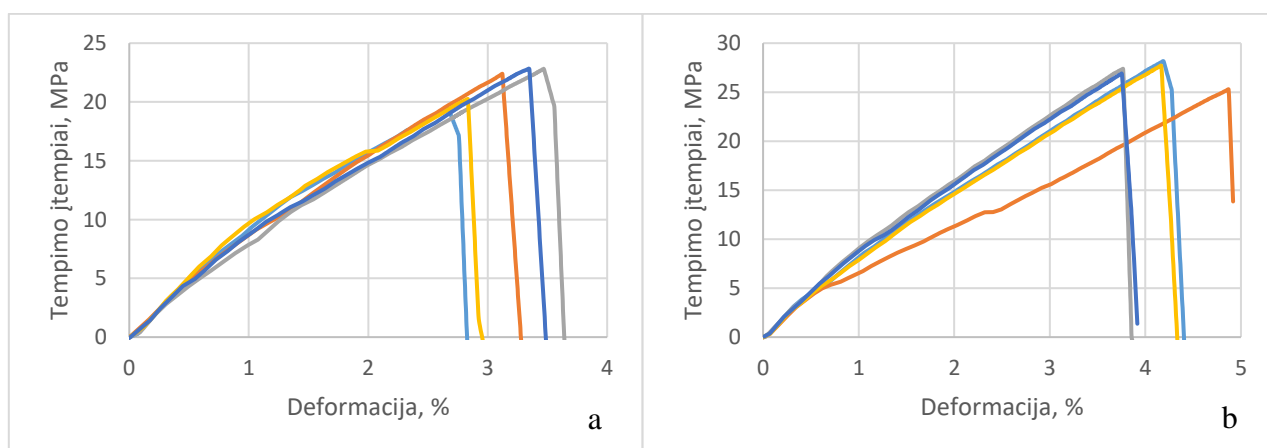


40 pav. Antrosios orientacijos bandinių tempimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA

3.7 lentelė. Antrosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA tempimo bandinių mechaninės savybės

Bandinio Nr.	Stiprumo riba tempiant, MPa		Maksimali jėga, N		Tamprumo modulis, MPa	
	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA
2.1	52,9	53,1	2444	2426	3238,8	3440,5
2.2	53,1	52,2	2479	2517	3734,1	3317,0
2.3	55,1	52,9	2561	2452	3444,3	3044,0
2.4	51,4	51,3	2399	2453	3208,6	3471,6
2.5	54,7	53,0	2546	2427	6096,9	3600,1
Vidurkis	53,5	52,5	2485,8	2455,0	3944,5	3374,6

Antrosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA bandinių vidutinės stiprumo ribos tempiant bei maksimalios atlaikytos jėgos buvo labai panašios. Pirminio PLA vidutinė stiprumo riba tempiant 2 % didesnė, o maksimali vidutinė trūkio jėga tik 1 % didesnė nei perdirbto PLA. Didesnis skirtumas buvo matomas tarp vidutinių tamprumo modulių – pirminio PLA bandinių tamprumo modulis buvo 17 % didesnis, lyginant su perdirbto PLA bandiniais.



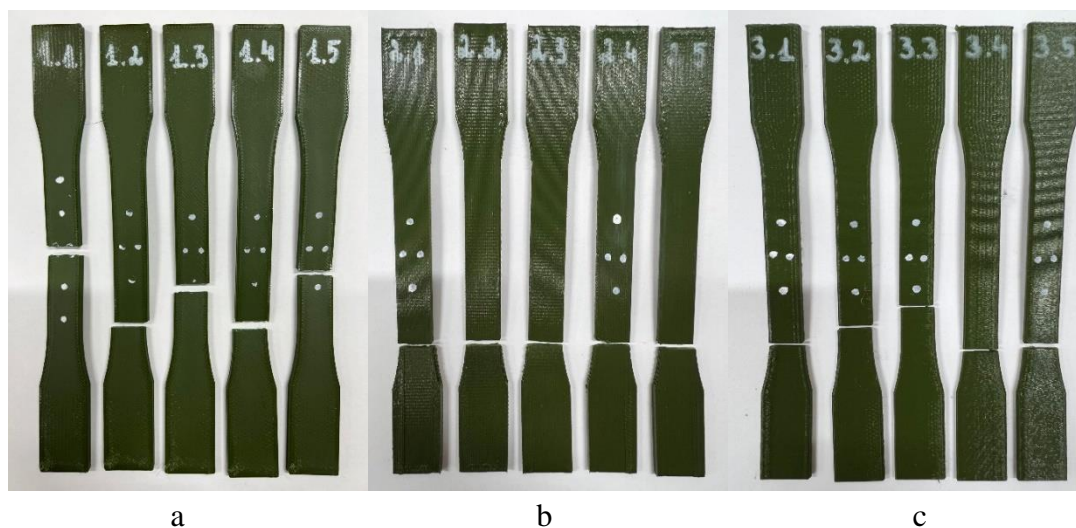
41 pav. Trečiosios orientacijos bandinių tempimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA

3.8 lentelė. Trečiosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA tempimo bandinių mechaninės savybės

Bandinio Nr.	Stiprumo riba tempiant, MPa		Maksimali jėga, N		Tamprumo modulis, MPa	
	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA
3.1	19,4	21,2	911	1040	2195,8	2307,9
3.2	22,4	18,8	1045	927	2579,0	2601,6
3.3	22,8	20,7	1073	1016	2725,3	2690,2
3.4	20,3	20,8	947	1020	2801,4	2553,4
3.5	22,8	20,2	1049	991	2632,9	2500,5
Vidurkis	21,6	20,3	1005,0	998,8	2586,9	2530,7

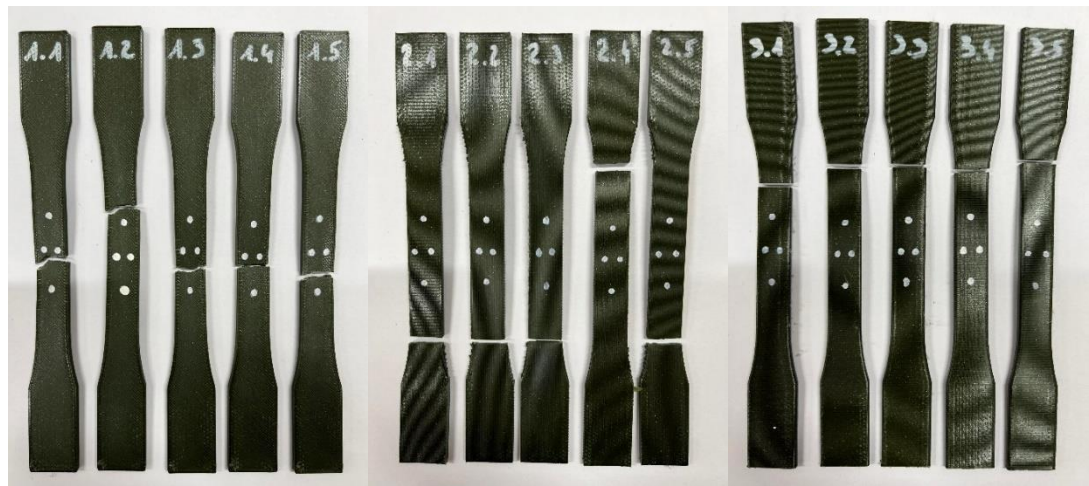
Trečiosios orientacijos pirminio PLA bandinių vidutinė stiprumo riba tempiant, vidutinė maksimali jėga ir vidutinis tamprumo modulis buvo šiek tiek didesni nei perdirbto PLA bandinių. Vidutiniškai pirminio PLA stiprumo riba buvo 6 % didesnė, maksimali atlaikyta jėga – 1 %, o tamprumo modulis 2 % didesnis.

Pirminio PLA bandiniai po antrojo tempimo etapo pateikti 42 paveiksle.



42 pav. Pirminio PLA bandiniai po tempimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos

Perdirbto PLA bandiniai po antrojo tempimo etapo pateikti 43 paveiksle.

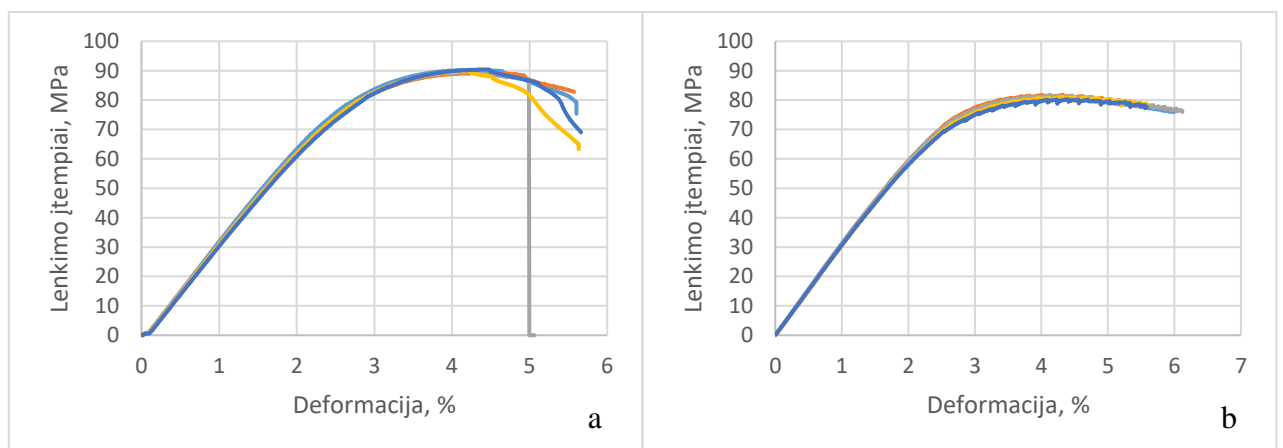


43 pav. Perdirbto PLA bandiniai po tempimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos

Kaip matyti iš bandinių nuotraukų po tempimo bandymo, esminio skirtumo tarp pirminio ir antrinio PLA plastiko trūkimo pobūdžio nematyti. Taip pat abiem atvejais galime išvelgti tą pačią trūkimo tendenciją visuose atitinkamos orientacijos bandinių grupėse. Pirmosios orientacijos bandiniai linkę nutrūkti ties bandinio viduriu, o antrosios ir trečiosios orientacijos grupių bandiniai nutrūksta netoli bandinio praplatėjimo, prie užspaudimo spaustuose zonos.

3.7. Lenkimo mechaniniai bandymai

Lenkimo bandymas vykdomas tol, kol bandinys sulūžta arba lenkimo jėga pradeda mažėti. Bandymas antruoju atveju tęsiamas, kol bandinio deformacija pasiekia 15 mm (žr. 44-46 pav). Bandymas atliekamas 2 mm/min greičiu tarp atramų išlaikant 96 mm atstumą. Lenkimo bandymų mechaninės savybės: stiprumo riba lenkiant, maksimali jėga ir lenkimo modulis pateikti 3.9-3.11 lentelėse.

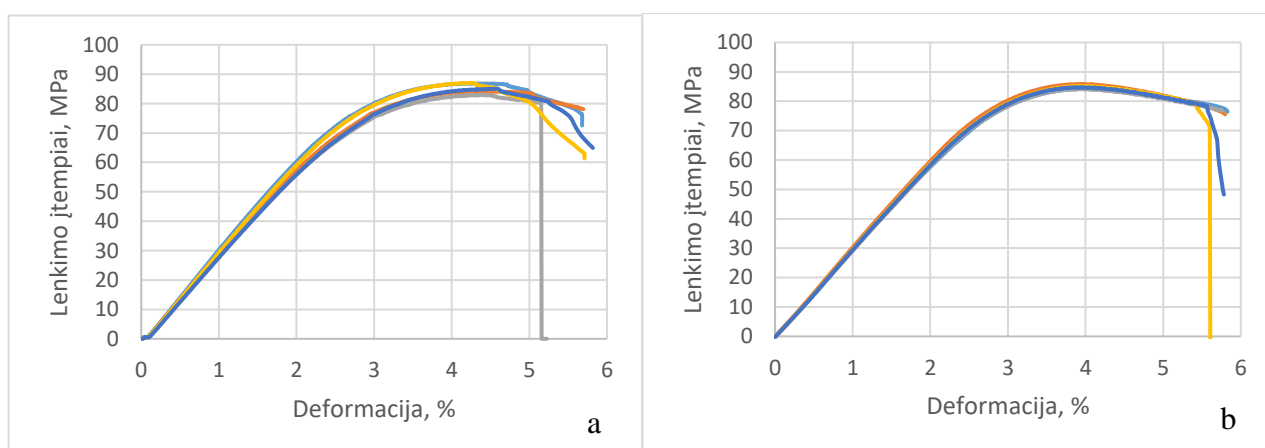


44 pav. Pirmosios orientacijos bandinių lenkimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA

3.9 lentelė. Pirmosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA lenkimo bandinių mechaninės savybės

Bandinio Nr.	Stiprumo riba lenkiant, MPa		Maksimali jėga, N		Lenkimo modulis, MPa	
	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA
1.1	90,1	80,5	533,3	468,3	3111,0	3077,8
1.2	89,3	81,7	533,3	474,2	3107,5	3129,8
1.3	89,7	81,6	530,0	473,3	3341,7	3127,5
1.4	89,8	81,1	535,8	473,6	3260,6	3069,9
1.5	90,4	80,3	539,2	470,0	3213,2	3086,5
Vidurkis	89,9	81,0	534,3	471,9	3206,8	3098,3

Bandymo metu vienas pirmosios orientacijos pirminio PLA bandinys lūžo, o pirmosios orientacijos perdirbto PLA bandiniai tik deformavosi. Tačiau pirminio PLA bandiniai pasižymėjo geresnėmis mechaninėmis savybėmis. Pirminio PLA bandinių vidutinė stiprumo riba lenkiant buvo 11 % didesnė, vidutinė maksimali jėga 13 % didesnė, o lenkimo modulis vidutiniškai 4 % didesnis, lyginant su perdirbto PLA bandiniais.



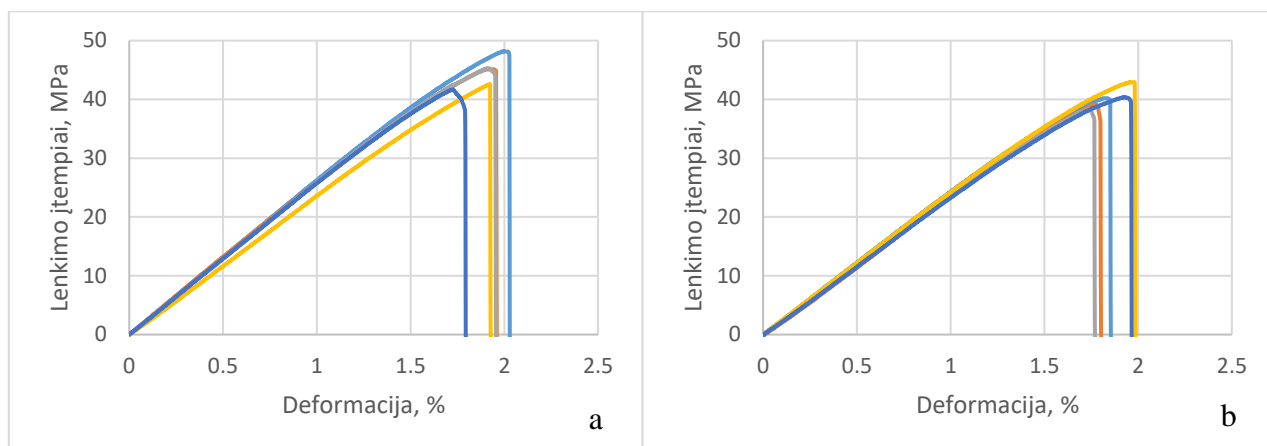
45 pav. Antrosios orientacijos bandinių lenkimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA

Nors antrosios orientacijos pirminio PLA bandinių lenkimo bandymo grafike (žr. 46 pav., a) yra matomas tik vieno bandinio lūžis, tačiau likę bandiniai lūžo iškart po bandymo sustabdymo, pasiekus 15 mm deformacijos ribą. Tuo tarpu lūžo trys iš perdirbto PLA atspausdinti bandiniai, likę du buvo tik deformuoti.

3.10 lentelė. Antrosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA lenkimo bandinių mechaninės savybės

Bandinio Nr.	Stiprumo riba lenkiant, MPa		Maksimali jėga, N		Lenkimo modulis, MPa	
	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA
2.1	86,8	84,2	533,3	535,8	2955,9	2849,3
2.2	84,3	85,9	533,3	532,2	2869,2	2902,9
2.3	83,0	84,1	530,0	533,3	2994,1	2785,6
2.4	87,1	85,2	535,8	531,1	3118,0	2930,6
2.5	85,0	84,8	539,2	535,8	2941,7	2867,3
Vidurkis	85,2	84,8	534,3	533,7	2975,8	2867,1

Antrosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA lenkimo bandinių parametrai buvo labai panašūs, tačiau pirminio PLA bandiniai visgi pasižymėjo šiek tiek geresnėmis mechaninėmis savybėmis nei perdirbto PLA bandiniai: vidutinė stiprumo riba lenkiant buvo 1 % didesnė, vidutinė maksimali jėga buvo beveik tokia pati, o lenkimo modulis vidutiniškai buvo 4 % didesnis.



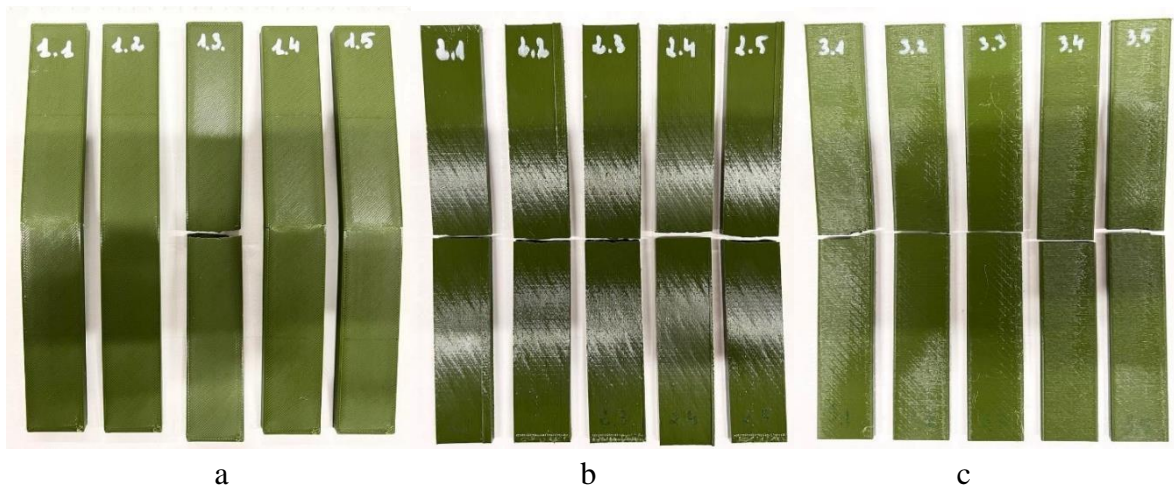
46 pav. Trečiosios orientacijos bandinių lenkimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos bandymo metu: a) pirminio PLA, b) perdirbto PLA

3.11 lentelė. Trečiosios orientacijos pirminio ir perdirbto PLA lenkimo bandinių mechaninės savybės

Bandinio Nr.	Stiprumo riba lenkiant, MPa		Maksimali jėga, N		Lenkimo modulis, MPa	
	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA	Pirminis PLA	Perdirbtas PLA
3.1	48,2	40,2	307,3	249,2	2601,8	2350,1
3.2	45,1	39,1	291,7	240,0	2624,0	2187,0
3.3	45,3	38,3	295,8	237,5	2630,4	2257,0
3.4	42,6	42,9	290,0	265,0	2225,8	2421,4
3.5	41,7	40,4	271,7	250,0	2566,3	2185,4
Vidurkis	44,6	40,2	291,3	248,3	2529,7	2280,2

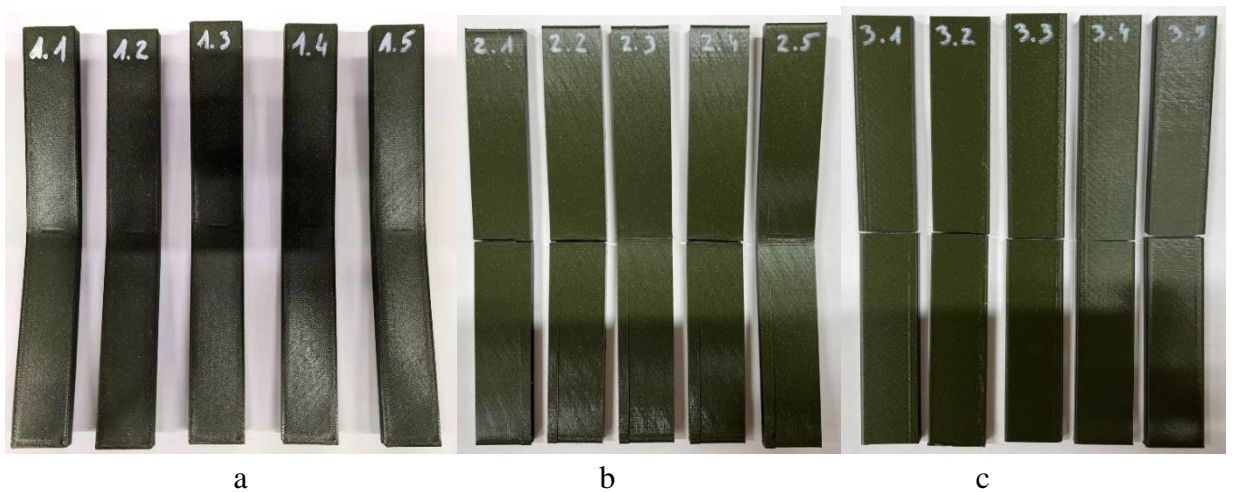
Trečiosios orientacijos pirminio PLA bandiniai taip pat buvo atsparesni deformacijoms nei perdirbto PLA bandiniai. Pirminio PLA bandinių stiprumo riba lenkiant vidutiniškai buvo 11 % didesnė, vidutinė maksimali jėga 17 % didesnė, o vidutinis lenkimo modulis 11 % didesnis, lyginant su perdirbto PLA bandiniais.

Pirminio PLA bandiniai po lenkimo bandymo pateikti 47 paveiksle.



47 pav. Pirminio PLA bandiniai po lenkimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos

Perdirbto PLA bandiniai po lenkimo bandymo pateikti 48 paveiksle.



48 pav. Perdirbto PLA bandiniai po lenkimo bandymo: a) pirmosios orientacijos, b) antrosios orientacijos, c) trečiosios orientacijos

Kaip matyti iš aukščiau pateiktų nuotraukų, esminio skirtumo tarp pirminio ir antrinio PLA termoplastiko bandinių po lenkimo bandymo nematyti. Abiem atvejais antrosios ir trečiosios orientacijos bandiniai lenkiant yra linkę sulūžti, kai tuo tarpu pirmosios orientacijos bandiniai tik deformuojasi. Tačiau pasitaikė ir išimčių: vienas pirminio PLA pirmosios orientacijos bandinys lūžo, o antrinio PLA antroje orientacijoje du bandiniai deformavosi.

3.8. Rekomendacijos tolimesniems tyrimams

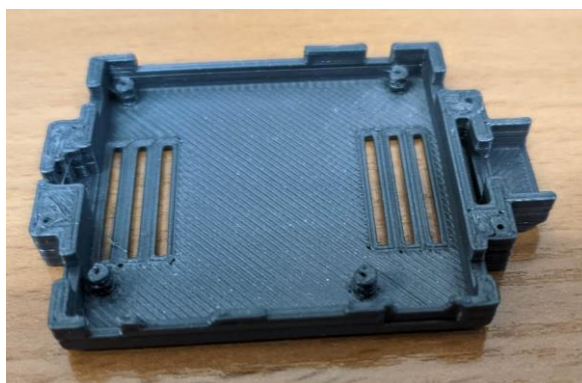
Atliekant baigiamojo projekto tyrimus buvo susidurta su įvairiais iššūkiais. Šiame poskyryje pateiktos pagrindinės rekomendacijos, siekiant sklandžių PLA perdirbimo etapų tolimesniuose tyrimuose.

3.8.1. Rekomendacijos smulkinimui

Svarbu užtikrinti, jog smulkinant plastiką tarp lydžiosios masės formavimo metu susidariusių atliekų nepatektų kitų medžiagų priemaišų. Siekiant, jog į PLA termoplastiko atliekas visiškai nepatektų kitų plastikų priemaišų, reikėtų smulkinimo įranga naudoti išimtinai tik PLA atliekoms smulkininti. Jei

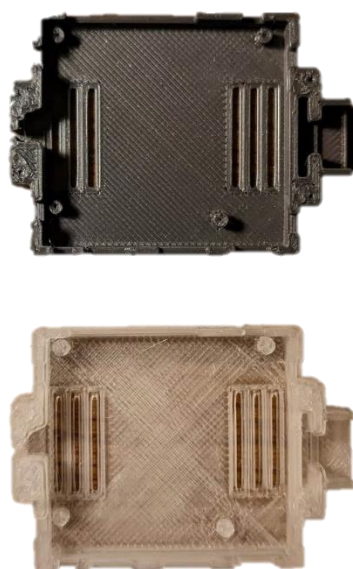
tokios galimybės nėra, turėtų būti naudojama smulkinimo įranga, kurią būtų galima pilnai išardyti ir išvalyti nuo prieš tai smulkinto plastiko likučių.

Siekiant patvirtinti hipotezę, jog kitame tyrimų etape – atliekant bandinių 3D spausdinimą – spausdinimo antgalis užsikimšo būtent dėl smulkinimo metu patekusių ir mikroskopu aptiktų priemaišų, buvo atliktas papildomas tyrimas. Nedidelė dalis susmulkintų PLA atliekų buvo rankomis išvalyta nuo vizualiai matomų (raudonos bei šviesiai mėlynos spalvos) nežinomos kilmės kito plastiko priemaišų. Panaudojant išvalytas PLA atliekas buvo išekstruduota apie 5 metrai termoplastiko gijos. Iš šios termoplastiko gijos buvo atspausdinta nedidelė detalė (žr. 49 pav.). Spausdinimo procesas su antrinio PLA termoplastiko gija be priemaišų buvo stabilus, spausdinimo antgalis neužsikimšo. Užtikrinus PLA atliekų grynumą, tyrimo metu sukurta PLA perdirbimo technologija yra veiksminga ir gali būti naudojama PLA spausdinimo atliekų perdirbimui.



49 pav. Iš išvalytų PLA atliekų gijos atspausdinta detalė

Taip pat buvo atspausdinta tokia pati detalė iš pirminio PLA termoplastiko gijos. Atlikus šių detalių vizualinį palyginimą (žr. 50 pav.), nepastebėta jokių matmenų ar formos nukrypimų bei spausdinimo procese atsirandančio broko (nepilno perimetro užpildymo, plastiko takumo problemų ar tarpfluoksninių oro ertmių).



50 pav. Perdirbto (be priemaišų) PLA (viršuje) ir pirminio PLA (apačioje) detalės

Tačiau susmulkintų PLA atliekų išvalymas rankomis nuo vizualiai matomų priemaišų yra kruopštumo ir didelių laiko sąnaudų reikalaujantis procesas. Todėl tolimesniems tyrimams buvo naudojama „Prusament“ 100 % perdirbto PLA termoplastiko gija.

Atliekų smulkinimo etape taip pat svarbu smulkinimą pakartotinai atlikti tol, kol plastiko dalelių dydis bus nedidesnis nei 5 mm. Esant tinkamam PLA atliekų dydžiui, ekstruzijos metu sraigto apvijojimas gali įtraukti visas atliekas ir sumažinama didesnių plastiko darinių susidarymo tikimybė, todėl galima pasiekti stabilų ekstruzijos procesą.

3.8.2. Rekomendacijos ekstruzijai

Atliekant ekstruziją buvo pastebėta, jog norint gauti tam tikro skersmens termoplastiko giją, geresni rezultatai pasiekiami naudojant didesnio skersmens ekstruderio antgalį. Tokiu būdu galima platesnėse ribose keisti ekstruzijos parametrus. Šiuo atveju keičiant ekstruzijos proceso temperatūrą galima reguliuoti termoplastikos gijos skersmenį. Priešingu atveju, kai ekstruzijai naudojamas antgalis atitinkantis norimą termoplastiko gijos skersmenį, padidinus temperatūrą gaunama mažesnio skersmens termoplastiko gija.

Ekstruzijos procesui taip pat svarbus nepertraukiamas dalelių judėjimas bunkeryje. Vykstant ekstruzijai dėl trinties su termoplastiko dalelėmis ir kondukcijos tarp metalinių įrangos detalių ekstruderio sraigtas įkaista. Dėl mažos PLA stiklėjimo temperatūros, užsistovėjus detalėms prie įkaitusio sraigto jos susilydo į didesnius plastiko darinius, kurie patekę tarp sraigto apvijojimo sustabdo sraigto sukimą. Šie procesai gali būti sulėtinami ekstruderio bunkeryje nuolat maišant plastiko atliekų daleles.

Kitas iššūkis, su kuriuo susiduriama atliekant termoplastiko gijos ekstruziją yra gijos matmenų stebėjimas. Atliekant PLA perdirbimo tyrimus ir siekiant sukurti šio termoplastiko perdirbimo technologiją svarbu nuolat stebėti gijos skersmenį. Šis parametras turi būti nekintantis, siekiant užtikrinti stabilų detalių 3D spausdinimo procesą. Kai naudojama įranga, kurioje nėra lazerinio gijos skersmens stebėjimo ir skersmuo yra matuojamas slankmačiu, matavimo metu gali būti sutrikdomas ekstruzijos procesas.

Dar vienas iššūkis, susijęs su įrangos apribojimais yra stabilus termoplastiko gijos tekėjimas. Tyrimo metu naudojama įranga, kurioje termoplastiko tekėjimas vyksta dėl įrenginio pozicijos ir gravitacijos. Siekiant gauti nekintamo skersmens termoplastiko giją, esant galimybei rekomenduojama naudoti įrangą su termoplastiko gijos tempimu. Ši įrangos funkcija leidžia greitai reaguoti į termoplastiko gijos skersmens pokyčius ir pakeitus termoplastiko tempimo greitį grįžti į priimtinas gijos skersmens ribas.

4. Ekonominė dalis

Lydžiosios masės formavimo metu susidarančių PLA atliekų perdirbimas yra svarbus siekiant mažinti plastikų sukeltą aplinkosaugos problemas bei skatinti žiedinę ekonomiką. Nepaisant to, jog PLA perdirbimas įvertinus mechaninių savybių degradaciją jau dabar gali būti taikomas gamybos procese, svarbu įvertinti šio proceso kainą. Pakartotinis atliekų panaudojimas sumažina gamybos išlaidas, skirtas žaliavoms, tačiau reikia nustatyti, ar antrinio PLA termoplastiko gijos gamyba nesukuria daugiau išlaidų nei naujos gijos įsigijimas.

Tyrimo metu naudojant turimą įrangą buvo susidurta su įvairiais iššūkiais. Naudotos smulkinimo įrangos dėl jos konstrukcijos nepavyko pilnai išvalyti nuo nežinomos kilmės plastiko priemaišų, kurios vėliau sutrikdė kitus tyrimo etapus. Perdirbtos gijos ekstruzijos procesas taip pat nebuvo stabilus ir įrangoje trūko gijos tempimo ir vyniojimo dalies, kuri leistų užtikrinti nekintantį gijos skersmenį. Todėl siekiant apskaičiuoti PLA perdirbimo proceso kainą, pasirinkti labiau komerciniai ir „draugiškesni vartotojui“ įrenginiai. Siūloma įranga yra „GP20 Shredder Hybrid“ smulkintuvas ir „Composer 350“ termoplastiko gijos gamybos įrenginys (žr. 51 pav.).



a



b

51 pav. Įranga, naudojama skaičiavimuose: a) „GP20 Shredder Hybrid“ smulkintuvas [69], b) „Composer 350“ termoplastiko gijos gamybos įrenginys [70]

Siekiant ekonomiškai įvertinti PLA perdirbimo procesą reikia atsižvelgti į šiuos aspektus:

- Įrangos kaina;
- Energijos sąnaudas;
- Laiko sąnaudas;
- Žmogiškųjų išteklių poreikį.

Įrangos kaina lydžiosios masės formavimo atliekų perdirbime yra laikoma vienu iš didžiausių trūkumų (žr. 4.1 lentelę). Esant aukštai įrangos kainai, jos atsipirkimas ilgai užtrunka.

4.1 lentelė. PLA perdirbimo įrangos kaina [69], [70]

Įranga	Kaina, eur
„GP20 Shredder Hybrid“ smulkintuvas	Nuo 7500
„Composer 350“ termoplastiko gijos gamybos įrenginys	Nuo 5350

Individualiai atliekant termoplastiko atliekų perdirbimą taip pat svarbu atsižvelgti į energijos sąnaudas. Nustatant šį parametą, įvertinama įrenginio galia (žr. 4.2 lentelę).

4.2 lentelė. PLA perdirbimo įrangos galia [69], [70]

Įranga	Galia, W
„GP20 Shredder Hybrid” smulkintuvas	1200
„Composer 350” termoplastiko gijos gamybos įrenginys	300-400

Taip pat svarbu žinoti ir įrenginių pajėgumus (žr. 4.3 lentelę).

4.3 lentelė. PLA perdirbimo įrangos pajėgumas [69], [70]

Įranga	Pajėgumas, kg/h
„GP20 Shredder Hybrid” smulkintuvas	12
„Composer 350” termoplastiko gijos gamybos įrenginys	0,7 (maksimalus)

Toliau bus apskaičiuojama, kiek kainuoja pagaminti 1 kg perdirbto PLA termoplastiko gijos.

Pirmiausia apskaičiuojama, kiek laiko užtruks susmulkinti 1 kg plastiko atliekų:

$$T_{smulk.} = \frac{m}{V_{smulk.}} = \frac{1}{12} = 0,083 \text{ h} \quad (5)$$

čia $T_{smulk.}$ – laikas, per kurį susmulkinama m kg plastiko atliekų, h;

m – plastiko masė, kg;

$V_{smulk.}$ – smulkintuvo pajėgumas, kg/h.

Tuomet apskaičiuojama, kiek elektros energijos bus sunaudojama smulkinimui:

$$E_{smulk.} = T_{smulk.} \cdot N_{smulk.} = 0,083 \cdot 1,2 = 0,01 \text{ kWh} \quad (6)$$

čia $E_{smulk.}$ – smulkinimui sunaudojama elektros energija, kWh;

$N_{smulk.}$ – smulkintuvo galia, kW.

Taip pat apskaičiuojama, kiek laiko užtruks išekstrudinti 1 kg plastiko atliekų į termoplastiko giją. Kadangi nurodytas maksimalus gijos gamybos įrenginio pajėgumas, atsižvelgiant į galimus proceso trikdžius, vietoje 0,7 kg/h pajėgumo, naudojamas šiek tiek mažesnis – 0,5 kg/h pajėgumas:

$$T_{ekstr.} = \frac{m}{V_{ekstr.}} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ h} \quad (7)$$

čia $T_{ekstr.}$ – laikas, per kurį išekstrudinama m kg plastiko atliekų, h;

m – plastiko masė, kg;

$V_{ekstr.}$ – ekstruderio, kg/h.

Tuomet apskaičiuojama, kiek elektros energijos bus sunaudojama ekstruzijai:

$$E_{ekstr.} = T_{ekstr.} \cdot N_{ekstr.} = 2 \cdot 0,35 = 0,7 \text{ kWh} \quad (8)$$

čia $E_{ekstr.}$ – ekstruzijai sunaudojama elektros energija, kWh;

$N_{ekstr.}$ – ekstruderio galia, kW.

Galiausiai apskaičiuojama, kokia yra elektros energijos, sunaudojamos 1 kg plastiko atliekų susmulkinimui ir ekstruzijai, kaina:

$$P_E = (E_{smulk.} + E_{ekstr.}) \cdot P_{kWh} = (0,01 + 0,7) \cdot 0,330 = 0,23 \text{ eur} \quad (9)$$

čia P_E – sunaudotos elektros energijos kaina, eur;

P_{kWh} – elektros energijos kaina, kg/kWh.

Skaičiuojant 1 kg perdirbto PLA termoplastiko gijos gamybos kainą ir siekiant įvertinti įrenginio kainos dedamąją, svarbu įsivertinti, kiek atliekų bus perdirbama per metus. Jei 3D spausdinimo įmonėje daugiausia gaminami standartiniai produktai, tai tikėtina, jog nepavykusių gaminių ir atliekų nebus daug. Tačiau jeigu įmonė specializuojasi prototipų gamyboje ir jų tobulinime, didelė dalis produktų gali tapti atliekomis. Atliekų kiekis labai priklauso ir nuo įmonėms pagaminamų produktų kiekio.

Taigi analizuosime du atvejus. Pirmuoju atveju apskaičiuosime 1 kg termoplastiko ritės kainą, kai per metus sukuriama 10 kg termoplastiko atliekų. Toks kiekis atliekų gali susidaryti universiteto laboratorijoje arba nedidelėje įmonėje. Antruoju atveju apskaičiuosime tos pačios ritės kainą, kai įmonė per metus perdirba 100 kg termoplastiko atliekų. Šis kiekis atliekų gali susidaryti didelio masto 3D spausdinimo įmonėje. Tolimesniems skaičiavimams priimame, jog įranga bus naudojama 10 metų.

Apskaičiuojame įrangos kainos dedamąją pirmuoju atveju:

$$P_{I1} = \frac{(P_{smulk.} + P_{ekstr.})}{X_1 \cdot 10} = \frac{(7500 + 5350)}{10 \cdot 10} = 128,50 \text{ eur} \quad (10)$$

čia P_{I1} – įrenginio kainos dedamoji pirmuoju atveju, eur;

X_1 – per metus perdirbamų atliekų kiekis pirmuoju atveju, eur.

Apskaičiuojame įrangos kainos dedamąją antruoju atveju:

$$P_{I2} = \frac{(P_{smulk.} + P_{ekstr.})}{X_2 \cdot 10} = \frac{(7500 + 5350)}{100 \cdot 10} = 12,85 \text{ eur} \quad (11)$$

čia P_{I2} – įrenginio kainos dedamoji antruoju atveju, eur;

X_2 – per metus perdirbamų atliekų kiekis antruoju atveju, eur.

Galiausiai apskaičiuojame galutinę 1 kg perdirbto PLA termoplastiko gijos ritės kainą pirmuoju atveju:

$$P_1 = P_{I1} + P_E = 128,50 + 0,23 = 128,73 \text{ eur} \quad (12)$$

Taip pat apskaičiuojame ir galutinę 1 kg perdirbto PLA termoplastiko gijos ritės kainą antruoju atveju:

$$P_2 = P_{I2} + P_E = 12,85 + 0,23 = 13,03 \text{ eur} \quad (13)$$

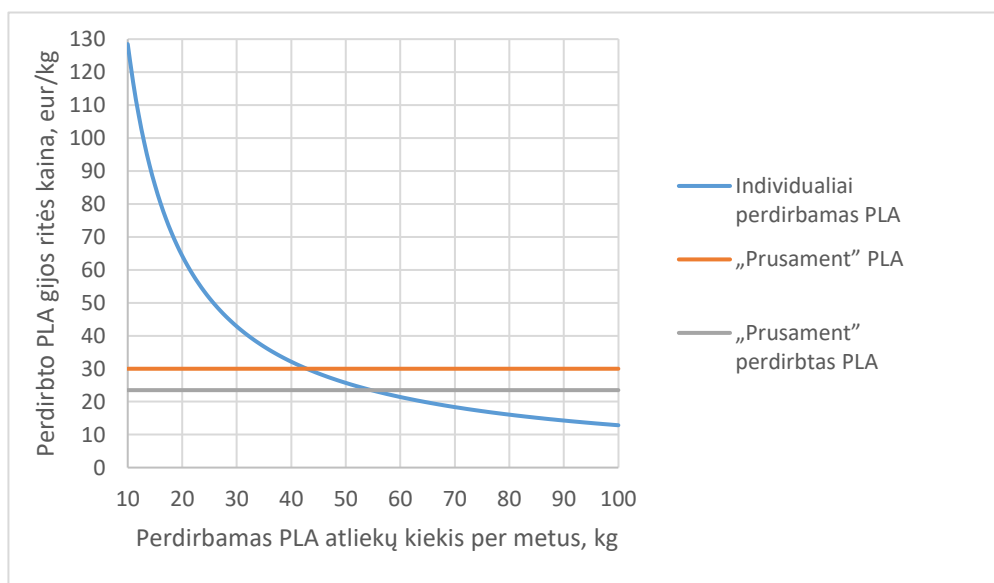
Šiuose skaičiavimuose nepalietas dar vienas svarbus gamybos proceso aspektas – žmogiškųjų išteklių poreikis. Siekiant perdirbti lydžiosios masės formavimo metu susidarančias atliekas, reikia žmogaus prižiūrinčio perdirbimo įrenginius ir procesą. Dėl šios priežasties susidaro papildomos išlaidos, skirtos apmokėti darbuotojų atlyginimams. Tačiau abiem analizuojamais atvejais atliekų nesusidaro tiek daug, jog reiktų pilno etato darbuotojo. Todėl žmogiškųjų išteklių poreikis perdirbimo procesui turėtų būti vertinamas individualiai konkrečiai situacijai.

Taip pat svarbu palyginti pirminio PLA termoplastiko gijos ir perdirbto PLA termoplastiko gijos kainas (žr. 4.4 lentelę).

4.4 lentelė. Pirminio ir perdirbto PLA termoplastiko gijos kaina

Termoplastiko gija	Kaina, eur/kg
„Prusament” PLA gija	29,99
„Prusament” 100 % perdirbto PLA gija	23,50 (2 kg – 46,99 eur)
Individualiai perdirbta gija pirmuoju atveju	128,73
Individualiai perdirbta gija antruoju atveju	13,03

Lydžiosios masės formavimo metu susidaranti PLA termoplastiko atliekų perdirbimo ekonominė nauda priklauso nuo individualios situacijos. Kaip matoma 52 paveiksle, individualiai perdirbamas PLA tampa pigesnis nei „Prusament” PLA, kai perdirbama daugiau nei 44 kg atliekų per metus. Norint, kad individualiai perdirbamas PLA būtų pigesnis už „Prusament” 100 % perdirbtą PLA, per metus reikia perdirbti daugiau nei 56 kg atliekų.



52 pav. Perdirbto PLA gijos ritės kainos priklausomybė nuo perdirbamų atliekų kiekio

Taigi, jei susidaro ir yra perdirbamos tik 10 kg termoplastiko atliekų per metus, perdirbti PLA individualiai yra ekonomiškai neefektyvu, nes individualiai perdirbto PLA termoplastiko gijos kaina yra daugiau nei 4 kartus didesnė už pirminio PLA kainą. Tokiu atveju, skatinti žiedinę ekonomiką galima perkant jau perdirbtą PLA giją. Jei per metus laiko sukuriama apie 100 kg termoplastiko atliekų, perdirbti šias atliekas individualiai yra ne tik naudingas aplinkai, bet ir ekonomiškai pagrįstas sprendimas. Tokiu atveju individualiai perdirbtos termoplastiko gijos kaina yra 2,3 karto mažesnė, lyginant su pirmine PLA gija, ir 1,8 karto mažesnė, lyginant su „Prusament” 100 % perdirbto PLA termoplastiko gija.

Išvados

1. Perdirbto PLA termoplastiko gija iš lydžiosios masės formavimo metu susidarančių atliekų gaunama atlikus smulkinimo ir ekstruzijos procesus. Smulkinimas atliekamas keturiais etapais, siekiant gauti kuo mažesnes susmulkinto plastiko daleles. Smulkinimo procese svarbu užtikrinti, jog tarp PLA termoplastiko atliekų nepatektų kito plastiko priemaišų. Eksperimentiškai sukurta metodologija 1,75 mm skersmens antrinio PLA termoplastiko gijos gamybai. Rekomenduojami ekstruzijos parametrai – 2,85 mm skersmens ekstruderio antgalis, T1 zonos temperatūra – 210 °C, T2 zonos temperatūra – 180 °C, sraigto sukimosi greitis ekstruzijos metu – 25 aps./min.
2. Pagaminta antrinio PLA termoplastiko gija 3D spausdinimui lydžiosios masės formavimo technologija nebuvo tinkama, dėl smulkinimo metu atsiradusių nežinomos kilmės plastiko priemaišų. Dėl šių priemaišų spausdinimo antgalis užsikišdavo ir tai turėjo neigiamos įtakos spausdinimo proceso stabilumui. Tačiau perdirbto PLA termoplastiko gijos tinkamumas spausdinimui lydžiosios masės formavimo technologija buvo patvirtintas dviem aspektais. Pirmiausia iš pagaminto antrinio PLA termoplastiko be priemaišų atspausdinta detalė neturėjo jokių vizualių broko požymių, matmenų ar geometrinių nukrypimų. O panaudojant „Prusament“ 100 % perdirbto PLA giją stabilus 3D spausdinimo procesas taip pat buvo pasiektas.
3. Skirtingų orientacijų pirminio PLA tempimo bandinių mechaniniai parametrai buvo geresni lyginant su perdirbto PLA bandiniais: stiprumo riba tempiant buvo vidutiniškai 4 % didesnė, maksimali jėga taip pat vidutiniškai 4 % didesnė, o tamprumo modulis buvo didesnis vidutiniškai 14 %. Skirtingų orientacijų pirminio PLA lenkimo bandiniai, lyginant su perdirbto PLA lenkimo bandiniais taip pat pasižymėjo geresnėmis mechaninėmis savybėmis: stiprumo riba lenkiant buvo vidutiniškai 7 % didesnė, maksimali jėga – vidutiniškai 10 % didesnė, o lenkimo modulis buvo didesnis vidutiniškai 6 %.
4. Atlikus ekonominę analizę buvo nustatyta, kad per metus surinkus ir perdirbus 10 kg PLA termoplastiko atliekų, jų perdirbimas yra ekonomiškai neefektyvus, nes įvertinus įrangos kainą ir elektros energijos sąnaudas termoplastiko gijos kaina tampa 4 kartus didesnė, lyginant su pirminio PLA termoplastiko gija. Kai per metus surenkama ir perdirbama 100 kg termoplastiko atliekų, PLA atliekų perdirbimo procesas tampa ekonomiškai pagrįstas, nes kaina sumažėja 2,3 karto, lyginant su pirmine PLA termoplastiko gija.

Literatūros sąrašas

1. HULL, C.W. The Birth of 3D Printing. *Research-Technology Management* [interaktyvus]. 2015, 58(6), 25–30 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 0895-6308. Prieiga per: <https://doi.org/10.5437/08956308X5806067>
2. XIAO, J. ir kt. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites* [interaktyvus]. 2021, 122, 104115 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115>
3. KIM, S. ir kt. Exploring the Potential of 3D Printing Technology in Landscape Design Process. *Land* [interaktyvus]. 2021, 10(3), 259 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 2073-445X. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/land10030259>
4. SPAHIU, T. ir kt. 3D printing for clothing production. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [interaktyvus]. 2020, 15, 1558925020948216 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 1558-9250. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/1558925020948216>
5. MATTOS NASCIMENTO, D.L. DE ir kt. A sustainable circular 3D printing model for recycling metal scrap in the automotive industry. *Journal of Manufacturing Technology Management* [interaktyvus]. 2022,33(5), 876–892 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 1741-038X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2021-0391>
6. MAMI, F. ir kt. Evaluating Eco-Efficiency of 3D Printing in the Aeronautic Industry. *Journal of Industrial Ecology* [interaktyvus]. 2017, 21(S1), S37–S48 [žiūrėta 2022-12-19]. ISSN 1530-9290. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/jiec.12693>
7. LI, L. ir kt. Comparison of 3D-Printed Dental Implants with Threaded Implants for Osseointegration: An Experimental Pilot Study. *Materials* [interaktyvus]. 2020, 13(21), 4815 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 1996-1944. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma13214815>
8. LUIS, E. ir kt. 3D Printed Silicone Meniscus Implants: Influence of the 3D Printing Process on Properties of Silicone Implants. *Polymers* [interaktyvus]. 2020, 12(9), 2136 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym12092136>
9. BROUWERS, L. ir kt. Validation study of 3D-printed anatomical models using 2 PLA printers for preoperative planning in trauma surgery, a human cadaver study. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery* [interaktyvus]. 2019, 45(6), 1013–1020 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 1863-9941. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00068-018-0970-3>
10. HORST, D. ir kt. Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review. *International Journal of Engineering and Technical Research* [interaktyvus]. 2018, 8, 3–8 [žiūrėta 2022-09-26]. ISSN 2321-0869. Prieiga per: <https://bit.ly/2BhDPyn>
11. ROSSI, E. - DI NICOLANTONIO, M. Integrating human-centred design approach into Sustainable-Oriented 3D Printing Systems. *Human-Intelligent Systems Integration* [interaktyvus]. 2020, 2(1), 57–73 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 2524-4884. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s42454-020-00009-9>
12. RAMARAJU, R. - CHANDRA, S. Additive Manufacturing of Metal Components by Thermal Spray Deposition on 3D-Printed Polymer Parts. *Journal of Thermal Spray Technology* [interaktyvus]. 2022, 1–13 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 1059-9630. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01450-9>

13. ZHANG, F. ir kt. A review of 3D printed porous ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* [interaktyvus]. 2022, 42(8), 3351–3373 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 0955-2219. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.02.039>
14. KUMAR, V. ir kt. Multi-material printing of PVDF composites: A customized solution for maintenance of heritage structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* [interaktyvus]. 2022, 14644207221118748 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 1464-4207. Prieiga per: <https://doi.org/10.1177/14644207221118748>
15. KANG, J.D. - KIM, S. Development of a 3D printing method for the textile hybrid structure. *International Journal of Clothing Science and Technology* [interaktyvus]. 2021, 34(2), 262–272 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 0955-6222. Prieiga per: <https://doi.org/10.1108/IJCST-09-2020-0134>
16. JOH, C. ir kt. Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. *Materials* [interaktyvus]. 2020, 13(21), 4919 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 1996-1944. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma13214919>
17. KAJAVE, N.S. ir kt. Bioglass incorporated methacrylated collagen bioactive ink for 3D printing of bone tissue. *Biomedical Materials* [interaktyvus]. 2021, 16(3), 035003 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 1748-605X. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1748-605X/abc744>
18. NGO, T.D. ir kt. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. 2018, 143, 172–196 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 1359-8368. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
19. PERROT, A. - AMZIANE, S. 3D Printing in Concrete: General Considerations and Technologies [interaktyvus]. 2019, 1–40 [žiūrėta 2022-10-16]. ISBN 978-1-78630-341-7. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/9781119610755.ch1>
20. KAFLE, A. ir kt. 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). *Polymers* [interaktyvus]. 2021, 13(18), 3101 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym13183101>
21. KOTZ, F. ir kt. 3D Printing of Transparent Glasses. *3D Printing of Optical Components* [interaktyvus]. 2021, 169–184 [žiūrėta 2022-12-19]. ISBN 978-3-030-58960-8. Prieiga per: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58960-8_4
22. WANG, J.-C. ir kt. The development of an active separation method for bottom-up stereolithography system. *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* [interaktyvus]. 2017, 108–114 [žiūrėta 2022-10-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/SII.2017.8279197>
23. MAO, Y. ir kt. A 3D Printable Thermal Energy Storage Crystalline Gel Using Mask-Projection Stereolithography. *Polymers* [interaktyvus]. 2018, 10(10), 1117 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym10101117>
24. ZAKERI, S. ir kt. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing* [interaktyvus]. 2020, 35, 101177 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 2214-8604. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177>
25. VOET, V.S.D. ir kt. Sustainable Photopolymers in 3D Printing: A Review on Biobased, Biodegradable, and Recyclable Alternatives. *Macromolecular Rapid Communications* [interaktyvus]. 2021, 42(3), 2000475 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 1521-3927. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/marc.202000475>

26. PEERZADA, M. ir kt. Additive Manufacturing of Epoxy Resins: Materials, Methods, and Latest Trends. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [interaktyvus]. 2020, 59(14), 6375–6390 [žiūrėta 2022-10-16]. ISSN 0888-5885. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06870>
27. ZHUANG, Y. ir kt. Study on process and parameter optimisation of selective laser sintering of thermoplastic polyurethane/carbon nanotube powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [interaktyvus]. 2021, 116(3), 993–1001 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1433-3015. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07482-9>
28. FAYED, E.M. ir kt. Characterization of direct selective laser sintering of alumina. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [interaktyvus]. 2018, 94(5), 2333–2341 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1433-3015. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0981-y>
29. CHEN, A.-N. ir kt. High-performance ceramic parts with complex shape prepared by selective laser sintering: a review. *Advances in Applied Ceramics* [interaktyvus]. 2018, 117(2), 100–117 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1743-6753. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/17436753.2017.1379586>
30. YANG, L. ir kt. Rapid casting technology based on selective laser sintering. *China Foundry* [interaktyvus]. 2021, 18(4), 296–306 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2365-9459. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1099-2>
31. KRINITCYN, M.G. Thermal stability of TiC–Ti₃AlC₂ and TiC–Ti₃AlC composites during selective laser treatment. *Advances in Applied Ceramics* [interaktyvus]. 2022, 0(0), 1–5 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1743-6753. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/17436753.2022.2121460>
32. HEELING, T. ir kt. Melt pool simulation for the evaluation of process parameters in selective laser melting. *Additive Manufacturing* [interaktyvus]. 2017, 14, 116–125 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2214-8604. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.02.003>
33. LUPONE, F. ir kt. Process Phenomena and Material Properties in Selective Laser Sintering of Polymers: A Review. *Materials* [interaktyvus]. 2022, 15(1), 183 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1996-1944. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma15010183>
34. SCHAPPO, H. ir kt. Polymer/calcium phosphate biocomposites manufactured by selective laser sintering: an overview. *Progress in Additive Manufacturing* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-10-24]. ISSN 2363-9520. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00332-4>
35. ROJ, R. ir kt. Quality optimization of FDM-printed (fused deposition modeling) components based on differential scanning calorimetry. *Materials Testing* [interaktyvus]. 2022, 64(10), 1544–1551 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2195-8572. Prieiga per: <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0199>
36. HOODA, N. ir kt. Deposition angle prediction of Fused Deposition Modeling process using ensemble machine learning. *ISA Transactions* [interaktyvus]. 2021, 116, 121–128 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 0019-0578. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.01.035>
37. WEI, C. ir kt. Development of 3D Printed Tablets by Fused Deposition Modeling Using Polyvinyl Alcohol as Polymeric Matrix for Rapid Drug Release. *Journal of Pharmaceutical Sciences* [interaktyvus]. 2020, 109(4), 1558–1572 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 0022-3549. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.01.015>
38. MOHAN, N. ir kt. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping* [interaktyvus]. 2017, 12, 1–13 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1745-2759. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1274490>

39. ALAFAGHANI, A. - QATTAWI, A. Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method. *Journal of Manufacturing Processes* [interaktyvus]. 2018, 36, 164–174 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1526-6125. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.025>
40. ABEYKOON, C. ir kt. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* [interaktyvus]. 2020, 3(3), 284–297 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2588-8404. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003>
41. FRUNZAVARDE, D. ir kt. The Influence of the Printing Temperature and the Filament Color on the Dimensional Accuracy, Tensile Strength, and Friction Performance of FFF-Printed PLA Specimens. *Polymers* [interaktyvus]. 2022, 14(10), 1978 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym14101978>
42. JELENA, Ž ir kt. Influence of printing speed on production of embossing tools using FDM 3d printing technology. *Journal of Graphic Engineering and Design* [interaktyvus]. 2017, 8(1), 19–27 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2217379X, 22179860. Prieiga per: <https://doi.org/10.24867/JGED-2017-1-019>
43. VICENTE, C.M.S. ir kt. Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts. *Polymers for Advanced Technologies* [interaktyvus]. 2020, 31(3), 501–507 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1099-1581. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/pat.4787>
44. AKHOUNDI, B. - BEHRAVESH, A.H. Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. *Experimental Mechanics* [interaktyvus]. 2019, 59(6), 883–897 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1741-2765. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11340-018-00467-y>
45. SYRLYBAYEV, D. ir kt. Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review. *Polymers* [interaktyvus]. 2021, 13(10), 1587 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym13101587>
46. SATHIES, T. ir kt. A review on advancements in applications of fused deposition modelling process. *Rapid Prototyping Journal* [interaktyvus]. 2020, 26(4), 669–687 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1355-2546. Prieiga per: <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2018-0199>
47. SANDANAMSAMY, L. ir kt. A comprehensive review on fused deposition modelling of polylactic acid. *Progress in Additive Manufacturing* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-02]. ISSN 2363-9520. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00356-w>
48. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *Progress in Additive Manufacturing* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-11-02]. ISSN 2363-9520. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00356-w>
49. TAIB, N.-A.A.B. ir kt. A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer. *Polymer Bulletin* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-04-21]. ISSN 1436-2449. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04160-y>
50. PRADHAN, R. ir kt. Compostability and biodegradation study of PLA–wheat straw and PLA–soy straw based green composites in simulated composting bioreactor. *Bioresource Technology* [interaktyvus]. 2010, 101(21), 8489–8491 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 0960-8524. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.053>

51. TOKIWA, Y. - CALABIA, B.P. Biodegradability and biodegradation of poly(lactide). *Applied Microbiology and Biotechnology* [interaktyvus]. 2006, 72(2), 244–251 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1432-0614. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0488-1>
52. WEBBE KERKES, T. ir kt. Characterization of process–deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens. *Additive Manufacturing* [interaktyvus]. 2019, 25, 532–544 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2214-8604. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.008>
53. FALUDI, J. ir kt. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal* [interaktyvus]. 2015, 21(1), 14–33 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1355-2546. Prieiga per: <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>
54. MADHU, N.R. ir kt. Fused deposition modelling approach using 3D printing and recycled industrial materials for a sustainable environment: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [interaktyvus]. 2022, 122(5), 2125–2138 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 1433-3015. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10048-y>
55. SUN, T. ir kt. Path to net zero is critical to climate outcome. *Scientific Reports* [interaktyvus]. 2021, 11(1), 22173 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2045-2322. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01639-y>
56. RIMKUS, A. ir kt. Continuously Reinforced Polymeric Composite for Additive Manufacturing—Development and Efficiency Analysis. *Polymers* [interaktyvus]. 2022, 14(17), 3471 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym14173471>
57. KUMAR, S. ir kt. A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling* [interaktyvus]. 2011, 55(11), 893–910 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 0921-3449. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.005>
58. PRICCI, A. ir kt. Analytical and Numerical Models of Thermoplastics: A Review Aimed to Pellet Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Polymers* [interaktyvus]. 2021, 13(18), 3160 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym13183160>
59. ZANDER, N.E. ir kt. Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials. *Additive Manufacturing* [interaktyvus]. 2019, 25, 122–130 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2214-8604. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.009>
60. CORREIA, C. ir kt. Reprocessability of PLA through Chain Extension for Fused Filament Fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* [interaktyvus]. 2022, 6(1), 26 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2504-4494. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010026>
61. SASSE, J. ir kt. Investigation of Recycled and Coextruded PLA Filament for Additive Manufacturing. *Polymers* [interaktyvus]. 2022, 14(12), 2407 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2073-4360. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/polym14122407>
62. KUO, C.-C. ir kt. Optimization of Process Parameters for Fabricating Polylactic Acid Filaments Using Design of Experiments Approach. *Polymers* [interaktyvus]. 2021, 13(8), 1222 [žiūrėta 2022-12-06]. ISSN 2195-3597. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
63. Prusa3D. *Prusament PLA*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.prusa3d.com/category/prusament-pla/>. [žiūrėta 2022-12-19].

64. Prusa3D. *Original Prusa i3 MK3S+ kit*. Interneto puslapis. Prieiga per: <<https://www.prusa3d.com/product/>. [žiūrėta 2022-12-19].
65. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM D638-14. Interaktyvus. Prieiga per: <https://www.astm.org/d0638-14.html>. [žiūrėta 2022-12-19].
66. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM D790-17. Interaktyvus. Prieiga per: <https://www.astm.org/d0790-17.html>. [žiūrėta 2022-12-19].
67. Tinius Olsen H25KT. Internetinis puslapis. Prieiga per: <https://apcis.ktu.edu/MIDF/lt/site/katalogas?more=9357>. [žiūrėta 2022-12-19].
68. ABJ 220-4NM - KERN & SOHN GmbH. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.kern-sohn.com/cgi-bin/cosmoshop/>. [žiūrėta 2022-12-19].
69. 3devo. *GP20 Plastic Shredder Hybrid*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.3devo.com/gp20-plastic-shredder>. [žiūrėta 2022-12-19].
70. 3devo. *Meet the Composer and Precision - Desktop Filament Makers*. Interneto puslapis. Prieiga per: <https://www.3devo.com/filament-makers>. [žiūrėta 2022-12-19].

Priedai

1 priedas. Dalyvavimo mokslinės konferencijos „Industrial Engineering 2022“ sertifikatas

